T. C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ŞEBEKE UYGULAMALARINDA KULLANILAN MUHTELİF ENERJİ KAYNAKLARININ DOĞRU AKIM ÜZERİNDEN GÜÇ ENTEGRASYONU

ABDULKERİM KARABİBER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2015

Tez Başlığı: Akıllı Şebeke Uygulamalarında Kullanılan Muhtelif Enerji Kaynaklarının Doğru Akım Üzerinden Güç Entegrasyonu

Tezi Hazırlayan: Abdulkerim KARABİBER

Sınav Tarihi: 15 Haziran 2015

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı	**Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ** İnönü Üniversitesi
Üye	**Prof. Dr. Salih MAMİŞ** İnönü Üniversitesi
Üye	**Prof. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI** İnönü Üniversitesi
Üye	**Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU** Fırat Üniversitesi
Üye	**Yrd. Doç. Dr. Dursun ÖZTÜRK** Bingöl Üniversitesi

Prof. Dr. Alaattin ESEN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum " **Akıllı Şebeke Uygulamalarında Kullanılan Muhtelif Enerji Kaynaklarının Doğru Akım Üzerinden Güç Entegrasyonu**" başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakça yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Abdulkerim KARABİBER

ÖZET

Doktora Tezi

AKILLI ŞEBEKE UYGULAMALARINDA KULLANILAN MUHTELİF ENERJİ KAYNAKLARININ DOĞRU AKIM ÜZERİNDEN GÜÇ ENTEGRASYONU

Abdulkerim KARABİBER

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

139+vii sayfa

2015

Danışman: Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ

Gelişen teknoloji ve artan enerji talebi, elektrik üretim ve tüketim alışkanlıklarını değiştirmektedir. Petrol ürünlerine dayalı merkezi üretim, artan enerji talebine cevap verememekte ve karbondioksit salınımının artmasına neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, merkezi üretime alternatif olmakta ve doğası gereği her yerde kullanılabilmesi nedeniyle küresel ölçekte ilgi görmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması ve güvenilirliğinin artması mevcut şebekeye verimli şekilde entegre edilmeleriyle mümkündür. Bu tez çalışmasında, çeşitli güç ölçeklerinde bulunan dağıtık enerji kaynaklarının mevcut şebekeye entegrasyonu için kullanılan doğru akım güç entegrasyon yöntemi ele alınmaktadır. Doğru akım formunda üretim yapan YEK'lerin ağırlıklı olarak yer aldığı mikro şebekelerde hedef yöntemin kullanılması durumunda güç dönüşümlerinden kaynaklanan kayıplar azalacak ve güç sisteminin verimliliği artacaktır. Bu yöntemde, merkezi entegrasyon barasında toplanan enerjinin tek inverter üzerinden tüketici hattına verilmesi, mikro şebekenin kontrolünü kolaylaştırmakta ve frekans ve genlik ayarı için gerekli olan ek donanımlara ihtiyaç kalmamaktadır. Önerilen yöntemin kullanıldığı güç sistemlerinde elektronik cihaz gereksinimi azaldığından, maliyetler düşmekte ve güç kalitesi artmaktadır. Arıza ve ani yük değişimi gibi şebekenin kararlılığını olumsuz etkileyen durumlarda, önerilen yöntem, sistemin sağlıklı şekilde çalışmasını devam ettirmekte ve şebekede yaşanan bozucu etkilerden tüketiciyi korumaktadır. Üç farklı model üzerinden yapılan analizler sonucunda, doğru akım güç entegrasyon yönteminin akıllı şebekelerde yer alan muhtelif güç seviyelerinde verimli şekilde kullanılabileceği görülmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Akıllı şebekeler, DC güç entegrasyonu, yenilenebilir enerji kaynakları, dağıtık üretim, mikro şebeke uygulamaları, güç elektroniği, tüketici taraflı güç yönetimi.

ABSTRACT

PhD. Thesis

THE POWER INTEGRATION OF THE ENERGY SUPPLIES USED IN SMART GRID APPLICATIONS VIA DIRECT CURRENT

Abdulkerim KARABIBER

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

139+vii pages

2015

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Improved technology and increasing energy demand change electricity generation and consumption habits. Central generation based on fuel products can't respond to increasing energy demand, and it leads to an increase in the amount of greenhouse gas emission. Renewable energy sources are alternative to central generation, and are concerned on a global scale due to their being naturally used everywhere. The increase in the reliability and widespread usage of renewable energy sources are possible with their efficiently integration of existing utility grid. In this thesis, direct current power integration method used in integration of distributed energy sources of various power scales to existing grid is handled. In micro grids in which renewable energy sources exist for the most part generating direct current form of electricity, when the suggested method is used, the efficiency of power system increases because of less technical losses. In this method, owing to the fact that accumulated energy in central integration bus is injected in consumption line via only one inverter, the control of micro grid is facilitated and the equipment is unnecessary to adjust frequency and amplitude. Because of fact that the need for electronic devices decreases in the proposed power systems method, the cost reduces and the power quality increases. In case of such situations as fault and sudden change in load which adversely affect the stability of the grid, the proposed method efficiently directs the continuity of the system and protects consumers from distortionary effects. From the results of three different analyzes, it is shown that direct current power integration method is efficiently performed in various power scales of smart grids.

KEY WORDS: Smart grids, DC power integration, renewable energy supply, distributed generation, micro grid applications, power electronics, user-side power management.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her safhasında yardım ve önerilerini eksik etmeyen çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ'a, hiçbir maddi beklenti içinde olmadan emekleriyle çalışmalarımın verimli bir şekilde ilerlemesini sağlayan Sayın Dr. Barış Baykant ALAGÖZ'e, doktora süresince yaptığımız bilimsel çalışmalarda yol arkadaşlarım olan Sayın Cemal KELEŞ ve Sayın Murat AKÇİN'e ve rehberlikleriyle çalışmalarımızı kolaylaştıran tüm Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm hocalarına en içten duygularımla şükranlarımı sunarım.

Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi doktora çalışmalarım süresince de benden desteklerini esirgemeyen çok değerli AİLEM'e ve özellikle anne ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	ÖZET.....	i
	ABSTRACT……..……...	ii
	TEŞEKKÜR……..……...	iii
	İÇİNDEKİLER……..……...	iv
	ŞEKİLLER LİSTESİ……..…….	v
	SİMGELER VE KISALTMALAR……..……	vii
1.	**GİRİŞ**……..…….	1
1.1.	Tezde Yapılan Çalışmalar……..……..	11
2.	**AKILLI ŞEBEKELERDE KULLANILAN DAĞITIK ENERJİ KAYNAKLARI VE BENZETİM MODELLERİ**…	15
2.1.	Güneş Enerjisi…….....	15
2.2.	Güneş Enerjisi Benzetim Modeli.....	19
2.3.	Rüzgar Türbinleri…….……..……...	24
2.4.	Rüzgar Türbinleri Benzetim Modeli…...……..……	27
2.5.	Li-on Batarya…….……...…….	30
2.6.	Li-on Batarya Benzetim Modeli……..…….	33
3.	**AKILLI ŞEBEKELERDE KULLANILAN TEMEL GÜÇ ELEKTRONİĞİ ELEMANLARI**.…….	37
3.1	AA/DA Doğrultucu……	38
3.2	DA/AA Evirici……	43
3.3	DA/DA Dönüştürücü……	47
4.	**GÜÇ ENTEGRASYON YÖNTEMLERİ**…….	54
4.1	Alternatif Akım Güç Entegrasyon Yöntemi.……	57
4.2	Doğru Akım Güç Entegrasyon Yöntemi.…….	59
4.3	AA/DA Melez Güç Entegrasyon Yöntemi……..……	63
4.4	Güç Entegrasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması……...	66
5.	**DOĞRU AKIM GÜÇ ENTEGRASYON YÖNTEMİNİN MUHTELİF GÜÇ ÖLÇEKLERİNDE PERFORMANS ANALİZİ**…….	72
5.1	Doğru Akım Güç Entegrasyon Yönteminin Evsel Ölçekte Performans Analizi……..……	72
5.1.2	Benzetim Modeli.…….	76
5.1.3	Benzetim Sonuçları……...	83
5.2	**Doğru Akım Güç Entegrasyon Yönteminin Dağıtım Ölçeğinde Performans Analizi**……...	90
5.2.1	Benzetim Modeli……	94
5.2.2	Benzetim Sonuçları……...	97
5.3	**Doğru Akım Güç Entegrasyon Yönteminin İletim Ölçeğinde Performans Analizi**…….	102
5.3.1	Benzetim Modeli……	107
5.3.2	Benzetim Sonuçları……...	110
6.	**SONUÇ VE ÖNERİLER**……	116
6.1	Konuyla İlgili Yapılabilecek Çalışmalar…..…….....	119
	KAYNAKLAR……	123
	ÖZGEÇMİŞ…….	137

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Panel hücresinin tek diyotlu modeli……... 16
Şekil 2.2 Üç adet panelin I-V ve P-V karakteristikleri…….. 18
Şekil 2.3 Üç adet panelin kısmen gölgeli ortamda I-V ve P-V karakteristikleri……... 18
Şekil 2.4 Güneş sistemlerinin blok diyagramı……... 20
Şekil 2.5 Güneş panellerinin matematiksel modeli……... 21
Şekil 2.6 Güç kontrollü sürücünün Matlab/Simulink benzetim modeli……..... 22
Şekil 2.7 DA yük bağlı güneş sisteminin Matlab/Simulink benzetim modeli….. 22
Şekil 2.8 Direnç ve gerilime bağlı olarak güç değişimi……..... 22
Şekil 2.9 Üç fazlı dengeli yük bağlı güneş sisteminin benzetim modeli…….. 23
Şekil 2.10 Üç fazlı dengeli güneş sisteminin güç ve gerilim çıktıları……. 24
Şekil 2.11 Rüzgar türbinlerinin ana bileşenleri……... 25
Şekil 2.12 Dikey eksenli rüzgar türbini modelleri……... 27
Şekil 2.13 Rüzgar türbini bağlı şebekenin benzetim modeli……..... 28
Şekil 2.14 Rüzgar türbinin matematiksel benzetim modeli……..... 29
Şekil 2.15 Örnek rüzgar türbinine ait benzetim modelinin bazı çıktıları …….. 30
Şekil 2.16 Farklı batarya türlerinin enerji tutma kapasiteleri…….. 31
Şekil 2.17 Li-on batarya dinamik eşdeğer modeli……... 34
Şekil 2.18 Li-on batarya Matlab/Simulink benzetim modeli…….. 34
Şekil 2.19 Li-on bataryanın parametrik değerlerinin akıma oranla değişimi…….. 35
Şekil 3.1 Yüksek güçte kullanılan yarı iletken malzemelerin kullanım alanı... 38
Şekil 3.2 Tek faz yarım dalga doğrultucu……. 39
Şekil 3.3 Üç fazlı tam dalga doğrultucunun çalışma prensibini gösteren devre… 40
Şekil 3.4 AA/DA güç dönüştürücünün Matlab/Simulink modeli……. 42
Şekil 3.5 AA/DA dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi…… 42
Şekil 3.6 Güneş paneline bağlı tek faz tam dalga inverter devre şeması…….. 44
Şekil 3.7 PWM inverter Matlab/Simulink benzetim modeli…… 46
Şekil 3.8 İnverter çıkışı ve tasarım değerleri…… 47
Şekil 3.9 Düşürücü DA/DA kıyıcı devre şeması……... 48
Şekil 3.10 PWM tekniğiyle kontrol edilen düşürücü kıyıcı devre topolojisi…….. 49
Şekil 3.11 Yaygın olarak kullanılan DA/DA kıyıcılar ve dönüştürme oranları….. 50
Şekil 3.12 Düşürücü DA/DA kıyıcının benzetim modeli…… 52
Şekil 3.13 DA/DA kıyıcıların kullanıldığı hedef yöntem benzetim modeli…… 52
Şekil 3.14 Düşürücü kıyıcının benzetim modeli çıktıları…… 53
Şekil 4.1 AA mikro şebeke modeli…… 57
Şekil 4.2 DA mikro şebeke modeli…… 62
Şekil 4.3 DA formda güç dağıtımı yapan ev modeli……. 63
Şekil 4.4 AA/DA melez mikro şebeke modeli…….. 64
Şekil 4.5 Yüklenme kapasitesine bağlı olarak elektriksel kayıp miktarları…….... 67
Şekil 4.6 Uzaklığa bağlı olarak AA ve DA iletim hatlarının maliyet grafiği…… 68
Şekil 4.7 Farklı dağıtım gerilimleri için evsel tüketim ve kayıplar……... 69
Şekil 4.8 Evsel cihazların AA ve DA dağıtımda enerji verimliliği……... 69
Şekil 4.9 Aylara bağlı olarak AA mikro şebeke ve DA mikro şebekede elektriksel kayıp miktarını ve DA mikro şebekede kayıpların azalma oranlarını gösteren grafikler…..... 70
Şekil 5.1 Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin kaynak dağılımı……... 73
Şekil 5.2 DA güç entegrasyonu ile oluşturulan evsel mikro şebeke topolojisi….. 76

Şekil 5.3	DA güç entegrasyon yönteminin evsel ölçekte benzetim modeli……..	80
Şekil 5.4	IGBT'lerle tasarlanan dinamik yük modeli……	80
Şekil 5.5	Kesicilerle tasarlanan dinamik yük modeli……	81
Şekil 5.6	DA entegrasyon yönteminin kullanıldığı evsel mikro şebekenin benzetim modeli……	82
Şekil 5.7	DA/DA kıyıcı ve akım kontrol ünitesi……...	82
Şekil 5.8	Kesici ve IGBT ile tasarlanan dinamik yük modellerinin tepkisi……..	84
Şekil 5.9	Dinamik yük modelinin akım-gerilim karakteristiği……..	85
Şekil 5.10	Şebekeden beslenen yük grubunun benzetim sonuçları…….	86
Şekil 5.11	Doğru akım barasından beslenen yük grubunun benzetim sonuçları….	86
Şekil 5.12	1 kW PV panellerin YEK olarak kullanıldığı mikro şebeke modelinin çıktıları……	87
Şekil 5.13	1 kW rüzgar türbinin YEK olarak kullanıldığı mikro şebeke modelinin çıktıları……..	88
Şekil 5.14	Güneş (0,5 kW) ve rüzgardan (0,5 kW) oluşan melez sistemin YEK olarak kullanıldığı mikro şebeke modelinin çıktıları……..	89
Şekil 5.15	Mikro şebeke modellerin batarya şarjı için ana şebekeden çektikleri enerji miktarı……..	89
Şekil 5.16	Melez mikro şebekeye sahip sitenin güç dağıtım şebekesi……	93
Şekil 5.17	Güç entegrasyon merkezinin elektriksel şeması…….	94
Şekil 5.18	Akıllı sitenin güç dağıtım modeli……...	95
Şekil 5.19	(a) Capo Vado raporuna göre dağıtık üretim miktarı, (b) Bir evin tükettiği enerji miktarı, (c) Sitenin tükettiği enerji miktarı, (d) Ani değişimlerde gerilim karakteristiği…….	96
Şekil 5.20	Tam güçte (a) Şebekeden çekilen güç, (b) Dağıtık kaynakların enerji üretim miktarı…….	98
Şekil 5.21	Yarım güçte (a) Şebekeden çekilen güç, (b) Dağıtık kaynakların enerji üretim miktarı…….	99
Şekil 5.22	Çeyrek güçte (a) Şebekeden çekilen güç, (b) Dağıtık kaynakların enerji üretim miktarı……..	99
Şekil 5.23	Arıza durumu benzetim sonuçları; (a) Arıza saat aralığı, (b) YEK'lerden hasat edilen enerji miktarı, (c) Benzetim süresince 3 faz gerilim karakteristiği……..	101
Şekil 5.24	Üretim ve tüketim hattı içeren melez mikro şebeke yapısı……	106
Şekil 5.25	Enerji merkezinin blok diyagramı……..	107
Şekil 5.26	Enerji merkezinin benzetim modeli……	108
Şekil 5.27	Kontrol yönteminin şeması……	108
Şekil 5.28	a) Tüketim hattı gerilim karakteristiği, b) DA entegrasyon barası gerilim değeri, c) Mantıksal kontrolün anahtarlama sinyalleri……..	110
Şekil 5.29	a) Şebekeden çekilen güç, b) Dağıtık kaynaklardan çekilen güç……..	112
Şekil 5.30	a) Üç fazlı tüketim hattının gerilim karakteristiği, b) Üç fazlı tüketim hattına ait gerilim karakteristiğinin ayrıntılı görünümü, c) Benzetim süresince şebekeden çekilen güç, d) Benzetim süresince dağıtık kaynaklardan çekilen güç……..	113
Şekil 5.31	a) DA bara gerilim, b) enerji merkezi kontrol sinyali……	113
Şekil 5.32	a) Güneşten elde edilen enerji miktarı, b) Şebekeden çekilen güç miktarı, c) DA entegrasyon bara gerilimi, d) Tüketim hattı gerilim karakteristiği……...	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

AA	Alternatif Akım
Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
D	İletim süresi oranı
DA	Doğru Akım
f	Frekans
f_0	Kesim Frekansı
I	Akım
G	Aydınlatma Miktarı
k	Boltzman Sabiti
K	Mutlak Sıcaklık
M(D)	Güç Dönüştürme Oranı
N_{pc}	Paralel Bağlı Panel Sayısı
N_{sc}	Seri Bağlı Panel Sayısı
P	Aktif Güç
P_m	Mekanik Güç
PWM	Darbe genişlik Modülasyonu
R	Omik Direnç
R_s	Seri Direnç
R_{sh}	Paralel Direnç
q	Elektron Yükü
SOC	Batarya Şarj Durumu
T	Sıcaklık
V	Gerilim
v	Rüzgar Hızı
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
X	Empedans
α	Kısa Devre Sıcaklık Katsayısı
β	Açık Devre Sıcaklık Katsayısı
ρ	Hava Yoğunluğu
δ	Darbe Genişliği

1. GİRİŞ

Elektrik şebekelerinin tarihçesi yaklaşık olarak bir asır önce başlamıştır [1]. Günümüzde ise hemen hemen her yerleşim bölgesinde elektrik enerjisine ulaşabilmek mümkündür. Elektrik işletmesi üretim, iletim ve dağıtım ana başlıkları altında toplanabilmektedir. Geleneksel olarak üretim büyük güçlü santrallerde merkezi olarak yapılmaktadır. Üretilen enerjinin uzak mesafelere yüksek gerilimle ulaştırılması iletim olarak adlandırılmaktadır. Yüksek gerilime sahip enerjinin kullanılabilir seviyeye düşürülerek tüketiciye ulaştırılması ise dağıtım alt başlığını oluşturmaktadır. Geçen yüzyılda elektrik şebekelerinde teknik olarak fazla bir değişim olmamış, çalışmalar, var olan teknolojiyi yaygınlaştırmaya ve güvenli kullanım için işletme koşullarını belirlemeye odaklanmıştır.

Artan nüfus ve teknoloji kullanımına bağlı olarak enerji talep değerleri devamlı olarak yükselmektedir. Bu talebin merkezi sistemle karşılanması hem üretim hemde işletme kapasitesinin artırılması ile mümkündür. Kapasite artırımına yönelik yapılacak yatırımlar için büyük meblağlar ve fazlaca zaman gerekmesi nedeniyle günümüzde geleneksel yöntemler verimli çözümler olarak görülmemektedir. Ayrıca fosil ürünü kaynakların elektrik üretiminde kullanımı, karbondioksit salınımını artırması nedeniyle çevre dostu alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüz elektrik işletme sorunlarını çözmek ve artan enerji talebine cevap vermek, son dönemde gelişen teknoloji, iletişim ve alternatif enerji kaynaklarının daha etkin kullanımı ile mümkündür. Bu amaca yönelik olarak yapılan çalışmalar "Akıllı Şebekeler" başlığı altında toplanmaktadır.

Literatürde akıllı şebekelere yönelik birçok tanım bulunmaktadır. Reddy vd'nin yaptığı tanımlamaya göre akıllı şebeke, tekdüze veya tekdüze olmayan yüklerin yer aldığı dağıtım şebekelerini beslemek amacıyla çoklu üretim kaynaklarını güvenilir şekilde entegre eden ve verimli kontrolünü sağlayan teknolojidir [2]. Ayrıca bu çalışmada akıllı şebeke kavramı; entegrasyon, kontrol, haberleşme ve ölçüm olarak sınıflandırılmıştır. Park vd'ye göre akıllı şebekeler, tüketiciyle üretici arasında gerçek iletişim bilgisine dayanarak enerji verimliliğini optimize eden geleceğin güç şebekeleridir [3]. Literatürde akıllı şebekelerin,

geleneksel şebekelerde var olan bütün problemlerin çözümüne yönelik yapılan çalışmaları kapsadığı da değerlendirilir [4-5].

Küresel ölçekte enerji kaynağı olarak genellikle fosil yakıtlar kullanıldığından enerji temini çevresel bir soruna dönüşebilmektedir. Bu sorun yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Geçen on yılda %21'lik artışla rüzgar enerjisi dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağıdır. Dünya çapında yeni santrallerin kurulmasıyla 2013 yılında 318.105 MW kapasiteye ulaşan rüzgar türbinleri küresel talebin %3'ünü karşılamaktadır [6]. Bu artışta, rüzgar enerjisini diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) nazaran daha yüksek kapasitelerde kurulumunun yapılabilmesi etkin bir faktördür [7-8]. Birçok ülkenin enerji temininde umut bağladığı rüzgar enerjisi sürdürülebilir, güvenli ve etkili bir kaynak olarak değerlendirilmektedir [9].

Rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme çalışmaları 1990'lardan sonra hız kazanmıştır [10]. Özellikle son on yılda rüzgar enerjisi piyasası önemli oranda büyümüştür. Bu büyümeye paralel olarak maliyeti azaltan, verimi ve güvenliği artıran çeşitli rüzgar dönüştürme teknolojileri geliştirilmektedir. İlk ticari türbinlerde rüzgar dönüşümü sabit hızlı, sincap kafesli ve şebekeye doğrudan bağlanan jeneratörlerle yapılmaktaydı. Güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler sayesinde değişken hızlı, çift beslemeli ve sistem verimini artıran kontrol elemanları içeren asenkron motorlar kullanılmaya başlandı [11-12]. Bu türbinler, kontrol edilebilirliği daha kolay olmasına rağmen mekanik sorunları gidermekte yetersiz kalmaktaydılar. Mekanik dönüşümünde kullanılan kırılgan dişlileri elemine etmek amacıyla doğrudan sürülebilen senkron motorlar geliştirildi [8]. Sabit magnetli olan bu senkron motorlar zamanla geleneksel motorların yerini almaya başladı. Yeni kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ile asenkron motorun maliyet ve az bakım gibi avantajlarından yararlanma imkanı doğdu. Günümüzde yaygın olarak rüzgar türbinlerinde, değişken hızlı rüzgar enerjisi dönüştürücü sistemleri ve çift beslemeli asenkron motorlar kullanılmaktadır. Mümkün olduğu kadar fazla enerji elde etmek amacıyla maksimum güç noktası izleme yöntemleri kullanılmaktadır [13]. Ayrıca gelişmiş tekniklerle yapılan ölçümlerle rüzgar türbinlerinin verimi artırılmaya çalışılmakta ve geleneksel motorlarda var olan uyartım sorunu gibi problemlere kontrol aşamasında çözüm bulunabilmektedir.

Karbondioksit salınımı, küresel bir tehdit haline gelirken enerji politikalarının belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Sürdürülebilir enerji temini için çevre dostu kaynakların kullanımı teşvik edilmeli ve tüketiciler bu konuda cesaretlendirilmelidir. Güneş enerjisi, sahip olduğu potansiyelle, çevre dostu enerji kaynaklarından en çok ilgi çekenler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Güneşin aydınlatma enerjisi 174 PW (peta watt) (1 PW= 10^{15} W) olup bu miktar yalnızca dünya yüzeyine yansıyan kısmıdır [14]. Güneş enerjisinin atmosfer tarafından %26'lık kısmı yansıtılmakta %19'lık kısmı ise emilmektedir ve geriye kalan aydınlatma enerjisi ise karaya ve denizlere ulaşmaktadır. Bu miktar göz önüne alındığında güneş enerjisinin ne kadar büyük bir enerji kaynağı olduğu anlaşılmaktadır.

Güneş enerjisi her ne kadar temiz, gürültüsüz ve yenilenebilir olsa da güneş panellerinin verimi düşüktür. Piyasada bulunan panellerin verimi %22,5'i aşmamakta ve üretim maliyetleri oldukça yüksektir [15]. Bu yüzden güneşten elde edilen enerjinin optimizasyonu önem kazanmaktadır. Güneş panelleri genel karakteristik olarak bir diyota paralel bağlı ve lineer olmayan gerilim ve akım karakteristiğine sahip akım kaynağı olarak modellenmektedir [16-17]. Modelleme için literatürde birçok örnek bulunmaktadır [18-22] ve bunlardan en çok kullanılanı tek diyotlu modeldir. Bir modüldeki her bir hücre sıcaklık ve aydınlatma açısından aynı çevresel koşullara sahip olduğunda panel karakteristiğini belirlemek kolaylaşmaktadır. Oysa tek bir hücre gölgelense bile çıkışa bağlı hücrelerin çoğu gölgelenmiş gibi çıkış gücü azalmaktadır. Bu etkiden kaçınmak amacıyla baypas diyot içeren modüller kullanılır. Baypas diyotu sayesinde farklı bir akım yolu sağlanır ve aşırı ısınmanın hücrelere zarar vermesi engellenmiş olur [23]. Düzenli olmayan çevre koşullarıyla karşılaşıldığında, baypas diyotlu modüllerden oluşan panellerin karakteristiği çok karışık bir yapıya sahip olabilmektedir. Ayrıca modüllerin seri veya paralel bağlı olmasına bağlı olarak maksimum güç noktası değişebilmektedir [24]. Güç noktası takip teknikleri, bu problemlerin çözümünü referans alarak güneş panellerinden maksimum gücü elde etmek amacıyla geliştirilmektedir. Bu tekniklerden çoğu P-V (Güç-Gerilim) karakteristik eğrisini kullanarak maksimum gücü bulmaktadır [25-28]. Kullanılan yöntem ve algoritmaya bağlı olarak, bu teknikler lokal ve genel maksimum noktası arasında yer alan bir değerle panelin gücünü bulurlar.

Geçmişte evsel ve ticari fotovoltaik sistemlerin maliyetlerinin büyük kısmını güneş panelleri oluşturmaktaydı [29]. Bu yüzden, güneş sistemleri için kurulum maliyetleri, bakım ve inverter seçimi önemli bir problem değildi. Güneş panellerinin ucuzlaması ve verimlerinin artmasıyla panellerin toplam maliyette oranı azalırken inverterlerin maliyet oranı artmıştır [30]. Toplam maliyeti azaltmak amacıyla inverter seçimi ve sistem veriminin artırılması önemli bir problem haline gelmiştir. Geleneksel olarak bütün paneller için bir inverter yerine her panel için ayrı bir mikro inverter (AC modül) kullanımı, verimi artırmaya yönelik alternatif bir yöntem olarak görülmektedir. Bu monteli mikro inverterler şebeke ihtiyaçlarına ve sınır değerlerine bağlı olarak çalışabilmektedirler [31]. Mikro inverterler güneş sistemlerinin maliyetlerini azaltmak amacıyla küçük, sıcağa dayanıklı, uzun ömürlü, verimli ve harmonik bozulmaların az olduğu şekilde tasarlanmalıdır. Henüz Ar-Ge aşamasında olan mikro inverterler geleneksel yöntemlere nazaran pek tercih edilmemektedir. Buna rağmen, yatırım maliyetleri ve uzun ömürlü olmaları göz önüne alındığında mikro inverterlerin gelecekte önemli bir seçenek haline gelmesi beklenmektedir [32].

Güç sistemlerinde hızlı bir değişim yaşanmaktadır. Üretim tarafında YEK'ler muhtelif ölçekte ve artan kullanım oranıyla yerini almaktadır [33]. Aynı şekilde, elektrikli araçlar, talep taraflı yük yönetimi ve gelişmiş ölçüm yöntemleri yeni teknolojiler arasındadır. Üretim ve talebin devamlı olarak değişiklik göstermesi, güç dengesi sağlama açısından şebeke verilerini etkilemektedir. Örneğin, YEK'lerde üretilen enerjinin kesintili ve değişken olması, güç değerlerinde ani ve tahmin edilemez değişimlere neden olabilmektedir [34]. Tüketim tarafında ise elektrikli araçlar gibi yüksek güçlü teknolojik cihazlar aniden talebi artırabilmekte veya azaltabilmektedirler. Geleneksel olarak, bu tür riskler işletme koşulları altında değerlendirilmekte ve ani güç dengesizliklerine neden olmaktadır. Ayrıca YEK'lerin kullanımı ile birlikte tüketici tarafında yer alan üretim kapasitesi değerleri, belirsizliğini artırmakta ve bölgesel hava koşullarına bağlı olarak tüketim değerlerini tahmin etmek zorlaşmaktadır [35].

Üretim ve tüketim tarafında yer alan belirsizlikler arttıkça güç akışı problemi daha karmaşık bir hal kazanmaktadır. Mevcut rüzgar türbinlerinin %20'den fazlası enerji depolama ünitesi içermediğinden [36] ürettiği enerjiyi doğrudan şebekeye vermektedir. Bu yüzden geleceğin elektrik şebekelerini yöneten altyapı

teknikleri, hızlı değişen yük ve üretim modellerine uygun olmalıdır [37-39]. Ayrıca şebekeye entegre edilen yeni kaynaklar işletme koşullarına uygun tasarlanmalı ve mikro şebeke sistemlerinin güvenliği için gerekli olan cihaz ve yöntemleri içermelidir [39-41].

Güç sistemlerinin esnekliğini artırmaya yardım eden teknolojiler YEK'lerin şebekeye verimli, ekonomik ve güvenli bir şekilde kazandırılmasında kritik öneme sahiptir [40-41]. Şebeke ölçeğinde enerji depolamanın genel olarak bu esnekliği kazandıracağı öngörülmektedir [42-45]. Bu öngörü bu alanla ilgili olarak teknik ve ekonomik birçok çalışmayı cesaretlendirmekte ve teşvik etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların tüketici tarafında karşılık bulması için çeşitli güç ölçeklerinde ve depolama sürelerinde enerji depolama teknolojileri piyasada yer almaktadır. Hidrolik santraller, hava sıkıştırma tankları, bataryalar, volanlar (flywheel), süper iletkenli magnetik depolama cihazları ve süper kapasitörler enerji depolamada kullanılan yaygın teknolojilerdir [46-51]. Bu teknolojilerin depolama karakteristikleri (enerji yoğunluğu, şarj/deşarj süresi, maliyet, kullanım ömrü vb.) farklılık gösterdiğinden, depolama türü kullanım yerine ve amacına bağlı olarak belirlenmektedir. Örneğin, volanların enerji kapasiteleri kısıtlı olduğundan güç sistemlerinde ölçme ve kontrol gibi kısa süreli gereksinimler için kullanılır. Buna karşılık, hidrolik santraller ve hava sıkıştırma tankları yüksek depolama kapasitesine sahip olduklarından uzun bir sürede şebekenin enerji ihtiyacını karşılamada kullanılabilirler. Depolama teknolojileri üzerinde yapılan çalışmalar yoğunlaşarak devam ettiğinden, her bir teknolojinin karakteristik özellikleri geliştirilerek daha geniş bir kullanım alanına sahip olması beklenmektedir [52].

Depolama, doğası gereği üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemlerine esneklik kazandırmaktadır. Depolama; kaliteli güç akışı sağlama, acil enerji ihtiyacını karşılama, arıza durumu ve şebeke kontrolünde etkili bir şekilde kullanılabilmektedir [51]. Bu yönüyle depolama şebeke kararlılığını ve kaliteli enerji gereksinimini de sağlamaktadır. Ayrıca YEK'lerin doğası gereği ürettiği kesintili enerji sorunu da depolamayla aşılarak YEK'lerin kullanımı daha verimli hale getirilebilmektedir. İletim sistemlerinde, uygun ölçek ve konumda yapılan depolama uygulamaları sistemin yükünü hafifletmekte ve altyapı yatırımlarını azaltmaktadır [53-55].

YEK'lerin bulunduğu güç sistemlerinde depolama, kararsızlığı azaltırken merkezi üretim kaynakları için gereken yatırımlara da alternatif olmaktadır [56-57]. Enerji kesintileri, güç çıkışında ani çıkışlara ve inişlere sebep olabilmektedir. Bu durumlarda büyük ölçekli depolamalar enerji kaynağı olarak kullanılarak yük kaybını engellemekte ve acil durumlarda güç çıkışındaki dalgalanmaların düzeltilmesinde kullanılarak kaliteli enerji yapısını korumakta kritik rol almaktadır. Ada modunda çalışan güneş ve rüzgar sistemlerinde üretilen enerji, talep edilen enerjiyi karşılamadığı durumlarda depolama kullanılarak sistemin açığı kapatılmaktadır. Depolamanın YEK'lerde bir diğer kritik rolü ise ani gerilim düşmelerinde veya artmalarında sistemin dayanıklılığını artırmaktır. Depolamanın, bu görevleri yerine getirebilmesi için müşterek konumlanması gerekir [42-51]. Müşterek konumlamayla küçük çaplı sorunlara çözüm bulunur ve bu sorunların büyüyerek bütün sistemi olumsuz etkilemesinin önüne geçilir.

Güç elektroniği elemanlarının enerji depolamada kullanılması, sistemin esnekliğini artırmakta ve güç kalitesini ve kararlığını korumayı sağlamaktadır [58]. Güç elektroniği elemanları reaktif güç gereksinimini karşılayacak şekilde tasarlanması durumunda, depolama sistemleri gerilim kontrolünde kullanılabilmektedir[59-60]. Güç elektroniği elemanları enerji sistemlerinde oluşan ani gerilim düşüm ve artırımlarında kompanzasyon görevi görerek gerilim kararlılığını korumaktadırlar. Güç dönüştürücüleri her ne kadar harmonik üretseler de tasarım konfigürasyonuna bağlı olarak hiçbir ara eleman olmaksızın şebekeye zarar vermeden çalışabilir ve depolama ünitelerinin şebekede kullanılmasında önemli bir rol oynarlar. Ayrıca güç elektroniği elemanları depolama davranışlarını düzenler ve doğru frekansta otomatik üretimi sağlarlar. Yukarıdaki sebeplerden anlaşıldığı üzere güç dönüştürücüleri depolamada geniş bir kontrol sahasının oluşmasında önemli rol alırlar.

Enerji sistemlerinde sorunlar birbirine bağımlı oldukları için bazen bir soruna bulunacak çözüm diğer sorunların çözümüne de yardımcı olmaktadır. Örneğin zirve talebi karşılamak için kullanılacak olan depolama sistemi aynı zamanda gerilim kararlılığını ve güç kalitesini korumayı da sağlayacaktır. Bu yüzden depolama yöntemi veya cihazı seçiminde çok yönlü değerlendirmeler yapılarak bütün sistemin güvenliği ve maliyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Depolama teknolojisi seçiminde, bütün gelir ve giderleri içeren ekonomik analizler temel

adımdır. Ekonomik analizler, depolamanın kullanım amacına uygun bir şekilde yapılması durumunda bütün şebekeye işletme yönünden yararı olacak ve sistem verimliliğini artıracaktır. Depolama üretim kapasitesini artırmak, merkezi enerji sistemine acil servis sağlamak ve iletim kayıplarını veya tıkanıklıklarını azaltmak için kullanılabilir. Depolama teknolojisi tüketici ve şebeke işletmesi adına, dolaylı olarak kapasiteyi artırmaya yönelik olarak yeni yatırımları azaltma, güç güvenliği ve kalitesini artırma gibi finansal yararlar sağlar. Ayrıca depolama cihazları, YEK'lerin daha verimli çalışmasını sağlayarak maliyetlerin azalmasında önemli bir rol oynar.

Depolamanın ekonomik ve teknik değerlerini inceleyen birçok çalışma literatürde geniş yer tutmaktadır [38,50-51,61-62]. Bu çalışmalar depolama sistemlerin şebekedeki konumlarına ve kapasitelerine göre gruplandırılabilirler. Ada modunda çalışan şebekelerde genellikle depolama bir veya iki bara üzerinden yapılmaktadır. Şebeke karakteristiği Kirchoff kanunlarıyla belirlenen güç akış denklemleri üzerinden kontrol edilmektedir. Kontrolün temel hedefi kayıpları azaltarak en uygun güç akışını sağlamaktır. Bu problem, kontrol edilen sistemin yapısına göre zorlaşabilmekte ve bütün sistem için belirlenen optimum güç akışı bir veya birkaç bara için optimum değerlerden uzak olabilmektedir. Bu yüzden depolama elemanlarının bara seçimi, optimum güç akışının belirlenmesinde önemli bir problemdir. Ayrıca frekans kararlılığı, yük kaydırma ve güç kalitesi depolama elemanlarından beklenen üç temel şarttır. Bu üç özelliği taşıyan ve optimum güç akış probleminin çözümüne uygun birden çok yöntem vardır. Ancak bu yöntemler uygulama alanına ve ölçeğine göre birbiri içinde dahi farklılık gösterebilmektedir [56]. Örneğin zor iklim şartlarında en ekonomik depolama sistemi seçildiğinde bazı teknik sorunlar çıkabilmektedir. Bu yüzden depolama sisteminin belirlenmesi ve optimizasyonunda değerlendirme yapabilmek için çeşitli yöntem ve teknolojilere ihtiyaç vardır.

Güneş ve rüzgar sistemlerine yönelik olarak ele alınan kontrol yöntemleri sistemin kararlığını koruma, dinamik sürekliliği sağlama ve arıza değerlendirme gibi durumlarda etkin rol alarak bütün sistemin performansını etkilemektedir. Güneş ve rüzgar sistemlerinin şebekeye uyumlu gerilim ve akım karakteristiğine sahip olması gerekir. Bu yüzden bu sistemlerin şebekeye uyumu önemli bir problemdir. Bu problemi çözmek amacıyla senkronizasyon yöntemlerine

dayanarak geliştirilen kilitli faz çevrimi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin değerlendirilmesinde kritik öneme sahip olan özellikler dinamik tepki hızı ve bozucu etkilere karşı dayanma kapasitesidir. Bu yöntemlerden ikinci sıralı genelleştirilmiş toplama yöntemi tek fazlı sistemlerde diğer sistemlere nazaran daha iyi bir performans göstermektedir [1]. Bu yöntem endüstri uygulamalarında ve YEK'lerin uyumunu sağlamada kullanılabilecek en iyi yöntemler arasında yer almaktadır.

Tüketici talebinin hızla artması elektrik şebekelerinin yetersiz kalmasına sebep olabilmektedir. Yakın gelecekte güvenli ve kaliteli bir şekilde talebi karşılamak dağıtım şirketleri için önemli bir problemdir [63]. Üretim kapasitesini artırma, elektrik şebekelerinin planlanmasında kritik bir role sahiptir. Bu planlamanın hedefi, kabul edilebilir güvenlik seviyesinde, ekonomik olarak en uygun genişleme programını belirlemektir [64]. Elektrik üretiminin karmaşık yapısı, kaynakların üretim maliyetlerindeki farklılık ve güvenli enerji gereksinimi bu problemi matematiksel olarak zor bir optimizasyon problemi haline getirmektedir [65]. Bu problemin çözümü son teknolojiyle donatılmış bilgisayar sistemleri ve geliştirilen yeni algoritmaları bünyesinde barındıran akıllı şebeke başlığı altında aranmalıdır. Bu çözümlerle üretim aşamasında birçok değişim yaşanacaktır. Enerjinin üretildiği en yakın yerde tüketilmesi ilkesini benimseyen bu değişim, merkezi üretimle beraber dağıtık kaynakları benimsemektedir.

Rouhani vd üretim, dağıtım ve iletim büyüme planlamasına ilişkin bir model geliştirmişlerdir [64]. Bu modelde planlanan üretim üniteleri ve dağıtık üretim koşulları eş zamanlı olarak ele alınmıştır. İletim hatlarında planlanan gelişim, düzenli olmayan coğrafi koşullar ve fosil yakıtların maliyeti problemin sınır değerlerini oluşturmaktadır. Çok bilinmeyenli, karmaşık sayı içermeyen lineer yapıya sahip bu problem yeni yapısal-sezgisel yaklaşımla analiz edilmiştir. Bu çalışmada, şebeke düğüm noktalarına bağlanan dağıtık üretim kaynakları (Rüzgar türbini, dizel jeneratör, mikro türbin, vb.) değerlendirerek sistem maliyeti minimize edilmeye çalışılmaktadır. Büyük ölçekli şebekelere örnek olarak İran elektrik şebekesi ele alınarak hedef modelin etkinliği gösterilmiştir.

Dağıtık üretim kullanılan elektrik şebekelerinde, gerilim kararlılığı, hat kayıpları, kısa devre akımları ve harmonikler gibi birçok parametreyi etkilemektedir. Dağıtık üretim kaynakları mevcut şebekeye entegre edilirken bu

hususlar göz önüne alınmalı ve verimli bir şebeke için sistem optimizasyonu sağlanmalıdır. Murty vd şebeke optimizasyonu için, geleneksel üretim azalmasını ve bu amaca yönelik olarak YEK'lerin dağıtık olarak kullanılmasını gerekçeleriyle ifade etmiştir [66]. Bu çalışmada dağıtık üretim için optimal konum ve üretim miktarı belirlemek amacıyla yeni bir yaklaşım olarak hassas yöntem adı verilen algoritma kullanılmıştır. Bu yöntem sistem kayıplarına karşı hassas davranarak sistem kayıplarını minimize ve sistem verimini maksimize etmeye çalışmaktır. Hedef yöntem 38 baralı bir dağıtım şebekesinde test edilmekle beraber radyal dağıtım sistemlerle de karşılaştırılması yapılmıştır.

Dağıtık üretim kaynaklarını optimize etmek amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Naveen vd çoklu dağıtık üretim için yer ve üretim miktarınının optimizasyonunu belirlemek amacıyla parçacık sürü optimizasyon yöntemini kullanmışlardır [67]. Bu çalışmada basit ve etkili bir algoritma kullanılarak gerilim kararlılığı, kayıpları azaltma ve üretimde gerilim çeşitliliğine odaklanılmıştır. Referans [68]'de dağıtık üretimin maliyeti geleneksel, güç üçgeni ve reaktif güç bileşenleri ile hesaplanmıştır. Arya vd iletim hatlarında dağıtık kaynakların konumunu belirlemek ve hat kayıplarını en aza indirmek için bara seçimi yapan yeni bir teknik tanımlamıştır [69]. Bara seçimi kritik gerilim duyarlılığına (dV/dP) göre seçilmektedir. Referans [70]'te dağıtık kaynakların optimal konumunu belirlemek ve dağıtık kaynaklarda optimal güç akışını sağlamak amacıyla iki yeni yöntem gösterilmiştir. Bu yöntemler gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Dağıtık kaynaklar için uygun konum belirlemenin iki nihai hedefi; sosyal refahı artırmak ve YEK'lerden maksimum yararlanmaktır.

Muhtemel dağıtık kaynağın konumu belirlenirken gerçek maliyet göz önünde bulundurulmaktadır. Dağıtık kaynakların gerçek maliyetini hesaplarken sezgisel yaklaşımlar kullanılabilmektedir [71]. Referans [72]'de çoklu nesnel optimizasyon yaklaşımı gelişimsel algoritma kullanılarak enerji kayıpları minimize edilmiş ve dağıtık şebeke kesintileri ve sistem iyileştirilmesi göz önüne alınarak konumlandırılmıştır. Gerilim kalitesini artırmak ve sistem kayıplarını azaltmak amacıyla dağıtık kaynakların konumu belirleme problemi, bulanık mantık ve yapay sinir ağları çözüm yöntemleriyle de analiz edilmiştir [73]. İlk aşamada bulanık mantık yaklaşımı dağıtık kaynakların optimal konumunu belirlemek amacıyla kullanılmıştır. İkinci aşamada ise sistem kayıplarını en aza

indirmek amacıyla yapay sinir ağları yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, insanların bağışıklık sisteminden esinlenerek yeni bir algoritma kullanılmıştır.

Referans [74]'de dağıtık kaynakları planlamada enerji kayıpları tahmin edilerek yük modellerine bağlı gerilim etkisi incelenmiştir. Gerilim profilini geliştirmek, kayıpları azaltmak amacıyla çoklu-nesnel optimizasyon yaklaşımı olarak genetik algoritma da kullanılmıştır [75-76]. Referans [77]'de aynı amaç için sistem kayıplarını referans alan yeni bir yöntem kullanılmıştır. Yeni analitik çözüm yöntemi, admitans ve empedans değerleri ele alınmadan sadece güç akış değerleri üzerinden optimizasyon yapan bir yöntemdir [78]. Referans [79]'da üç fazlı dengesiz radyal dağıtım sistemlerinde güç kayıplarını en aza indirmek ve gerilim profilini geliştirmek amacıyla, dağıtık kaynak kapasitesini en uygun kapasite ve konumlama problemi, gerilim indeks analiz yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Referans [80]'de muhtemel dağıtık kaynak yerlerini belirlemek amacıyla yük duyarlılık faktörü kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada en uygun üretim ölçeğini belirlemek amacıyla "Simulated Annealing" yöntemi kullanılmıştır. Radyal sistemlerde dağıtık kaynakların en uygun ölçek ve konumu için yeni bir yöntem [81], uyum araştırma algoritması kullanarak en uygun üretim ölçeğini ve güç kayıplarına bağlı olarak en uygun konumu elde etmektedir. Referans [82]'de dağıtık kaynakların en uygun konumu güç kayıplarına ve gerilim kararlılık indeksine göre belirlenmiştir. Zamanla değişen talebi karşılamaya yönelik yapılan dağıtık üretim planlamada, tahmini enerji kayıpları ve yük modellerine etkisini incelemek amacıyla bir araştırma yapılmıştır [83]. Bu çalışmada, dağıtık üretim planlamada kullanılmak üzere gerilim bağımlı yük modeli tanımlanmıştır. Bu yük modelleri evsel, endüstriyel ve ticari olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır.

Referans [84]'de dağıtık üretim konumuna bağlı olarak servis kalitesini tanımlayan bir değer kullanılmıştır. Borges vd dağıtık kaynakların güç kayıplarını, güvenliğini ve gerilim kalitesini artırmaya yönelik yer tahsisi için bir çalışma yapmışlardır [85]. Kumar ve Gao farklı karaktere sahip elektrik piyasalarında dağıtık kaynakları konumlandırmak için karışık cebirsel program kullanmışlardır [86]. Program düğüm noktalarında meydana gelen kayıpları azaltmayı hedeflemektedir. Bu yöntem iletim hatlarında da kullanılabilmektedir. Literatüre genel olarak bakıldığında, radyal dağıtım sistemleri için kullanılan

yaklaşımlar dağıtık kaynaklar içinde kullanılmakta ve hesaplamalar için güç akışı ve kayıplar referans alınmaktadır. Düzensiz yüklerden oluşan radyal dağıtım şebekelerini çözmek için kullanılan yöntemler, dağıtık kaynakları etkin kullanmak amacıyla enterkonnekte güç sistemleri için de kullanılmaktadır.

Dağıtık üretim kaynaklarının şebekeye güç elektroniği elemanları aracılığıyla bağlanabilmesi, dağıtık kaynak ve şebeke arasında uygun yük paylaşımına olan ilgiyi artırmıştır. Dağıtık üretimin ana şebekeye olumsuz etkisi çok az olsa da şebekeye bağlanan dağıtık kaynak sayısının artması güç kalitesini ve tüm sistemi olumsuz etkilemektedir. Dağıtık kaynak sayısından bağımsız olarak, şebekeye olan olumsuz etkilerini azaltmak için yapılan çalışmalar mikro şebeke çalışmalarını meydana getirmektedir. Mikro şebeke için standart bir tanım bulunmamakla beraber birçok farklı tanımı bulunmakta ve bu tanımlar içerik olarak birbirine benzemektedir. Temel olarak mikro şebeke, en az bir dağıtık kaynak, yük ve depolama ünitesi içeren ara şebeke olarak tanımlanabilmektedir. Mikro şebekeler, ada durumda olsa bile, yükü otomatik olarak besleyebilme kapasitesinde olmalıdır. Ayrıca merkezi üretimin yetersiz kalacağı yerlerde, dağıtık kaynaklar mevcut şebekeye verimli şekilde entegre edilebilmelidir.

Buraya kadar yapılan literatür araştırmasından anlaşılacağı üzere akıllı şebekelere olan ilgi sürekli olarak artmaktadır. Entegrasyon, kontrol, haberleşme ve ölçüm ana başlıkları altında toplanan akıllı şebeke çalışmaları enerji verimliliği açısından bir gereksinim olmakla beraber gelişime açık ve geniş bir çalışma alanına sahiptir.

1.1. Tezde Yapılan Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, akıllı şebekede kullanılan güç elemanlarının benzetim modelleri ve doğru akım güç entegrasyon yöntemi ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Tezde yer alan çalışmaların özeti aşağıdaki gibidir.

1. Bölümde, literatürde yer alan ve akıllı şebekeler teknolojisine yönelik yapılan çalışmalar ele alınmaktadır.

2. Bölümde, dağıtık kaynakların benzetim modelleri oluşturulmaktadır. Özellikle güneş, rüzgar ve bataryalar olmak üzere YEK'ler, ikincil enerji kaynağı olarak mevcut şebekede yerini almaktadır. Güneş sistemleri evsel aboneler

tarafından daha çok tercih edilirken, rüzgar sistemleri nispeten daha büyük güçlerde şebekeye entegre edilmektedir. Başta bataryalar olmak üzere depolama teknolojileri ise YEK sistemlerinde, daha verimli ve güvenli enerji temini için kullanılmaktadır. YEK sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik yapılan çalışmalar öncelikle benzetim ortamında test edildiğinden; yaygın olarak kullanılan güneş, rüzgar ve batarya sistemlerinin benzetim modellerine akıllı şebeke alanında yapılan çalışmalarda gereksinim duyulmaktadır. Benzer şekilde benzetim ortamında yapılacak DA güç entegrasyon yönteminin performans analizi için ikincil enerji kaynakların benzetim modellerine ihtiyaç vardır. Bu bölümde, yaygın olarak kullanılan ikincil enerji kaynaklarının benzetim modelleri literatüre uygun ve gerçek zamanlı olarak elde edilmiştir. Akademik çevrelerce genel kabul görmüş Matlab/Simulink benzetim programında tasarlanan modeller referans alınmıştır. DA güç entegrasyon yöntemi benzetim uygulamasına yönelik seçilen ikincil kaynaklardan örnek benzetim modellerinin çıktıları ve matematiksel modelleri analiz edilmektedir.

3. Bölümde, mikro şebekede kullanılan güç elektroniği elemanlarının benzetim modelleri oluşturulmaktadır. Melez enerji kaynaklarından oluşan mikro şebeke sistemleri geleceğin enerji alt yapı sistemlerini oluşturacaktır. Mikro şebekelerin sürdürülebilir ve güvenli şekilde mevcut şebekeyle çalışması güç elektroniği elemanlarının ara eleman olarak kullanılmasıyla mümkündür. Ayrıca güç elektroniği elemanları, mikro şebekelerin kontrol edilebilirliğini artırarak sistemin veriminin artmasında etkin rol oynamaktadır. Bu bölümde mikro şebekede kullanılan DA/DA, DA/AA, AA/DA güç dönüştürücülerinin teorik temeli ve benzetim modelleri ele alınmıştır. Ayrıca güç elektroniği elemanlarının benzetim modellerinin çıktıları analiz edilerek, kontrolünde kullanılan PWM tekniğinin yeterliliği gösterilmiştir. Sonraki bölümlerde DA güç entegrasyon yönteminin performansını test etmek amacıyla oluşturulan entegre sistemlerde, bu bölümde tanıtılan güç dönüştürücü modelleri kullanılmaktadır.

4. bölümde, güç entegrasyon yöntemleri ele alınmaktadır. Gelişen teknolojiyle beraber küçük ve orta ölçekli enerji santralleri, hava koşullarına bağlı olarak dağıtık olarak kurulabilmektedir. Dağıtık kaynakların verimli ve etki kullanılmasını etkileyen faktörlerden biri de kullanılan güç entegrasyon yöntemidir. Mevcut şebekenin AA formda işletiliyor olması, DA formda olan

üretim kaynakları için ek önlemler alınmasını gerektirmektedir. Bu önlemler, mikro şebeke sistemlerin verimliliğini ve maliyetini doğrudan etkilemektedir. Literatürde birçok güç entegrasyon yöntemi bulunmasına rağmen uygulamada yaygın olarak kullanılan yöntemler; AA, DA ve melez güç entegrasyon yöntemleridir. Bu yöntemlerin, tüketici yük durumuna ve üretim kaynaklarının karakteristiğine bağlı olarak avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Üretim ve tüketim tarafında DA formun kullanımının artmasıyla beraber DA güç entegrasyon yöntemi, yakın gelecekte bir adım öne çıkmaktadır. Güç entegrasyon yöntemlerinin karşılaştırmalı analizinin yapıldığı bu bölümde, DA güç entegrasyon yönteminin hedef yöntem olarak tercih edilmesinin sebepleri açıklanmaktadır.

5.1. bölümde, evsel ölçekte DA güç entegrasyon yönteminin performansı analiz edilmektedir. Fosil ürünü yakıtların tükenmeye başlaması ve çevreye zararlı olmaları nedeniyle YEK'lere yönelim artmaktadır. Bu kapsamda evsel tüketiciler mikro rüzgar türbinlerine ve güneş sistemlerine yönelmektedirler. Değişen hava koşulları nedeniyle YEK'lerden sürekli ve kaliteli enerji temini zorlaşmaktadır. Depolama teknolojileri, her ne kadar YEK'lerin kesintili enerji kaynağı olma problemine nispeten çözüm olsa da yetersiz kalmaktadır. Depolama teknolojisini kesintili kaynak probleminin çözümünde tamamlayacak, tüketici ihtiyaçlarını doğru yorumlayacak ve dağıtım şirketlerinin sınır değerlerini sağlayacak entegrasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde, DA güç entegrasyon yönteminin evsel ölçekte kullanımı incelenmektedir. Evsel yükler, dinamik yük olarak ele alınarak değişken yüke karşı DA güç entegrasyon yönteminin performansı değerlendirilmektedir. YEK ve Güç elektroniği elemanları modelleri için önceki bölümlerde tanıtılan modeller kullanılmaktadır. Şebeke frekansında ve şebekeye uygun karakteristiğe sahip enerji temini ve üretilen fazla enerjinin depo edilmesi gibi olağan mikro şebeke durumları örnek iki model üzerinde tartışılmaktadır. Arıza anında DA güç entegrasyon yönteminin sisteme etkisi, sistem çıktıları üzerinden incelenerek ortaya konulmaktadır.

5.2. bölümde, iletim ölçeğinde DA güç entegrasyon yönteminin performansı analiz edilmektedir. YEK'lerin üretim ölçeği arttıkça birim maliyetleri azalmaktadır. Güç ölçeği ile birim maliyeti arasındaki ilişki site büyüklüğünde kurulan yerleşim bölgeleri için bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Site

büyüklüğünde bir abone grubunda devamlı olarak tüketim söz konusu olacağından, YEK'lerden üretilen enerjinin depo edilmeden, en yakın yerde tüketilmesi de diğer bir avantajdır. YEK kullanımını artırmak amacıyla, yoğun nüfuslu yerleşim bölgeleri alt gruplara ayrılarak, küçük yerleşim bölgeleri ise bir bütün halinde site olarak ele alınabilir. Bu bölümde, site ölçeğinde kurulu YEK sistemleri için DA güç entegrasyon yönteminin yeterliliği tartışılmaktadır. Örnek modelde, ikincil enerji kaynağı olarak orta güç ölçeğinde rüzgar ve güneş sistemleri kullanılmaktadır. Enerji depolama olmaksızın bir sitenin şebekeye bağımlılığını azaltan bu modelde enerji yönetimi için enerji merkezi öngörülmektedir. Güç elektroniği elemanlarının yer aldığı enerji merkezi DA güç entegrasyon yönteminin uygulama merkezi konumundadır. Sistemin sadeliğini sağlamak amacıyla mikro şebeke elemanları doğal akışına bırakılarak sonuçlar gözlemlenmektedir. Arıza durumunda sistemin tepkisi ölçülerek ilgili yöntemin yeterliliği gösterilmektedir.

5.3. bölümde, üretim ölçeğinde DA güç entegrasyon yönteminin performansı analiz edilmektedir. Rüzgar türbinleri genel olarak, daha yüksek verimliliği nedeniyle, büyük ölçekli santrallerde tercih edilmektedir. Hidroelektrik santraller ve su ile depolama gibi mikro şebeke uygulamaları da yine büyük ölçekli güçlerde kullanılabilmektedir. Yoğun yerleşim bölgelerinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kurulan büyük ölçekli YEK'ler bölgesel olarak merkezi üretime bağımlılığı azaltabilmektedir. Bu bölümde büyük ölçekli ikincil enerji kaynaklarının, DA güç entegrasyon yöntemi ile güç entegrasyonu ele alınarak ilgili yöntemin avantajları gösterilmektedir. Büyük ölçekli kaynaklarla beraber küçük ölçekli ikincil kaynakların da sistemde yer aldığı öngörülmektedir. YEK'lerden üretilen enerji, güç dönüşümüne tabi tutulmadan, DA hat üzerinden toplanarak enerji yönetim merkezinde toplanmaktadır. Üretilen enerjinin bir araya toplanmasıyla merkezi güç dönüşümü hedeflenmektedir. Sistemin kontrolünde gerilim kontrol yöntemi kullanılmakta, üretimin talebi karşılamaması durumunda şebekeden destek alınmaktadır. DA güç entegrasyon yönteminin yeterliliği; arıza, olumsuz hava koşulları ve aşırı talep gibi uç senaryolar üzerinden test edilmektedir.

6. Bölümde ise tezde elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

2. AKILLI ŞEBEKELERDE KULLANILAN DAĞITIK ENERJİ KAYNAKLARI VE BENZETİM MODELLERİ

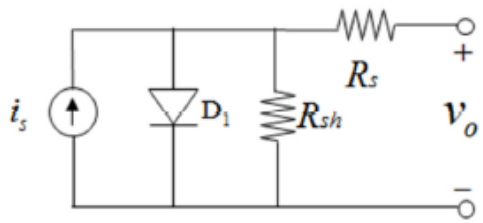
Elektrik enerjisi sosyal yaşamda ve endüstriyel alanda kullanılan temel enerji kaynağıdır. Elektrik enerjisi temininde ağırlıklı olarak fosil ürünü petrol kaynakları kullanılmaktadır [87]. Artan enerji talebi, petrol ürünlerine olan bağımlılığı ve bu ürünlerin maliyetini artırmaktadır. Petrol ürünlerinin kısıtlı imkanlarda bulunması ve çevreye zararlı gazlar yaymaları nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar önem kazanmaktadır. Birçok ülke YEK yatırımlarını artırmakta ve geleceğe yönelik hedefler belirlemektedir. YEK'lerden meydana gelen mikro şebekeler, enerjide esneklik ve çevre dostu olma gibi avantajları sayesinde geleceğin elektrik enerji altyapısını meydana getirecektir [88-89]. Güneş ve rüzgar enerjisi mikro şebekelerde en çok tercih edilen kaynaklar olmakla beraber depolama elemanlarıyla birlikte verimleri artmaktadır. Geleceğe yönelik güç şebekeleri planlanırken, bu kaynakların şebekede dağıtık olarak yer aldığı göz önünde bulundurulmaktadır.

Modern alt yapı sistemleri üstün teknolojik özellikler taşımakla beraber karmaşık ve girift bir yapıya sahip olacaktır. Geleneksel güç problemlerinin bir kısmına etkin çözümler bulunurken diğer bir kısmının yapısı daha zorlaşacak ve yeni sorunlar ortaya çıkacaktır. Bu problemlerin çözümüne yönelik geliştirilen teoremlerin ispatı, deneysel ortamlarda yapılabileceği gibi benzetim ortamlarında da yapılabilmektedir. Benzetim programları zaman ve maliyet açısından önemli bir avantaj sağlamakla beraber ilgili sonuçların grafiksel çıktılarını da vermektedir. Böylece çözüme yönelik değerlendirmeler kolaylaşmakta ve görsel sunum zenginlik kazanmaktadır. Bu bölümde güneş, rüzgar ve Li-ion bataryanın matematiksel temeli ve literatürde kabul görmüş benzetim modelleri gösterilmektedir. DA güç entegrasyon yönteminin performans analizinde kullanılacak bu modeller sistemin ikincil enerji kaynaklarını oluşturmaktadır.

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi temiz, gürültüsüz ve dağıtık olarak kullanılabilen bir enerji kaynağıdır. Buna karşın üretilen enerjinin kullanılabilmesi için fazladan güç

dönüştürücülerine ihtiyaç duyduklarından ve güneş panellerinin verimi düşük olduğundan güneş sistemlerinin maliyeti yüksektir. Bu yüzden güneş enerjisinden elde edilen enerjinin optimum seviyede kullanılması önem kazanmaktadır. Güneş sistemleri alanında yapılan çalışmalar optimizasyon, güvenlik ve verimi artırmaya yönelik çalışmalar gibi alt gruplara ayrılabilmektedir. Bu çalışmalarda güneş sistemlerinin elektriksel modeli göz önün alınarak gerçek zamanlı çözümler aranmaktadır. Geleneksel olarak güneş panelleri lineer olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip, bir diyota paralel bağlı akım kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Şekil 2.1). Tek diyotlu modelde R_s seri dirençlerin toplamını ve R_{sh} paralel dirençlerin toplamını temsil etmektedir. Hücrenin çıkış gücü sabit olmamakta ve akım gerilim karakteristiğine bağlı olarak artırılabilmektedir.



Şekil 2.1. Panel hücresinin tek diyotlu modeli

Literatürde farklı modellerin varlığıyla beraber yaygın olarak tek diyotlu model kullanılmaktadır. Tek diyotlu modelin akıma bağlı elektriksel eşitliği Denklem 2.1'de gösterilmektedir. Denklemde i_s aydınlatmaya bağlı olarak hücrenin ürettiği akımı, I_0 diyotun doyum akımını, q elektron yükünü ($1{,}6 \times 10^{-19}\, C$), k Boltzman sabitini($1{,}38 \times 10^{-23} J/^oK$), T sıcaklığı, ^oK mutlak sıcaklığı ve A ideal diyot faktörünü göstermektedir.

$$I = i_s - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_S)}{kTA}\right) - 1\right] - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \qquad (2{,}1)$$

Güneş sistemlerinde üretilen enerjinin karakteristiğini etkileyen en önemli iki faktör sıcaklık ve aydınlatmadır. Güneş modüllerinin akım ve gerilim karakteristiği sıcaklık ve aydınlatmaya bağlı olarak elde edilebilir. Denklem 2.2'de hücre akımının aydınlatma ve sıcaklığa bağlı olarak değişimini gösteren

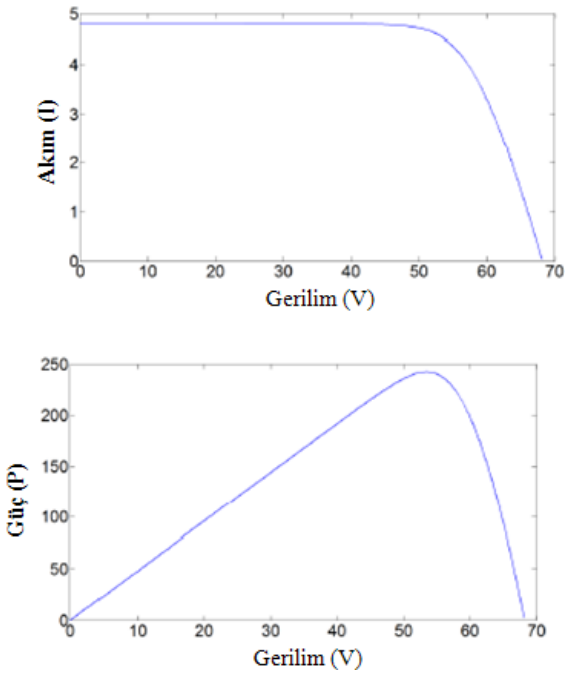
eşitlik görülmektedir. I hücre akımını, I_r referans akımını, a kısa devre sıcaklık katsayısını, β açık devre sıcaklık katsayısnı, G aydınlatma miktarını, T_c modül sıcaklığını, I_{sc} kısa devre akımını ve ΔI anlık akımın değişimini göstermektedir. ΔI değeri Denklem 2.2'de yer alan köşeli parantez ifadesiyle elde edilmektedir. Paneller seri bağlanması durumunda sistemin gerilimi, seri bağlı panellerin gerilimler toplamına eşittir. Panellerin paralel bağlanması durumunda ise paralel bağlı panellerin akımlarının toplamı sistemin ürettiği akıma eşittir.

$$I = I_r + [a\left(\frac{G}{G_r}\right)(T_c - T_{cr}) + (\frac{G}{G_r} - 1)I_{sc}] \quad (2,2)$$

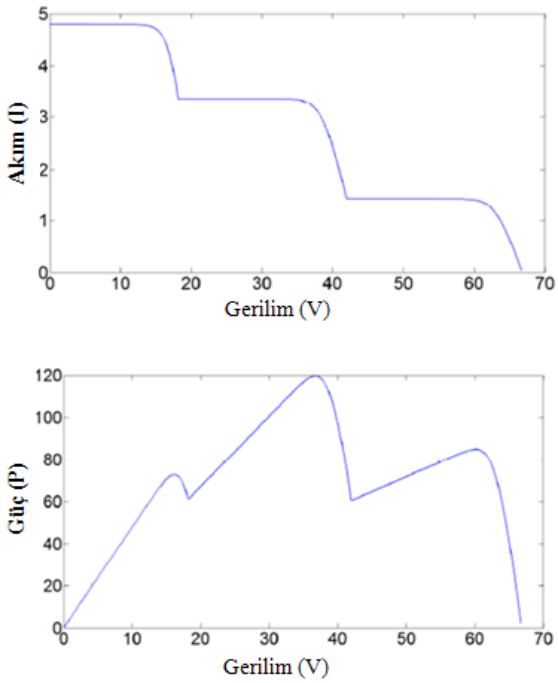
$$V = -\beta(T_c - T_{cr}) - R_s\Delta I + V_r \quad (2,3)$$

Güneş panelleri düşük akım ve gerilim oranına sahip olmakta ve paralel veya seri olarak bağlanabilmektedir. Lyden vd yaptıkları çalışmada 3 adet panelin aynı ve değişken ortamlarda I-V ve P-V karakteristiklerini elde etmiştir [24]. 3 adet panelin seri bağlanması durumunda elde edilen I-V ve P-V karakteristiği Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Aynı ortam şartlarında seri bağlı panellerin tek bir panel karakteristiği gösterdiği, tek maksimum güç noktasının bulunduğu ve gerilime bağlı akım çıkışının birbirinin aynı olduğu Şekil 2.1'de görülmektedir. Bu durum panellerin güç çıkış karakteristiğini basitleştirmekte ve sistemin kontrolünü kolaylaştırmaktadır.

Güneş panelleri eşit ortam şartlarına sahip olmadıklarında, örneğin; panellerden biri veya birkaçı gölgelendiğinde önemli bir kısmı gölgelenmiş gibi güç çıkışı azalmakta ve I-V karakteristiği değişken yapıya sahip olmaktadır (Şekil 2.3). Birden fazla maksimum güç noktası bulunması durumunda ortak güç mevcut maksimum güç noktaları arasında bir değer almaktadır. Bu durum sistemin verimini düşürmekte ve kontrolü zorlaştırmaktadır. Kontrolü zor ve birden çok maksimum güç noktası içeren sistemlerde ortak güç noktası bulmak amacıyla elektriksel veriler yerine çevre koşulları kullanılmaktadır. Bu durumda maksimum güç noktası, aydınlatmaya ve sıcaklığa bağlı olarak bulunmakta ve sistemde yer alan kısmen gölgelenme gibi küçük çaplı problemler atlanarak sistemin daha verimli çalışması sağlanmaktadır.



Şekil 2.2. Üç adet panelin I-V ve P-V karakteristikleri [24]



Şekil 2.3. Üç panelin kısmen gölgeli ortamda I-V ve P-V karakteristikleri [24]

Güneş panelleri, kullanılan yarı iletken malzemeye ve modele bağlı olarak farklı teknolojilerde üretilmektedir. Üretilen malzemenin kalitesine (neme duyarlılık, verimlilik, kullanım ömrü vb.) bağlı olarak güneş modülünün karakteristiği değişmektedir. Panel üreticileri temin ettiği malzemenin teknik

verilerini içeren bilgileri paylaşarak tüketiciye yol göstermektedir. Güneş sistemlerinin kurulumunda veya planlanmasında panellere ait teknik verilerin kullanılması, farklı hava koşullarından veya panel karakteristiğine bağlı sınır değerlerden kaynaklanan olası problemlerin önüne geçmektedir.

Güneş sistemlerinin elektriksel karakteristiğini belirleyen önemli etkenlerden biri de arıza durumudur. Sararma, çizilme, çatlama, leke, panellerin kayması, gölgelenme etkisi ve hücre yanması gibi meydana gelebilecek olumsuz olaylar güneş sistemlerinin karakteristiğini etkilemekte, ömrünü ve verimini azaltmaktadır. Güneş panellerinin muhtemel olumsuzluklara karşı mukavemetini artırmak amacıyla çeşitli testler yapılır. Gözle kontrol, kapalı ve açık ortamda güç ölçümü, kızılötesi görüntüleme, termal görüntüleme, ultrasonik titreşim uygulama ve aydınlatma testleri [90] panel kalitesini belirlemek için yapılan testlerdendir. Bu testler laboratuvar ortamında yapılmakta ve bu testlerden yeterlilik alan panellere 20 yıla kadar garanti verilebilmektedir.

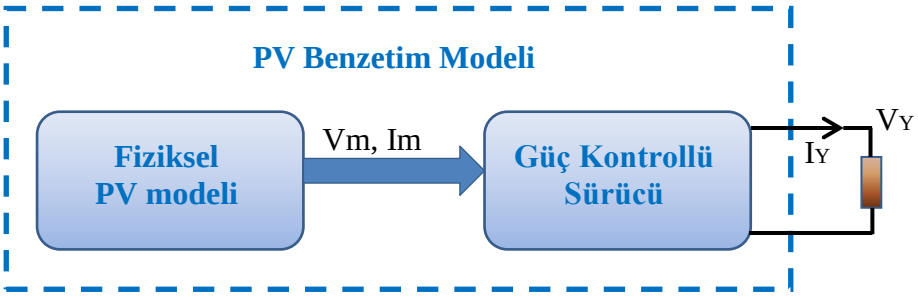
2.2. Güneş Enerjisi Benzetim Modeli

Güneş, enerji potansiyeli ve kolay dönüşümü nedeniyle YEK'ler arasında yer alan en önemli kaynaklardandır. Güneş enerjisi, kesintili ve düzensiz enerji kaynağı olmasına rağmen gün boyu kullanılabilir olması nedeniyle yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisinin temiz enerji kaynağı olması yani çevreye zarar vermemesi ise bir diğer önemli avantajıdır. Güneş sistemlerinde, enerjinin üretim merkezi modüllerdir. Modüllerde üretilen enerjinin gerilim ve akım değerleri sıcaklık ve aydınlatma değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Panel benzetim modellerinin kullanılabilir seviyede olması karakteristik özelliklerin doğru uygulanmasına bağlıdır. Modüllerde üretilen enerji lineer olmayan karakteristiğe sahip olduğundan modelleme için gerçek zamanlı veriler kullanılmaktadır. Panellerin modellenmesinde gelişmiş matematiksel eşitliklerin [91] kullanılması durumunda, benzetim ortamında tasarlanan modeller gerçek zamanlı verileri karşılamayabilmektedir.

Matlab/Simulink benzetim programı, sahip olduğu geniş kütüphane sayesinde kullanıcılarına yeni modeller tasarlama imkanı sunmakla beraber var olan çalışmalar üzerinden yeni yöntemlerin analiz edilmesinde de kolaylık

sağlamaktadır. Literatürde, güneş panellerini Matlab/Simulink benzetim ortamında modelleyen birçok çalışma vardır [91-95]. Bu çalışmalarda sıcaklık ve aydınlatma değerlerine bağlı olarak panelin ürettiği enerji akım-gerilim karakteristiğine bağlı olarak bulunmuş ve güç dönüştürücüleri üzerinden farklı yükler beslenerek benzetim modellerinin yeterliliği tartışılmıştır. Güç entegrasyonu ve mevcut şebekeye uyum problemleri bu modeller kullanılarak incelenebilmektedir. Ayrıca güneş sistemlerinin geçici ve kararlı hal analizleri bu modeller üzerinden yapılabilmektedir.

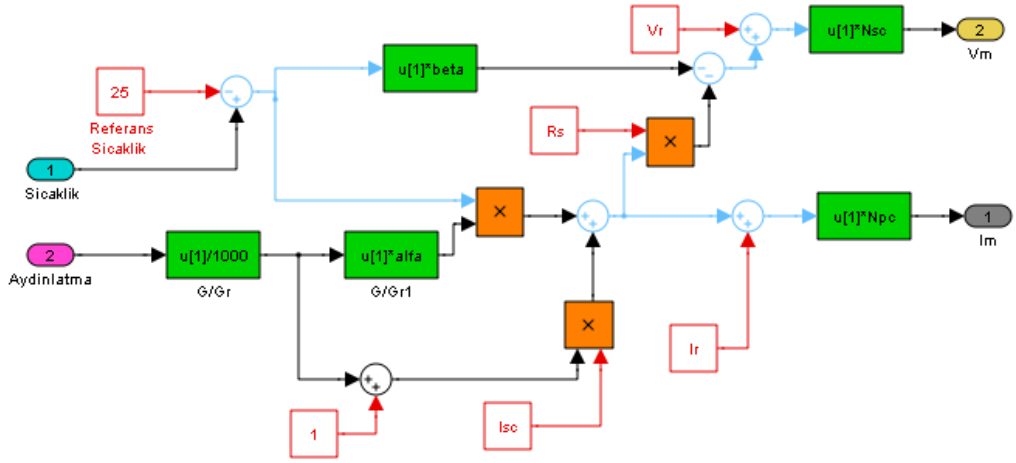
Keleş vd. yaptıkları PV benzetim modelinin [96] blok diyagramı Şekil 2.4'te gösterilmektedir. İlk blokta, panelin fiziksel tepkileri teorik bilgilere uygun olarak modellenmiştir ve çıkış değerlerini anma akım ve gerilim değerleri oluşturmaktadır. İkinci blokta I-V karakteristiğine bağlı olarak yük için gerekli gücü kontrol eden sürücü yer almaktadır. Sınır değerler arasında yer alan talep değişimine akım ve gerilim değerleri ayarlanarak cevap verilmektedir. Ayrıca güç çıkışı, yükün çektiği nominal güçle sınırlanarak yük kontrolü sağlanmaktadır.



Şekil 2.4. Güneş sistemlerinin blok diyagramı

Şekil 2.5'te güneş panellerinin matematiksel benzetim modeli gösterilmektedir. Önceki bölümde tanımlanan devre denklemleri kullanılarak oluşturulan benzetim modelinin giriş değerlerini sıcaklık ve aydınlatma oluşturmaktadır. N_{sc} seri bağlı panel sayısını göstermek üzere, çıkış gerilimi seri bağlı panellerin gerilimleri toplamına eşittir. Aynı şekilde N_{pc} paralel bağlı panel sayısını göstermek üzere, çıkış akımı seri bağlı panellerin çıkış akımları toplamına eşittir. Panellerin aynı çevre koşullarında yer aldığı ve aynı karakteristiğe sahip olduğu kabul edildiğinden her bir panelin çıkış akım ve gerilimi eşittir. Bu yüzden sistemin akım ve gerilim değerleri tek tek toplanmak yerine ilgili panel sayısı ile

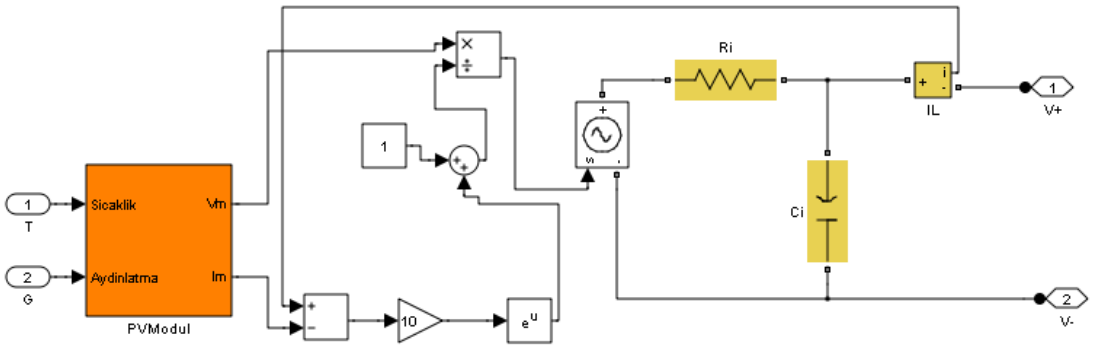
çarpılarak bulunmuştur. Diğer elektriksel ifadeler bir önceki bölümde ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. Referans değerler için literatürde genel kabul görmüş sabit değerler atanmıştır. Teknik kayıpların yer almadığı modelde güneş paneli ideal olarak kabul edilmektedir. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştüğü bu aşamada güç kontrolü olmadığından çıkış parametreleri olan akım ve gerilim değerleri düzensizdir.



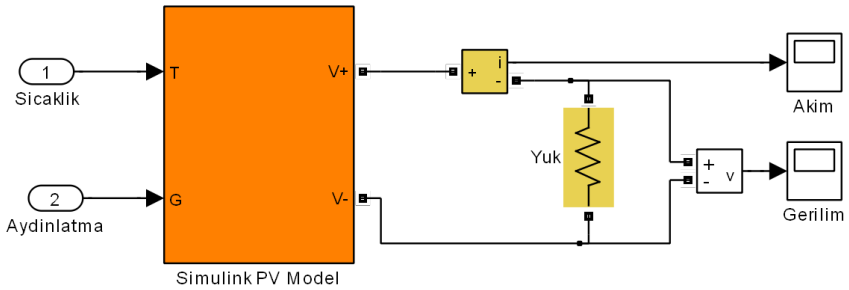
Şekil 2.5. Güneş panellerinin matematiksel modeli [96]

Güneş sistemine bağlı yükü kontrol etmek amacıyla güç kontrol katmanına ihtiyaç vardır. Bu katmanda yükü beslemek için yeterli güç sağlanmakta ve üretilen maksimum güç hesaplanarak güneş sisteminin verebileceği maksimum güç belirlenmektedir. Güç kontrollü sürücüde maksimum güç seviyesini belirlemek amacıyla ilk katmandan elde edilen nominal akım ve gerilim değerleri kullanılmaktadır. Güç kontrolünde, kontrollü akım kaynağı kullanılmıştır. Sigmoid fonksiyonuna bağlı olarak güç değeri belirlenmekte ve sistemin verebileceği maksimum güç değeri üretilen maksimum güçle sınırlandırılmaktadır. Ayrıca sınır değerler arasında yer alan güç değerlerini sağlamak amacıyla güneş sisteminin I-V karakteristiği kullanılmaktadır.

Yukarıda tasarlanan güneş PV modülün, katmanları birleştirilerek örnek bir güneş sistemi tasarlanmaktadır. Şekil 2.7'de güneş panellerinden ve sabit yükten oluşan örnek sistem gösterilmektedir. Yük için 4,5 ohm'luk sabit direnç kullanılmaktadır. Referans sıcaklık $25^{o}C$, referans aydınlatma 1000 W/m^2, R_i ve C_i değerleri sırasıyla 1 ohm ve 10^{-2} F ve panelin nominal gerilimi 17,1 V'dir.

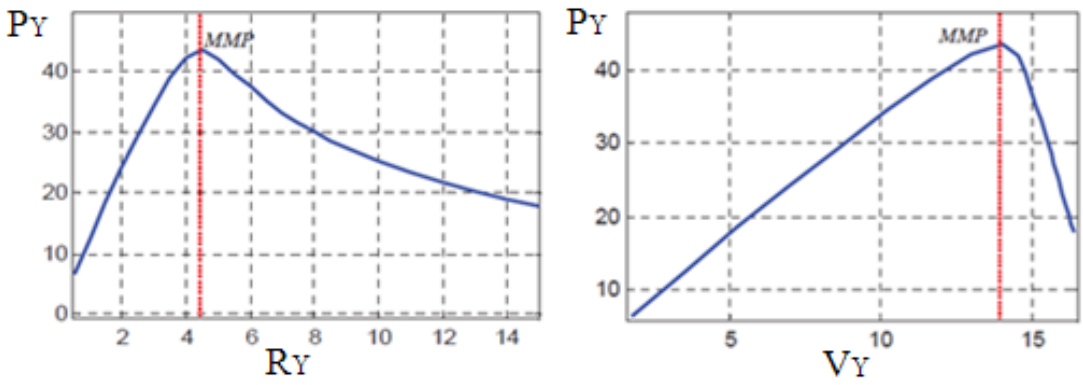


Şekil 2.6. Güç kontrollü sürücünün Matlab/Simulink benzetim modeli [96]



Şekil 2.7. DA yük bağlı güneş sisteminin Matlab/Simulink benzetim modeli [96]

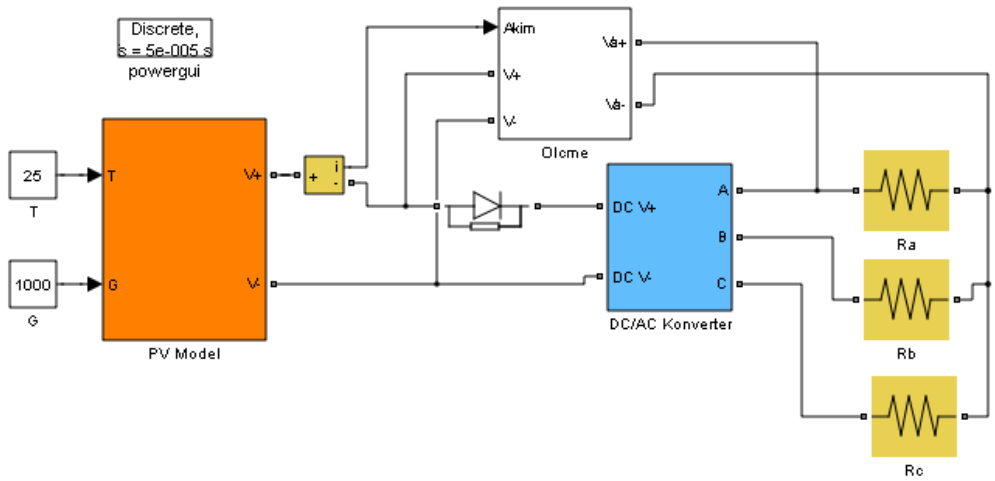
Sistem, yaklaşık olarak 0,05 saniyelik geçici hal görüldükten sonra sürekli hale geçmektedir. Sistemin geçici hal süresini belirleyen değerler R_i ve C_i değerleridir. Bu değerler ayarlanarak sistemin zaman sabiti ayarlanabilmektedir. Şekil 2.8'de sistemin güç-yük direnci ve güç-yük gerilimi eğrileri gösterilmektedir. Sistem maksimum güce 4,2 ohm ve yaklaşık olarak 14 V seviyelerinde ulaşmaktadır. 40 watt'ın üzerinde güç sağlayan sistemin çalışma değerleri, sistemi oluşturan panellerin nominal değerleri arasındadır.



Şekil 2.8. Direnç ve gerilime bağlı olarak güç değişimi [96]

Benzetim modeli üzerinden yapılan uygulamada amaç güneş sistemini gerçek zamanlı bilgilerle analiz etmektir. Yapılan analizler sonucunda panel güç çıkışının gerçek zamanlı verilerle örtüştüğü görülmektedir. Yük için gerekli güç sağlanırken sistemin maksimum güç sınırları dışına çıkmadığı görülmektedir. Sistemin kontrolünde kullanılan sigmoid fonksiyonun etkinliği bu uygulamadan çıkarılabilecek bir diğer sonuçtur.

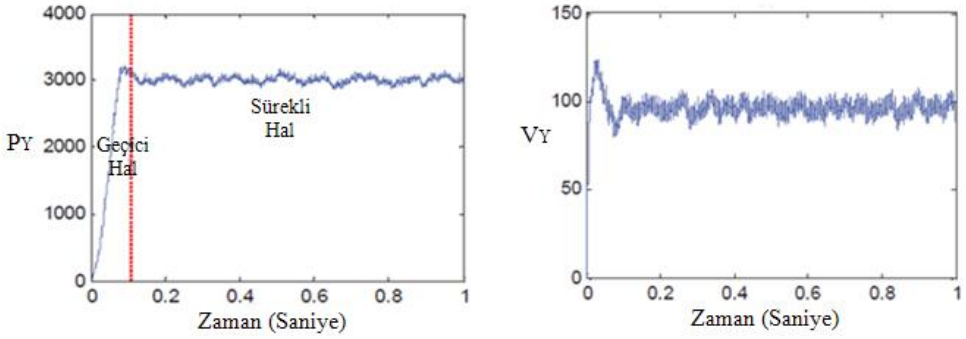
Tasarlanan benzetim modelinin piyasa koşullarında yeterliliğini test etmek amacıyla farklı yüklerin bağlı olduğu durumlar analiz edilmelidir. Alternatif akım çeken tek fazlı ve üç fazlı yükler piyasada sık rastlanan yüklerdendir. Şekil 2.9'da üç fazlı yükün bağlı olduğu bir güneş sistemi görülmektedir. Üç fazlı yükler alternatif akımla beslendiğinden güneş sisteminin çıkışında DA/AA inverter kullanılmaktadır. DA/AA dönüştürücünün kaliteli enerji sağlayabilmesi için giriş geriliminin üretici tarafından belirtilen seviyenin altına düşmemesi gerekir. Bu durumdan anlaşılacağı üzere; güneş sistemleri alternatif yükleri beslemeleri durumunda, sistemin sınır değerleri belirlenirken DA/AA dönüştürücünün de sınır değerleri göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2.9. Üç fazlı dengeli yük bağlı güneş sisteminin benzetim modeli [96]

Şekil 2.10'da üç fazlı yük bağlı olan güneş sisteminin zamana bağlı güç ve gerilim değerleri görülmektedir. Sistemde fazladan güç dönüştürücü olması, tek fazlı sisteme nispeten, geçici hal süresini artırsa da uygulamada kabul edilebilir seviyededir. Yapılan iki uygulamadan anlaşılacağı üzere tasarlanan güneş sistemi benzetim ortamında yapılacak farklı güç deneylerinde kullanılabilecek

yeterliliktedir. Farklı hava koşullarını değerlendirmek için sıcaklık ve akım değerlerini, güç ölçeğini değiştirmek için ise panel sayısını değiştirmek yeterli olacaktır.



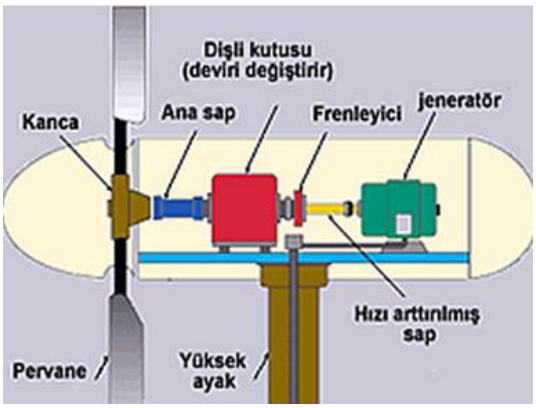
Şekil 2.10. Üç fazlı dengeli güneş sisteminin güç ve gerilim çıktıları [96]

2.3. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjiyi mekanik aksam yardımıyla elektrik enerjisine dönüştüren enerji santralleridir. Rüzgar türbinlerinde elektrik enerjisi, rotora bağlı kanatların rüzgarla dönmesi sonucunda elde edilmekte ve genel olarak 10 kW ile 6 MW arasındaki güçlerde kurulmaktadır. Rüzgar türbinlerinde senkron veya asenkron jeneratörler kullanılabilmektedir. Senkron jeneratörler güç elektroniği elemanları vasıtasıyla doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Türbin karakteristiğine bağlı olarak yetersiz rüzgar olması durumunda, rüzgar santrallerinde enerji üretimi yapılmamaktadır. Türbinler, panellere benzer şekilde harici yakıta ihtiyaç duymasa da periyodik bakımlarının zamanında yapılması enerji verimliliği açısından önemlidir [97].

Son yıllarda alınan mesafeler sayesinde rüzgar türbinleri enerji temininde önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Rüzgar türbini piyasası geçen 5 yıl içinde her yıl %30 oranında büyüyerek elektrik üretiminde önemli bir rol kazanmıştır [98]. Rüzgar türbinlerinin ana bileşenleri Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Türbin kanatları rüzgar akımıyla döner ve dönme hareketi ana şafta aktarılır. Şafttaki dönme hareketi dişli kutusuna iletilir. Dişli kutusu değişik çaplarda çarklardan oluşur ve devir sayısını arttırır. Oluşabilecek aşırı hızı,

frenleyici önler. Jeneratöre gelen kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek rüzgardan elektrik enerji elde edilir. Rüzgar türbinleri, rüzgar engelleyici nesnelerden (bina, ağaç vb.) korunmak amacıyla yüksek kuleler üzerine konulur. Ayrıca yüksek mesafelerde artan rüzgar hızına bağlı olarak üretilen enerji de artmaktadır.



Şekil 2.11. Rüzgar türbinlerinin ana bileşenleri [97]

Rüzgar türbinlerinin karakteristik özellikleri geçici ve sürekli hal durumlarına göre farklılık göstermektedir. Denklem 2.4'te rüzgar türbinlerinin sürekli haline ilişkin eşitlik gösterilmektedir. P_m türbinin ürettiği mekanik güç, ρ hava yoğunluğu, A türbin kanatlarının kapladığı alan, C_P rüzgar türbinin performans katsayısı, v rüzgar hızı, λ rüzgar hızı ile rotor hızı arasındaki oran, β kanat açısını göstermektir. Denklem 2.5'te eşitliği verilen moment katsayısı (C_m) kullanılarak Denklem 2,6'da verilen türbinin ürettiği moment (T_m) bulunmaktadır.

$$P_m = \frac{1}{2}\rho A C_P(\lambda,\beta)v^3 \tag{2,4}$$

$$C_m = \frac{C_P}{\lambda} \tag{2,5}$$

$$T_m = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 C_m v^2 \tag{2,6}$$

Rüzgar türbinleri teorik olarak, rüzgarın sahip olduğu kinetik enerjinin tamamını elektrik enerjisine dönüştürememektedir. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine maksimum dönüşme oranını ifade eden orana Betz katsayısı (C_P)

denmektedir [99]. Teorik olarak Betz katsayısı 0,593 olmakla birlikte uygulamada bu oran %35-45 arasındadır.

Rüzgardan elden edilen elektriksel güç, türbin kanatlarının süpürdüğü alanla yani rotor çapının karesiyle doğru orantılıdır. Bu yüzden, rotor yarıçapının belirlenmesi türbin tasarımında temel adımlardan biridir. Rotor yarıçapının etki ettiği bir diğer faktör kanat ağırlığıdır. Türbin kanatlarının süpürdüğü alan arttıkça, kullanılan malzemeye bağlı olarak kanat ağırlığı da artmaktadır. Rotor çapının statik ve elektriksel hesaplamalarda temel parametre olması, rüzgar türbinlerinin tasarımının bir bütün olarak ele alınmasını gerektirmektedir. Rüzgar sistemlerinin maliyeti, verimliliği ve sürdürülebilirliği açısından ilgili alanlarda yapılan çalışmaların birbiriyle uyumu önem arz etmektedir.

Rüzgar türbinleri yatay ve dikey eksenli olarak tasarlanabilmektedir. Yatay eksenli türbinlerin en büyük avantajı, rüzgar yönüne bağlı olarak türbin yönünün kontrol edilmesidir. Bununla birlikte kanat açısı ayarlama imkanı, uzun mesafeli kuleler sayesinde daha hızlı ve yoğun rüzgar hasadı ve yüzeyde az yer kaplama gibi önemli avantajları da vardır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin dezavantajları; ağır ve büyük çaplı kanatlar ve kulelere sahip olduklarından imalatı, taşınması, kurulumu ve bakımı pahalı ve zordur. Ayrıca rüzgar yönüne bağlı olarak kanatların sapmasını sağlamak amacıyla kontrol ünitesine ihtiyaç vardır.

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin karakteristiğini belirleyen etkenlerden biri kanat sayısıdır. Rüzgar türbinleri bir, iki ve üç kanatlı olarak tasarlanmaktadır. Tek kanatlı türbinlerin yapısı basit ve ekonomik olmalarına karşın yüksek güçlü santrallere uygun değildir. Tek kanatlı türbinler arazi sulamada, deniz suyu arıtmada ve elektrik şebekesine uzak bölgelerin elektrik temininde kullanılmaktadır. İki ve üç kanatlı türbinler tek kanatlı türbinlere nazaran daha yüksek güçlerde tercih edilir. Kanat sayısı arttıkça türbinlerin yapısı daha karmaşık hale gelmekte, bakımı ve kurulumu zorlaşmakta ve maliyeti artmaktadır.

Dikey eksenli türbinlerin en büyük avantajı rüzgar yönü için sapma kontrolü gerektirmemesidir. Sabit rotor ekseni sayesinde ağaç ve bina gibi rüzgar engelleyici nesnelerin bulunduğu yerlerde kullanılabilirler. Kule ve benzeri montaj donanımı gereksinim olmadığından herhangi bir zemine montaj edilebilirler. Dikey eksenli türbinlerin bakımının kolay ve gürültüsünün az olması önemli avantajları olmasına karşın düşük verimleri en önemli dezavantajlarıdır.

Ayrıca kütlesinin azlığı nedeniyle yüksek irtifalarda rüzgar hasadı için uygun değillerdir. Dikey eksenli türbinler de yatay eksenli türbinler gibi değişik kanat sayısında ve modelinde tasarlanabilmektedir (Şekil 2.12).

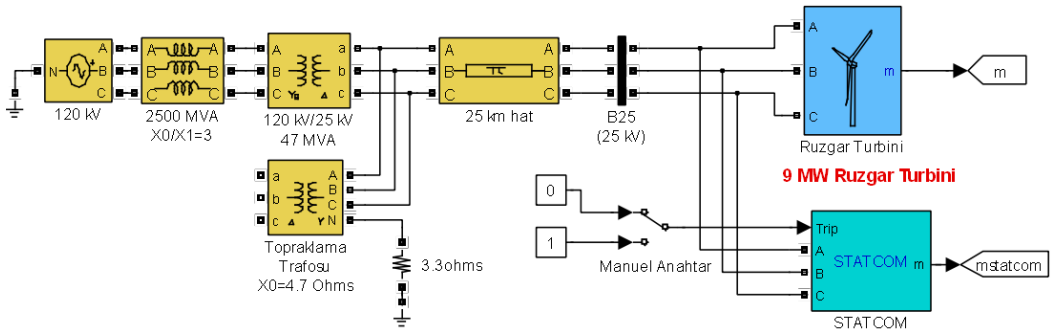


Şekil 2.12. Dikey eksenli rüzgar türbini modelleri

Rüzgar türbinlerinde verimi etkileyen faktörlerden biri de kanat açısıdır. Rüzgardan maksimum derecede güç çekilebilmesi için rüzgar türbinin kanat yapısının optimum düzeyde tasarlanması gereklidir. Kanat elemanına etki eden kuvvet ve momentler, kanat profilindeki kaldırma ve sürükleme kuvvetlerine baglıdır. Her bir kanat elemanının bagımsız hareket etmesi kabulünden dolayı her bir kanat elemanı üzerine gelen kuvvetler, bölgesel rüzgâr hızları ile hesaplanır [100]. Bu analizde kanadın N tane parçaya veya elemana bölündügü kabul edilmektedir ve her bir kanat elemanı için kabul edilen aerodinamik kuvvet, kanat elemanları için adapte edilen aynı kesitin uygun kanat profilindeki kuvvetler olarak düşünülmektedir.

2.4. Rüzgar Türbinlerinin Benzetim Modeli

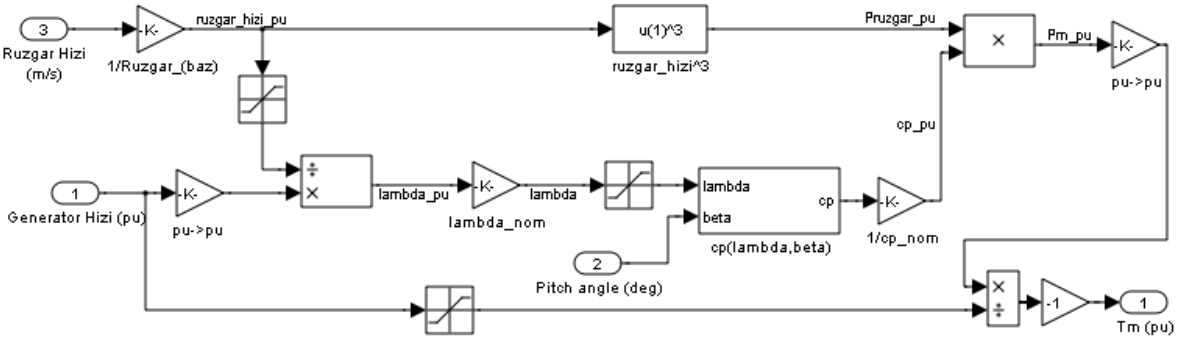
Matlab/Simulink benzetim programında yer alan kütüphaneler, geliştirilebilir tasarım için uygun modeller sunmakta ve bu modeller özel amaçlar için kullanılabilmektedir [101-103]. Şekil 2.13'te Matlab/Simulink programının örnek modelleri arasında yer alan şebekeye bağlı rüzgar türbini gösterilmektedir [103]. Rüzgar santrali, altı adet 1,5 MW'lik rüzgar türbininden oluşmakta ve dağıtım şebekesine 25 kV'lık gerilim seviyesinde bağlı bulunmaktadır. Rüzgar santralinde üretilen enerji 25 km uzunluğunda bir hat üzerinden 120 kV'lık iletim şebekesine aktarılmaktadır.



Şekil 2.13. Rüzgar türbinine bağlı şebekenin benzetim modeli [103]

Örnek modelin rüzgar türbinlerinde sincap kafesli asenkron jeneratör kullanılmaktadır. Stator sargıları doğrudan 60 Hz'de çalışan şebekeye bağlı olmakta ve rotor, değişken kanat açısına sahip rüzgar türbini tarafından sürülmektedir. Aşırı rüzgar hızında jeneratör güç çıkışını kontrol etmek amacıyla kanat açısı kontrol edilmektedir. Jeneratörün, enerji üretimi yapabilmesi için senkron hızın üzerinde çalışması gerekir. Bu yüzden jeneratör hızı 1-1,05 pu değerleri arasında yer alması istenmektedir. Her bir rüzgar türbini koruma sağlamak amacıyla gerilim, akım ve makine hızını görüntüleme ünitesine sahiptir. Asenkron jeneratörden çekilen reaktif enerji kısmen, her türbine bağlı (1,5 MW'lik türbin için 400 kVAr), kapasite bankasından sağlanmaktadır. Geriye kalan reaktif güç gereksinimi ise STATCOM tarafından karşılanmaktadır.

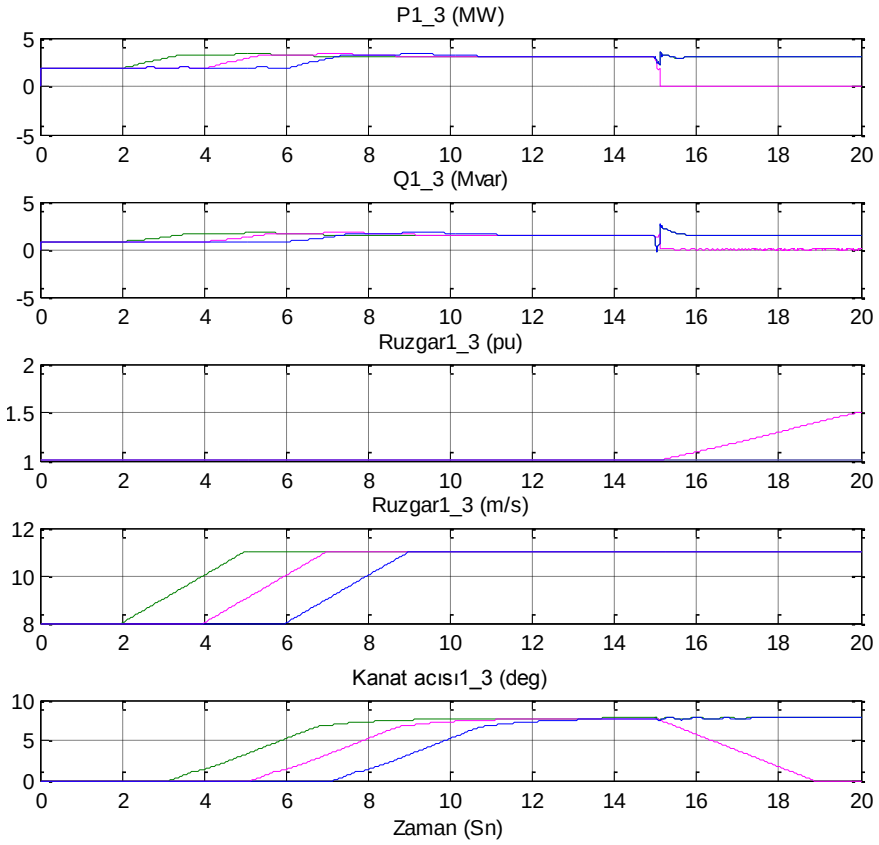
Rüzgar santralinin içerisinde rüzgar türbini modeli yer almaktadır (Şekil 2.14). Model içerisinde yer alan türbin ve jeneratör modellerinin parametrik değerleri bir üst modelde belirtilmektedir. Her bir rüzgar türbini bloğu iki adet 1,5 MW'lik rüzgar türbinini temsil etmektedir. Türbinin menüsü açıldıktan sonra türbine ait karakteristik özellikler kontrol edilebilmekte ve değiştirilebilmektedir. Türbin hızına bağlı mekanik güç 4 m/s ile 10 m/s değerleri arasında tanımlanmaktadır. Nominal rüzgar hızında (9 m/s) elde edilen nominal türbin gücü 3 MW'dir (1 pu=3 MW). Rüzgar türbini modeli SimPowerSystems kütüphanesinden, STATCOM modeli ise FACTS cihazları kütüphanesinden alınarak kullanılmaktadır. Sistemde, benzetim süresi boyunca etkili olan geçici hal modeli tanımlanabilmektedir. Bu örnek programda benzetim süresi 20 saniye olup benzetim sonuçları her bir parametre için ayrı ayrı gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Rüzgar türbininin matematiksel benzetim modeli [103]

Örnek benzetim modelinde her bir türbine uygulanan rüzgar hızı kontrol edilmektedir. Rüzgar hızı başlangıçta 8 m/s'dir (Şekil 2.15). Sırasıyla 2, 4 ve 6'ıncı saniyelerde her bir türbine gelen rüzgar hızı 3 saniye içinde artarak 11 m/s'ye ulaşmaktadır. 15. saniyede 2. türbinin gerilim çıkışında ani bir arıza meydana gelmektedir. Şekil 2.15'de görüldüğü üzere arıza anından itibaren 2. türbin grubunda üretim dururken 1 ve 3. türbin gruplarında üretim olağan şekilde devam etmektedir.

Matlab/Simulink benzetim programında yer alan örnek rüzgar türbini modelinde aktif ve reaktif güç, rüzgar hızı jeneratör hızı ve kanat açısı programın çalışma süresince gözlemlenebilmektedir. Rüzgar hızının düzgün karakteristiği, elde edilen güce yansımakta ve her bir rüzgar türbini grubunun nominal güç değerine ulaşması yaklaşık 8 saniye sürmektedir. Başlangıçta kanat açıları sıfır derece konumundadır. Çıkış gücü nominal değerleri aşınca kanat açısı sıfır dereceden sekiz dereceye ayarlanarak üretilen güç kontrol altında tutulmaktadır. Üretilen aktif güç arttıkça reaktif güç gereksinimi de artmaktadır. Nominal güç değerinde her grup 1,47 MVAr reaktif güç çekmektedir. Rüzgar hızı 11 m/s olunca çekilen reaktif güç değeri 1,62 MVAr değerine ulaşmaktadır. 15. saniyede 2. türbinin çıkışında faz-faz arızası meydana gelmektedir. Arızadan hemen sonra anahtarlama devreye girerek 15,11 saniyede türbin koruma altına alınmaktadır. 2. türbinin devre dışı kalması diğer türbinleri etkilememekte ve olağan çalışma devam etmektedir.



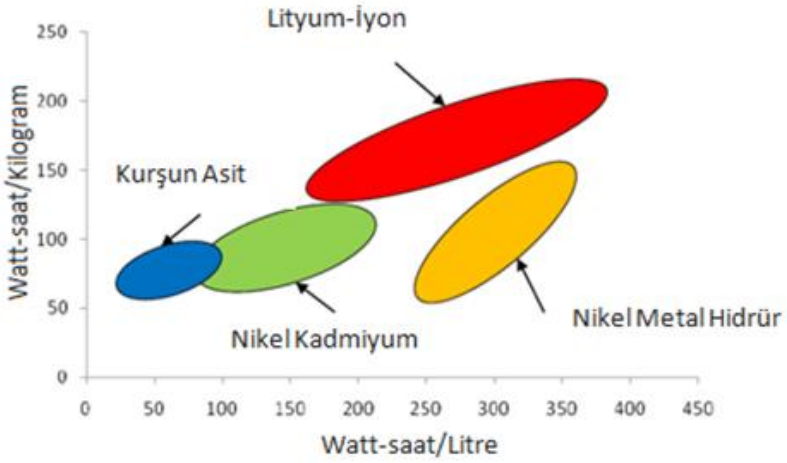
Şekil 2.15. Örnek rüzgar türbinine ait benzetim modelinin bazı çıktıları [103]

2.5. Li-on Batarya

Bataryalar kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren enerji depolama cihazlarıdır. Bataryalar genel olarak elektrokimyasal hücrelerden meydana gelir. Bu hücreler negatif elektrot (anot), pozitif elektrot (katot) ve anot ve katot arasında yer alan bir elektrolitten (yarı iletken ortam) oluşmaktadır. Pozitif ve negatif elektrotlar birbirine değmeden elektrolit çözelti veya madde içinde bulunurlar. Dışarıdan bu düzeneğe doğrusal elektrik enerjisi uygulandığında, elektrik enerjisi kimyasal enerjiye dönüşür. Dışarıdan bir yük bağlanması durumunda elektrotlar arasında yer alan kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüşür. Birbirinin tersi olan bu iki olay şarj-deşarj döngüsünü oluşturur.

Bataryalarda kullanılan elektrolit malzeme gaz, sıvı veya katı olabilir. Katı elektrolit madde olarak lityum, en hafif metal ve yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir. Bu özellikleri sayesinde lityum yüksek enerji ve güç yoğunluğu tutma kapasitesine sahiptir. Şekil 2.16'da

farklı türden elektrolitlerle yapılmış bataryaların ağırlık ve hacime oranla güç tutma kapasiteleri gösterilmektedir. Lityum-İyon bataryanın hacim ve ağırlığına oranla daha fazla güç tutma kapasitesinin olduğu görülmektedir. Li-on bataryalar diz üstü bilgisayar ve cep telefonları gibi taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.16. Farklı batarya türlerinin enerji tutma kapasiteleri [104]

Şarj edilebilir batarya sistemleri genelde sulu çözeltilerle yapılmaktadır. Yapısı, bolluğu ve çevre dostu olması nedeniyle sulu çözeltilerin bataryalarda çoğunlukla tercih edilmesi ideal elektrolit malzeme olduğunu ispatlamaktadır [104]. Buna rağmen ticari olarak üretilen sulu bataryaların (Pb-asit, Ni-Cd ve Ni-MH) hiçbiri organik elektrolit kullanılan Li-on bataryalar kadar dönüşüm kararlılığına ve enerji tutma kapasitesine sahip değildir. Otomobillerde en çok kullanılan Kurşun-Asit (Pb-asit) bataryalar, ucuz olmaları nedeniyle tercih edilse de düşük enerji yoğunluğu nedeniyle yüksek oranda güç tutma özelliğine sahip değildir. Metal-Hidrid (Ni-MH) bataryalar ise hızlı çözülmeleri nedeniyle yüksek güçlü depolamalarda tercih edilmemektedir [105-107]. Kadmiyum ve kurşunun çevreye zarar vermeleri nedeniyle Nikel-Kadmiyum (Ni-Cd) ve Kuşun-Asit (Pb-Asit) bataryaların kullanım oranı zamanla azalmaktadır [108]. Ayrıca Li-on bataryalar diğer bataryalara nazaran en az üç kat fazla elektrokimyasal potansiyel (3,6 V) sağlamaktadır. Li-on bataryalar, Ni-Cd bataryalar gibi önceki şarj ve deşarj karakteristiğinden etkilenmemektedir. Bu önemli avantajlara karşın yanıcı ve pahalı organik elektrolit malzeme kullanımı Li-on bataryaların en önemli

dezavantajıdır. Bu yüzden yüksek güçlü enerji depolama uygulamalarında organik elektrolit kullanılan Li-on bataryalar diğer bataryalara nazaran pahalı ve daha az güvenli olmaktadır. Bu problem ilk defa 1995 yılında rapor edilen sulu elektrolitlerin (lityum manganez oksit-katot, vanadyum oksit-anot, lityum nitrat-sulu elektrolit) kullanımı ile kısmen çözülmüştür [109-112].

Li-on bataryalar yüksek güç ve enerji yoğunluğuna sahip olmaları nedeniyle zamanla diğer bataryaların kullanım yerini almaktadır. Li-on bataryalar toplam batarya piyasasının yaklaşık %20'sinde, taşınabilir bataryaların ise %75'inde kullanılmaktadır [113]. Li-on batarya piyasası 2008 yılında küresel ölçekte, yıllık %20 artmıştır [114]. Jung vd yaptıkları piyasa analizinde, 2010 yılında YEK'lerde kullanılan batarya değerinin 599 milyon dolar olduğunu ve bu değerin 2020 yılında 2,6 trilyon dolara çıkacağını belirtmiştir [115]. Ayrıca 2015 yılına kadar araçlarda kullanılan Li-on batarya değerinin 8 trilyon dolara ulaşması beklenmektedir [116]. Yeni nesil teknolojik uygulamalarda Li-on bataryaların yüksek güç tutma kapasitesinin büyük bir avantaj sağladığı görülmektedir.

Li-on bataryaların taşınabilir elektronik cihazlarda kullanımı ile beraber güvenlik tedbirleri önem kazanmıştır. Cep telefonlarında ve elektrikli araçlarda kullanılan Li-on bataryaların yanmasına ve patlamasına ait birçok olay rapor edilmiştir [117]. Bu aksaklıkların genellikle ısınma kaynaklı olduğu görülmektedir. Li-on bataryaların kullanım oranına nazaran yanma ve patlama olayları nadiren meydana gelse de; bu olaylar, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda, Li-on bataryaların güvenlik limitinin kısıtlı olduğunu göstermektedir. Geleneksel Li-on bataryalarda tutuşabilen organik çözücüler hücre kopmasına veya ısıl kaynaklı darbelerden kaynaklanan kısa devre durumunda patlamaya neden olabilmektedir. Ayrıca aşırı şarj durumu malzemenin yanmasına neden olabilmektedir.

Li-on bataryalarda dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri ortam sıcaklığıdır. Olağan çalışma koşullarında elektrolit malzeme kimyasal reaksiyon sonucunda meydana gelen ısıyı yalıtabilmektedir. Ancak reaksiyonların sürekli ve yüksek seviyede olması durumunda, çözeltinin yapısı bozulduğundan aşırı ısınma meydana gelmekte ve bataryanın kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Muhtemel aşırı ısınma sorunlarından kaçınmak amacıyla depolama yönetimi sistemleri kurulmaktadır. Depolama yönetiminde gerilim,

akım, sıcaklık değerleri sensörler yardımıyla analiz edilmekte ve gereken tedbirler (Enerjiyi kesme, soğutma sistemini devreye alma vb) otomatik olarak devreye alınmaktadır. Güvenlik sisteminin Li-on bataryaların güvenliğini artırması avantaj iken sistem maliyetini artırması bir dezavantajdır. Aşırı ısınmanın bir diğer çözümü sulu çözeltili Li-on batarya kullanımıdır. Sulu elektrolit malzemenin ısı tutma kapasitesi yüksek olduğundan daha fazla ısıyı bünyesinde tutabilmektedir [118]. Böylece şarj ve deşarj süresince meydana gelebilecek ısınma problemine ekonomik olarak çözüm bulunmaktadır. Ayrıca anot ve katot kutuplarıyla temas halinde olan sulu elektrolit malzeme doğal bir soğutucu görevi görmektedir. Sonuç olarak sulu elektrolit malzemenin kullanılması durumunda harici batarya yönetim sistemine ve soğutma sistemine ihtiyaç kalmamakta; sistemin maliyeti güvenilir bir şekilde azaltılmaktadır.

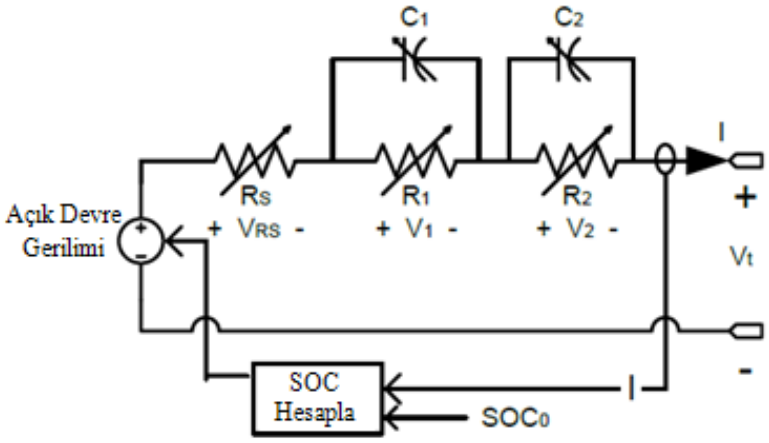
2.6. Li-on Batarya Benzetim Modeli

Şarj edilebilir bataryalarda elektrolit malzeme olarak farklı elementlerden oluşan kimyasallar kullanılabilmektedir. Bu malzemelerden lityum yüksek güç ve enerji yoğunluğu ve çıkış gerilimi ile diğerlerine oranla daha çok tercih edilmektedir. Özellikle taşınabilir teknolojik cihazların piyasasında açık ara öndedir. Li-on bataryaların gerilim, akım ve şarj durumunu bilmek; tasarım ve işletme aşamasında verimlilik ve güvenlik açısından önem arz etmektedir. Ayrıca bu bilgilerin anlık olarak değerlendirilmesi aşırı şarj ve deşarj gibi istenmeyen olayların önüne geçmek için de gereklidir. Bu yüzden Li-on bataryaların gerçek verilere uygun şekilde modellenmesi tasarım ve işletme açısından önem arz etmektedir.

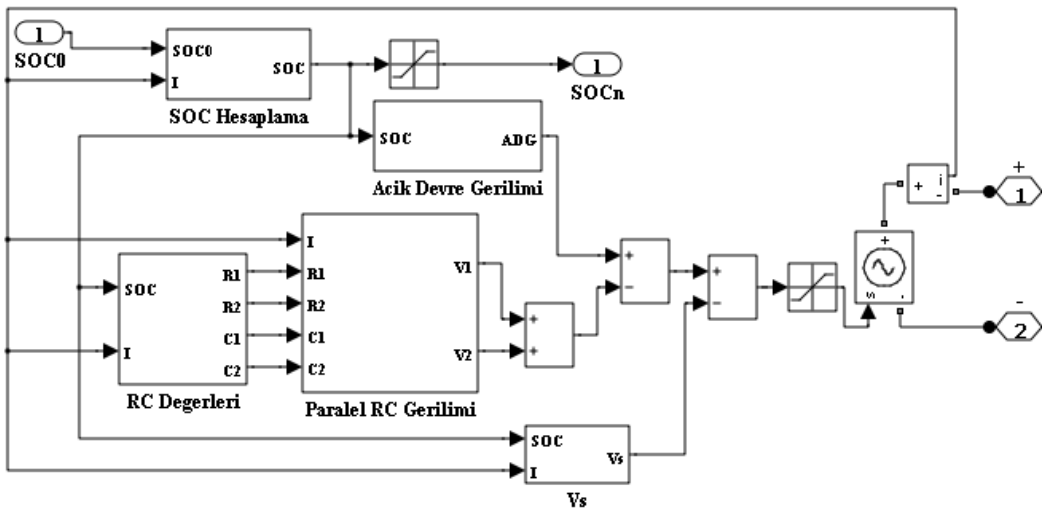
Li-on bataryaların benzetim modeli tasarlanırken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri kolay anlaşılabilir olmasıdır. Böylece farklı amaçlar için tasarlanan devreler amaca uygun şekilde kullanılabilir. Şekil 2.17'de Chen vd Matlab/Simulink ortamında tasarladığı model görülmektedir [119]. Bu modelde DA gerilim kaynağı, kayıpları gösteren direnç ve iki adet paralel RC devresi yer almaktadır. DA gerilim kaynağı, bataryanın açık devre gerilimini göstermektedir. Bataryanın şarj durumu, kapasitelerin değerleri üzerinden belirlenmektedir. Bu modelde batarya parametreleri şarj durumuna ve akıma bağımlı olarak

belirlenmektedir. Çıkış gerilimi bilgisinden bataryanın geçici ve sürekli hal karakteristiği belirlenebilmektedir.

Şekil 2.18'de Li-on bataryanın Matlab/Simulink benzetim modeli gösterilmektedir. Örnek benzetim modeli beş alt sistemden oluşmaktadır: SOC, açık devre gerilimi, RC değerleri, RC gerilimi ve Rs gerilimi hesaplamaları. Hesaplanan gerilim değerini elektriksel bileşene çevirmek amacıyla çıkış geriliminde kontrollü gerilim kaynağı kullanılmaktadır. SOC hesaplamada referans değer çıkış akımıdır, bu değer, çıkış tarafına konulan ampermetreden okunmaktadır. Başlangıç şarj durumunu belirtmek amacıyla SOC0 ve gerçek zamanlı şarj durumunu belirtmek amacıyla SOC ifadeleri kullanılmaktadır.

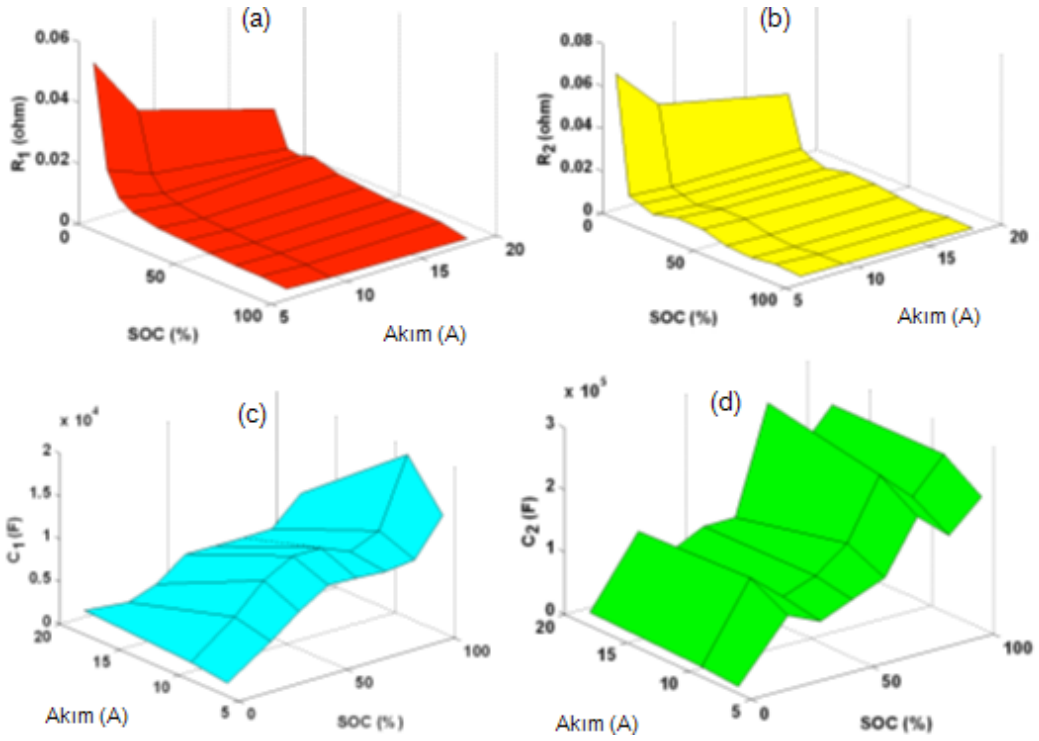


Şekil 2.17. Li-on batarya dinamik eşdeğer modeli [119]



Şekil 2.18. Li-on batarya Matlab/Simulink benzetim modeli [119]

Örnek modelin testinde $LiFePO_4$ bataryanın karakteristik özellikleri; anma gerilimi 3,2 V ve kapasite 18 Amper saat olarak referans alınmaktadır. Yük olarak 120 V, 240A ve 1200 W anma değerlerine sahip IT8514C elektronik yük kullanılmaktadır. Sıcaklık etkilerinden kaçınmak amacıyla ortam sıcaklığı 25 ^0C olarak belirlenmektedir. Batarya karakteristiğini belirlemek amacıyla sürekli deşarj testi uygulanmaktadır. Örnek sistemde batarya şarj durumunun etkisini analiz etmek amacıyla 6A (0,33C), 9A (0,5C) ve 18A (1C) akımlarla sürekli deşarj akımı uygulanmaktadır. Örnek modelin tasarımında akıma bağlı direnç ve kapasite değişimini belirlemek amacıyla optimizasyon yapılmaktadır. Parametrik değerlerin akım ve SOC bağlı değişimi Şekil 2.19'da gösterilmektedir. Elde edilen R_1, R_2, C_1, C_2 eğrileri Matlab/Simulink benzetim ortamında tanımlanarak modellemenin gerçek zamanlı verilere yaklaşması sağlanmaktadır.



Şekil 2.19. Li-on bataryanın parametrik değerlerinin akıma oranla değişimi [119]

Bu bölümde, Li-on bataryanın karakteristik özelliklerini yansıtan örnek dinamik model gösterilmektedir. Bu modelde, alt sistemler yardımıyla detaylı şekilde tasarlanarak, gerçek veriler elde edilmeye çalışılmaktadır. Tasarlanan model diğer devre tasarımlarında kolayca kullanılabilir özelliktedir.

Matlab/Simulink kütüphanesinde hazır bulunan batarya modelinden farklı olarak, örnek modelde batarya karakteristiğinin özellikleri ilgili çıktılar üzerinden analiz yapılabilmektedir. Ayrıca bu bölümde, batarya yönetim sistemlerinin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli noktalar belirtilerek YEK çalışmalarında gerekli olan tasarım sınır koşulları değerlendirilmektedir.

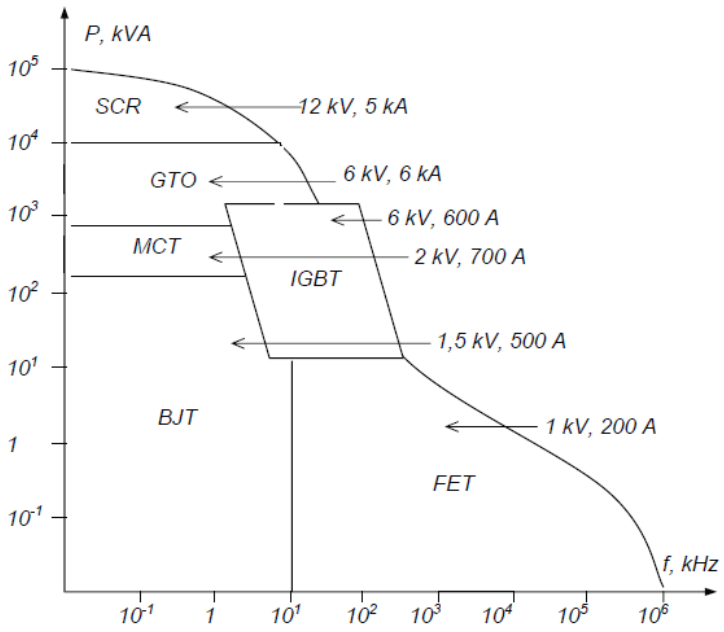
3. AKILLI ŞEBEKELERDE KULLANILAN TEMEL GÜÇ ELEKTRONİĞİ ELEMANLARI

Teknolojik gelişmeler ve YEK kullanımının artması, araştırmacıları ve şebeke servislerini akıllı ve mikro şebekeler gibi yeni enerji kavramlarını üretmeye itmektedir. Yeni enerji kavramları elektrik enerjisine ait üretim, iletim, dağıtım ve tüketim alanlarında enerji verimliliğini ve sürdürebilirliğini artırmaya yöneliktir. Üretimden tüketime kadar bütün elektrik enerjisi formlarında farklılık olduğundan güç elektroniği elemanları güç sistemlerinin değişmez ara elemanı durumundadır. Bu bölümde akıllı şebeke uygulamalarında kullanılan temel güç elektroniği elemanlarının teorisi ve literatüre uygun benzetim modelleri ele alınmaktadır. Bu bölümün sonunda örnek bir uygulama üzerinden test edilen güç elektroniği elemanlarının benzetim modelleri, önerilen yöntemin analizlerinde kullanılmaktadır.

20. yüzyılın ilk yarısında elektronik cihazlarda vakum tüpler kullanılmaktaydı. Vakum tüplerin dahili ısıtıcı gereksinimi, kısa kullanım ömrü, fazla yer kaplaması, fazla ısınma ve bu etkenlere bağlı olarak fazla maliyet gibi dezavantajları vardı. 1947 yılında Amerikan bilim adamlarının kendilerine Nobel ödülü kazandıran germanyum transistoru bulmasıyla yarı iletken devri başlamıştır. Transistor vakum tüpün dezavantajlarını içermediğinden hızla gelişim sağlamıştır. General Elektrik ilk germanyum diyotu 1952 yılında üretmiştir. Texas Enstitüsü sıcaklık performansını ve güvenliği artıran silikonlu transistoru 1954 yılında üretmiştir. 1960'lardan sonra transistor hızla gelişerek zamanla vakum tüplerin yerini almıştır. Bugünlerde güç elektroniği, hızla büyüyerek elektriğin kullanıldığı hemen her alanda gereksinim olarak görülmekte ve cihazların verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Güç elektroniği sistemleri genel olarak AA/DA, DA/AA, AA/AA ve DA/DA güç dönüştürücülerinden oluşmaktadır. Güç elektroniği elemanlarında direnç, kapasite, endüktans, trafo vb. temel elektriksel bileşenlerle beraber yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Yarı iletken malzemeler, amaca uygun kullanım karakteristiğine bağlı olarak farklı özellikler taşımaktadır. SCR, GTO, MCT, IGBT, BJT ve FET yüksek güçlerde yaygın olarak kullanılan yarı

iletken malzemelerdir. Şekil 3.1'de yüksek güçlerde kullanılan yarı iletken malzemelerin frekans ve güce bağlı olarak kullanım alanları gösterilmektedir. SCR nispeten yüksek güçlerde kullanılmasına rağmen yüksek anahtarlama frekanslarında kullanılamadığı görülmektedir. FET ise yüksek anahtarlama frekansı için uygunken nispeten düşük güçlerde kullanılmamaktadır. GTO ve MCT için yüksek frekans daha çok sınırlayıcı olurken IGBT kendine münhasır özellik göstermekte; frekans ve güç bandının ortalarında yer almaktadır. Yarı iletken malzemelerin yüksek güçlerde kullanımı ile beraber güç elektroniği elemanları sadece tüketimde değil aynı zamanda üretim, iletim ve dağıtım alanlarında etkin olarak rol almaktadır. Ayrıca güç elektroniği elemanları, güç dönüşümü için kullanılmakla beraber kontrol tekniklerinin uygulanması, güç entegrasyonu, haberleşme ve güç katsayısı ayarlama gibi sistemlerin güç yönetimi aşamasında da kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.1. Yüksek güçte kullanılan yarı iletken malzemelerin kullanım alanları

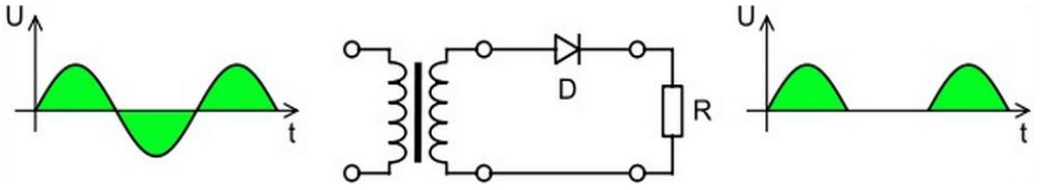
3.1. AA/DA Doğrultucu

Evlere, ticarethanelere ve sanayiye elektrik dağıtımı, alternatif akım (AA) üzerinden yapıldığından kullanıcıların en kolay ulaşabileceği elektrik enerjisi AA formundadır. Buna karşın teknolojik birçok cihazın doğru akıma (DA) uyumlu olması nedeniyle şebekenin sağladığı AA'nın DA'ya dönüştürülmesi gerekir.

AA'nın DA'ya dönüşümüne doğrultma ve işlemi yapan elektronik cihaza doğrultucu denilmektedir. Bu cihazlarda diyot kullanılması durumunda kontrolsüz doğrultucu, transistor kullanılması durumunda ise kontrollü doğrultucu olarak anılmaktadır. Doğrultucuların kullanım amacına bağlı olarak birçok türü vardır. Bunlar orta nokta ve köprü doğrultucular, tek fazlı ve üç fazlı doğrultucular ve yarım ve tam dalga doğrultucular olarak sınıflandırılmaktadır. Doğrultucular mili Watt'lardan mega Watt'lara kadar çıkış gücü sağlayan cihazlar olarak üretilebilmektedir. Genellikle, düşük güç ölçeğinde tek fazlı kaynaklar kullanılırken büyük güç ölçeğinde ise üç fazlı kaynaklar kullanılmaktadır.

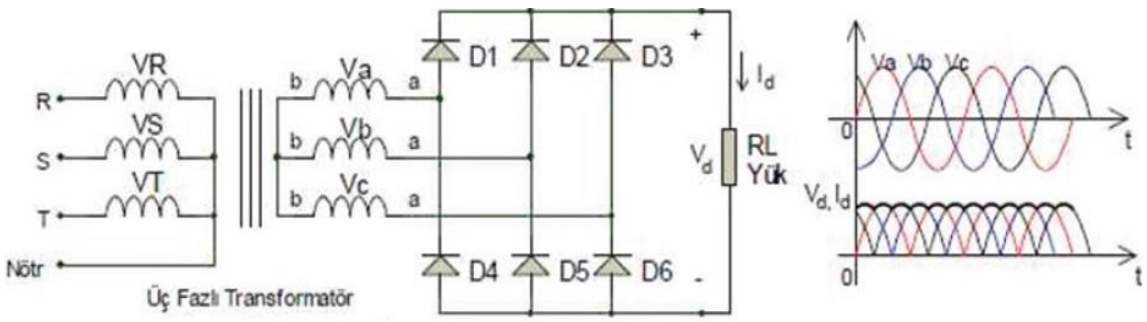
Kaynak gerilim seviyesi elektronik cihazlarda kullanılan gerilim seviyesinden bazen çok fazla olabilmektedir. Bu durumda gerilimi düşürmek amacıyla transformatör kullanılır. Transformatörler kaynağın etkin gerilim değerini, uygun etkin gerilim değerine düşürerek doğrultucuya iletirler. Yüksek verime sahip olan transformatörler idealde kayıpsız olarak kabul edilir. Kaynak tarafında yer alan birinci sargı ile yük tarafında yer alan ikinci sargı arasındaki oran, gerilimlerin dönüşme oranı ile aynıdır. Gerilimin düşme oranı kadar akım arttığından dönüşen toplam güç aynı kalmaktadır. Bir doğrultucuya bağlanabilecek muhtemel yükler genellikle üç grupta sınıflandırılır: aktif, endüktif ve kapasitif yük. Yükün aktif yük olması durumunda akımın dalga formu gerilimle aynıdır. Endüktif veya kapasitif olması durumunda ise akım ile gerilim arasında faz farkı oluşur ki bu farka güç katsayısı denmektedir. Güç katsayısı trafodan çekilen görünür güçle yükün çektiği aktif güç arasındaki oran olarak da tanımlanmaktadır.

Doğrultucuların en basit modeli tek diyot kullanılan tek faz yarım dalga doğrultucular dır. Bu doğrultucularda giriş dalga formunun yalnız bir yarısı çıkışa ulaştığından güç transferi için kullanılması oldukça verimsizdir. Şekil 3.2 'de görüldüğü üzere bu doğrultucularda enerjinin yarısından faydalanılmakta, diğer yarısı kayba uğramaktadır.



Şekil 3.2. Tek faz yarım dalga doğrultucu

Üç fazlı doğrultucuların çalışma prensibi tek fazlı doğrultucularla aynı olmakla beraber farklı bağlantı modelleri vardır. Şekil 3.3'te üç fazlı tam köprü doğrultucunun devresi gösterilmektedir. Bu doğrultucu modelinde altı adet diyot kullanılmaktadır. Diyotlar ikişerli olarak seri bağlandıktan sonra birbirlerine paralel bağlanmaktadır. Seri bağlı diyotların arasına birer faz bağlantısı yapılarak kaynaktan çekilen üç fazlı enerji yüke aktarılır. Her bir seri bağlı diyot grubu 120^o'lik faz açısında iletimde kalarak yüke tek fazlı kaynak sağlamaktadır. Üç fazlı doğrultucularda bir periyotluk çıkış, iki yerine altı adet diyotla yapıldığından gerilim dalgalanmaları daha azdır. Tek fazlı doğrultuculara nazaran daha temiz çıkış gerilimi sağlayan üç fazlı doğrultucular yüksek güç sağlama olanağına da sahiptir.



Şekil 3.3. Üç fazlı tam dalga doğrultucunun çalışma prensibini gösteren devre şeması

Kontrolsüz yani diyot kullanılan doğrultucularda çıkış gerilimi giriş gerilimine bağlı olarak sabittir. Üç fazlı tam doğrultucu devrelerin giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki bağıntı Denklem 3.1'de ifade edildiği gibidir. Bu denklemde $cos \propto$ güç katsayısı, $V_{maks.}$ giriş geriliminin maksimum değeri ve V_d doğrultucunun çıkış gerilimidir. Diyot yerine kontrollü yarı iletken malzeme kullanılması durumunda çıkış gerilimi tetikleme açısıyla kontrol edilmektedir.

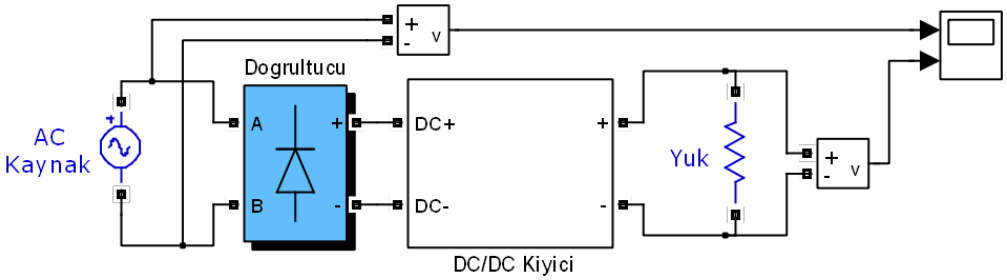
$$V_d = \left(\frac{3\sqrt{3}V_{maks.}}{\pi}\right) cos \propto \qquad (3,1)$$

Üç fazlı tam köprü doğrultucular düşük dalgalanma oranı, yüksek güç faktörü, basit yapısı ve düşük maliyeti ile yüksek ve düşük güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan doğrultucular dır. Ayrıca AA/AA güç dönüştürücülerinde

DA barası oluşturmak için de kullanılırlar. Bu avantajlarına karşın, çok sayıda anahtarlama elemanı kullanılması nedeniyle, daha fazla harmonik üretimine sebep olarak giriş akımına bozucu etkileri daha fazladır. Transistor kullanılan senkron doğrultucularda harmonik üretim sorunu diğer modellere nazaran daha az olmaktadır.

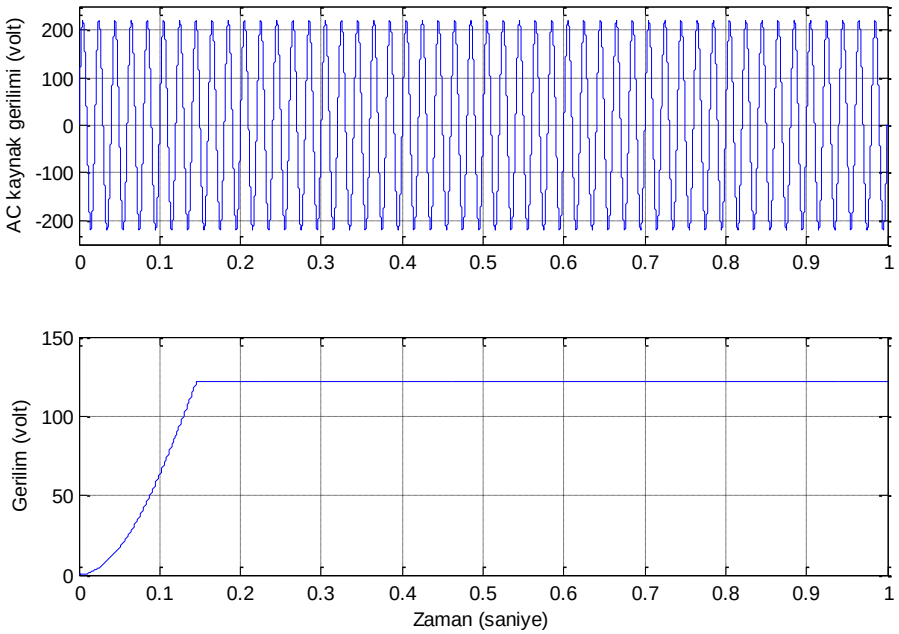
AA/DA güç dönüştürücüleri hız ayarı yapan sürücülerde, kesintisiz güç kaynaklarında, yüksek gerilim DA iletim sistemlerinde, güneş enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarında, enerji depolama sistemlerinde, elektrikli araçların şarjında ve haberleşmede yaygın olarak kullanılmaktadır [120]. AA/DA güç dönüştürücülerde, girişi gerilimine bozucu etkisi olan ve harmonik akımlardan kaynaklanan düşük güç kalitesi, ayarsız güç faktörünün neden olduğu DA çıkışta gerilim dalgalanması, düşük verim ve filtre gereksinimi en önemli problemlerdir. Bu dönüştürücülerin kullanımının artmasıyla beraber bu problemlere çözüm üreten modellerde geliştirilmektedir. Son zamanlarda geliştirilen AA/DA güç dönüştürücü modelleri; güç katsayısı düzeltici, darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilen, çok seviyeli ve çok darbeli doğrultucular [121-123] gerilim bozulmasını önlemede önemli aşamalar kaydedildiğini göstermektedir. Güç kalitesini artırmak amacıyla pasif, aktif ve melez filtreler geliştirilmektedir [124-126]. Ancak bu filtreler pahalı, hantal ve kayıplara neden olduğundan sistemin verimini azaltmaktadır. AA/DA güç dönüştürücülerin ürettiği harmoniği azaltmak amacıyla çok darbeli (12, 18, 24, 36, 48 vb.) tasarımlar geliştirilmektedir. Devre topolojisinde farklı yarı iletken malzemeler kullanılabilmekte ve elektriksel elemanların yerleri farklılık gösterebilmektedir. Çok darbeli dönüştürücüler tek yönlü [127] ve iki yönlü [128] olarak tasarlanabilmektedir.

Keles vd evsel yüklerin enerji yönetimini geliştirmek amacıyla çok seviyeli giriş ve çıkış gerilimleri içeren güç yönetim modelinin analizini yapmaktadır [129]. Bu modelde, akıllı sayacın ve çok seviyeli DA prizlerin AA/DA güç dönüştürücüleri içerdiği öngörülmektedir. Referans 129'da kullanılan AA/DA güç dönüştürücün Matlab/Simulink benzetim modeli Şekil 3.4'te gösterilmektedir. AA kaynak, yük ve doğrultucu elemanları için araç kutusunda bulunan hazır modeller kullanılmaktadır. Çıkış gerilimini kontrol etmek ve gerilim dalgalanmalarını azaltmak amacıyla bu bölümün ilerleyen kısmında tanıtılan DA/DA kıyıcı kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. AA/DA güç dönüştürücünün Matlab/Simulink modeli [129]

AA/DA güç dönüştürücünün çıkışında yer alan statik yükün güç değeri 300 W'dır. Giriş ve çıkış geriliminin eğrileri Şekil 3.5'de gösterilmektedir. AA Kaynak 220 V ve 50 Hz'lik sinüzoidal gerilim sağlamaktadır. Çıkışta 0,15 saniyelik geçici rejimden sonra 120 V'luk düzgün DA gerilim elde edilmektedir. Sürekli hal boyunca çıkış geriliminde meydana gelen dalgalanmalar gerilim eğrisinde görülemeyecek kadar azdır. Çıkış geriliminin değeri kıyıcının kontrol ünitesinden ayarlanmaktadır. Referans 129'da yer alan çalışmanın diğer çıktılarının analiz edilmesi durumunda, AA/DA dönüştürücü model ile ilgili olarak daha ayrıntılı bilgiler elde edilmektedir. Geçici hal süresi her ne kadar kıyıcıda yer alan elektriksel elemanlarla (endüktans ve kapasite) ayarlanabilse de çıkış gerilim değeri arttıkça geçici hal süresi de artmaktadır. 5-1500 W yük aralığında aynı benzetim modeli verimli şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 3.5. AA/DA dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi [129]

AA/DA dönüştürücüler temel prensip olarak sade bir yapıya sahip olsa da çıkış geriliminde yer alan dalgalanmaları sönümlemek ve anahtarlama elemanlarının ürettiği harmonikleri azaltmak amacıyla, kontrol yöntemlerine ve farklı devre topolojilerine gereksinim vardır. Kontrol yöntemlerinin uygulanması ile verimi artan AA/DA dönüştürücülerin, ek donanım nedeniyle maliyeti de artmaktadır. Bu yüzden, gerilim dalgalanmalarına tahammülü olmayan veya yüksek güç kalitesi gereken hassas yükler için gelişmiş donanıma sahip modeller tercih edilirken, daha basit uygulamalarda maliyeti azaltmak amacıyla sade modeller tercih edilmektedir.

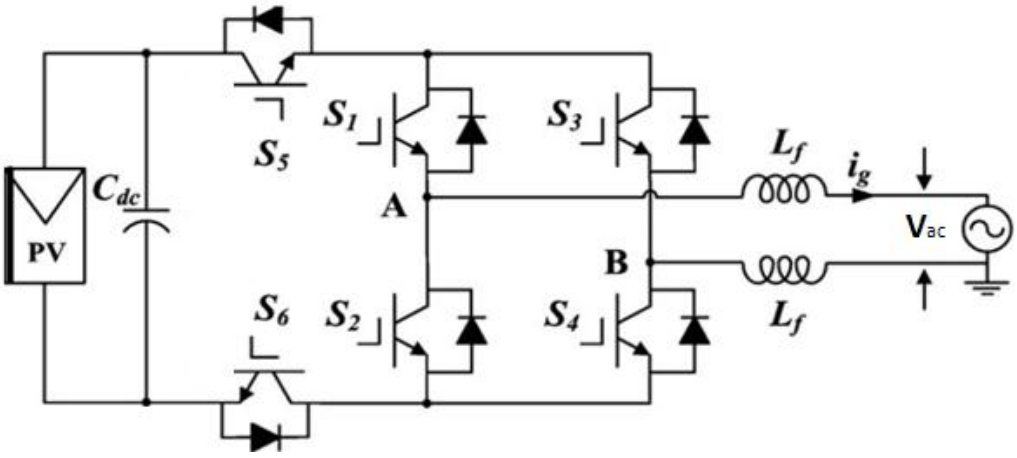
3.2. DA/AA Evirici (İnverter)

Elektrik enerjisini DA formundan AA formuna dönüştüren cihazlara genel olarak inverter denilmektedir. İnverterlerin amacı DA formda depolanan elektrik enerjisini AA formuna dönüştürerek günlük hayatta kullanımını sağlamaktır. Örneğin, ev tipi inverter, bataryalardan alınan 12 ve 24 V DA formu 240 V ve 50 Hz AA formuna dönüştürerek evsel cihazlarda kullanılmasını sağlayan ara elemandır. İnverterler YEK'lerde, kesintisiz güç kaynaklarında ve AA motor sürücülerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İnverterleri kontrol etmek amacıyla genellikle PWM (Pulse Width Modulation) tekniği kullanılmaktadır. PWM tekniği, darbe genişliğinin farklı mekanizmalarla kontrol edildiği kullanışlı ve gelişmiş bir tekniktir. PWM inverter, kullanıcının tercihine bağlı olarak, çıkış gerilimini yükten bağımsız şekilde kararlı tutmak amacıyla kullanılır. PWM inverterlerde, yük değişiminin kaynak gerilimine bozucu etkisinden korunmak için darbe sayısı kontrol edilir. İnverter çıkışında elde edilen AA formunun karakteristiği anahtarlama frekansına ve darbe genişliğine bağlıdır. İnverterlerde farklı devre topolojileri kullanılsa da kontrol amacıyla genellikle darbe genişlik modülasyon tekniği kullanılmaktadır. İnverterlerde çıkış karakteristiğini korumak amacıyla gerilim veya akım değerleri kullanılmaktadır. Gerilim kontrollü inverterlerde, çıkış gerilimi referans sinyale bağlı olarak AA formda çıkış sağlarken; elde edilen gerilim karakteristiği yükten bağımsızdır. Bu özelliği sayesinde, gerilim kontrollü inverterler sanayide ve güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Akım kontrollü inverterler ise

referans sinyale göre gerilimden ve yükten bağımsız akım elde etmek amacıyla kullanılır. Akım kontrollü inverterler orta gerilim sanayi uygulamalarında ve yüksek güç kalitesinin gereksinim olduğu yerlerde tercih edilirler.

İnverterler tek/üç faz ve yarım/tam dalga olarak tasarlanabilmektedir. Şekil 3.6'da güneş paneline bağlı tek faz tam dalga inverter devre şeması gösterilmektedir. Güneş panel sisteminden alınan DA formu, şebeke karakteristiğine uyumlu AA formuna dönüştürülerek şebekeye entegre edilmektedir. S_1, S_2, S_3 ve S_4 anahtarları kontrol yöntemine bağlı olarak DA formunu AA formuna evirmek için kullanılırken S_5 ve S_6 anahtarları enerji kesmede kullanılmaktadır. Anahtarlama elemanlarının kapı ucu kontrol ünitesine bağlıdır. Referans sinyale ve istenen gerilim karakteristiğine bağlı olarak anahtarlar tetiklenmektedir. Anahtarlamadan sonra tam dalga şeklinde olan enerji, filtreler yardımıyla sinüzoidal hale gelmektedir.



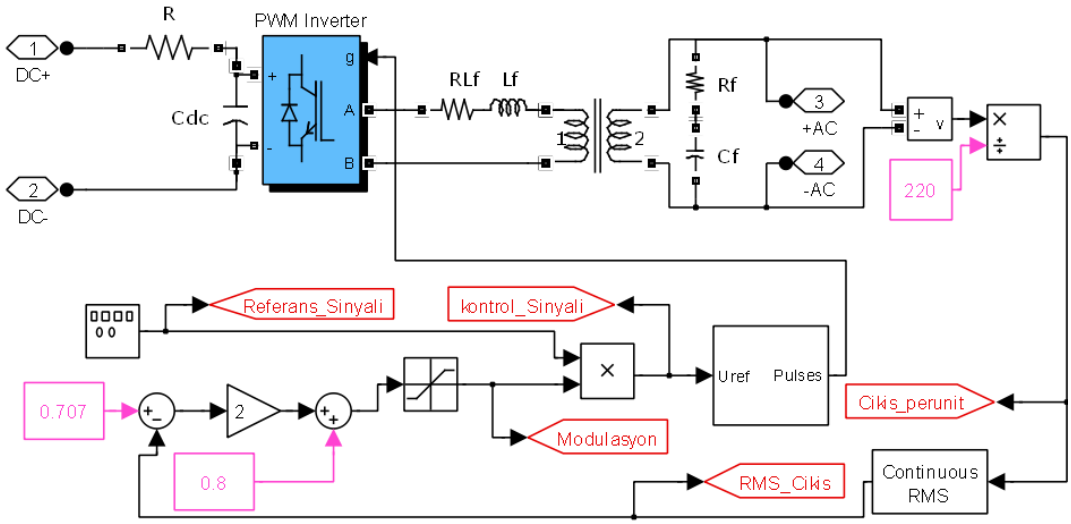
Şekil 3.6. Güneş paneline bağlı tek faz tam dalga inverter devre şeması

İnverter çıkışında, anahtarlama elemanlarının ürettiği harmonikleri azaltmak amacıyla, alçak geçiren LC filtreler kullanılmaktadır. LC filtreler tasarlanırken kesim frekansı, harmoniklerin çoğunu elemine edecek şekilde seçilir. İnverterin, gerilim bozulmalarına maruz kalmadan ideal bir gerilim kaynağı olarak kullanılabilmesi için çıkış empedansının sıfırda tutulması gerekir. Bu yüzden, LC filtre tasarımında, kapasite değeri maksimum, endüktans değeri ise minimum yapılmaktadır. LC filtre tasarımında önemli olan bir diğer faktörde reaktif güç gereksinimidir. Filtrenin reaktif güç gereksinimi arttıkça maliyeti de arttığından, reaktif güç gereksinimi minimize edilmektedir. Tasarım sınır değerleri göz

önünde bulundurulduktan sonra, sabit yükte veya sürekli halde inverter çıkışı gürbüz ve temiz karakteristiğe sahip olsa da yük değişimi gibi geçici hallerde bu düzgünlük bozulabilmektedir. Bu bozulmalar inverterin talebe olan tepki hızını azaltmakta ve çıkış geriliminin kalitesini düşürmektedir. Bu yüzden, her ne kadar yüksek verimli ve gelişmiş inverterler üretilse de inverter teknolojisi küçük çaplı problemleri olan, YEK'lerde kullanımının yaygınlaşması için maliyeti düşürülmesi gereken ve yeni kontrol yöntemleri kullanılarak geliştirilebilecek bir alandır.

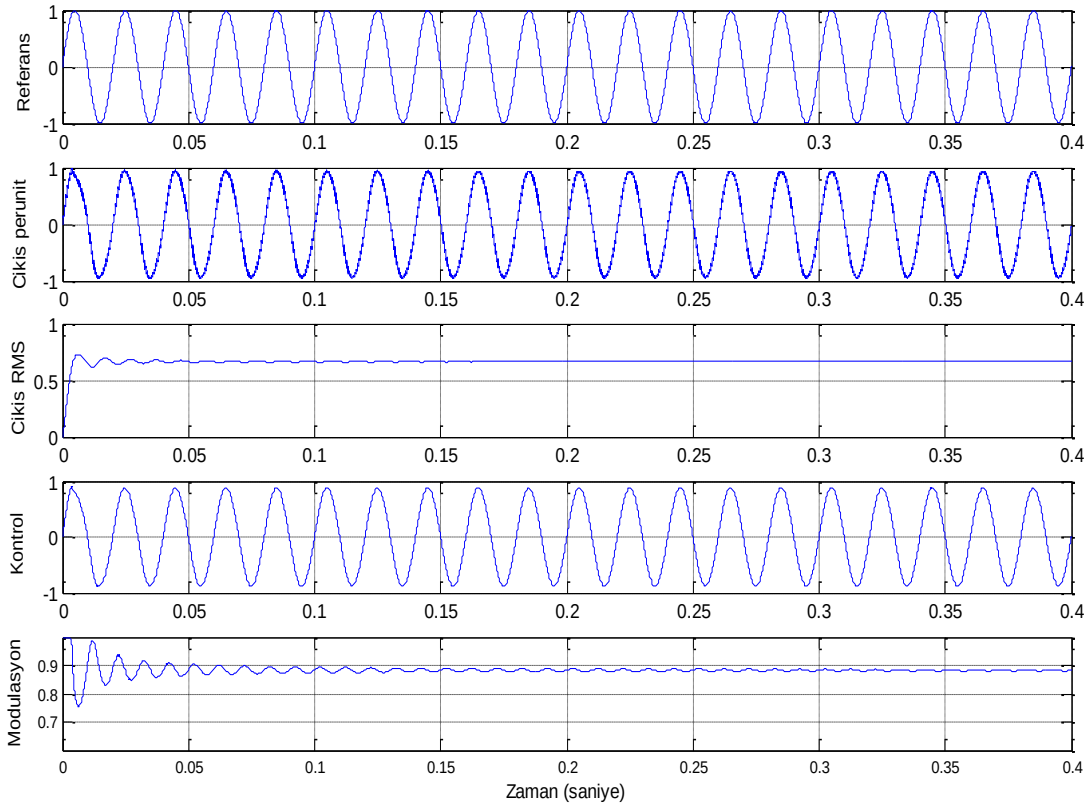
Optimizasyon teknikleri birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanıldığı gibi inverter kontrolünde de kullanılmaktadır. Optimizasyon tekniklerinde alt başlık olan yumuşak hesaplama yöntemleri, lineer olmayan matematiksel problemlerin çözümünde etkili olmakta ve işlem yükü az olduğundan, düşük kapasiteli işletim sistemleri kontrol yönteminin uygulanmasında yeterli olmaktadır [130]. Referans [131-133]'te yumuşak hesaplama yöntemleri, YEK'lerde kullanılan inverterlerin verimini optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, inverterlerde meydana gelen beklenmedik durumları ve ani yük değişimlerini değerlendirmek amacıyla genetik algoritma [134], parçacık sürüsü optimizasyonu [135] ve diferansiyel gelişim [136] algoritmaları kullanılmaktadır. İnverterler, çıkış kontrol parametresine bağlı olarak akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı [137] veya giriş sinyalinin seviyesine bağlı olarak iki seviyeli ve çok seviyeli olarak [138] sınıflandırılmaktadır.

Referans [129]'da yer alan ve evsel güç yönetiminde kullanılan tek fazlı PWM inverterin benzetim modeli Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Batarya, YEK veya farklı bir DA kaynağına bağlanan inverter, şebekeye uyumlu AA formunda enerji sağlamaktadır. PWM inverter, trafo, darbe üreteci ve sürekli RMS hesaplama bloğu Simulink kütüphanesinde hazır bulunmaktadır. Kütüphaneden alınan hazır blokların parametrik değerleri amaca uygun şekilde ayarlanabilmektedir. Referans sinyal, etkin değer, modülasyon katsayısı ve çıkış geriliminin değeri şebekeye uyumlu şekilde tanımlanırken; hesaplamalarda kullanılan diğer değerler ölçümler sonucu elde edilmektedir.



Şekil 3.7. PWM inverter Matlab/Simulink benzetim modeli

Şekil 3.8'de tek fazlı PWM invertere ait benzetim modelinin tasarım değerleri ve çıkış sinyali gösterilmektedir. Referans sinyal, şebeke frekansına uyumlu düşük güçlü sinyaldir. Çıkış sinyalinin per-unit değerinin, referans sinyale uyumlu olduğu görülmektedir. Trafo parametrelerinde veya giriş gerilimin meydana gelecek değişiklikler çıkış sinyalini etkilemektedir. Çıkış sinyalinin tepe değeri birden farklı olması durumunda trafo parametreleri değiştirmelidir. Değişken giriş gerilimi için, inverter çıkışı kararlı yapıya sahip olmamaktadır. Girişin değişken olması durumunda, inverterden önce DA/DA kıyıcı kullanılmalıdır. Çıkışın etkin değeri, yaklaşık 0,05 saniyelik geçici halden sonra sabit değer yakalamaktadır ve bu değer referans sinyalinin etkin değeriyle aynıdır. Darbe sayısını ve süresini belirleyen kontrol sinyalinin tepe değeri, hesaplamada modülasyon katsayısı kullanıldığından, tam değerden biraz düşüktür. Modülasyon katsayısından önce kullanılan değer sınırlayıcı bloğu, modülasyon katsayısının bir değerini aşmamasını sağlamaktadır. Modülasyon katsayısı geçici hal süresince dalgalanmalar gösterse de sürekli hal boyunca göz ardı edilebilir dalgalanmaya sahiptir. İnverterden önce kullanılan kapasite gerilim dalgalanmalarını azaltırken, inverterden sonra kullanılan alçak geçiren pasif filtre harmonikleri azaltmak ve çıkış sinyaline sinüzoidal dalga şeklini vermek amacıyla kullanılır. Benzetim sonuçları, örnek inverter benzetim modelinin akıllı ve mikro şebeke çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.



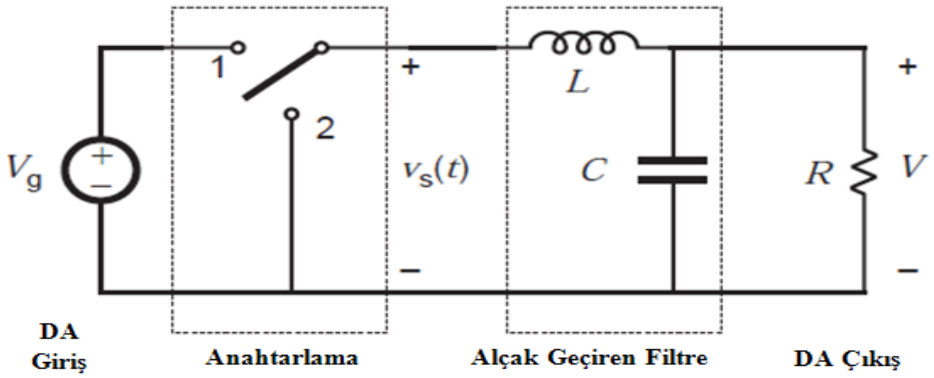
Şekil 3.8. İnverter çıkışı ve tasarım değerleri

3.3 DA/DA Dönüştürücü (Kıyıcı)

DA/DA kıyıcı; masa üstü bilgisayarlar, güç kaynakları, ofis cihazları, haberleşme ve uzay araçları gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. DA/DA kıyıcılar, düzensiz veya ayarsız olan DA elektrik formunu düzenleyerek, elektronik cihazlara kararlı ve ayarlı DA enerji sağlayan güç elektroniği elemanlarıdır. Örneğin, şebekenin sağladığı 220 V AA enerji doğrultulduğunda 340 V DA enerji elde edilir ve 340 V DA enerji 5, 12, 24 ve 48 V gibi daha düşük DA enerji seviyesine, DA/DA kıyıcılarla indirgenerek elektronik cihazlarda kullanılır. İdealde %100 verime sahip olduğu varsayılan DA/DA kıyıcılar pratikte %75-95 arası verimle çalışırlar. Diğer güç dönüştürücülerde olduğu gibi DA/DA kıyıcılarda da çıkış sinyalini kontrol etmek amacıyla PWM tekniği kullanılmaktadır.

Düşürücü dönüştürücü olarak bilinen temel DA/DA kıyıcı devresi şekil 3.9'da gösterilmektedir. Tek kutuplu iki çıkışa sahip anahtar giriş gerilimine bağlıdır. Anahtar 1 konumundayken anahtarlama gerilimi (V_s), giriş gerilimi (V_g)'ye eşit; 2 konumundayken ise sıfır olmaktadır. Anahtarın bir konumunda yani

iletimde olduğu süre (D) çıkış gerilimini doğrudan etkilemektedir. 0 ≥ D ≥ 1 değeri için çıkış gerilimi $V_o = DV_g$ olmaktadır. Anahtarlama frekansı D oranını hesaplamada kullanılan periyodu belirlemektedir. Pratikte anahtarlama içini diyot, Mosfet, IGBT, BJT ve Tristör gibi yarı iletken elemanlar kullanılmaktadır. Anahtarlama frekansı kullanılan yarı iletken türüne bağlı olarak 1 kHz ile 1 MHz arasında değişmektedir.



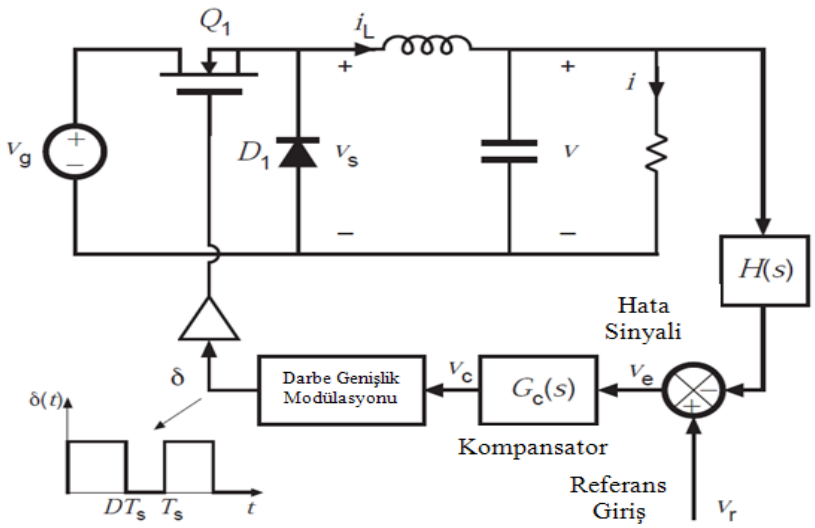
Şekil 3.9. Düşürücü DA/DA kıyıcı devre şeması

Anahtarlama gerilimi ayarlı DA gerilimden ayrı, anahtarlama frekansına bağlı harmonikler içerir. Bu harmonikleri elemine etmek amacıyla alçak geçiren filtre kullanılmaktadır. Alçak geçiren filtrenin L-C değerleri Denklem 3.3 yardımıyla bulunur. Denklemde yer alan f_0 kesim frekansını göstermekte ve anahtarlama frekansından daha düşük değerler almaktadır. Alçak geçiren filtrenin temel çalışma prensibi, yalnızca istenen DA bileşeni geçirmek ve istenmeyen diğer sinyallerin geçişine engel olmaktır. Kapasite ve endüktans değerlerinin ideal olduğu varsayıldığında, harmoniklerin elenmesinde güç kaybı olmadığı görülmektedir. Böylece iletim süresi (D) ile kontrol edilen DA çıkış, güç kaybı olmadan elde edilmektedir. Denklem 3.4'te D'ye bağlı dönüşüm oranı tanımlanmaktadır. Çıkış geriliminin giriş gerilimine oranını veren dönüşüm oranı, sürekli hal için kullanılmaktadır. Geleneksel düşürücü kıyıcılarda, dönüşüm oranı iletim oranının kendisine eşittir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3,3}$$

$$M(D) = \frac{V}{V_g} \tag{3,4}$$

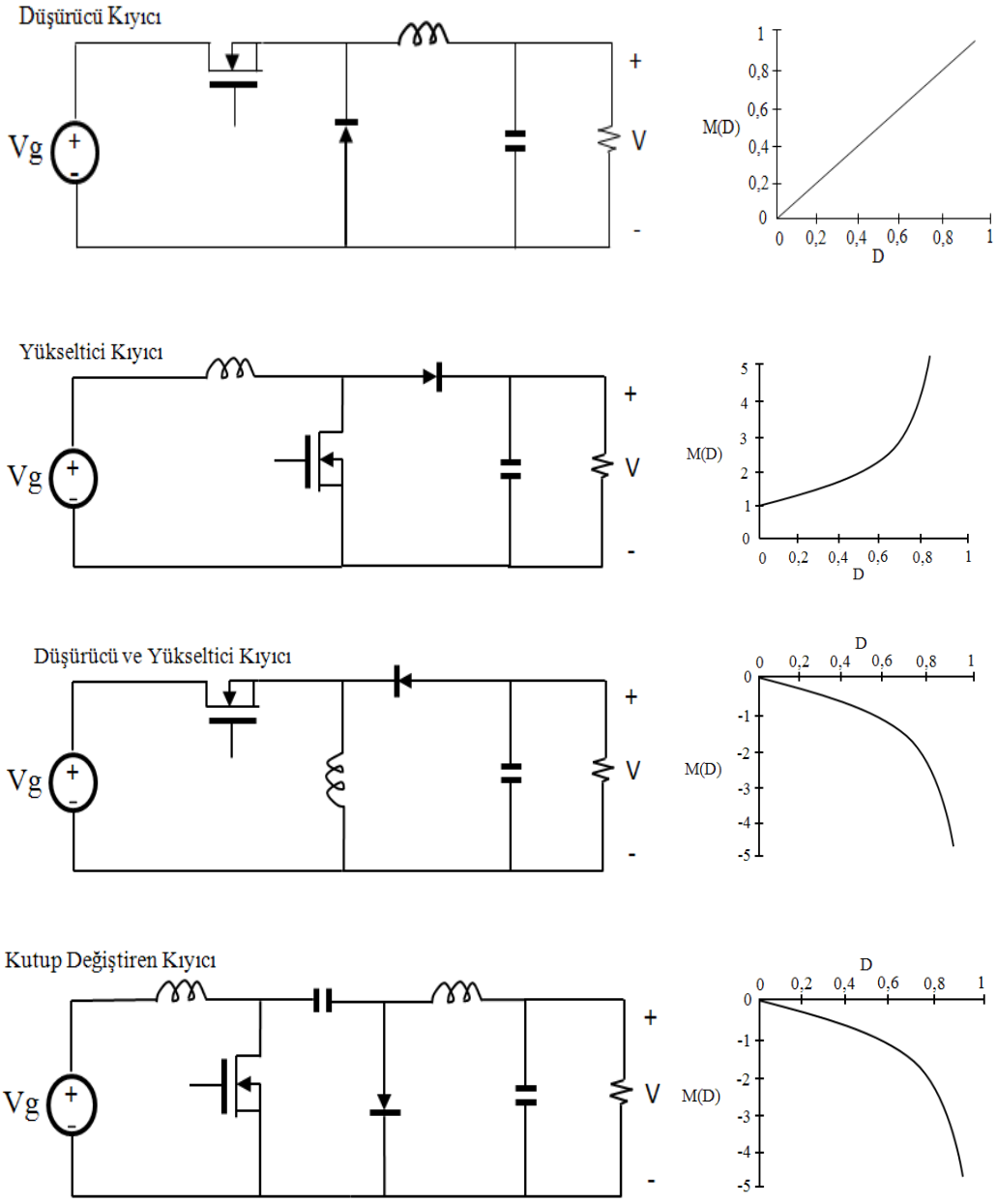
Şekil 3.10'da düşürücü kıyıcı devre için, Mosfet ve diyotla gerçekleştirilmiş, örnek bir devre topolojisi gösterilmektedir. Mosfet kapı akımı, mantıksal sinyal olan δ(t) tarafından kontrol edilmektedir. Mosfet iletimdeyken kaynağa doğru çok düşük bir akım akmakta ve V_s hemen hemen V_g'ye eşit olurken diyot ters kutuplanmaktadır. Bu durumda pozitif i_L akımı Mosfetten akmaktadır. $t = DT_s$ olduğunda sürücü sinyali azalmakta ve Mosfet kesime gitmektedir. Bu durumda i_L akımı diyot üzerinden akmakta ve V_s sıfıra yakın bir değer almaktadır. Bir diğer ifadeyle diyotun görevi, Mosfet kesimdeyken, i_L akımını ters yönde akmasını engellemektir.



Şekil 3.10. PWM tekniğiyle kontrol edilen düşürücü kıyıcı devre topolojisi

Çıkış gerilimi D'nin bir fonksiyonu olduğundan, kontrol sistemi referans sinyale göre D'nin ayarlanmasıyla yapılabilmektedir. Ölçümle çıkış gerilimi algılanmakta ve referans sinyalle karşılaştırılmaktadır. Çıkış gerilimi ile referans sinyal arasındaki fark hata olarak değerlendirilerek kompansatore iletilmektedir. Analog sinyal olan kontrol gerilimine (V_c) göre darbe genişlik modülasyonu bloğunda mantıksal kontrol sinyali üretilmektedir. Kontrol sistemi uygun parametrelerle tasarlanması durumunda çıkış gerilimi, otomatik olarak referans

sinyali takip etmekte ve yük akımı ve anahtarlama geriliminden bağımsız bir karaktere sahip olmaktadır.



Şekil 3.11. Yaygın olarak kullanılan DA/DA kıyıcılar ve dönüştürme oranları

DA gerilimini düşüren, yükselten veya polaritesini değiştiren birçok DA/DA kıyıcı devre topolojisi bulunmaktadır [139-144]. Şekil 3.11'de yaygın olarak kullanılan DA/DA kıyıcı devre topolojileri ve bu devrelerin dönüştürme oranları gösterilmektedir. Her bir örnekte Mosfet ve diyot kullanılmış olsa da, devre

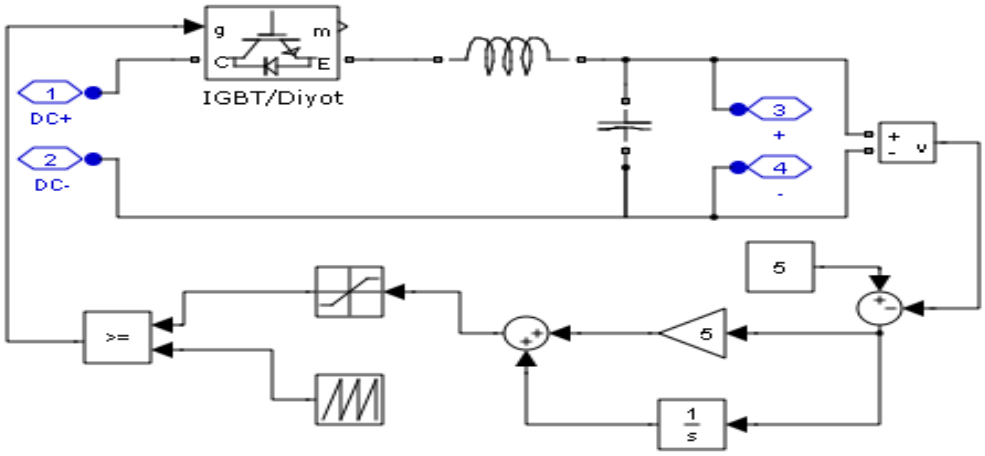
karakteristiğine bağlı olarak aynı devre topolojisinde BJT, Tristör, IBGT vb. anahtarlama elemanları kullanılabilmektedir.

İlk kıyıcı devre düşürücü devredir ve çıkış geriliminin giriş gerilimine dönüşme oranı M(D) = D'dir. İkinci devre yükseltici kıyıcı devredir ve giriş gerilimini belli bir oranda artırmak için kullanılır. Giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki oran fazla olması durumunda trafo kullanılması zorunludur. Yükseltici kıyıcılarda dönüştürme oranı M(D) = 1/(1-D) eşitliğiyle bulunur. Düşürücü ve yükseltici kıyıcı giriş gerilimini artırmak veya azaltmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu kıyıcılarda çıkış geriliminin polaritesi giriş gerilimden farklıdır. Dönüştürme oranı M(D) = -D/(1-D) eşitliğiyle bulunur. Kutup değiştiren kıyıcı, düşürücü ve yükseltici kıyıcıyla aynı karakteristiğe sahip olmakla birlikte devre topolojisi farklılık göstermektedir.

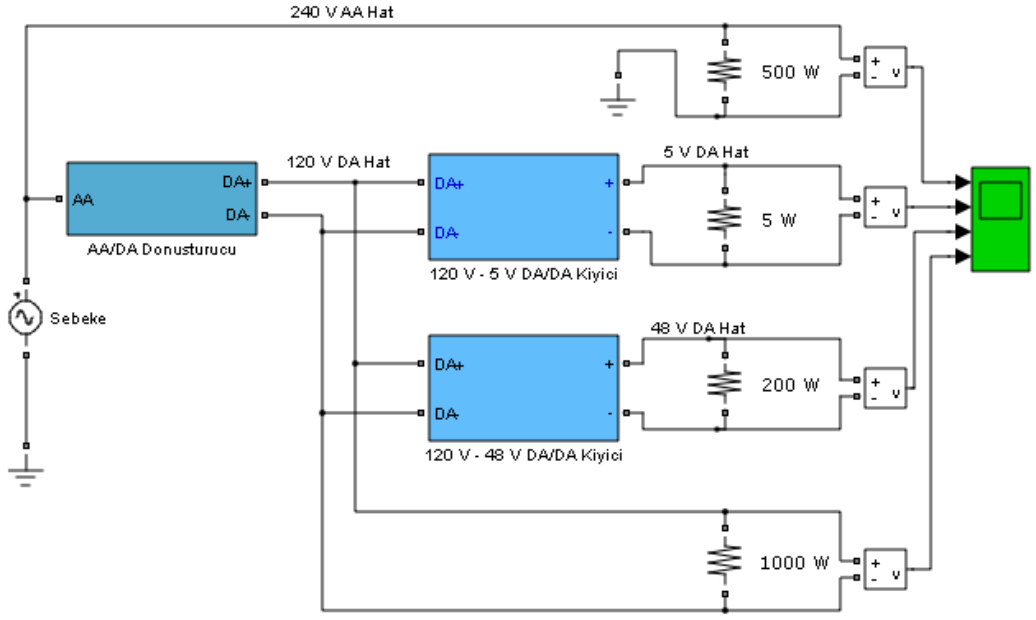
Referans 209'da talep taraflı yük yönetimi amacıyla kullanılan DA/DA kıyıcı devrenin benzetim modeli Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Bu modelde, geleneksel düşürücü DA/DA kıyıcının devre topolojisi kullanılmaktadır. Kıyıcı modeli 120 V DA giriş gerilimini 5 V DA gerilime düşürmek amacıyla kullanılmaktadır. Çıkış gerilim seviyesi, ölçümlerden sonra karşılaştırma yapılan sabit değer bloğuyla belirlenmektedir. IGBT'yi kontrol eden mantıksal sinyali üretmek amacıyla PWM tekniği kullanılmaktadır.

Elektronik ağırlıklı yeni teknolojilerin artması ve YEK'lerin DA formda üretim yapması nedeniyle DA formunun doğrudan kullanılması gündeme gelmektedir. Referans 129'da yakın gelecekte evlerde DA elektrik formunun daha etkin kullanılacağı öngörülmektedir. Hedef modelde şebekeden alınan AA gerilim, DA gerilime dönüştürülerek ev içi dağıtım yapılmaktadır. Ayrıca elektrik prizlerinin, geleneksel prizlerden farklı olarak birden çok gerilim seviyesi sağlama özelliğine sahip olduğu kabul edilmektedir. Şekil 3.13'te hedef yöntemin mimarisini özetleyen benzetim modeli gösterilmektedir. Evsel yükün talebini belirtmek amacıyla 5, 200 ve 1000 W gücünde DA yükler ve 500 W gücünde AA yük modelleri kullanılmaktadır. AA yükler geleneksel yöntemde olduğu gibi doğrudan şebekeden beslenmektedir. DA formda ev içi dağıtım yapılması sayesinde prizlerde sadece DA/DA kıyıcıların kullanılması yeterli olmaktadır. Ev içi DA dağıtım seviyesi 120 V olarak belirtilmektedir. 1000 W gibi yüksek güçler için bu gerilim seviyesi doğrudan kullanılırken daha düşük güçler için gerilim

seviyesi DA/DA kıyıcılar aracılığıyla düşürülmektedir. Örneğin, 5 W seviyesindeki yükleri beslemek amacıyla prizin 5 V DA gerilim ucu ve 200 W seviyesindeki yükleri beslemek amacıyla 48 V DA gerilim ucu kullanılmaktadır.



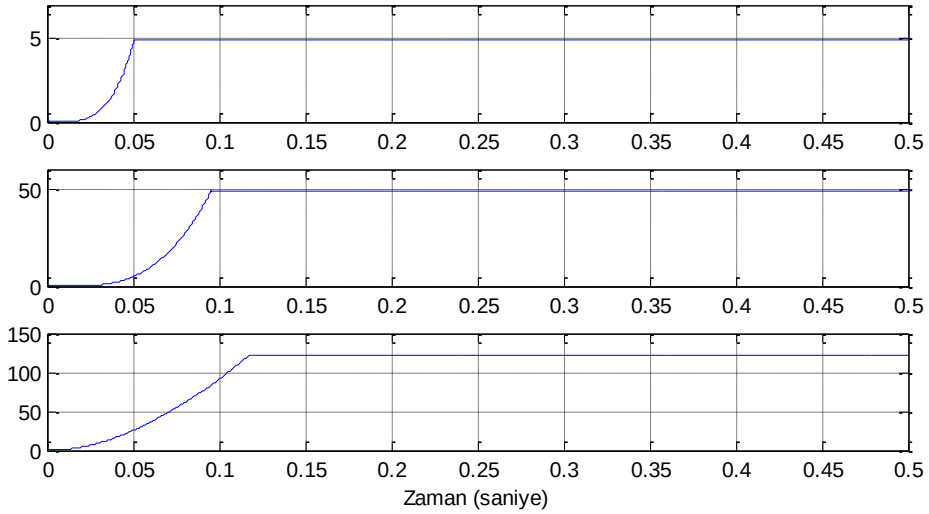
Şekil 3.12. Düşürücü DA/DA kıyıcının benzetim modeli [129]



Şekil 3.13. DA/DA kıyıcıların kullanıldığı hedef yöntem benzetim modeli [129]

Şekil 3.14'te hedef yöntemin benzetim modeli çıktıları gösterilmektedir. DA/DA kıyıcılar, yeterli performans göstererek; en fazla 0,15 saniye gibi kısa bir zamanda istenen gerilim seviyesinde çıkış vermektedir. Çıkış gerilim seviyesi arttıkça sürekli hale geçiş artsa da bu artış göz ardı edilebilecek seviyededir.

Kıyıcıların tepkime hızı ve çıkış gerilimindeki düzgünlük bu modelin akıllı çalışmaları için yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.14 Düşürücü kıyıcının benzetim modeli çıktıları [129]

4. GÜÇ ENTEGRASYON YÖNTEMLERİ

Geleneksel güç sistemlerinde üretim, merkezi büyük santrallerde (hidroelektrik santral, nükleer santral, doğalgaz ve kömürle elektrik üretimi yapan termik santraller vb.) yapılmakta ve bu santraller genellikle tüketim bölgelerinden uzak mesafelerde yer almaktadır. Birçoğu YEK'lerden oluşan dağıtık kaynakların artmasıyla yeni şebeke yapıları ortaya çıkmakta ve enerjide üretim, iletim, dağıtım ve tüketim alışkanlıkları değişmektedir. Tüketim bölgesine yakın mesafelerde kurulan dağıtık kaynaklar, güneş ve rüzgar gibi ikincil enerji kaynaklarından oluşmakta ve şebekeye entegre (on-grid) veya ada modunda (off-grid) tüketicinin enerji talebini karşılamaktadır. Ayrıca enerji depolama cihazlarının kullanımıyla dağıtık kaynakların güvenirliliği ve kalitesi artırılarak, YEK'lerin yaygınlaşması sağlanmaktadır. Bu yüzden mikro şebeke, üretim, depolama ve bölgesel yüklerden oluşan bir sistem olarak tanımlanmakta ve şebekeye olan enerji bağımlılığını azaltmaktadır.

Çevreye duyarlı olan dağıtık kaynaklar, iletim ve dağıtım kayıplarını azaltmakta ve şebekeye uyumlu elektrik üretimi yaparak mevcut güç sisteminin kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca dağıtık kaynaklar yıllanmış güç sistemlerinin güncellenmesi için gerekli olan yüksek maliyetli yatırımların önüne geçerek ülke ekonomisine katkıda bulunmaktadır. Bu yüzden geleceğin enerji alt yapısını oluşturmada, mikro şebekelerin yaygınlaşması ve performansının artırılması kritik öneme sahiptir. Dağıtık kaynak yatırımlarında uygun mikro şebeke mimarisini belirlemek, projeden beklenen çıktıları elde etmek açısından, temel adımlardan biridir. Mikro şebeke mimarisi belirlenirken dikkat edilecek hususlar: yük modelinin belirlenmesi, var olan ve planlanan üretim kaynaklarının tespiti, enerji depolama teknolojilerinin konumu ve kapasitesi, dağıtım hattının özellikleri ve haberleşme sisteminde kullanılan teknoloji olarak sıralanabilmektedir. Bu yüzden, mikro şebeke tasarımcıları için farklı mimari yöntemlerin ve topolojilerin zayıf ve güçlü yönlerini kapsamlı şekilde bilmek önemlidir. Örneğin, talep tarafında, AA formda enerji talebi olan yüklerin çoğunlukta bulunması durumunda, AA mikro şebeke mimarilerinden birinin seçimi, güç dönüşümlerine bağlı kayıpları azaltmak amacıyla, doğru seçenek olacaktır. Enerji sisteminde bulunan diğer güç bileşenlerini ve yakın gelecekte yapılabilecek muhtemel yatırımları göz önünde

bulundurmak; uygulanan mimarinin sürdürülebilirliği açısından önemli olan bir diğer noktadır.

Bu bölümde, literatürde yaygın olarak yer alan mikro şebeke mimarileri tanıtılmaktadır. Bu mimariler ticari amaçlı olarak pratikte kullanılmakta ve devam eden çalışmalar sayesinde her geçen gün verimleri ve güvenirlilikleri artmaktadır. Mikro şebeke mimarileri, en yüksek verimi ve güvenirliliği sağlamak amacıyla, AA bara, DA bara ve bu yöntemlerin karışımı olan melez sistemler üzerinden oluşturulmaktadır. Farklı güç sistemleri modelleri içi uygun mikro şebeke mimarisi belirlemek, yukarıda sayılan güç entegrasyon yöntemlerinin etraflı şekilde bilinmesi ve karşılaştırma yaparak avantaj ve dezavantajlarının belirtilmesi ile mümkündür. Ayrıca güç entegrasyon yöntemlerinde gelişmiş kontrol teknikleri (yük kaydırma veya talep taraflı yük yönetimi gibi) ve algoritmalar kullanılması durumunda, dağıtık kaynaklar mevcut sorunların çözümünde de etkili olmaktadır.

Mikro şebekeler temel olarak dağıtık üretim kaynakları, enerji depolama teknolojileri, yerel yük ve güç kontrolünde kullanılan elektronik dönüştürücülerden oluşmaktadır. Mikro şebekeler mevcut şebekeye entegre edilebilmekte veya şebekeden bağımsız çalışabilmektedir. Şebekeye entegre edilmesi durumunda, Mikro şebekelerin şebekeye bağlantı noktasına ortak bağlantı noktası veya entegrasyon barası denilmektedir. IEEE, mikro şebekenin enerji üretim kaynaklarını oluşturan dağıtık kaynakları, güç sistemine herhangi bir noktadan bağlı ve merkezi üretimden daha küçük güçlerde elektrik üretimi yapan tesisler olarak tanımlamaktadır [145]. Bu tesislerin elektrik üretim miktarları kW seviyelerinden birkaç MW seviyesine kadar çıkabilmektedir. En çok kullanılan dağıtık kaynaklar 200 kW'dan düşük güçlerde üretim yapmaktadır [146-147]. Tüketim noktalarına yakın mesafelerde kurulan bu dağıtık kaynaklar düşük gürültü ve emisyona sahip kaynaklar olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca dağıtık kaynakların düşük maliyette ve yüksek güvenirliliğe sahip olması arzu edilmektedir.

Dağıtık kaynakların önemli bir kısmını YEK'ler oluşturmaktadır. YEK'lerin doğası gereği kesintili kaynaklar olması ve tahmin edilemez üretim koşulları bu kaynakların güvenirliliğini azaltmaktadır. Bu problem, enerji depolama cihazlarıyla aşılarak YEK'ler daha güvenli hale getirilmektedir. Enerji üretimi ile

tüketimi arasında dengeleyici rol oynayan enerji depolama cihazları, YEK'lerin verimini de artırmaktadır. Ayrıca dinamik tepkisi yavaş olan üretim kaynaklarıyla birlikte depolama cihazları kullanılması durumunda, güç sisteminin tepki hızı artmaktadır [147-148]. Enerji depolama cihazlarına bataryalar, süper kapasiteler, volanlar (flywheel) ve magnetik enerji depolama cihazları örnek verilebilir. Bu cihazların enerji tutma, maliyet ve kullanım ömrü farklılıklar göstermekte ve kullanım amacına bağlı olarak tercih edilmektedirler.

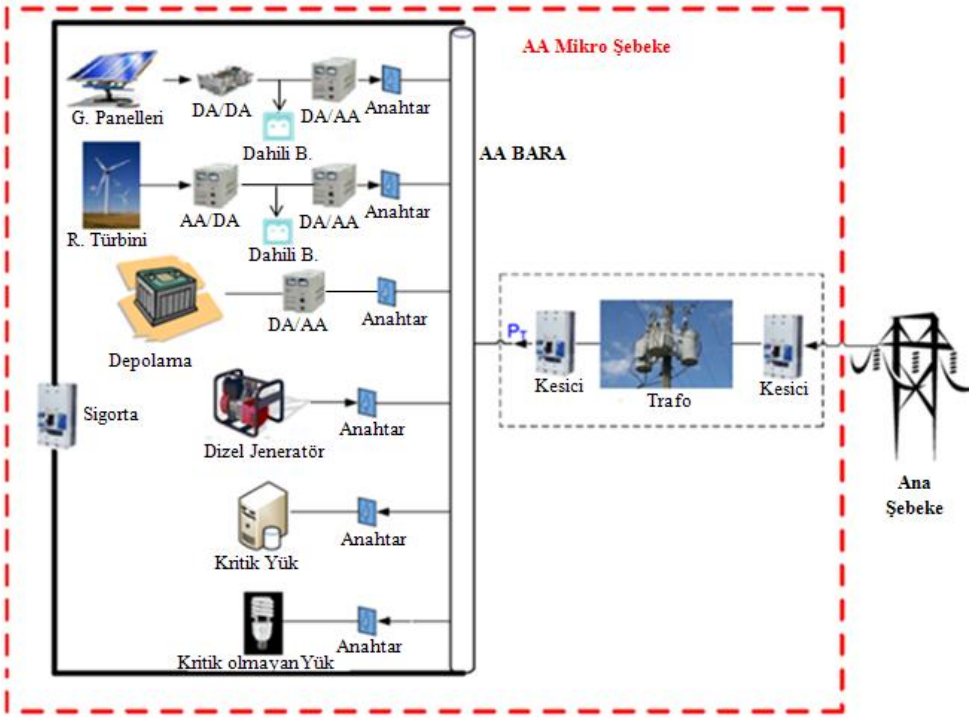
Dağıtık kaynaklar, elektriksel yüklere doğrudan bağlanabileceği gibi kontrol cihazları aracılığıyla da bağlanabilmektedir. Bu bağlamda yükler iki sınıfa ayrılmaktadır: kritik ve kritik olmayan yükler [149]. Kritik yüklerde, yüksek kalite güç ve güvenirlilik gereksinim iken; kritik olmayan yükler için daha esnek çalışma koşulları yeterli olabilmektedir. Ticari ve endüstriyel yükler kritik yükler olarak sınıflandırılırken, evsel yükler genel olarak kritik olmayan yükler grubuna dahil olmaktadır. Üretilen enerjinin talepten az olması durumunda kritik olmayan yüklerin şebekeden bağlantısı kesilerek, kritik yüklerin güç kalitesi korunabilmektedir [150]. Mevcut şebekelerde mikro şebekelerin etkinliğini ve ekonomikliğini sağlamak için optimal yük yöntemi sağlanmalıdır.

Lokal yükler ile ana şebeke ve mikro şebeke arasındaki bağlantı güç elektroniği elemanlarında yapılmakta ve güç yönetimi bu cihazlar üzerinden yapılmaktadır. Güç elektroniği elemanları ortak bara üzerinde yer almakta ve işletme politikaları ve koşulları bu noktada belirlenmektedir [151-153]. Ayrıca şebekeye sonradan dahil olan dağıtık kaynaklar ve bölgesel yükler, sisteme ortak bara üzerinden entegre edilmektedir. Güç elektroniği elemanlarında işletme koşullarına bağlı olarak farklı yarı iletken elemanlar kullanılabilmektedir. Örneğin, yüksek güç ve düşük frekansta IGBT ve SCR kullanılırken, düşük güç ve yüksek frekansta BJT ve FET tercih edilmektedir.

Mikro şebekeler AA ve DA ortak bara seçimine bağlı olarak altı gruba ayrılmaktadır [154]: AA mikro şebekeler, DA mikro şebekeler, AA-DA mikro şebekeler, DA depolamalı AA mikro şebekeler, DA bölgesel mikro şebekeler ve elektronik güç dönüşümüne dayalı mikro şebekeler. Bu bölümde yaygın olarak kullanılan; AA, DA ve melez yani AA-DA güç entegrasyon yöntemleri içeren mikro şebekeler tanıtılmaktadır.

4.1. Alternatif Akım Güç Entegrasyon Yöntemi

AA güç entegrasyonuna örnek bir model Şekil 4.1'de gösterilmektedir. AA mikro şebeke yapısında bir veya birden fazla AA barası bulunmakta ve mikro şebeke elemanları AA baraya elektronik dönüştürücüler üzerinden bağlanmaktadır. YEK'ler ve depolama üniteleri genellikle DA formda çalıştıkları için, AA mikro şebekelerde en çok DA/AA dönüştürücüye ihtiyaç duyulmaktadır. AA mikro şebeke ortak bağlantı noktasından mevcut şebekeye bağlanmaktadır. Bu yüzden, bütün AA mikro şebeke, güç dağıtım sisteminde yer alan bir fider olarak ele alınmaktadır.



Şekil 4.1. AA mikro şebeke modeli

Mikro şebekelerde ortak bara sayısı bir veya birden çok olabilmektedir. Şekil 4.1'de gösterilen örnek AA mikro şebeke modelinde bir adet AA bara bulunmaktadır. AA mikro şebeke ana şebekeye trafo üzerinden bağlanmakta, trafo ve mikro şebekenin enerji kontrolünü sağlamak amacıyla kesiciler kullanılmaktadır. Örnek AA mikro şebekede dağıtık kaynakları güneş panelleri ve rüzgar türbini oluşturmaktadır. AA bara karakteristiğinden farklı üretim karakteristiğine sahip dağıtık kaynaklar, güç elektroniği elemanları aracılığıyla

AA baraya bağlanmaktadır. Depolama için kullanılan bataryanın da ortak baraya bağlantısı DA/AA güç dönüştürücüsüyle yapılmaktadır. Dizel jeneratör şebekeye uyumlu enerji üretimi yaptığından, AA baraya bağlantı için, ara elemana ihtiyaç duymamaktadır. Sistemde kritik ve kritik olmayan yükler bulunmaktadır. AA mikro şebeke modelinde yer alan her bir elemanın bağlantısı anahtarlar vasıtasıyla kesilebilmektedir. Aşırı yüklenme veya arıza durumlarında meydana gelebilecek aşırı akım çekme olayına karşı, sistemi korumak amacıyla sigorta kullanılmaktadır.

AA güç entegrasyon yönteminde kontrol güç elektroniği elemanları tarafından yapılmakta ve enerji yönetim politikaları bu elemanlar üzerinden uygulanmaktadır. Ana şebekeden çekilen gücün kalitesinin düşük olması durumunda, AA mikro şebekenin ana şebekeyle bağlantısı kesilerek, sistemin ada modunda çalışması sağlanabilir. Böylece ana şebekenin mikro şebekeyi olumsuz etkilemesinin önüne geçilmektedir. Mikro şebekenin sınır değerleri: gerilim artımı için %10, gerilim düşümü için %20, frekans artışı için 0,5 Hz, frekans düşümü için -0,5 Hz ve aşırı akım için %30 olarak belirlenmektedir [155]. Arıza durumunda, zarar görme ihtimaline karşı kritik olmayan yüklerin şebekeyle bağlantısı kesilmektedir. Kritik yükler ise dağıtık kaynaklardan ve enerji depolama cihazlarından beslenmektedir [156]. Böylece kritik yükler için gerekli olan güç kalitesi sağlanmakta ve cihazların kesintisiz enerji gereksinimi karşılanmaktadır.

AA güç entegrasyonunda farklı kontrol yöntemleri benimsenmekle beraber yaygın olarak hiyerarşik kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [157-158]. En üst kontrol seviyesinde mikro şebekenin güç kontrolü sağlanmaktadır, ikinci seviyede elektriksel kısıtlamalar değerlendirilmektedir, üçüncü seviyede sistemin kararlığını sağlamak amacıyla hızlı ve güvenilir kontrol algoritmaları kullanılmaktadır ve son seviyede gerilim ve akım geri beslemeleri değerlendirilmektedir. Şebekeye bağlı AA mikro şebekede, AA bara, herhangi bir ara yüz veya cihaz kullanılmadan doğrudan şebekeye bağlıdır. Bu özellik, AA mikro şebekelere yüksek güvenirlilik sağlamaktadır. Mikro şebeke çıkışının gerilim ve frekans karakteristiği ana şebekeyle aynıdır. Bu yüzden AA mikro şebekede kullanılan depolama cihazları ve dağıtık kaynaklar ana şebekeye uyumlu olmalıdır. Bu bileşenlerin, mevcut teknolojiye uyumlu ve gerilim ve akım

değerlerinin sınır değerler arasında yer alması durumunda, mikro şebekenin yüksek güvenirliliği sağlanabilmektedir. AA mikro şebekelerin en büyük dezavantajı, karmaşık işlemler yapabilen güç elektroniği elemanlarına (inverter, kıyıcı vb.) olan gereksinimdir. Sistemde yer alan sınır değerlerin çokluğu nedeniyle kullanılan güç elektroniği elemanları bütün sistemin verimini ve güvenirliliğini azaltmaktadır. Karmaşık ve alt bileşenleri fazla olan elektronik güç dönüştürücülerinin verimi daha sade yapıda olanlara nazaran daha az olmaktadır. Bu nedenle AA güç entegrasyon yöntemi, ikincil kaynakların fazla olduğu şebeke mimarilerinde düşük verimleri nedeniyle tercih edilmemektedir.

4.2. Doğru Akım Güç Entegrasyon Yöntemi

20. yüzyıl boyunca elektrik üretiminde, iletiminde ve tüketiminde AA form kullanımı ağırlıktaydı. Özellikle trafo, elektriğin uzak mesafelere dağıtımını sağladığından, elektrik şebekelerinin vazgeçilmez bileşeni durumundaydı. 21. yüzyılda, güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler sayesinde, AA formun baskınlığı azalmakta ve DA formun kullanımı ağırlık kazanmaktadır. Tüketim tarafında DA kullanan elektronik cihazların sayısı her geçen artmakta ve üretim tarafında başta YEK'ler olmak üzere birçok elektrik üretim kaynağı DA formda üretim yapmaktadır. Gelişen güç elektroniği sayesinde yüksek gerilime sahip DA formda, elektrik iletimi ve dağıtımı yapılabilmektedir. Ayrıca mobil cihazlarda ve YEK sistemlerinde kullanılan depolama cihazlarında DA form kullanılmaktadır. Günümüzde mevcut şebeke yapısını AA forma dayalı olmasından dolayı AA form kullanımı ağırlıkta olsa da; elektronik kullanımına dayalı teknolojik gelişmeler bu durumun zamanla değişeceğini göstermektedir.

Evlerde ve ofislerde kullanılan bilgisayar, telefon, yazıcı, televizyon ve aydınlatma elemanları gibi teknolojik aletler DA formda çalışmaktadır [159-162]. Son teknoloji aydınlatma ürünleri DA formda çalışmakla birlikte verimleri daha yüksektir. Isıtma, soğutma ve asansör gibi yaygın olarak kullanılan cihazların değişken hızlı sürücülerinde DA formu kullanılmaktadır. Ayrıca çelik işleme gibi sanayi uygulamalarında, yüksek verim ve daha az kıvılcım nedeniyle DA form tercih edilmektedir [163]. Bu kaynakların mevcut AA şebekeyle beslenmesi durumunda fazladan güç dönüşümüne ihtiyaç olduğundan sistemin verimi

düşmektedir. Referans [164]'de belirtildiği üzere dağıtımda kullanılan AA formun %30'u dönüştürüldükten sonra kullanılmaktadır. Bu dönüşüm, kullanılan toplam enerjinin %10-25'nin kayıp olmasına neden olmaktadır [165]. Referans [166]'da ifade edildiğine göre, dağıtım sisteminde DA form kullanılmasıyla doğrultucuların devre dışı kalması durumunda güç dönüşümü verimi %8 artmaktadır. Bütün bu gelişmeler tüketim tarafında AA formun cazibesini kaybettiğini göstermektedir.

Küresel ölçekte çevresel sorunlar ve ekonomik etkenler göz önüne alındığında gelecekte YEK'lerin daha yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir. Güneş ve yakıt hücresi gibi YEK'ler doğrudan DA formda üretim yaparken, rüzgar türbinleri ve mikro türbinler gibi düzenli AA enerji üretmeyen YEK'lerde de AA/DA/AA dönüşümü yapılmaktadır [167-168]. YEK sistemlerinin entegre edilmekte olduğu dağıtım sistemlerinin AA form yerine DA formda olması durumunda kayıplar azalmakta ve sistemin verimliliği artmaktadır. Dağıtım sisteminde DA formu kullanılmasının bir diğer önemli avantajı da enerji depolamada görülmektedir. Batarya ve süper kapasite gibi depolama cihazları doğrudan DA form kullanırken, volanlar gibi mekanik enerjiyi depo eden cihazlarda DA bağlantı noktası bulunmaktadır [169-170]. Ayrıca, depolamada AA yerine DA kullanılmasının daha güvenilir olduğu belirtilmektedir [171].

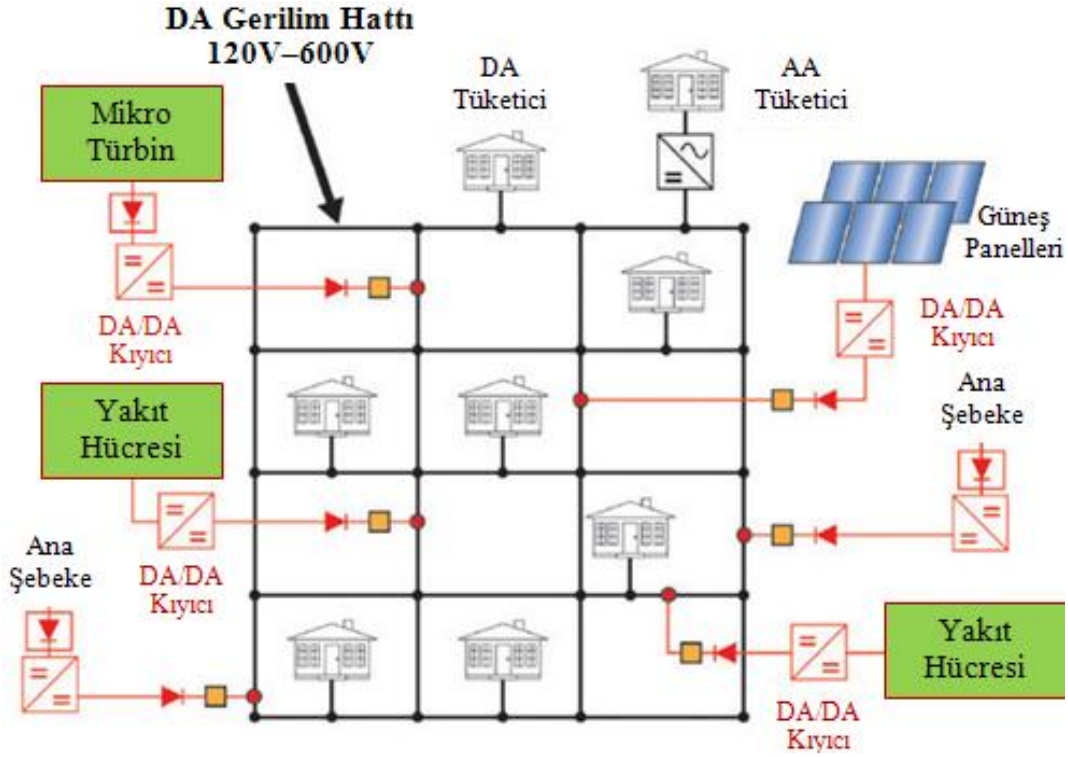
Veri kontrol merkezlerinde, yüksek güvenirliliğe sahip enerji temini hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, veri kontrol merkezleri kesintisiz güç kaynaklarıyla donatılmaktadır. Kesintisiz güç kaynaklarının şarj/deşarj döngülerinde çok katlı enerji dönüşümleri yapılmaktadır. Dağıtım sisteminin veya entegrasyon tekniğinin DA forma dayalı olması durumunda, kesintisiz güç kaynaklarında meydana gelen kayıplar azalmaktadır [172]. Elektriksel kayıpların azalmasıyla enerji giderleri azalmakta ve sistemin işletme maliyeti düşmektedir. Diğer bir ifadeyle, DA dağıtım sistemleri veri merkezleri için hem daha ekonomik hem de daha güvenli olmaktadır [173-174].

Karbondioksit salınımını azaltmak için öngörülen tedbirlerden biri de elektrikli araçların kullanımını artırmaktır. Ayrıca elektrikli araçların petrol bağımlılığını azaltması da beklenmektedir. Elektrikli araçlarda yer alan yakıt hücresi ve depolama cihazları DA formda çalıştığından; DA form kaynaklar ve dağıtım sistemleri bu teknolojileri için daha uygundur [175]. Günümüzde,

elektrikli araçlar, şarj istasyonlarında hızlı şarj edilmekte veya boş depolama cihazları dolu olanla değiştirilmektedir. Evlerde ve kamuya açık alanlarda elektrikli araçların şarj edilmeye başlanması ile birlikte mevcut şebekelerin yükü artacaktır [176-179]. Bu aşırı yüklenmede, birçok mevcut şebekenin kapasitesi yetersiz kalacağından, yük yönetiminin önemi artacaktır. DA mikro şebeke yapıları, enerji depolama ve kontrol sistemlerinde daha verimli ve güvenilir olmaları nedeniyle, elektrikli araçların şarj sistemlerinde kullanılması öngörülmektedir [176-179].

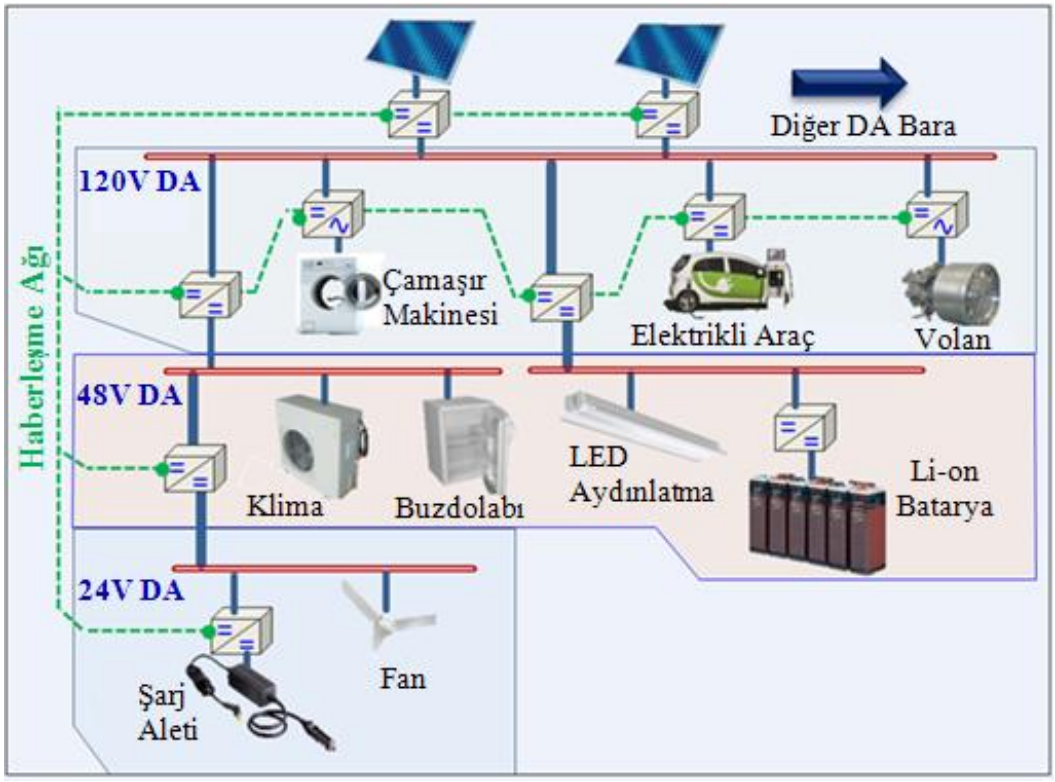
DA mikro şebekeler tasarlanırken, özellikle AA yüklerin bulunduğu güç sistemlerinde, birçok faktör göz önünde bulundurulmaktadır. Güvenilir DA mikro şebeke tasarımının gereksinimlerinden biri, DA gerilim altında sistem tepkisinin bilinmesidir. Bu bilginin elde edilebilmesi için, hedef güç sisteminin sürekli ve geçici hal analizlerinin yapılması gerekir [159]. DA mikro şebekelerde talep tarafında farklı karakteristiğe sahip yükler olduğu gibi üretim tarafında da farklı işletme koşullarında sürülen dağıtık kaynaklar bulunabilmektedir. Şekil 4.2'de DA mikro şebeke yapısı için örnek bir model gösterilmektedir. Örnek modelde ana şebekenin ve dağıtık kaynakların DA formda enerji sağladığı öngörülmektedir.

DA mikro şebeke sistemlerinde farklı dağıtım gerilim seviyeleri belirlenmekte ve bu gerilim seviyeleri 120 V ile 600 V arasında değişmektedir. Uluslararası Elektrik Elektronik Komisyonu ev içi dağıtım üst seviyesini, emniyet gerekçeleri nedeniyle, 120V DA olarak belirlerken, dağıtım şebekelerinde bu seviye genel olarak 400 V DA olarak belirlenmektedir [129]. Farklı DA gerilim seviyesinde üretim yapan dağıtık kaynakların gerilim karakteristiği, DA/DA kıyıcılarla düzenlenerek DA gerilim hattında mevcut şebekeye entegre edilmektedir. Ana şebekenin de DA formda dağıtım yaptığı göz önüne alınarak; DA gerilim hattı ile şebeke arasında DA/DA kıyıcı kullanılmaktadır. Örnek modelde DA ve AA tüketiciler bulunmaktadır. AA tüketiciler DA gerilim hattına inverter üzerinden bağlanmaktadır. DA mikro şebekelerde AA yükler, fazladan enerji dönüşümüne sebep olduğundan asgari tutulmaktadır. Böylece sistemin verimliliği artmakta ve maliyeti düşmektedir.



Şekil 4.2. DA mikro şebeke modeli

DA form dağıtım şebekesinde kullanılabileceği gibi ev içi güç dağıtımında da kullanılabilmektedir. Şekil 4.3'te DA formda güç dağıtımı yapan bir evin örnek modeli gösterilmektedir. Ev aletleri çektikleri güce göre sınıflandırılarak ilgili DA barasına bağlanmaktadır. Böylece yüksek güçte çalışan cihazların fazla akım çekmesinin önüne geçilmekte ve düşük güçte çalışan cihazlar için harici adaptör gerekmemektedir. Çamaşır makinesi ve elektrikli araç gibi yüksek güçte çalışan cihazlar, en üst DA gerilim seviyesi olan 120 V DA barasına bağlıdır. Klima ve LED aydınlatma gibi orta güçte çalışan cihazlar 48 V; fan ve şarj cihazı gerektiren düşük güçte aletler için ise 24 V DA bara kullanılmaktadır. Depolama cihazları çıkış gerilimine bağlı olarak farklı baralara bağlanabilmektedir. Güneş panellerinin en üst gerilim seviyesinden bağlanması, elektrik tüketiminin fazla olduğu yüksek güçlü cihazlarda, fazladan dönüştürücü kullanılmasının önüne geçmektedir. Ev içi cihazların iletişiminde, kablolu ve kablosuz iletişim teknolojileri kullanılabilmektedir. Üretim ve tüketim elemanları haberleşme ağı üzerinden kontrol edilmektedir. Talep taraflı yük yönetimi uygulamaları sayesinde, cihazlardan alınan anlık verilere göre, yüksek verimlilikte enerji maliyeti minimize edilebilmektedir.



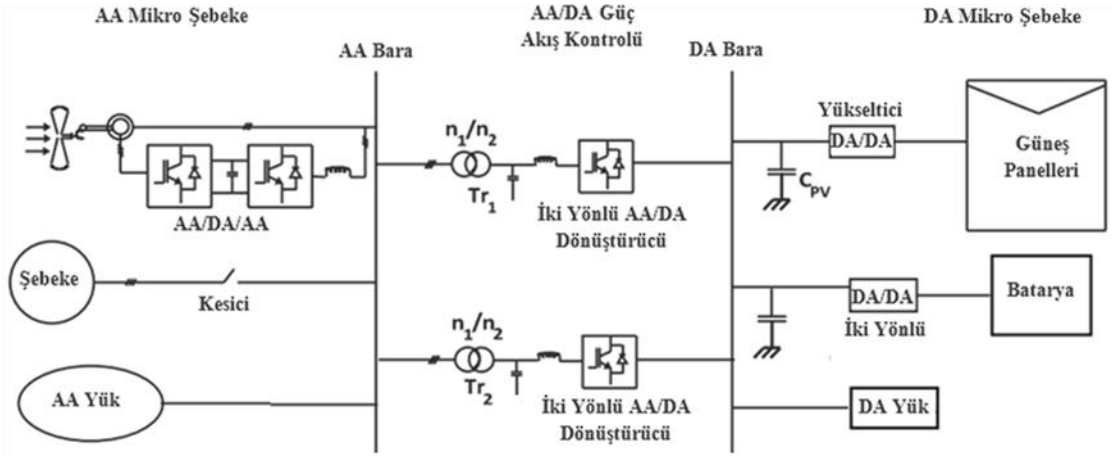
Şekil 4.3. DA formda güç dağıtımı yapan ev modeli

4.3. AA/DA Melez Güç Entegrasyon Yöntemi

Mikro şebekelerde farklı karakteristiğe sahip üretim kaynakları, depolama cihazları ve yükler bulunabilmektedir. Farklı elektriksel karaktere sahip mikro şebeke elemanlarının birbirine uyumunu sağlamak amacıyla merkezi kontrol benimsenmektedir. Mikro şebeke güç sistemleri bölgesel ölçekte, dağıtık kaynakların yeniden değerlendirilerek daha etkin kullanılmasını amaçlamaktadır. Ayrıca mikro şebekeler, yer aldıkları şebekelerde kontrol merkezi olarak da değerlendirilmektedir. Örneğin, mikro şebekeler iletim hatlarının gereksinimlerine, çok hızlı bir tepkimeyle cevap vererek sistemde güç kalitesini ve güvenirliliğini artırırlar. Mikro şebeke sistemleri bölgesel güç güvenirliliği artırma, fider kayıplarını azaltma, gerilim kararlılığı ve enerjide verimliliği artırma gibi özel amaçlar için de kullanılabilmektedir [180]. Mikro şebekeler mevcut şebekeye bağımlılığı azaltmakta ve uygun kontrol yöntemleri ve teknikleri kullanılması durumunda enerji kalitesini artırmaktadır. Ayrıca çevre dostu olan mikro şebekeler, geleneksel şebekelerin aksine, enerji verimliliğini artıran ve

maliyetleri azaltan, yeni enerji politikalarının uygulanmasına imkan sağlamaktadır [181].

AA ve DA formda güç kaynakları, yükler ve güç elektroniği elemanları içeren, örnek AA/DA melez mikro şebeke modeli Şekil 4.4'te gösterilmektedir. AA ve DA baralar, trafo ve iki yönlü güç dönüştürücüler kullanılarak, bağlantı halindedir. Ana şebeke melez mikro şebekeye AA bara üzerinden bağlıdır. Ana şebekeye uyumlu AA enerji üretimi yapan rüzgar türbini ve AA yükler, AA baraya bağlanan diğer mikro şebeke elemanlarıdır. Güneş panellerinin DA çıkışı, inverter girişi veya DA bara gerilim değeri için yeterli seviyede olmadığından yükseltici kıyıcı kullanılmaktadır. Batarya, üretimle tüketim arasındaki dengeyi korumak için kullanılmaktadır. Kontrol yöntemine bağlı olarak şarj/deşarj olan bataryanın DA baraya bağlantısı iki yönlü dönüştürücü üzerinden yapılmaktadır. DA yüklerin, DA bara gerilimine uyumlu olduğu öngörüldüğünden, DA baraya doğrudan bağlanmaktadır. DA gerilim, trafoda doğrudan dönüştürülmediği için trafodan önce DA/AA dönüştürücü kullanmak bir gereksinimdir. Aynı şekilde, AA bara gerilimini trafo kullanmadan DA bara gerilim seviyesine çıkarmak da mümkün değildir. Bu yüzden, AA barası ile DA barası arasında yapılan güç dönüşümlerinde trafo kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. AA/DA melez mikro şebeke modeli

Güneş panelleri seri veya paralel bağlanabilmektedir. Aydınlatma seviyesine ve anlık sıcaklığa bağlı olarak güneş panellerinden elde edilen güç değişmektedir. Panel güç çıkışında meydana gelen yüksek frekanslı dalgacıkları bastırmak

amacıyla kapasite (C_{pv}) kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde genel olarak çift beslemeli asenkron jeneratör kullanılmaktadır. Asenkron jeneratörün rotoru ile AA bara arasında PWM kontrollü AA/DA/AA dönüştürücü kullanılır. Rüzgar türbininin ürettiği düzensiz ve şebekeye uyumlu olmayan AA enerji bu dönüştürücü üzerinden ayarlanarak (reaktif güç gereksinimi, frekans ve gerilim genliği düzenlenerek) şebekeye uyumlu hale getirilmektedir. Rüzgar türbinleri AA/DA/AA dönüştürücünün DA barasından veya AA/DA güç dönüştürücüsüyle DA baraya bağlanabilmektedir.

Melez mikro şebekeler diğer mikro şebeke yapıları gibi iki çalışma modunda (şebekeye bağlı ve bağımsız mod) işletilmektedir. Şebekeye bağlı işletme modunda, ana dönüştürücü kararlı DA gerilim sağlar ve AA ve DA bara arasında güç dönüşümü için reaktif enerjiye ihtiyaç duyar. Rüzgar türbininin ve güç dönüştürücülerinin kontrolü ile maksimum güç elde edilir. DA kaynakların ürettiği güç DA yüklerin talebinden fazla olması durumunda iki yönlü dönüştürücü inverter olarak görev yapar. Üretilen toplam enerji, melez mikro şebekenin ihtiyacından fazla olması durumunda ise fazla enerji ana şebekeye verilerek şebekenin yükü azaltılır. Talebin üretimden fazla olması durumunda ise şebekeden destek alınır. Şebekeye bağlı mod için batarya ikinci dereceden önemli iken bağımsız mod için bataryalar hayati önem arz eder. Üretim ve tüketim arasında ki denge bataryalar ile sağlanır. Ayrıca bataryalar gerilim kararlılığı ve talebe hızlı cevap vermede de etkin rol oynarlar. Her iki işletme koşulunda da kontrol güç elektroniği elemanları üzerinden yapılmaktadır.

Buraya kadar yapılan değerlendirmelerden anlaşılacağı üzere, melez mikro şebeke, farklı türde üretim ve tüketim güç elemanlarına hitap edebilmektedir. Çalışma koşullarının esnek olması, melez mikro şebeke yapısının en önemli avantajı olarak değerlendirilebilir. Ancak, melez mikro şebeke yapısı diğer mikro şebeke yapılarına nazaran daha fazla güç elektroniği elemanına gereksinim duyarlar. Güç elektroniği elemanlarının fazlaca kullanılması güç dönüşümlerinden kaynaklanan kayıpların artması anlamına geldiğinden bütün sistemin verimliliği azalmaktadır. Uygun kontrol yöntemleriyle sistemin verimi artırılsa bile; güç elektroniği elemanları, sistemin kurulum ve işletme maliyetini artırdığından, mikro şebeke yapılarında asgari düzeyde olmalıdır. Fazladan güç elektroniği

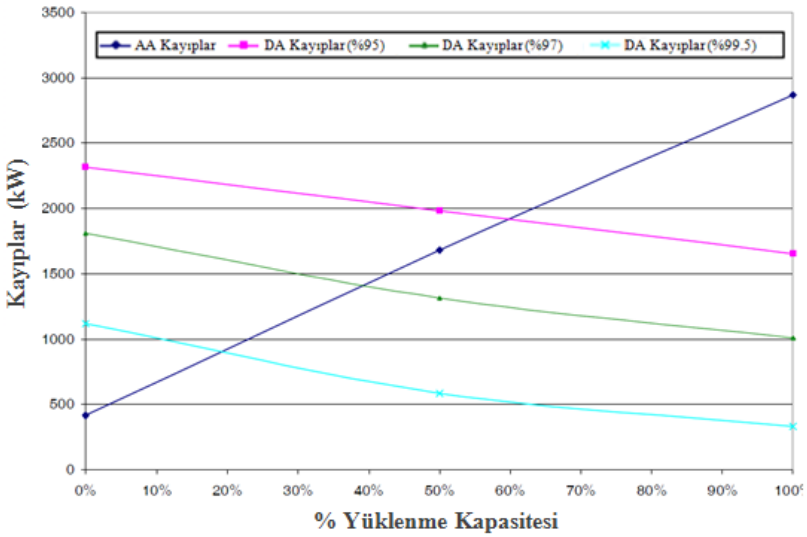
elemanları gereksinimi melez mikro şebeke yapılarının en büyük dezavantajı olarak tanımlanabilir.

4.4. Güç Entegrasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Gelişen teknoloji ile beraber elektrik kullanımına ait üretim ve tüketim alışkanlıkları değişmektedir. Geleneksel güç sistemlerinin aksine yeni nesil güç sistemlerinde DA form ağırlık kazanmaktadır. Bu değişim, ikincil kaynakların mevcut şebekeye entegrasyonunda kullanılan yöntemlerin tartışılmasında zemin oluşturmaktadır. Son zamanlarda literatürde yer alan ve güç entegrasyon yöntemlerinin karşılaştırıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Hammerstrom, [182], AA ve DA dağıtım topolojilerine bağlı olarak ev aletlerinde yer alan güç dönüştürücülerinin verimlerini karşılaştırmıştır. Şebekeden beslenen bir ev için, AA dağıtım topolojisinde toplam güç dönüşümü verimi %97 olarak bulunurken, DA dağıtım topolojisinde bu oran %95 olarak hesaplanmaktadır. Aradaki farkı belirleyen en önemli etken enerjinin dönüşüm sayısı olmaktadır. Örneğin, su ısıtıcısı için gerekli olan enerji AA dağıtım topolojisinde bir kere dönüştürülürken, DA dağıtım topolojisinde iki defa dönüşmektedir. Bu durumda, AA kaynaktan beslenen güç sistemleri için AA dağıtım topolojisi daha uygun olmaktadır. Güç kaynağının yakıt hücresi gibi DA formda üretim yapan bir kaynak olması durumunda ise; AA dağıtım topolojisinde toplam güç dönüşümü verimi %94,5 olarak ve DA dağıtım topolojisinde %97,3 olarak hesaplanmaktadır. Kaynağın DA formda olması durumunda DA dağıtım topolojisinin verimi daha yüksek olmaktadır. Bu sonuçtan anlaşılacağı üzere ev aletlerinde güç dönüşümünde, kaynak DA ve dağıtımın DA olması durumu, kaynağın AA ve dağıtımın AA olması durumundan daha verimlidir.

Starken vd iletim hatlarında meydana gelen elektriksel kayıpları AA ve DA formda tasarlanan modellere göre karşılaştırmasını analiz etmektedir [183]. AA ve DA modelleri için 714 bara ve 235 yük içeren iletim hattı kullanılmaktadır. AA model için geleneksel şebeke yapısı kullanırken, DA modellerde, farklı verimlere sahip güç dönüştürücüleri için ayrı hesaplamalar yapılmaktadır. Güç dönüştürücülerinin verimleri %95, %97 ve %99,5'dir. DA modellerde, dönüştürücülere bağlı olarak ilk kayıplar fazla olmaktadır. DA modellerde,

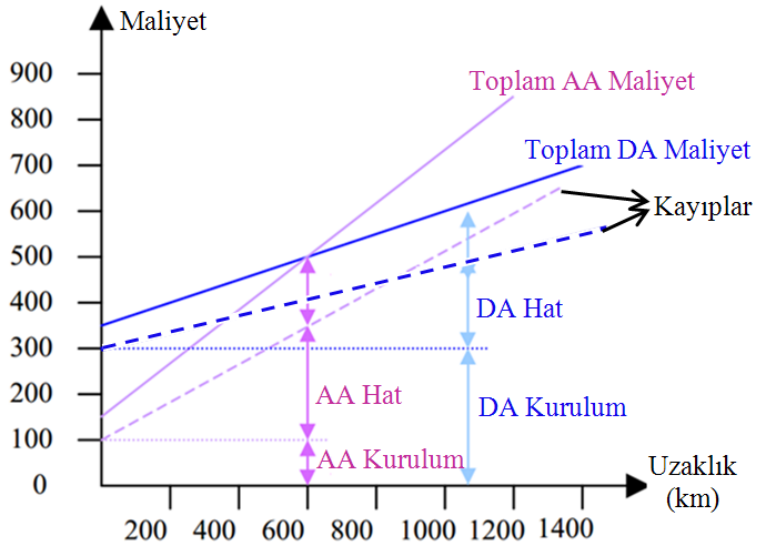
yüklenme kapasitesinin düşük olduğu durumlarda kayıplar fazla iken; yüklenme kapasitesi arttıkça kayıplar, AA modele nazaran azalmaktadır (Şekil 4.5). Yüksek verimli dönüştürücüler kullanıldığında, yüklenme kapasitesinin %20'den fazla olması durumunda DA modelde daha az kayıp meydana gelmektedir. Düşük verimli dönüştürücüler kullanılması durumunda ise, kayıpların AA modele göre aynı olma oranı, artarak %60 civarında olmaktadır. Analiz sonuçlarından elde edilen en önemli sonuçlardan biri de; AA modelde yüklenme kapasitesi arttıkça kayıplar artarken, DA modellerde yüklenme kapasitesi artıkça dönüştürücülerin verimi arttığından toplam kayıplar azalmaktadır.



Şekil 4.5. Yüklenme kapasitesine bağlı olarak elektriksel kayıp miktarları [183]

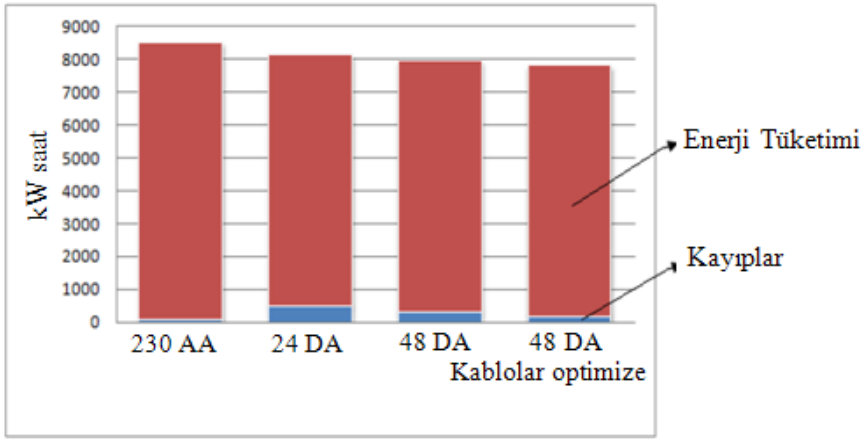
Larruskain vd. [184] AA ve DA formda tasarlanan iletim hatlarını karşılaştırmaktadır (Şekil 4.6). Bu analiz sonuçlarına göre; DA iletim hatlarında kurulum maliyeti AA hatlara nazaran fazla olmaktadır. Güç dönüştürücüleri, DA sistemlerde kurulum maliyetini artıran ana etkendir. Elektriksel kayıplar, DA modellerde daha az olmaktadır. DA sistemlerin ilk kurulum maliyetinin fazla olmasına rağmen hat kayıplarının daha az olması, DA sistemi uzun mesafelerde, düşük maliyetle, daha avantajlı hale getirmektedir. 700 km uzunluğundaki bir hatta AA ve DA sistemlerinin maliyeti aynı olmakta ve daha uzun mesafelerde DA sistemin toplam maliyeti daha az olmaktadır. Ayrıca, aynı çalışmada DA iletim hatlarının diğer avantajları olan; yüksek güç taşıma kapasitesi, kontrol

kolaylığı, faz-faz bağlantı imkanı, daha düşük kısa devre akımı ve çevreye daha az zarar vermesine değinilmektedir.



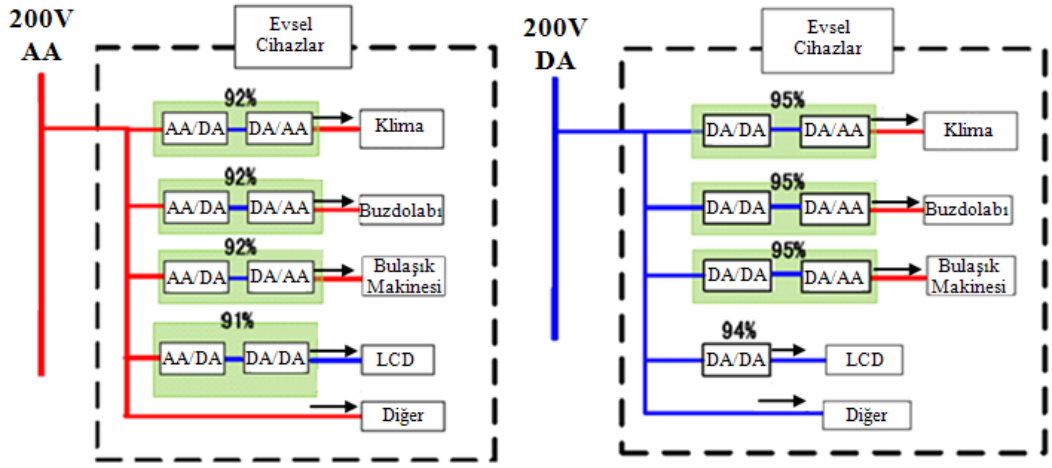
Şekil 4.6. Uzaklığa bağlı olarak AA ve DA iletim hatlarının maliyet grafiği [184]

Li vd DA evlerin, farklı beş grup yük kullanarak DA gerilim standartlarını analiz etmektedir [185]. Ev içi dağıtım DA gerilim standardı olarak 24, 48 ve 120 V gerilimleri karşılaştırılmaktadır. 24 ve 48 V DA gerilim kullanılmasının, AA sisteme göre daha fazla kayıplara neden olduğu ve 120 V ve daha üstü gerilimlerde ise DA dağıtımın daha avantajlı olduğu ifade edilmektedir. Benzer sonuçları Amin vd ev dağıtımında DA gerilimle AA gerilimini karşılaştırdıkları çalışmada elde etmektedir [186]. Şekil 4.7'de gösterilen sonuçlara göre; Ev aletlerinde DA gerilim kullanılması durumunda toplam tüketim azalmaktadır. Tüketimin azalması, bekleme modunda enerji kayıplarının azalmasına ve AA/DA dönüştürücülere ihtiyaç kalmamasına bağlanmaktadır. Dağıtım geriliminde 24 veya 48 V DA gerilim kullanıldığında sistem kayıpları 230 AA gerilime göre artmaktadır. Her ne kadar kabloları optimize etmek kayıpları azaltsa da, kayıplar yine AA sisteme nazaran fazladır. DA dağıtım gerilim seviyesini artırmak kayıpları azaltmaktadır. Bu iki çalışmadan anlaşılacağı üzere, ev içi DA dağıtım kullanımı, ev aletlerinde toplam tüketimi azaltmakta ve ev içi dağıtım gerilim seviyesi 120 V ve üzeri olması durumunda ise DA sistem kayıpları AA sisteme nazaran daha az olmaktadır.



Şekil 4.7. Farklı dağıtım gerilimleri için evsel tüketim ve kayıplar [186]

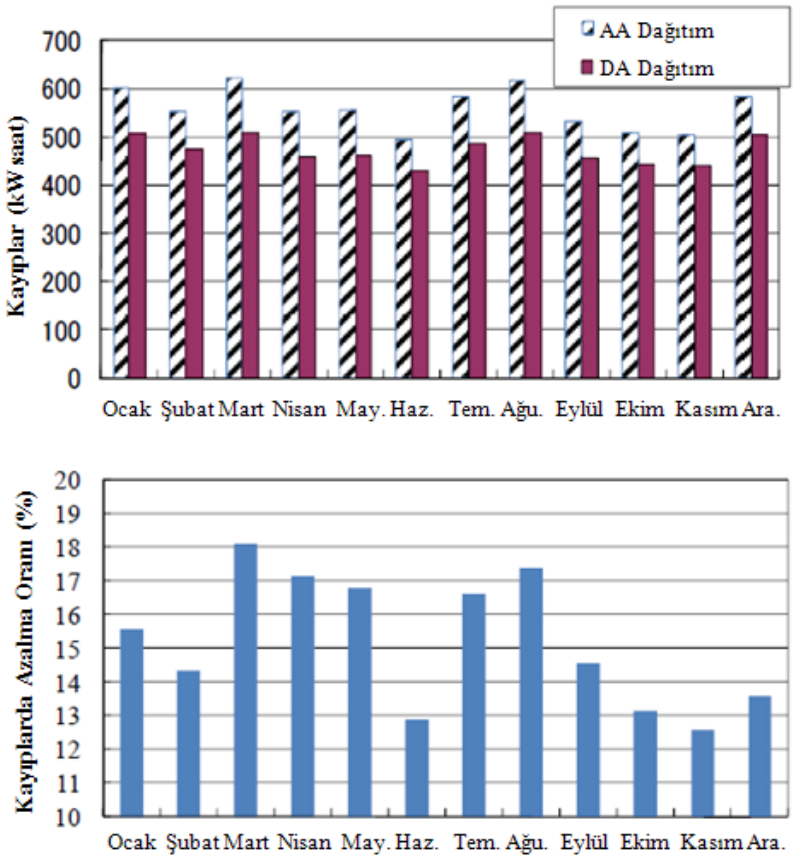
Kaynak [186]'ta evsel cihazların dağıtım formuna bağlı olarak enerji verimliliği analiz edilmektedir. Dağıtım gerilim seviyesi AA ve DA formda 200V olarak alınmaktadır. DA/DA kıyıcıların, doğrultuculardan daha verimli olduğu göz önüne alınarak evsel cihazların DA evsel dağıtımda daha verimli olduğu gösterilmektedir (Şekil 4.8). Evsel cihazlar DA dağıtımda, AA dağıtımdan %3 daha yüksek verimliliğe sahiptir.



Şekil 4.8. Evsel cihazların AA ve DA dağıtımda enerji verimliliği [186]

Bir önceki analizin referansı da olan kaynak [186]'ta, 30 kW güce sahip güneş panelinin ve 6,6 kW güce sahip kojenerasyon sisteminin bağlı olduğu bir sistemde AA ve DA mikro şebeke yapılarında kayıplar karşılaştırılmaktadır. Kojenerasyon sisteminin, AA mikro şebekede dönüştürücü verimi %92 olurken; DA mikro şebekede invertere ihtiyaç olmadığından dönüştürücü verimi %95'e

çıkmaktadır. Aynı nedenle güneş sisteminin verimi de artmaktadır. Güneş sisteminin yaz aylarında, kojenerasyon sisteminin ise kış aylarında daha fazla üretim yapacağı hesaba katılarak aylara bağlı elektriksel kayıplar analiz edilmektedir (Şekil 4.9). DA mikro şebekede yıl boyunca kayıplar AA mikro şebekeden daha az olmaktadır. DA mikro şebeke kullanılması durumunda yıllık kayıp miktarı 1030 kW saat azalmaktadır. Bu miktar AA mikro şebeke kayıplarının yaklaşık olarak %15'ine denk gelmektedir.



Şekil 4.9. Aylara bağlı olarak AA mikro şebeke ve DA mikro şebekede elektriksel kayıp miktarlarını ve DA mikro şebekede kayıpların azalma oranlarını gösteren grafikler [186]

Elektrik üretim ve tüketiminde DA formun ağırlık kazanmasıyla mevcut dağıtım şebekeleri sorgulanmaya başlanmıştır. Son zamanlarda yapılan literatür çalışmaları DA formun iletim ve dağıtımda daha avantajlı olduğunu göstermektedir. DA formda güç dönüşümünün AA formda güç dönüşümüne oranla daha verimli olması ve güç elemanlarının ağırlıklı olarak DA formda olması nedeniyle daha az dönüştürücüye ihtiyaç duyulması, DA mikro şebeke

sistemlerini daha verimli yapmaktadır. Ayrıca, kontrol, emniyet, güç taşıma kapasitesi ve çevre dostu olma alanlarında da DA form bir adım öne çıkmaktadır. DA mikro şebekenin birçok avantajına rağmen, DA formun yaygınlaşmasındaki en büyük engel mevcut sistemlerin AA forma göre tasarlanmış olmasıdır. DA mikro şebeke alanında yapılan çalışmaların, mevcut güç sistemlerinin dönüşmesi için gereken yatırım maliyetlerinin geri dönüş süresini kısaltması kaçınılmazdır. Bu değerlendirmeler sonucunda gelecekte DA mikro şebeke yapılarının yaygınlaşacağı sonucuna varılabilmektedir.

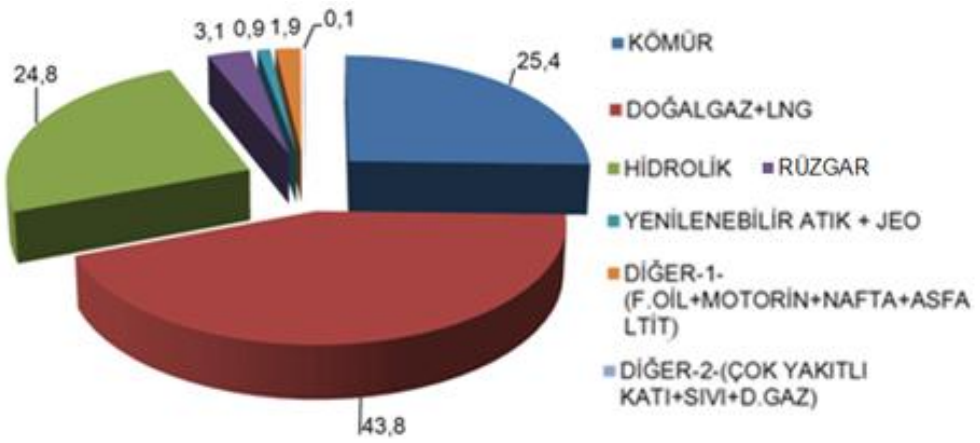
5. DOĞRU AKIM GÜÇ ENTEGRASYON YÖNTEMİNİN MUHTELİF GÜÇ ÖLÇEKLERİNDE PERFORMANS ANALİZİ

Küresel ölçekte artan enerji talebi geleneksel olarak fosil ürünü yakıtlardan karşılanmaktadır. Petrol ürünlerinin karbondioksit salınımını artırması ve bu kaynakların sınırlı miktarlarda bulunması yetkilileri yeni kaynak arayışına yönlendirmektedir. Devam eden araştırmalardan elde edilen sonuçlara bağlı olarak, YEK'ler, temiz ve tükenmez yapısıyla, geleneksel enerji kaynaklarına en önemli alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak YEK'lerin kesintili ve tahmin edilemez üretim karakteristiği önemli bir dezavantajdır. Bu sorun, birbirini tamamlayan birden fazla kaynak ve/veya depolama cihazlarının kullanılmasıyla kısmen aşılmıştır. Ancak YEK'lerin sürdürebilirliğini artırmak amacıyla yeni kontrol tekniklerine ve yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemlerden biri de DA güç entegrasyon yöntemidir. Bu bölümde, DA güç entegrasyon yönteminin evsel, dağıtım ve iletim ölçeklerinde performansı analiz edilmektedir. Analiz sonucunda, DA güç entegrasyon yönteminin, bir entegrasyon yöntemi olarak, YEK kullanan mikro şebekelerde yeterliliği ve muhtemel işletme koşulları için verdiği tepkiler tartışılmaktadır.

5.1. Doğru Akım Güç Entegrasyon Yönteminin Evsel Ölçekte Performans Analizi

Artan nüfusa ve teknoloji kullanımına bağlı olarak küresel enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Artan talebi büyük oranda fosil ürünü yakıtlardan karşılamak karbondioksit salınımını artırmaktadır. Bu yüzden, son zamanlarda, YEK'ler, çevreye duyarlılık açısından önem kazanmakta ve uygun yönetim ve yatırım yapılması halinde artan enerji fiyatlarına çözüm olmaktadır. YEK'lerin en önemli avantajı; tüketiciye yakın mesafelerde kurulabilen dağıtık kaynaklardır. Dağıtık kaynaklar sayesinde iletim ve dağıtım kayıpları azalmakta, artan talebe bölgesel çözümler bulunabilmekte ve temiz, tükenmez ve her yerde bulanabilen alternatif enerji kaynakları kullanılabilmektedir. Dağıtık kaynaklarda enerji verimliği açısından kontrol ve entegrasyon çalışmaları ön plana çıkmakta ve bu sayede YEK'lerin sürdürülebilirliği sağlanmaktadır.

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'nin (TEİAŞ) 2013 verilerine göre Türkiye'nin yıllık elektrik üretim miktarı 239,308 GW saat olarak belirtilmektedir [187]. Elektrik üretiminde en çok doğalgaz kullanılırken, kömür ikinci en çok kullanılan kaynak olmaktadır (Şekil 5.1). YEK kaynaklarından hidrolik, %24,8'lik oranla yeterli bir seviyeye ulaşmışken; rüzgar ve güneşin üretimde payı yetersiz kalmaktadır. Bu veriler, Türkiye'nin elektrik üretiminde YEK kaynaklarını yeterli seviyede kullanmadığını göstermektedir. Özellikle güneş enerjisinin kullanımı toplam üretimde yer almayacak kadar az miktardadır. Türkiye'nin elektrik üretiminde en çok doğalgaz kullanması, enerjide dışa bağımlı olduğunu göstermektedir. Başta güneş olmak üzere rüzgar ve diğer YEK kaynaklarına yönelim, ülkemizin dinamiklerini hareketlendirerek enerjide dışa bağımlılığı azaltacak ve yeni istihdamların oluşmasına meydan hazırlayacaktır.



Şekil 5.1. Türkiye'de üretilen elektrik enerjisinin kaynak dağılımı [187]

Dünya YEK yatırımı giderek artan bir seyir izlemektedir. 2014 küresel yenilenebilir enerji raporu [188] verilerine göre, solar enerji piyasası 2013 yılında 39 GW artarak toplamda 139 GW'ı aşmıştır. Çin küresel solar enerji büyümesinin yaklaşık üçte birini gerçekleştirerek bu alanda lider konumdadır. Amerika ve Japonya solar piyasada Çin'i takip etmektedir. Avrupa ülkelerinde ise, güneş enerjisi yerel politikaların bir parçası haline gelmekte ve güneş enerjisinin daha ucuz olduğu Afrika ve orta doğu ülkeleriyle işbirliği yapılmaktadır. Küresel ölçekte, rüzgar enerjisi 2013 yılında 35 GW artarak toplamda 318 GW'lık bir kapasiteye ulaşmıştır. Amerika' da rüzgar enerjisine yapılan yatırımların kesilmesi sonucunda, 2013 yılında rüzgar enerjisindeki artış önceki yıllara

nazaran yaklaşık 10 GW azalmıştır. Rüzgar enerjisine yapılan yatırımlarda Avrupa ve Asya ülkeleri başı çekerken Latin Amerika bölgesi yatırımlara yeni başlamaktadır.

Evsel ölçekte rüzgar türbinleri ve güneş panelleri yaygın olarak tercih edilen YEK kaynaklarıdır [189-192]. Bu kaynakların üretim karakteristikleri, günlük ve mevsimsel hava koşullarına bağlı olduğundan hasat edilen enerjinin miktarı net olarak bilinmemektedir. Bu problemin üstesinden gelmek amacıyla birden fazla YEK veya depolama cihazları kullanılmaktadır. Böylece farklı enerji kaynakları birbirinin zayıf yönlerini kapatmakta veya üretimin fazla olduğu saatlerde enerji depolanarak üretimin az olduğu saatlerde depolama cihazları devreye girmektedir. YEK sistemlerinde birden fazla enerji kaynağı kullanılması durumunda, kullanılan güç entegrasyonu yöntemi ve uygulamasının önemi artmaktadır. Güvenilir mikro şebeke yapısı oluşturmak, kullanılan güç elemanlarının uyumlu, ihtiyaca yönelik kapasitede ve doğru maliyet hesaplarının yapılması ile mümkündür. Bu yüzden, mikro şebeke enerji sistemlerinin tasarımı, geleneksel şebekelere nazaran, daha karmaşık ve sınır değerleri daha çok olan bir problemdir.

Buraya kadar yapılan değerlendirmelerin ışığı altında, son zamanlarda literatürde yer alan ve evsel ölçekte yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Zhan vd mikro şebekelerin bulunduğu akıllı evlerde adil fiyatlandırma için matematiksel bir program önermiştir [193]. Program algoritmasında, çözüm yöntemi olarak leksikografik minimaks yöntemi kullanılmaktadır. Fiyatlandırmada adaletsizliği gidermek amacıyla her bir evin günlük ihtiyacı tahmin edilmekte ve dağıtık kaynaklardan her bir eve düşen pay göz önüne alınarak tüketicilerin enerji maliyeti hesaplanmaktadır. 10 ve 50 ev ile yapılan iki farklı senaryoya göre %25 civarında enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Taşçıkaraoğlu vd yaptıkları çalışmada uygulamalı olarak akıllı evlerde kullanılan farklı YEK'leri ve depolama teknolojilerini farklı işletme koşulları altında (evsel güç kontrolü, cihaz kontrol ve güç akışı) analiz etmektedir [194]. Bu çalışmada deneysel değerlendirmelerden sonra; YEK'lerle ev cihazları arasında uyum olması durumunda tüketimin %3-4 azaldığı ve yük kaydırma yöntemlerinin kullanılması durumunda ise enerji maliyetinin %30-50 arasında azaldığı sonucuna varılmaktadır.

Zhang vd güneş sistemlerini ele alarak güç entegrasyonun, gelecekte elektrik şebekesini nasıl etkilediğini analiz etmektedir [195]. Çalışmada elektrikli araçların yaygınlaştığı varsayılmaktadır. Kullanılan benzetim modelinde elektrikli araçların, depolama cihazlarının ve güneş sisteminin gerçek zamanlı etkileri ele alınmaktadır. Entegrasyonda kullanılan güç bileşenlerinin doğru yönetilmesi durumunda mevcut şebekenin yükü hafiflemektedir. Elektrikli araçlar ve depolama cihazları, aşırı yüklenme durumunda ve karbondioksit salınımını azaltmada, şebekenin yükünü paylaşarak sisteme yük olmak yerine yardımcı olmaktadır. Japonya'da bir milyon adet elektrikli araç ve ısı pompası kullanılması durumunda 3 TWh fazla elektrik kullanımının önüne geçileceği ve karbondioksit salınımının %43 azalacağı hesaplanmaktadır.

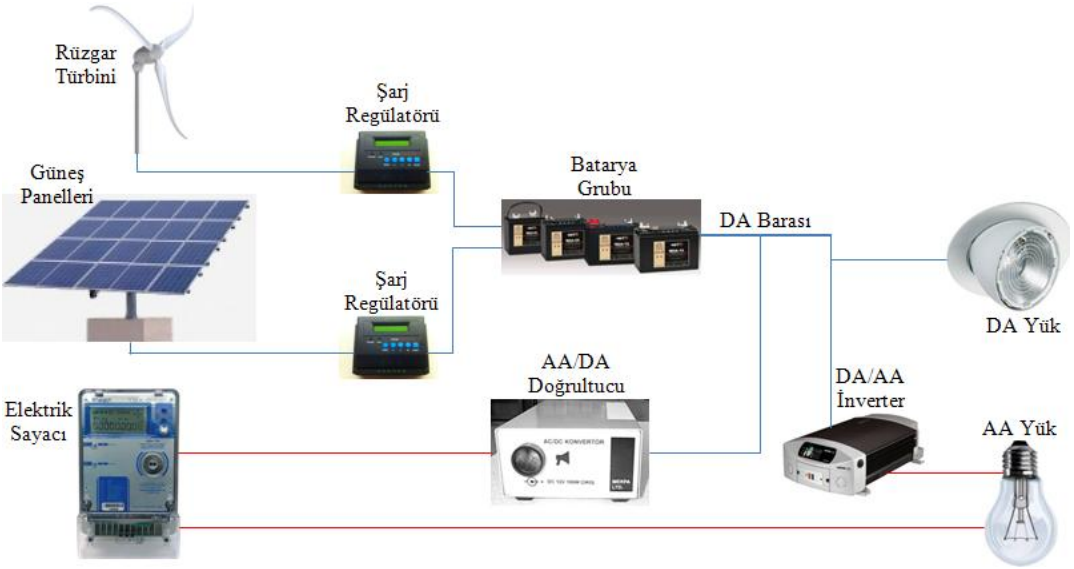
Kaynak [190]'da güneş ve rüzgardan oluşan melez bir sistemin, Ürdün hava koşullarına bağlı olarak, elektrik üretimine katkısı deneysel olarak incelenmektedir. Üretilen enerji ağırlıklı olarak ortam ısıtma ve soğutmada kullanılmaktadır. Güneş panellerinin eğimi ve tozlanmanın etkilerini de ele alan çalışmada, güvenilirliği artırmak amacıyla ana şebekede yer almaktadır. Ürdün hava koşullarına ve enerji fiyatlarına bağlı olarak, melez mikro şebekeye yapılan yatırımların geri dönüş süresi, ticari uygulamalarda 14 yıl, sanayi uygulamalarında 22,75 yıl ve evsel uygulamalarda 21,75 yıl olarak hesaplanmaktadır. Benzer bir çalışma, İrlanda hava koşulları ve enerji fiyatlarına bağlı olarak kaynak [196]'da gösterilmektedir. Bu çalışmada sadece rüzgar, sadece güneş ve rüzgar ve güneşten oluşan melez sistemler karşılaştırılmaktadır. 6 adet mikro türbinden oluşan toplam 2,4 kW'lık rüzgar sisteminin İrlanda koşullarına en uygun topoloji olduğu, ancak bu seçeneğin bile günümüz koşullarında ekonomik olmadığı yapılan analizler sonucunda ortaya konulmaktadır.

5.1. bölümde DA güç entegrasyon yönteminin evsel ölçekte performans analizi yapılmaktadır. Ana şebekenin ve ikincil enerji kaynaklarının DA bara üzerinden farklı yükleri beslemesi durumunda tüketiciye güvenli ve sürdürülebilir enerji verilebileceği incelenmektedir. AA ve DA formda yük modellemeleri için dinamik benzetim modelleri kullanılarak gerçek verilere yakın sonuçlar elde edilmesi hedeflenmektedir.

5.1.2. Benzetim Modeli

YEK'lerin kesintili ve tahmin edilemez üretim karakteristiği nedeniyle birden fazla ve birbirinin zayıf yönlerinin tamamlayıcı güç elemanlarının bir arada kullanılması daha güvenli olmaktadır. Örneğin, güneşli gün ve mevsimlerde yeterli üretim yapan güneş panellerinin, rüzgar türbinleriyle birlikte kullanılması durumunda kısa güneşlenme süresine sahip gün ve mevsimlerde sistemin açığı kapanmaktadır. Diğer bir örnek olarak; YEK sistemlerinde depolama teknolojisi kullanılması durumunda arz ile talep arasındaki denge daha kolay sağlanmaktadır. Üretimin talepten fazla olması durumunda, fazla enerji depo edilerek talebin üretimden fazla olduğu saatlerde kullanılabilmektedir. Aynı şekilde YEK sistemlerinin ana şebekeyle desteklenmesi durumunda sistem daha güvenli olmakta ve depolama cihazlarına olan ihtiyaç azalmaktadır.

Şekil 5.2'de DA güç entegrasyon topolojisiyle oluşturulan bir evin mikro şebeke modeli gösterilmektedir. YEK sisteminin üretim kaynaklarını mikro rüzgar türbini ve güneş panelleri oluşturmaktadır. Güneş ve rüzgardan hasat edilen enerjinin maksimum güçte sisteme kazandırılması için şarj regülatörleri kullanılmaktadır. Şarj regülatörlerinin kapasitesi YEK sisteminin üretim kapasitesine göre değişiklik gösterir. Örneğin 24 V ve 60 A karakteristiğine sahip bir şarj regülatörü, en fazla 1,44 kW'lık bir YEK sisteminde kullanılabilmektedir.



Şekil 5.2. DA güç entegrasyonu ile oluşturulan evsel mikro şebeke topolojisi

Örnek modelde rüzgar ve güneşten elde edilen enerji bataryalarda depo edilmektedir. Batarya sisteminin kapasitesi, kullanım amacına bağlı olarak belirlenmektedir. Depolama cihazları sadece arıza gibi acil durumlar için kullanılacaksa kapasiteleri daha düşük olmakta ve buna bağlı olarak sistemi besleme süresi kısalmaktadır. Depolama cihazlarının, yük kaydırma veya bir yük grubunu devamlı olarak besleme gibi uzun süreli enerji sağlama işlemlerini yapabilmesi için kapasitenin artırılması gerekir. Rüzgar ve güneşten elde edilen enerji bataryadan önce entegre edilebileceği gibi bataryada veya bataryadan sonra da entegre edilebilmektedir.

Farklı karakteristiğe sahip iki kaynağın düzenlenmeden entegresyonu mümkün olmadığından ek kontrol yöntemlerine gereksinim ortaya çıkar. Bataryadan önce entegrasyon yapılması durumunda dönüşüm kayıpları azalmasına rağmen güç akışı kontrolü zorlaşmaktadır. İkincil kaynakların bataryada veya bataryadan sonra entegre edilmesi durumunda ise kontrol kolaylığı olmasına rağmen fazladan dönüşüm nedeniyle kayıplar artmakta ve verim azalmaktadır. DA güç entegrasyon yönteminde entegrasyonun yapılacağı yer kullanım amacına ve sistem özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Örnek modelde YEK sistemleri batarya üzerinden bir araya gelmekte ve batarya ile ana şebeke DA barası üzerinden entegrasyon sağlamaktadır. Böyle bir sistemde kontrol kolaylığı tercih edilmekte olup verim ikinci planda kalmaktadır. Bu model, YEK'lerin ağırlıklı olarak sistemin yükünü çektiği işletmelerde tercih edilmektedir.

İnverterler, YEK sisteminde üretilen enerjiyi şebekeye uyumlu hale getirmektedir. İnverterler YEK sisteminin hemen çıkışına, şarj regülatöründen sonra ve bataryadan sonra sisteme dahil edilebilmektedir. İnverterlerin giriş gerilim değeri aralığı, tasarım özelliklerine göre, farklılık göstermektedir. Üretici tarafından belirtilen bu değerlere bağlı olarak inverter girişinin karakteristiği çıkış gücünün kalitesini belirlemekte ve bu değerlerin dışına çıkılması durumunda ise inverter çalışmamaktadır. İnverterin doğrudan panellere veya türbine bağlanması durumunda giriş gerilimi yeterli seviyede değilse veya ani değişimlerden dolayı akım ve gerilim değerleri istenmeyen seviyelere çıkması durumunda inverterden güç elde edilemez. Örneğin, giriş gerilim değerleri 15-30 V DA olan bir inverter bulutlanma, yetersiz aydınlatma veya yetersiz rüzgar durumunda dağıtık

kaynaklarda enerji üretimi yapılsa bile, çalışmamaktadır. Bu yüzden, inverterlerin şarj regülatöründen veya bataryadan sonra kullanılması YEK sisteminin verimini artırmaktadır. İnverter çıkışı amaca yönelik olarak AA yüklere, şebekeye veya her ikisine birden bağlanabilmektedir. İnverter çıkışının şebekeye bağlanması durumunda üretilen enerjinin fazlası şebekeye aktarılarak şebekenin yükü hafifletilebilir. YEK sisteminde üretilen fazla enerjinin ana şebekeye aktarılabilmesi için mevcut şebekenin bu duruma uyumlu olması gerekir. Bu noktada, çift yönlü sayaçlardan okunan değerlerin, tüketicinin faturasına adil bir şekilde yansıması önem arz etmektedir.

Ana şebekenin, YEK sistemini desteklemesi sürdürülebilir bir mikro şebeke yapısı için avantajdır. AA/DA doğrultucular sayesinde, ana şebekeden alınan enerjiyle sistemde bulunan DA yükler beslenebilmekte ve batarya sistemi acil durumlar için şarj edilebilmektedir. Ayrıca AA/DA doğrultucuların ara eleman olarak kullanılmasıyla volan (flywheel) gibi AA çıkış veren depolama cihazları ve asenkron motorla üretilen rüzgar türbinleri gibi AA formda üretim yapan dağıtık kaynaklar mikro şebeke sisteminde yer alabilmektedir. Yeni nesil birçok cihaz DA formda çalışmakta ve bu cihazların şebekeye uyumu AA/DA doğrultucularla (adaptör) sağlanmaktadır. YEK sistemlerinin kullanımın yaygınlaşmasıyla sistemde yer alacak olan AA/DA doğrultucular, teknolojik cihazlarda kullanılan adaptörlere gereksinimi ortadan kaldırmaktadır. Farklı gerilim aralığında çalışan yükler için çok çıkışlı DA/DA dönüştürücüler [129] kullanmak mümkündür.

Akıllı sayaçlar, geleneksel sayaçların yaptığı tüketim değerlerini okuma ve görüntülemeye ek olarak çift yönlü güç okuma, dinamik fiyatlandırma, talep taraflı güç yönetimi ve güç dönüşümü yapma gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca akıllı sayaçlar YEK sistemlerinin üretim ve tüketim karakteristiğini göz önünde bulundurarak mikro şebeke güç elemanlarını kontrol edebilmektedir. Bu sayede tüketicinin enerji faturası en aza inmekte ve enerji güvenliği sağlanmaktadır. Örnek modelde elektrikli sayaç çift yönlü elektrik akışını kontrol etmekte ve dinamik fiyatlandırma için giriş ve çıkış güçlerini okuyabilmektedir. Bu özellikleriyle akıllı sayaçlar, bölgesel veya küresel enerji yönetim politikalarının evsel ölçekte uygulanmasına imkan sağlamaktadır.

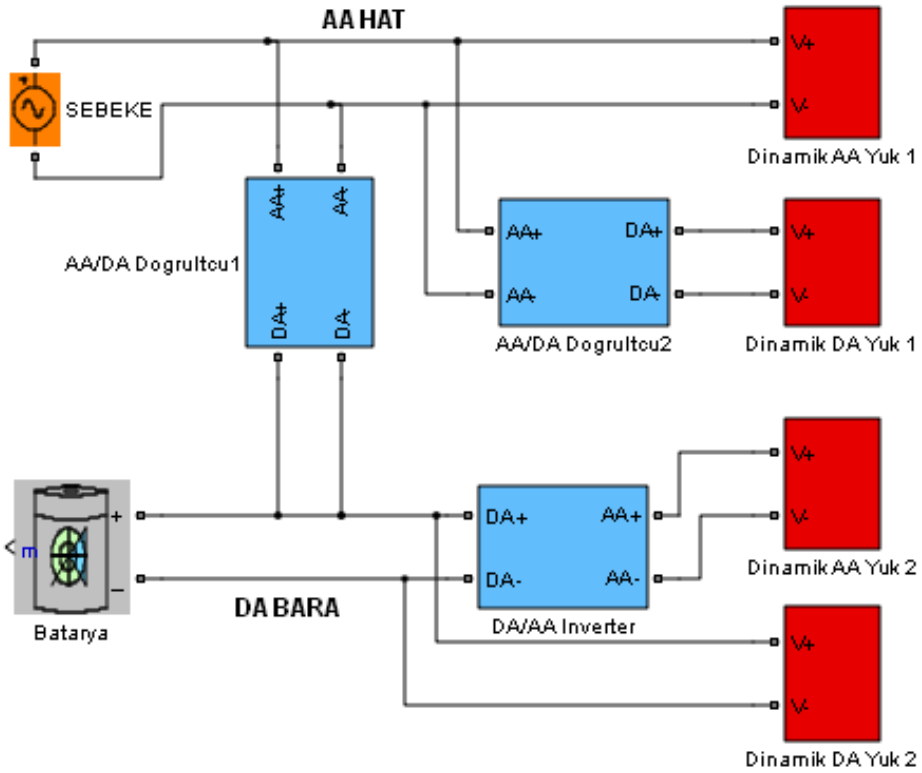
Elektrik enerjisinde üretim ve tüketim alışkanlıklarının değişmesiyle DA formun kullanımı artmaktadır. DA yükleri mevcut şebekeden alınan AA enerjiyle

beslemek veya DA formda yapılan üretimi AA forma uyumlu cihazlarda kullanmak güç sisteminin verimliliğini azaltmaktadır. DA formda çalışan cihazların çoğalması ve LED ampul gibi doğrudan DA formla beslenen yüklerin günümüzde üretilmeye başlanması, geleceğin evlerinde DA barasının varlığını zorunlu hale getirmektedir. YEK'lerin ürettiği DA formda enerji ve tüketim tarafında yer alan DA yükler entegrasyon barası üzerinde toplanması halinde enerji en az dönüşümle tüketilmiş olacaktır. Sistemde yer alan AA yükler için inverter kullanılarak tüketicinin şebekeye bağımlılığı en az seviyeye indirilebilir. Bu durumda şebeke, yetersiz hava koşuları, aşırı yüklenme ve mikro şebeke sisteminde meydana gelebilecek arıza durumları gibi şebeke koşullarında kullanılmaktadır.

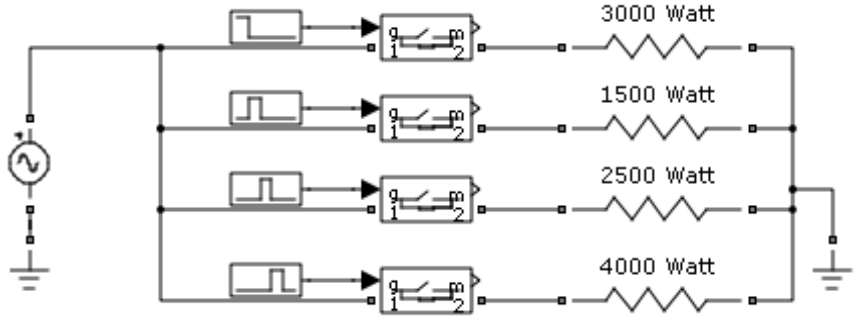
Şekil 5.3'te evsel ölçekte DA güç entegrasyon yönteminin kullanıldığı benzetim modeli gösterilmektedir. YEK'lerin batarya üzerinden entegre edildiği öngörüldüğünden ikincil kaynak olarak sadece batarya vardır. Ana şebeke 220 V 50 Hz karakteristiğe sahip ve güç sınırı olmayan kaynak olarak belirlenmektedir. AA ve DA yüklerden oluşan ve aynı yük modeline sahip iki ev bulunmaktadır. Evlerden birinde depolama ünitesi varken diğerinde bulunmamaktadır. Batarya bulunmayan evde talebin tamamı şebekeden karşılanmakta ve DA yükleri beslemek için AA/DA doğrultucu kullanılmaktadır. Aynı yük modeline sahip ikinci ev ise hem şebekeden hem de bataryadan beslenmektedir. DA bara geriliminin DA yükleri doğrudan besleyecek seviyede olduğu varsayıldığı için, ikinci evin DA yüklerinden önce DA/DA kullanımına gerek kalmamaktadır. İkinci evin AA yüklerini beslemek için DA/AA inverter kullanılmaktadır.

DA güç entegrasyon yönteminin evsel ölçekte yeterlilik gösterebilmesi için ani yük değişimlerinde akım ve gerilim kararlılığını koruması gerekir. Bu yüzden, örnek benzetim modelinde gerçek zamanlı veriler elde etmek amacıyla dinamik yük modelleri kullanılmaktadır. Dinamik yük modelleme, Matlab/Simulink ortamında farklı yöntemlerle ve güç elemanlarıyla yapılabilmektedir. Şekil 5.4'te yarı iletken güç elemanlarıyla yapılan dinamik yük modeli gösterilmektedir. Modelde farklı güç değerlerine sahip AA yükler beslenmektedir. Her bir farklı zaman aralığında bir yük devreye alınarak diğerleri devre dışı bırakılmaktadır. Yükler, IGBT anahtarlama elamanlarıyla aktive edilmektedir. IGBT'lerin

tetiklenmesinde farklı darbe süresine sahip ve birden çok darbe içeren tetikleme sinyali kullanılabilmektedir.



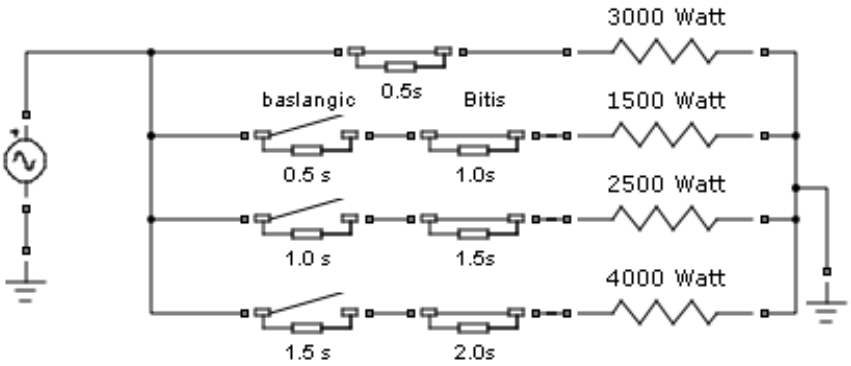
Şekil 5.3. DA güç entegrasyon yönteminin evsel ölçekte benzetim modeli



Şekil 5.4. IGBT'lerle tasarlanan dinamik yük modeli

Dinamik yük modelini oluşturmak için farklı anahtarlama elemanları kullanılabileceği gibi kesiciler de kullanılabilmektedir. Şekil 5.5'te kesicilerle tasarlanan dinamik yük modeli gösterilmektedir. Kesiciler, benzetim süresi boyunca, kesme veya devreye alma olarak tek hamle yapabilmektedir. Yükün

başlangıç zamanında aktif olması durumunda tek kesici kullanılması yeterli iken, ilerleyen benzetim süresinde yükü devreye almak ve atmak için ayrı iki kesici kullanmak gerekmektedir. Örnek benzetim modelin başlangıç anında 3000 W yük aktif haldedir ve 0,5 saniyeye ayarlı bir kesici bulunmaktadır. 0,5. saniyede kesici açarak 3000 W yükü devre dışı bırakmaktadır. 1500 W yüke ise 0,5 ve 1,0 saniyeye ayarlı iki kesici bulunmaktadır. 0,5. saniyede 1500 W yük devreye alınmakta ve 1,0 saniyede devre dışı kalmaktadır. Bu yöntemle, kesicilerle her bir benzetim süresi dilimi için farklı yük tanımlanabilmektedir. Örnek yük modellerinde saf aktif yük kullanılmış olsa da reaktif yükler için de aynı yöntem kullanılabilmektedir. Reaktif yük için yük bloklarını hedef yüke göre ayarlamak yeterli olmaktadır.

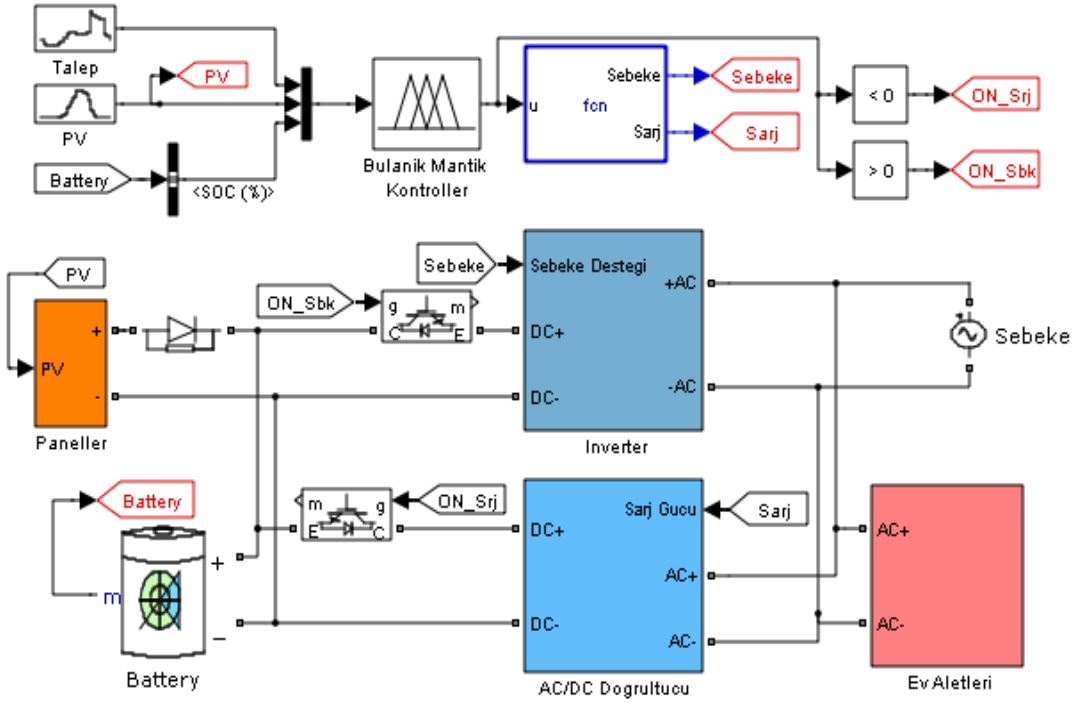


Şekil 5.5. Kesicilerle tasarlanan dinamik yük modeli

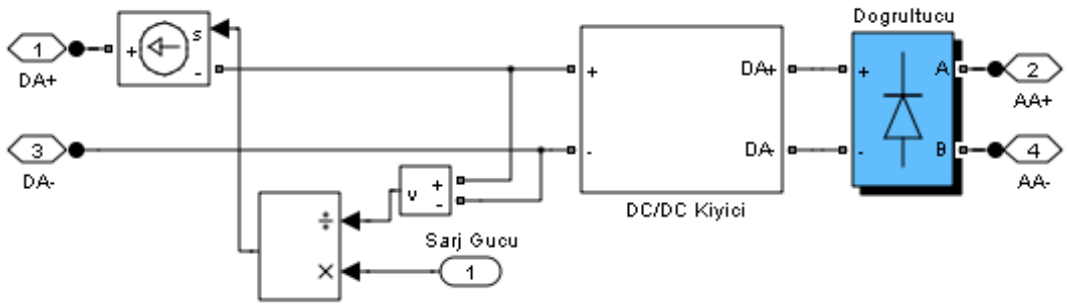
Şekil 5.6'da YEK ile bataryanın DA bara üzerinden entegrasyonunu içeren bir evsel mikro şebeke modeli gösterilmektedir. Batarya ve YEK, elektronik ara eleman kullanılmadan, birbirine doğrudan bağlıdır. Şebeke enerjisi geleneksel olarak kullanılan 220 V ve 50 Hz değerlerine sahiptir. Batarya 5 kWh kapasiteye sahiptir ve bu miktar evsel mikro şebekelerde kullanıma uygundur. Diyot ve kontrollü yarı iletken anahtarlar ters akımı engellemek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, kontrollü yarı iletken anahtarlar kontrolörün çıkışına bağlı olarak inverter ve doğrultucunun eş zamanlı çalışmasını da önlemektedir.

Bulanık mantık çıkışı pozitif ve negatif değerler alabilmektedir. Pozitif değerler inverter güç kontrolünde kullanılmakta ve şebekenin YEK ve bataryadan ne kadar destekleneceğini belirlemektedir. Negatif değerler ise doğrultucunun güç kontrolünü sağlamakta ve bataryanın şebekeden ne kadar güçle şarj edileceğini

belirlemektedir. Güç dönüştürücülerin kontrol etmek amacıyla akım kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Doğrultucunun güç kontrol ünitesi Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Bulanık kontrol tarafından hesaplanan güç değeri DA/DA kıyıcının çıkış gerilimine bölünerek şarj akımı elde edilmektedir. Şarj gerilimi genellikle sabit ve seri bağlı batarya grubunun gerilimleri toplamına eşit olmaktadır. Bu yüzden, doğrultucu gücü akım değiştirilerek kontrol edilebilmektedir. Aynı akım kontrol ünitesi inverter için de kullanılmaktadır.



Şekil 5.6. DA entegrasyon yönteminin kullanıldığı evsel mikro şebekenin benzetim modeli



Şekil 5.7. DA/DA kıyıcı ve akım kontrol ünitesi

Batarya yönetimi zirve talebi azaltmada anahtar rol oynamaktadır. Gelişmiş batarya kontrol teknikleri sayesinde mikro şebekelerin verimleri artırılabilmekte

ve bataryaların kullanım ömrü uzatılabilmektedir. Bulanık kontroller bataryanın şarj seviyesini %15-%85 arasında kalmasını sağlamaktadır. Ayrıca akım kontrolü sayesinde şarj gücü kontrol edilmekte ve batarya için zararlı olan yüksek güçlü şarjlardan kaçınılmaktadır.

Evsel mikro şebeke, kontrolörün çıkışına bağlı olarak batarya şarj durumunda veya şebeke destek modunda olmaktadır. Mikro şebeke şarj durumunda olduğunda, batarya YEK ve şebekeden şarj olmaktadır. Şebekeden çekilen şarj gücü ($P_{ŞŞ}$) bulanık kontrolün çıkışına bağlı olarak ayarlanmaktadır. Talep, şarj seviyesi ve YEK'lerden elde edilen güç azaldıkça $P_{ŞŞ}$ artmaktadır. Şarj durumunda batarya şarj gücü $P_{BŞ}$ Denklem 5.1'de gösterildiği gibidir.

$$P_{BŞ} = P_{BŞ} + P_{ŞŞ} \tag{5,1}$$

Zirve talep zamanında batarya ve YEK şebekeyi desteklemektedir. Şebeke destek gücü ($P_{ŞD}$) batarya şarj durumuna ve YEK üretimine bağlı olarak bulunmaktadır. Batarya şarjı ve YEK üretimi arttıkça $P_{ŞD}$'de artmaktadır. Talep ve batarya şarjının düşük olduğu durumlarda, YEK'lerde üretilen enerji şebeke ve batarya arasında paylaşılmaktadır. Şebeke destek modunda $P_{ŞD}$ Denklem 5.2' de yer alan bağıntıdan bulunmaktadır.

$$P_{BŞ} = P_{YEK} - P_{ŞD} \tag{5,2}$$

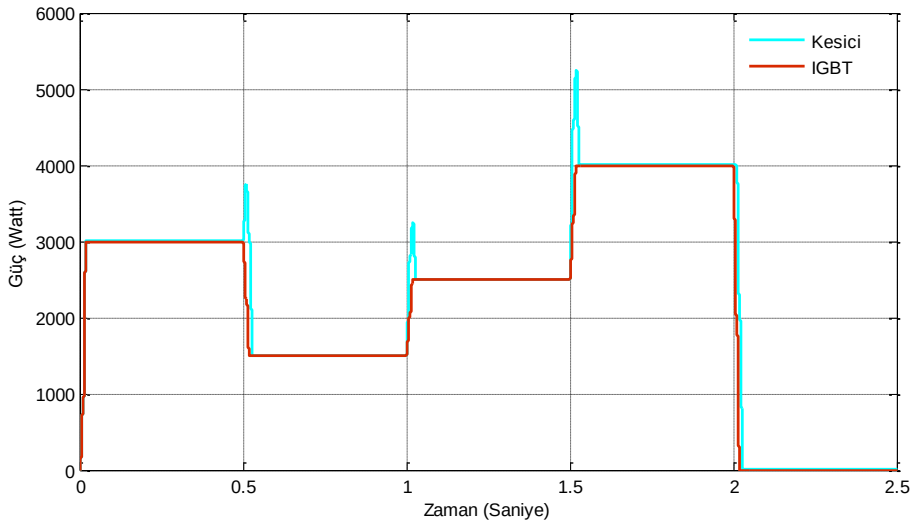
Şebeke destek gücü, YEK'lerden elde edilen güçten fazla olduğunda batarya şarj gücü eksi değer almaktadır. Batarya şarj gücünün eksi olması, bataryanın şebeke desteği için deşarj olduğunu göstermektedir. Yeklerden elde edilen güç, şebeke destek gücünden fazla olduğu durumlarda ise batarya şarj gücü pozitif değer almakta ve bu değer bataryanın şebekede desteğinden kalan YEK gücü ile şarj olduğunu göstermektedir.

5.1.3. Benzetim Sonuçları

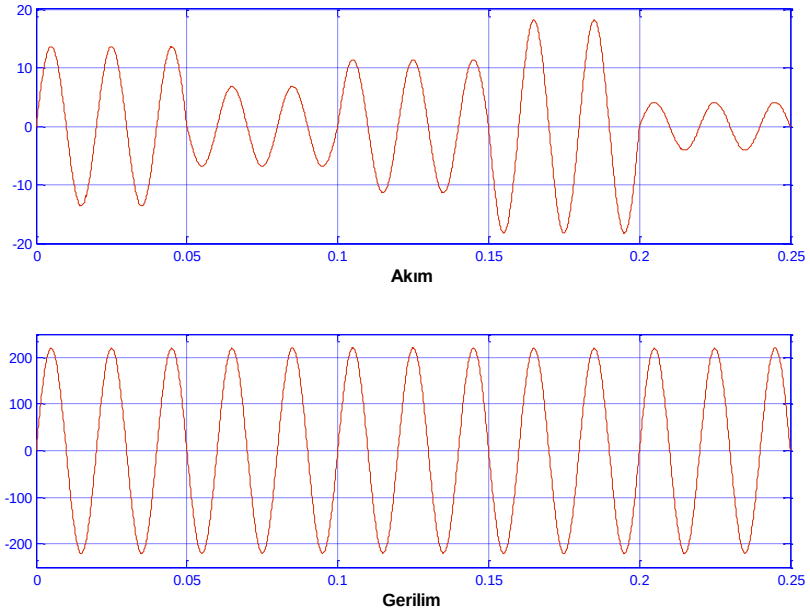
IGBT ve kesicilerle tasarlanan aynı dinamik yük modeli bir kaynaktan beslenerek, modellerin tepkisi analiz edilebilir. Şekil 5.8'te kesici ve IGBT ile

tasarlanan dinamik yük modellerinin tepkisi gösterilmektedir. Güç sistemlerinde ani gerilim değişimi meydana geldiğinde yüksek akım akmaktadır. Bu yüzden, ani gerilim değişimini önlemek amacıyla kesicilerde anahtara paralel kapasite bulunmaktadır. Bu kapasiteler sebebiyle kesiciler, geçiş sürelerinde reaktif güce gereksinim duyarlar. Benzetim çıktılarında görüldüğü üzere; kesicilerin kullanıldığı modelin geçiş sürelerinde çekilen güç artmakta ve kararlılık süresi, IGBT'li modele oranla daha geç yakalanmaktadır. Bu sonucun sebebi kesicilere paralel bağlı kapasitelerin reaktif güç gereksinimidir. IGBT kullanılan modelde kararlılığı yakalama süresi daha kısadır ve fazladan güç çekme durumu söz konusu değildir. Ancak IGBT'nin karmaşık yapısı nedeniyle benzetim süresi kesici modele nazaran daha fazla olmaktadır. Bu sonuçlara göre, reaktif güç gereksinimi olmayan IGBT modeli güç tasarrufunda ve kontrol kolaylığında daha avantajlıyken, kesici modeli, basit yapısı nedeniyle benzetim süresinin kısalığında daha avantajlıdır.

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere, örnek iki dinamik yük modelinde de istenen güç seviyesine kısa sürede ve yüksek hassasiyette ulaşılabilmektedir. Aynı sonuç dinamik yüklerin akım ve gerilim karakteristiğinde de görülmektedir. Şekil 5.9'da dinamik yük modelinin akım ve gerilim karakteristiği gösterilmektedir. Dinamik yük değeri sırasıyla 3000, 1500, 2500, 4000 ve 900 W olarak değişen yük modelinde gerilim kararlılığı benzetim süresince korunmaktadır. Yük değişiminde geçici rejim görülmemekte ve akım güç değerine bağlı olarak farklı değerlerde düzgün sinüs yapısına sahip olmaktadır.

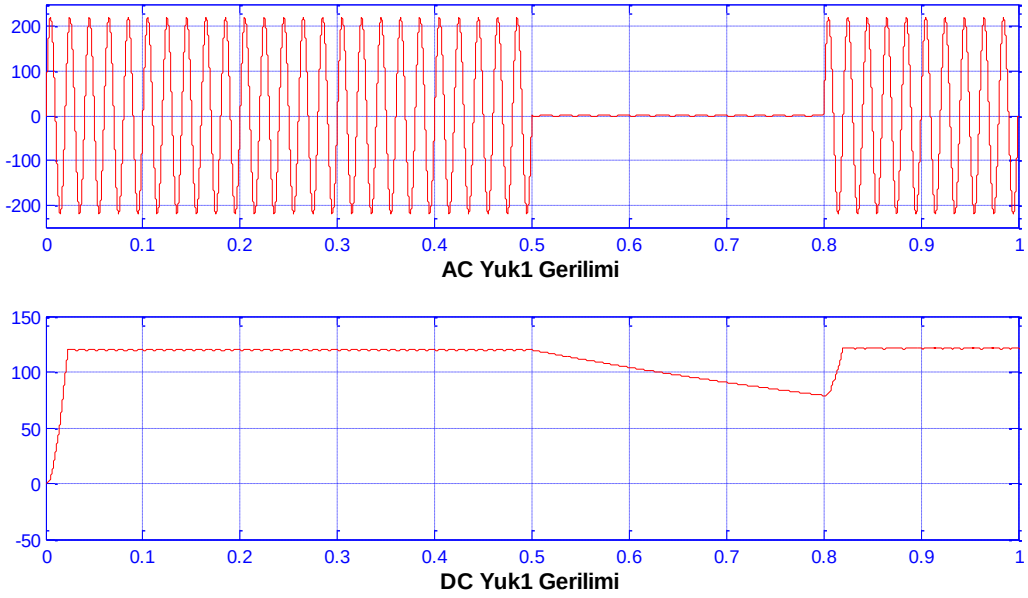


Şekil 5.8. Kesici ve IGBT ile tasarlanan dinamik yük modellerinin tepkisi



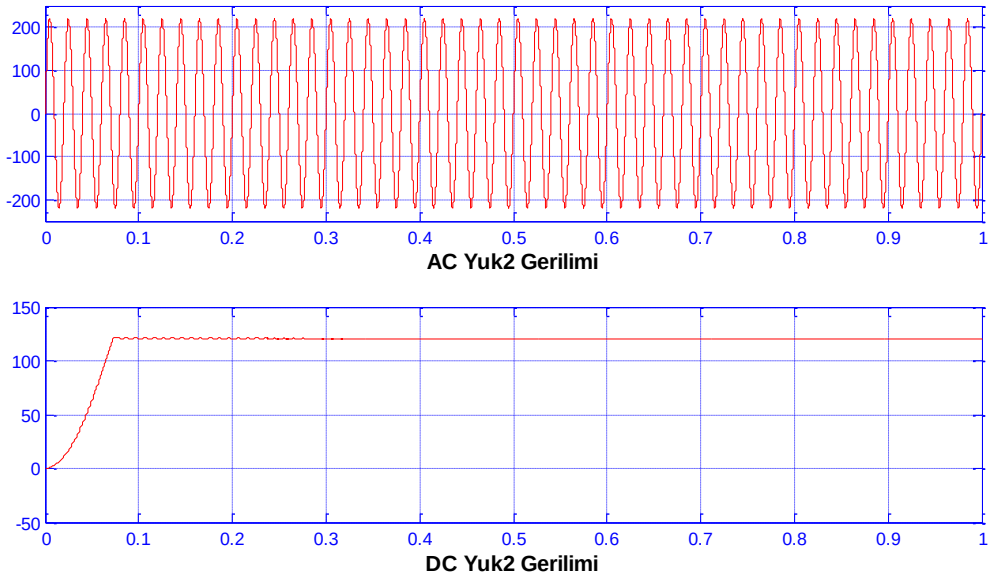
Şekil 5.9. Dinamik yük modelinin akım-gerilim karakteristiği

Dinamik AA yük, DA yük, batarya, şebeke ve güç elektroniği elemanlarından oluşan evsel mikro şebekenin AA hattında yer alan dinamik yüklerin benzetim çıktıları Şekil 5.10'da gösterilmektedir. AA yük modelinin şebekeye bağlı olarak besleme gerilimi gayet düzgündür. Şebekede 0,5-0,8 saniyeleri arasında arıza meydan geldiği varsayılmaktadır. Bu durumda sistemin ikincil kaynağı olmadığından enerji kesilmektedir. DA yükte ise geçici rejimden sonra gayet düzgün 120 V DA gerilim vardır. Arıza anında DA gerilimin düzgünlüğü bozulmakta ve güç elektroniği elemanları cihazların zaman sabitine bağlı olarak gerilim değeri düşmektedir. Bu sonuçtan anlaşılacağı üzere; evsel benzetim modelinde yer alan güç elemanları mikro şebeke uygulamaları için yeterli seviyede olmakta ve bu elemanlarla evsel ölçekte gerçek verilere yakın değerler elde edilebilmektedir.



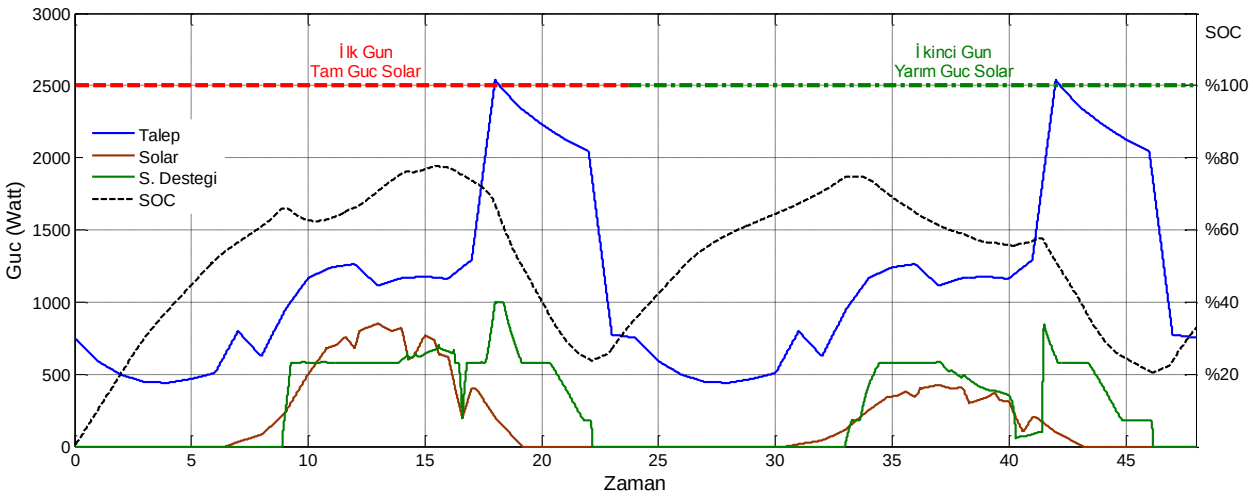
Şekil 5.10. Şebekeden beslenen yük grubunun benzetim sonuçları

Şekil 5.11'de DA barasına bağlı yüklerin gerilim karakteristikleri gösterilmektedir. İnverterden beslenen AA yükün gerilim değerleri gayet düzgündür ve 0,5-0,8 saniye aralığında meydana gelen arıza AA yükü etkilememiştir. Şebekenin arıza sonucu devre dışı kalması durumunda batarya yeterli tepkiyi göstererek AA ve DA yükleri beslemeye devam etmektedir. Bu sonuca göre; DA güç entegrasyon yöntemiyle entegre edilen evsel mikro şebeke sistemi muhtemel işletme koşulları altında yeterli performansı göstermektedir.



Şekil 5.11. Doğru akım barasından beslenen yük grubunun benzetim sonuçları

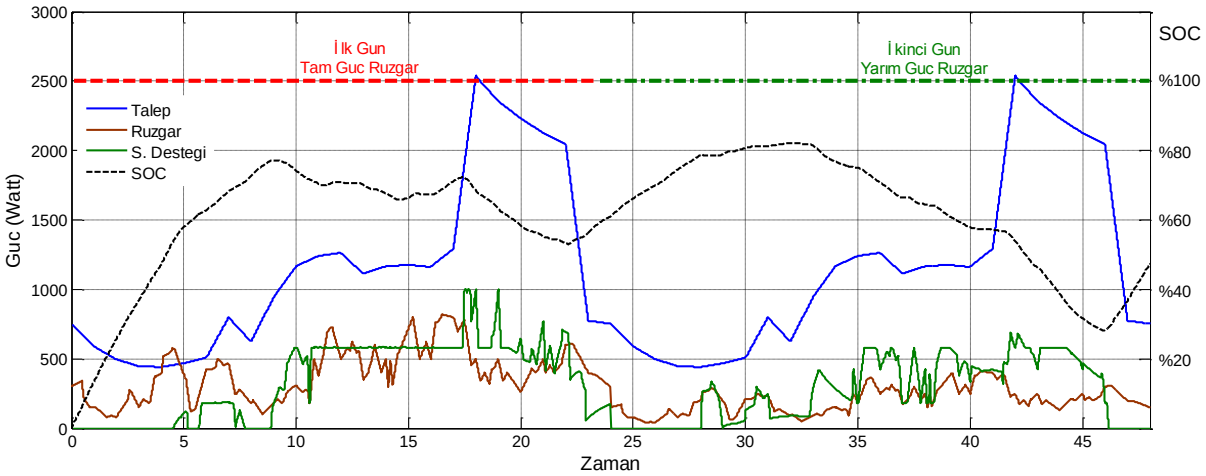
Şekil 5.6'ta gösterilen evsel mikro şebeke modeli farklı üç senaryoda analiz edilmektedir. İlk senaryo 1 kW üretim kapasitesine sahip güneş, ikinci senaryoda 1 kW üretim kapasitesine sahip rüzgar türbini ve son senaryoda 0,5 kW güneş ve 0,5 kW rüzgardan oluşan melez YEK üretim karakteristikleri kullanılmaktadır. Bu senaryolarda ilk gün için tam güç ve ikinci gün için yarım güç YEK üretimi ön görülmektedir. 1 kW maksimum üretim kapasitesine sahip PV panellerin YEK olarak kullanıldığı evsel mikro şebeke modelinin çıkıtları Şekil 3'te gösterilmektedir. Batarya zirve talebin olmadığı saatlerde şebeke ve güneş panellerinden şarj olmakta ve zirve talep zamanında şebekeye destek vermek amacıyla deşarj olmaktadır. Bataryanın şebekeden çektiği güç diğer senaryolarla birlikte Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Güneş panelleri kontrol giriş değişkenlerine bağlı olarak hem bataryayı şarj edebilmekte hemde şebekeyi destekleyebilmektedir. Şebeke desteği ile güneş üretimi arasındaki fark bataryanın şarj veya deşarj oranın göstermektedir. Güneşten elektrik üretiminin şebeke desteğinden fazla olduğu saatlerde aradaki fark bataryanın şarjında kullanılmaktadır. Güneşten elektrik üretiminin şebeke desteğinden az olduğu saatlerde ise aradaki fark bataryadan karşılanmaktadır.



Şekil 5.12. 1 kW PV panellerin YEK olarak kullanıldığı mikro şebeke modelinin çıktıları

1 kW üretim kapasitesine sahip rüzgar türbinin YEK olarak kullanıldığı evsel mikro şebekenin çıktıları Şekil 5.13'te gösterilmektedir. Rüzgar türbinin ürettiği enerji değişken olmakla birlikte gün boyu devam etmektedir. Bu yüzden, zirve

talep zamanında rüzgar türbinin ürettiği enerji doğrudan şebekeyi desteklemek için kullanılabilmektedir. Zirve talep zamanında rüzgar enerjisinin varlığı batarya kullanımını azaltmaktadır. İkinci gün rüzgar enerjisi yarıya indiğinden bataryanın şebeke destek oranı artmaktadır. Artan batarya kullanım oranına rağmen ikinci günde şebeke desteği daha az olmaktadır. Bulanık mantık kontroller SOC seviyesini sağlıklı çalışma koşulları arasında tutmayı başarmaktadır.

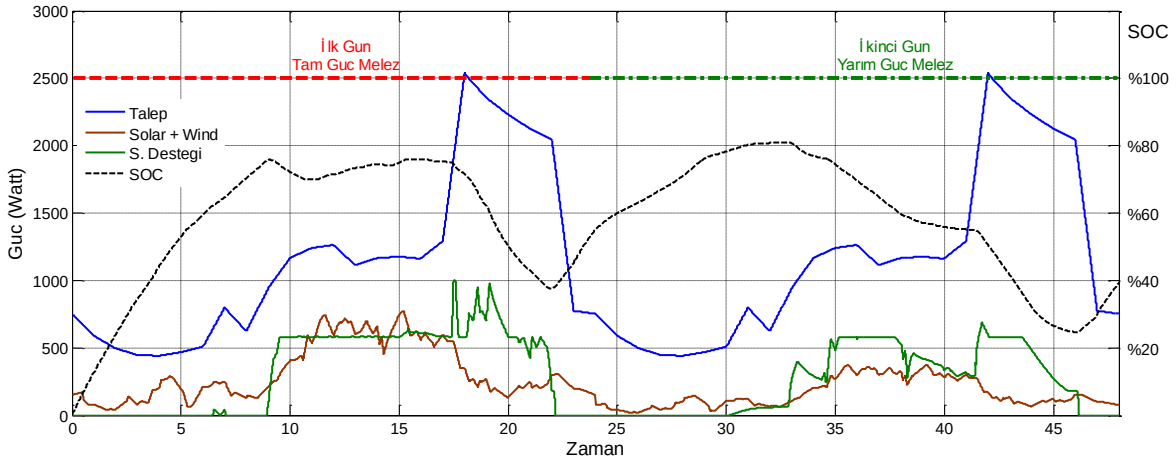


Şekil 5.13. 1 kW rüzgar türbinin YEK olarak kullanıldığı mikro şebeke modelinin çıktıları

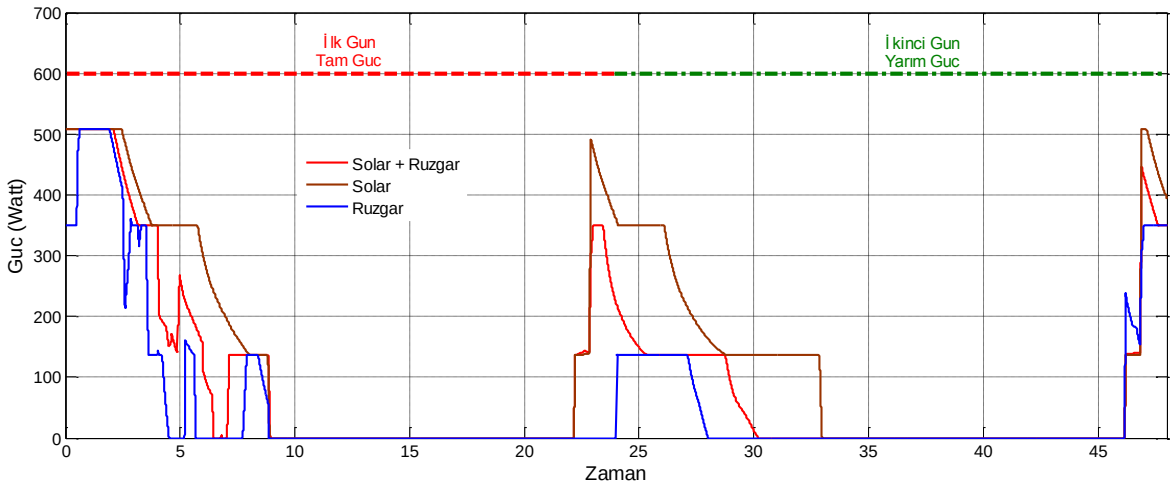
0,5 kW solar ve 0,5 kW rüzgardan oluşan melez mikro şebekenin benzetim sonuçları Şekil 5.14'te gösterilmektedir. Güneş enerjisinin tam güçte olduğu ilk gün ortasında talep artmasına rağmen depo edilen enerji kullanılmamaktadır. İkinci gün güneş enerjisi miktarı yarıya düştüğünde depo edilen enerjinin kullanımında da artış gözlemlenmektedir. Akşam saatlerinde güneş olmadığından, melez mikro şebeke desteğini azaltmaktadır. Bu azalma bataryayla giderilmeye çalışılmakta ve bataryanın şebeke desteği artmaktadır. Bu sonuçtan da anlaşılacağı üzere, zirve talebi azaltmayı amaçlayan mikro şebekelerde batarya anahtar rol oynamakta ve şebekeye esneklik kazandırmaktadır.

Benzetim modellerinde, batarya zirve talebin olmadığı saatlerde şebekeden şarj olmakta ve depo edilen enerji zirve saatlerinde şebekeyi desteklemek için kullanılmaktadır. Bu uygulama dinamik fiyatlandırma nedeniyle tüketicinin enerji faturasına olumlu yansımaktadır. Ancak, bu uygulama fazladan enerji kayıplarına neden olduğundan, bataryanın şebekeden şarj miktarı minimum seviyede kalması istenir. Şekil 5.15'de örnek mikro şebeke modellerinin ana şebekeden çektikleri

enerji miktarı gösterilmektedir. Batarya zirve talebin olmadığı saatlerde ve batarya şarj seviyesine bağlı olarak şebeken şarj olmaktadır. Güneş enerjisinin kullanıldığı mikro şebekede, ana şebekeden çekilen şarj miktarı diğerlerine nazaran daha fazla olmaktadır. Zirve talebin olmadığı saatlerde güneş enerjisinden elektrik üretimi olmaması bu durumun başlıca nedenidir. Rüzgar türbini zirve talebin olmadığı saatlerde enerji üretimi yapabildiğinden, rüzgar mikro şebekenin batarya şarjı için ana şebekeden çektiği enerji diğer mikro şebekelere nazaran daha az olmaktadır. Beklenildiği gibi melez mikro şebekenin eğrisi güneş ve rüzgar sisteminin arasında yer almaktadır.



Şekil 5.14. Güneş (0,5 kW) ve rüzgardan (0,5 kW) oluşan melez sistemin YEK olarak kullanıldığı mikro şebeke modelinin çıktıları



Şekil 5.15. Mikro şebeke modellerin batarya şarjı için ana şebekeden çektikleri enerji miktarı

Gelişen teknolojiyle beraber DA enerji formu, elektrik şebekelerinin üretim ve tüketim tarafında ağırlık kazanmaya başlamıştır. DA formda üretim yapan YEK'lerin ve DA form gereksinimi duyan teknolojik cihazların mevcut şebekeye yani AA forma uyumunda, fazladan güç dönüşümü yapılması nedeniyle, işletme verimi düşmektedir. Bu yüzden, araştırmacılar farklı güç kontrol ve entegrasyon yöntemlerinin analizini yaparak yeni nesil güç sistemlerinin verimini artırmaya çalışmaktadır. Bu yöntemlerden biri de DA güç entegrasyon yöntemidir. DA güç entegrasyon yöntemi, ana şebekenin ve ikincil kaynakların güç elektroniği elemanları üzerinden DA barasında toplanmasını öneren ve tüketiciye kaliteli ve güvenilir enerji sağlamayı amaç edinen bir yöntemdir. DA güç entegrasyon yönteminde şebeke, ikincil kaynakları desteklemede ve arıza ve aşırı yüklenme gibi muhtemel şebeke koşulları durumunda devreye girmektedir. Şebekeden alınan enerjinin DA forma dönüştürüldükten sonra kullanılması verimi düşürse de, şebeke sadece acil durumlarda ikincil kaynakları desteklediğinden, bu kayıp göz ardı edilebilecek seviyede kalmaktadır. Bu yapısıyla DA güç entegrasyon yöntemi, talebin çoğunlukla ikincil enerji kaynaklarından temin edildiği güç sistemleri için önerilmektedir.

5.2. Doğru Akım Güç Entegrasyon Yönteminin Dağıtım Ölçeğinde Performans Analizi

Geleneksel şebeke yapıları artan talebe karşı yetersiz kalmakta ve gelişen teknoloji dağıtık kaynakları, merkezi üretimin sorunlarına çözüm olarak sunmaktadır. Dağıtık kaynaklar temiz ve tükenmez yapıları nedeniyle birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar, yakın gelecekte dağıtık kaynak kullanımının yaygın şekilde mevcut şebekede yerini almasının önünü açmaktadır. Dağıtık kaynak kullanımının yaygınlaşmasıyla, artan talebe yerinde çözüm bulanabilecek ve bu sayede iletim kayıpları ve tüketicinin şebeke bağımlılığı azalacaktır. Bu bölümde, dağıtık kaynakların dağıtım ölçeğinde kullanılması durumunda şebekeye kazandıracağı faydalar analiz edilmektedir. Orta ölçekli (bölgesel talebi karşılayacak oranda) rüzgar ve güneş kaynakları kullanılan dağıtık kaynak sisteminin şebekeye entegrasyonu ele alınarak arz talep dengesi incelenmektedir. Hedef modelin benzetim sonuçlarına göre DA güç entegrasyon yöntemi kullanılan

dağıtık kaynaklar şebekeye verimli şekilde entegre edilmekte ve evsel tüketicilerin şebekeye bağımlılığı azalmaktadır.

Gelişen teknolojinin etkileri, elektrik şebeke altyapısında da kendini göstermekte ve geleneksel şebeke yapıları değişmektedir. Bu değişim çalışmaları akıllı sistemler içermesi nedeniyle akıllı şebeke başlığı altında toplanmaktadır. Geleceğin elektrik şebekeleri olarak adlandırılan akıllı şebekeler, dağıtık kaynaklar, depolama cihazları, talep taraflı yük yönetimi ve dinamik fiyatlandırma gibi teknolojik uygulamaları gündeme getirmektedir. Artan talep, enerji yönetimini daha zor bir hale getirdiğinden [197] akıllı şebekenin sunduğu teknolojik uygulamalar gereksinim olarak görülmektedir. Bu amaç doğrultusunda, çevre dostu enerji temini sağlayan dağıtık kaynaklar ve dağıtık depolama cihazları geleceğin enerji altyapılarını oluşturmada önem kazanmaktadır [198]. Merkezi üretimin yükünü hafifleten bu teknolojiler yüksek enerji verimliliği, karbondioksit salınımını azaltma ve ekonomiye katkı gibi alanlarda da enerji politikalarının bir parçası haline gelmektedir [199].

Günümüzde fosil yakıtlar, küresel ölçekte, enerji temininde kullanımı yoğun şekilde devam etmesine rağmen birçok avantajı bulunan YEK'ler, en hızlı gelişen enerji piyasası olarak kendini göstermektedir [200]. Gelişmiş kontrol cihazları ve teknikleri sayesinde YEK kullanımı büyük bir potansiyele sahiptir. YEK'lerin mevcut şebekeye entegrasyonu sürdürülebilir, verimli ve ekonomik güç dağıtım sistemlerinin gerçekleşmesini sağlamakta ve bu sayede sera gazının etkileri kontrol edilmektedir. YEK'lerin dağıtım ölçeğinde şebekenin yükünü paylaşması, şebeke bağımlılığını önemli ölçüde azaltabilir ve böylece artan enerji talebine çevreye zarar vermeden ve tüketime yakın yerde üretimle verimli çözümler bulunur. Hava koşullarına bağlı olarak üretim yapan YEK'lerin üretim karakteristiği tahmin edilmemektedir. Bu probleme, birbirinin zayıf yönlerini kapatan YEK'lerin bir arada kullanılması çözüm olmaktadır. Örneğin, güneş ve rüzgardan meydana gelen melez güç sistemleri sadece bir YEK'in kullanıldığı sistemlere nazaran daha verimli olmaktadır.

Elektrik şebeke hattının mevcut olmadığı yerlerde sosyal hayatın devamı zorlaşmaktadır. YEK'ler kırsal bölgelerde enerji temininde kullanılarak günlük hayatın kolaylaşmasında etkin rol oynamaktadır [201]. Bu bağlamda, YEK'lerin mevcut tüketim cihazlarına uyumlu şekilde kullanılması önem arz etmektedir.

YEK'lerden enerji talebini karşılama konusunda beklentiler artmakta ve merkezi üretime uzak kırsal bölgelerde YEK kullanımı genişletilerek dağıtım ölçeğinde ele alınmaktadır [202-207]. Kaynak [208]'te evsel abonelerinden meydana gelen yedi binanın, güneş enerjisinin ikincil kaynak olarak kullanım durumu için, güç entegrasyonu analiz edilmektedir. Brezilya hava koşullarına uygun olarak tasarlanan benzetim modeli üç faklı şehrin analiz sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmada evsel tüketicilerin, enerji ihtiyacını büyük ölçüde YEK'lerden karşıladığı görülmektedir. Benzer bir çalışma Yeni Zelanda'nın hava koşullarına bağlı olarak rüzgar türbinleri için yapılmaktadır [209].

Dağıtık kaynakların entegrasyonunda önemli olan konulardan biri küçük ölçekli YEK'lerin tüketicilerin doğrudan kullanılabileceği şekilde mevcut şebekeye entegrasyonudur. Güneş ve rüzgarın kesintili ve tahmin edilemez karakteristiği nedeniyle bir arada kullanılması enerji güvenirliliğini artırmakta ve arz ile talep arasındaki dengeyi korumaya yardımcı olmaktadır. Günümüzde YEK'ler şebekeyi destekler nitelikte kurulmakta ve şebekeye bağımlılığı azaltmaktadır. Ancak YEK'lerin yüksek maliyeti ve verimliliğinin düşük olması bu uygulamaların yaygınlaşmasının önüne geçmektedir. Bu problemler, akıllı şebekelerin önerdiği teknolojik alt yapılarla aşılabilir. Üretim, tüketim, haberleşme ve güç yönetiminde yeni fırsatlar sunan akıllı şebeke çalışmaları sayesinde, evsel ölçekte veya site ölçeğinde, kendine yetebilen akıllı binalar tasarlamak mümkündür. Ayrıca YEK'lerden oluşan mikro şebeke sistemleri temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması için ön adım niteliğindedir.

Mikro şebekeler geleceğin elektrik şebekelerinin üretim tarafındaki en küçük parçalarıdır [157, 204-205, 210]. Melez mikro şebekelerin yer aldığı akıllı evler, dağıtık kaynakların uygulaması için önemli fırsatlar sunmaktadır. Melez mikro şebekenin site ölçeğinde uygulanması evsel ölçekte uygulanmasına nazaran daha verimli ve kullanışlı olabilir. Bu durumun en önemli sebebi; YEK'lerin büyük ölçekte kurulumunun ve bakımının daha ekonomik olmasıdır. Şekil 5.16'da melez mikro şebekeye sahip bir sitenin şebeke yapısı gösterilmektedir. Ana şebekeye ait üç fazlı AA gerilim siteyi beslemektedir. İkincil kaynak olarak güneş panelleri ve rüzgar türbini kullanılmaktadır. Şebeke ve ikincil kaynakların entegrasyonu, enerji entegrasyon merkezinde yapılmaktadır. Entegrasyon yöntemi DA güç entegrasyonudur. Şebekeden gelen enerji DA forma dönüştürülerek YEK'lerden

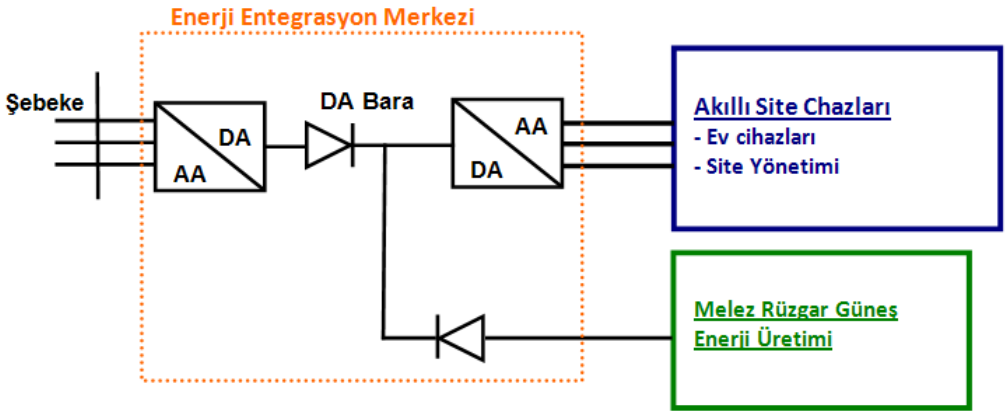
gelen DA enerjiyle entegre edilmektedir. DA barasında toplanan enerji üç fazlı AA forma dönüştürülerek siteye verilmektedir. Her bir faz bir bloğu beslemektedir. Talebin ağırlıklı olarak YEK'lerden karşılandığı sistemde şebeke arıza ve aşırı yüklenme gibi acil durumlarda kullanılmaktadır. Bu yüzden, şebekeden alınan enerjinin fazladan dönüşüme uğramasından dolayı meydana gelecek kayıplar göz ardı edilebilecek seviyededir.



Şekil 5.16. Melez mikro şebekeye sahip sitenin güç dağıtım şebekesi

Şekil 5.17'de enerji entegrasyon merkezinin elektriksel şeması gösterilmektedir. sistemde AA/DA inverter, DA/AA doğrultucu ve diyotlar bulunmaktadır. Doğrultucu AA formu 580 V DA forma dönüştürmektedir. Diyotlar enerji akışının yönünü belirlemekte ve ters yönde akışların önüne geçmektedir. YEK'lerden hasat edilen enerji 600 V DA gerilimle DA barasına iletilmektedir. İnverter, 600 V DA gerilimi 220 V AA enerjiye dönüştürerek tüketicilerin kullanabileceği enerji formunu temin etmektedir. YEK'lerden temin edilen 600 V DA gerilim, şebekeden sağlanan gerilimden 20 V daha fazladır. YEK'lerin entegrasyon geriliminin fazla olması birincil kaynak olarak kullanılmasını sağlamaktadır. YEK'lerde üretilen enerjinin, talebi karşılamada yetersiz kalması durumunda DA bara geriliminin seviyesi düşmektedir. DA bara geriliminin kararlılığı, siteye verilen enerjinin kalitesini belirlemektedir. Gerilim seviyesinin düştüğünü algılayan kontrol cihazı şebekeyi devreye alarak enerji kalitesinin düşmesini önlemektedir. Bu işlem anlık sürdürülerek YEK'lerin kesintili enerji problemi çözülmektedir. Bu yöntemin diğer bir avantajı;

dönüştürücülerin şebekeyle tüketici arasında elektriksel izolasyon sağlayarak bozucu etkisi olan gürültüleri elemine etmesidir.



Şekil 5.17. Güç entegrasyon merkezinin elektriksel şeması

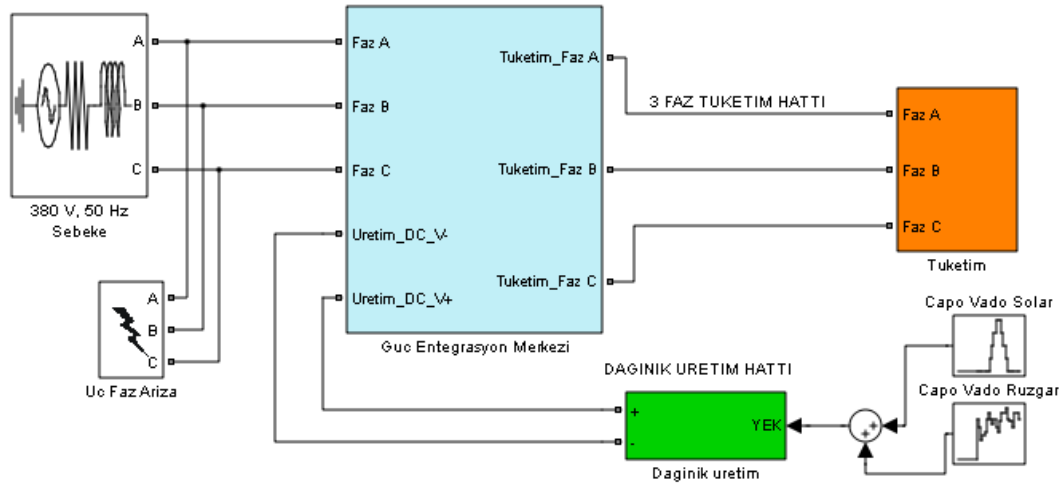
5.2. bölümde, rüzgar ve güneşten oluşan melez bir güç sisteminin avantaj ve dezavantajları dağıtım (site) ölçeğinde ele alınmaktadır. YEK'leri mevcut şebekeye entegrasyonu için DA güç entegrasyon yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmanın nihai hedefi; tüketicilerin şebekeye bağımlılığını azaltmak, güç kalitesini ve güvenirliliğini artırmaktır.

5.2.1. Benzetim Modeli

Dağıtım ölçeğinde orta ölçekli melez mikro şebekeninnin avantajları, bir sitenin güç akışı üzerinden incelenebilir. Örnek model için 15 evden oluşan akıllı bir site ele alınmaktadır. Güneş ve rüzgardan hasat edilen enerjiyi belirlemek için, melez mikro şebekeyi site ölçeğinde modelleyen, Capo Vado site raporunun bilgileri referans alınmaktadır [212]. Modellemenin hava koşulları, yüksek rüzgar potansiyeline sahip İtalya'nın Liguria bölgesine göre ayarlanmaktadır. Sitenin yük tarafında yer alan evlerin enerji tüketimi dinamik ve düzenli bir yapıya sahiptir. Evsel yüklerin enerji tüketimine göre evlerin talebi devamlı olarak değişmektedir.

Matlab/simulink benzetim ortamında tasarlanan örnek site güç dağıtım modeli Şekil 5.18'de gösterilmektedir. Capo Vado site raporuna göre güneş ve rüzgardan elde edilen enerji miktarı Şekil 5.19(a)'da gösterilmektedir. Bu enerji miktarı dağıtık kaynaklardan elde edilen enerji miktarını belirlemektedir. Bir evin günlük tüketimi Şekil 5.19(b)'de ve 15 evden oluşan sitenin tüketimi ise Şekil

5.19(c)'de gösterilmektedir. Ev aletlerinin kullanımına bağlı olarak dinamik yükte ani değişimler meydana gelmektedir. Benzetim süresini etkili kullanmak amacıyla her 0,1 saniyelik dilim 1 saate karşı gelmektedir.

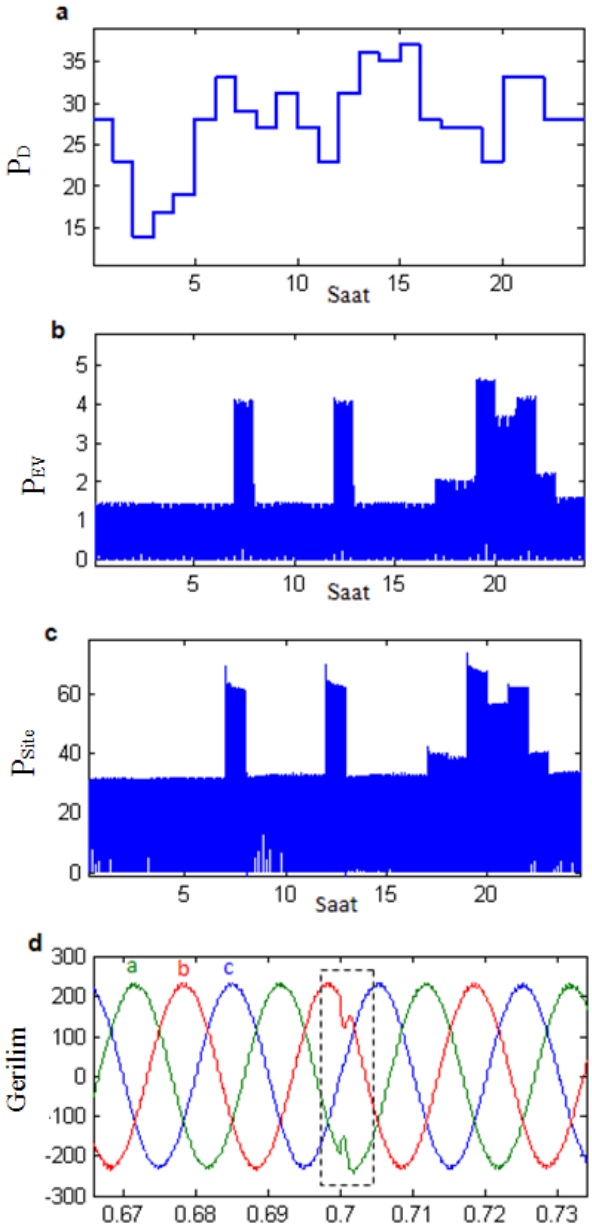


Şekil 5.18. Akıllı sitenin güç dağıtım modeli [211]

Rüzgar ve güneş gibi kesintili güç kaynakları kullanılan bir mikro şebekede de üç fazlı ana şebekenin gerilim kararlılığı önem arz etmektedir. Şekil 5.19(d)'de tüketim tarafının, ani yük değişim esnasında gerilim kararlılığı gösterilmektedir. Keskin yük değişim anında (0,7 s) üç fazdan b ve c fazlarında göz ardı edilebilecek bir bozulma meydana gelirken a fazında herhangi bir bozulma görülmemektedir. Bu sonuca göre; enerji entegrasyon yöntemi ani yük değişiminin meydana getirebileceği işletme sorunlarını elemine etmektedir.

Önerilen yöntemin yeterliliğini göstermek için farklı işletme koşulları altında test edilmesi gerekir. DA güç entegrasyon yöntemi akıllı site güç akış modeli, farklı dört işletme senaryosuyla analiz edilmektedir. Güneş ve rüzgarın dalgalı üretim karakteristiğine bağlı olarak güç akışı ve dinamik yük durumuna bağlı olarak şebeke karakteristiği benzetim sonuçlarında gösterilmektedir. Denklem 5.3 ve 5.4'de YEK'lerin ve şebekenin kullanım oranını tanımlayan matematiksel bağıntılar verilmektedir. Bağıntılarda, S_Y toplam tüketime oranla YEK'lerin ürettiği enerji miktarını ve $S_Ş$ toplam tüketime oranla şebekeden çekilen gücü ifade etmektedir. Bu oranlar, işletme senaryolarının analizinde kullanılmaktadır ve akıllı sitenin şebekeye bağımlılık oranını göstermektedir. Benzetim sonuçları

değerlendirilirken bu oranlar kullanılmakta ve bu oranların değerlerine bağlı olarak sitenin kendi enerjisini karşılayabilme durumu belirlenmektedir.



Şekil 5.19. (a) Capo Vado raporuna göre dağıtık üretim miktarı, (b) Bir evin tükettiği enerji miktarı, (c) Sitenin tükettiği enerji miktarı, (d) Ani değişimlerde gerilim karakteristiği [211]

$$S_Y = \frac{E_Y}{E_T} \tag{5,3}$$

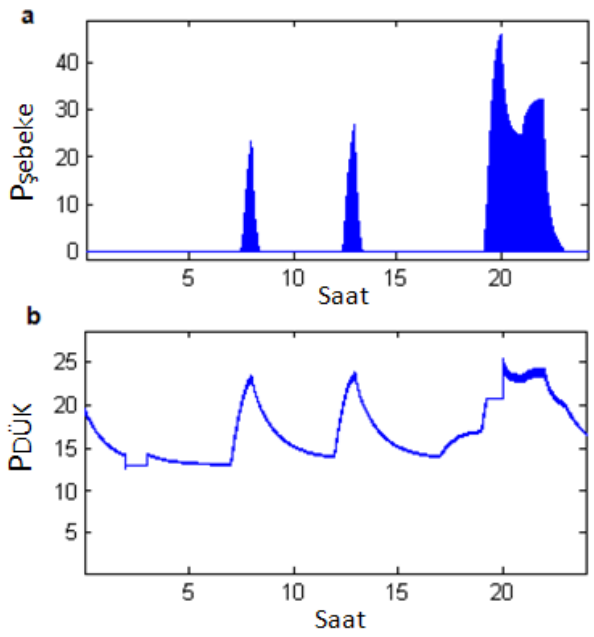
$$S_{Ş} = \frac{E_Y}{E_S} \quad (5,4)$$

Akıllı sitede kullanılan DA güç entegrasyon yönteminin test edildiği ilk senaryo tam güç durumudur. Bu senaryoda dağıtık kaynakların Capo Vado raporunda yer değerlere göre tam üretim yaptığı öngörülmektedir. İkinci senaryoda YEK'lerden elde edilen toplam gücün yarıya düştüğü varsayılmaktadır ve bu yüzden yarım güç Capo Vado sitesi olarak adlandırılmaktadır. Üçüncü senaryoda, üretimin dörtte birine düştüğü göz önüne alınarak çeyrek Capo Vado site analiz edilmektedir. Son olarak şebekede meydana gelebilecek arıza durumu analiz edilmektedir. 17 saat süren bir arıza durumunda dağıtık kaynakların kullanımının avantajları ele alınmaktadır.

5.2.2. Benzetim Sonuçları

Tam güç Capo Vado üretim koşullarına bağlı olarak modellenen akıllı sitenin güç akış değerleri Şekil 5.20'de gösterilmektedir. Site yükü için Şekil 5.19(c)'de gösterilen tüketim değerleri kullanılmaktadır. Şebeke ve YEK'lerden çekilen güç değerleri Şekil 5.20'de gösterilmektedir. YEK'lerin tüketimi destekleme oranı S_Y = 0,92 ve şebekenin oranı ise $S_Ş$ = 0,08'dir. Site tüketiminin zirve yaptığı saatlerde, şebekeden destek alınarak siteye verilen enerjinin kararlılığı korunmaktadır. Diğer saatlerde sitede üretilen enerji site tüketimine yetmekte ve ada modunda çalışmaktadır. Tam güç Capo Vado verilerine göre YEK'lerden elde edilen güç tüketimi büyük oranda karşılayarak sitenin şebekeye bağımlılığını azaltmaktadır.

Güneş ve rüzgardan elde edilen enerjinin yarıya düştüğü senaryo olan yarım güç Capo Vado değerlerinde, şebekeden çekilen güç Şekil 5.21 (a)'da ve dağıtık kaynaklardan çekilen güç Şekil 5.21 (b)'de gösterilmektedir. Bu senaryoda YEK üretim değerleri yarıya düşerken sitenin tüketim değerleri sabit kalmaktadır. Saat 14:00 ile 17:00 arasında site ada modunda çalışmaktadır. YEK'lerin tüketimi destekleme oranı S_Y = 0,70 ve şebekenin oranı ise $S_Ş$ = 0,30'dur. Yarım Capo Vado üretim koşullarında şebekeye bağımlılığın önemli oranda azaldığı söylenebilmektedir.

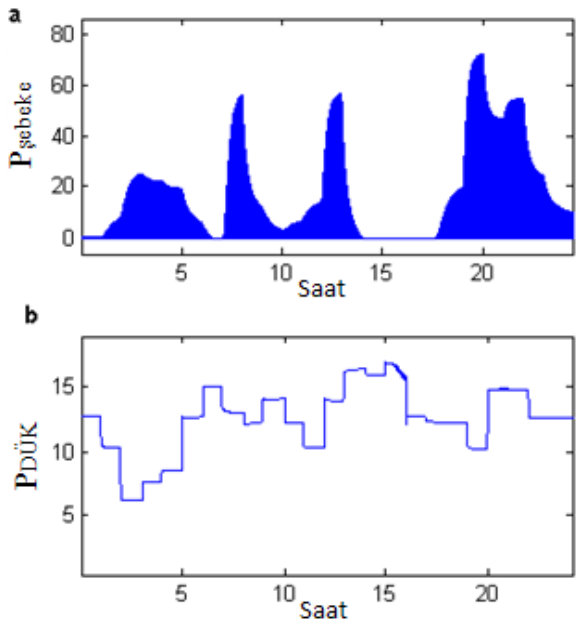


Şekil 5.20. Tam güçte (a) Şebekeden çekilen güç, (b) dağıtık kaynakların enerji üretim miktarı [211]

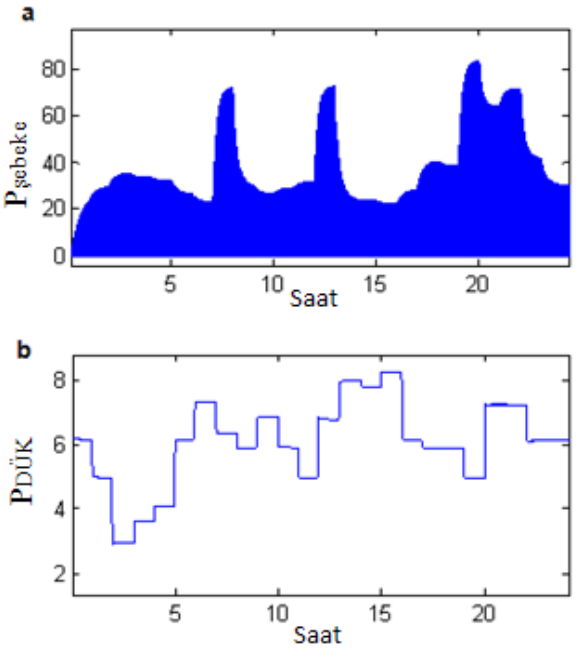
Güneş ve rüzgardan elde edilen enerjinin dörtte bire düştüğü senaryo olan çeyrek güç Capo Vado değerlerinde, şebekeden çekilen güç Şekil 5.22(a)'da ve dağıtık kaynaklardan çekilen güç Şekil 5.22(b)'de gösterilmektedir. Bu modelde de akıllı sitenin yük durumu değişmemekte ve Şekil 5.19(c)'de gösterilen değerlerde olmaktadır. YEK'lerin tüketimi destekleme oranı S_Y = 0,34 ve şebekenin oranı ise $S_Ş$ = 0,66'dır. Çeyrek güç durumunda akıllı sitenin ada modunda çalışmadığı görülmektedir. YEK'ler toplam tüketimin yaklaşık %30'unu karşılayarak şebekenin yükünü azaltmaktadır.

Capo Vado güç senaryolarının sonuçlarına göre; DA güç entegrasyon yöntemi alternatif enerji kaynaklarının mevcut şebekeye entegrasyonunda yeterli performans göstermektedir. Tam güç ve yarım güçte akıllı site ada modunda çalışabilmekte ve çeyrek güçte talebin üçte birini karşılayabilmektedir. Örnek modellemede enerji depolama cihazları yer almamakta ve YEK'lerde üretilen enerji sitenin talebi doğrultusunda tüketilmektedir. Enerji depolama cihazları kullanılması durumunda üretim ile tüketim arasındaki denge artacak ve üretilen fazla enerji depo edilerek ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılabilecektir. Özellikle enerji tüketiminin fazla olduğu saatlerde sitenin şebeke yerine depolama cihazlarını kullanması, şebekeye bağımlılığı azaltacak ve güç sisteminin esnekliğini artırarak güç politikalarının uygulanmasına imkan verecektir.

YEK'ler gibi depolama cihazları da entegrasyon barasına bağlanarak şebekeye entegre edilebilmektedir.



Şekil 5.21. Yarım güçte (a) Şebekeden çekilen güç, (b) dağıtık kaynakların enerji üretim miktarı [211]



Şekil 5.22. Çeyrek güçte (a) Şebekeden çekilen güç, (b) dağıtık kaynakların enerji üretim miktarı [211]

Örnek modelin analizinde kullanılan diğer bir işletme koşulu arıza durumudur. Örnek bir arıza için; şebekede bir arıza meydana geldiği ve bu

arızanın 17 saat sürdüğü varsayılmaktadır. Şekil 5.23'te saat 03:00 ile 20:00 arasında meydana gelen bir arıza için benzetim sonuçları gösterilmektedir. Bu arızadan dolayı şebeke devre dışı kalmakta ve sitenin enerji kaynağı olarak sadece YEK'ler kalmaktadır. Şekil 5.23 (b)'de YEK'lerden hasat edilen gücün saatlik değerleri gösterilmektedir. Şebekede meydana gelen arıza nedeniyle akıllı site, talebi karşılamak için YEK'lerden daha fazla enerji çekmektedir. Şekil 5.23 (c)'de gösterilen üç faz gerilim karakteristiğinden anlaşılacağı üzere, YEK'ler sitenin talebine yeterli gelmekte ve gerilim kararlılığı korunmaktadır. Kesintili üretim karakteristiğine sahip YEK'ler DA barası üzerinde entegre edilmesi durumunda sitenin günlük talebine cevap vermekte ve ihmal edilebilir seviyede gerilim bozulmalarıyla güç kalitesini koruyabilmektedir. Çoklu enerji kaynağının DA güç entegrasyon yöntemiyle kullanımına bağlı olarak sitenin güç güvenliği arttığı görülmektedir.

Benzetim sonuçlarından elde edilen bulgular şu şekilde sıralanabilir,

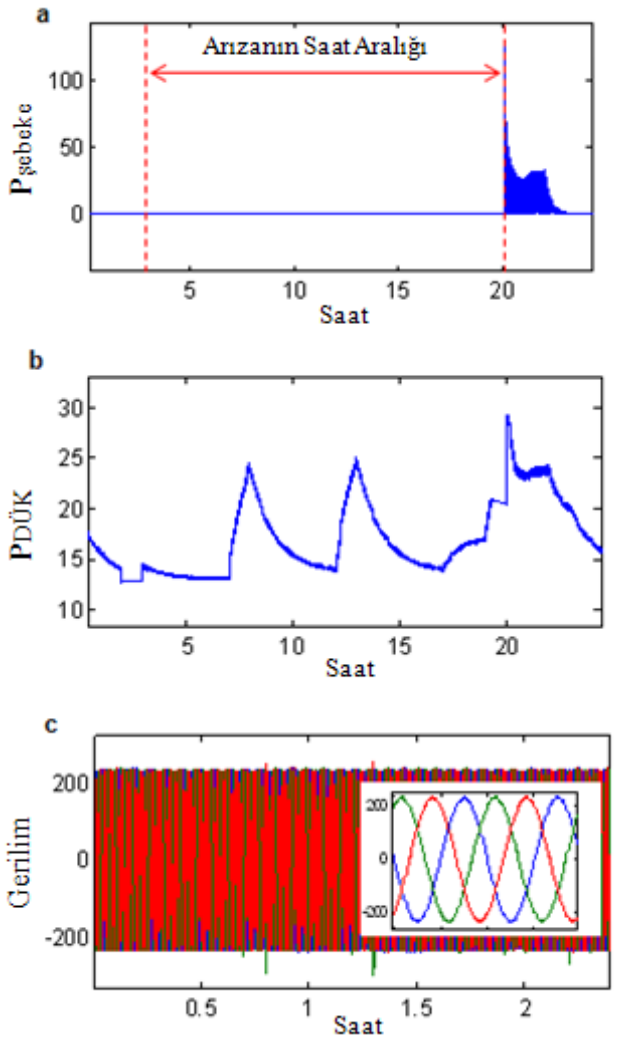
- YEK'lerin verimli şekilde mevcut şebekeye entegrasyonu yapıldığında evsel tüketicilerin şebeke bağımlılığı azalmaktadır.

- Çoklu kaynakların DA barasında toplanması ve YEK'lerin şebekeyle desteklenmesi güç kalitesini artırmaktadır. Şebekede meydana gelebilecek arıza durumlarında YEK'ler ihtiyaca cevap verebilecek niteliktedir.

- Yakın gelecekte daha güvenli ve sürdürülebilir güç sistemleri için dağıtık kaynaklar kullanılacak ve bu kaynakların şebekeye entegrasyonunda DA güç entegrasyon yöntemi, etkili ve verimli bir yöntem olarak yerini alacaktır.

Bu bölümde, alternatif enerji kaynaklarının, dağıtım ölçeğinde, mevcut şebekeye entegrasyonu analiz edilmektedir. YEK kullanımını artırarak tüketicinin şebeke bağımlılığını azaltmayı hedefleyen Capo Vado senaryoları ve DA güç entegrasyon yönteminin kullanıldığı modeller üzerinden analizler yapılmaktadır. YEK'lerin üretim yaptığı saatlerde tüketicin şebekeye bağımlılığını azaltmak ve daha önemlisi ada modunda çalışmak mümkündür. YEK'ler tüketimi karşılamada yetersiz kaldığı saatler için şebeke devreye girmekte ve YEK'lere DA barası üzerinden destek vermektedir. Farklı senaryolarla test edilen modellerde, YEK kullanım oranlarına bağlı olarak, YEK'lerin şebekeye bağımlılığı azalttığı ve günün bazı saatlerinde sitenin kendine yetecek enerjiyi ürettiği görülmektedir. YEK kullanımının artışı, karbondioksit salınımını ve iletim kayıplarını kayda

değer düzeyde azaltması beklenmektedir. Bu sayede, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarıyla, artan enerji talebi yerinde karşılanmakta ve günümüzde var olan; çevre ve elektriksel kayıplar merkezli problemlere kısmen çözüm bulunmaktadır.



Şekil 5.23. Arıza durumu benzetim sonuçları; (a) Arıza saat aralığı, (b) YEK'lerden hasat edilen enerji miktarı, (c) benzetim süresince 3 faz gerilim karakteristiği [211]

DA güç entegrasyon yönteminin en önemli avantajı karmaşık kontrol yöntemleri içermemesi ve ikincil kaynakların doğrudan kullanımını sağlamasıdır. Akıllı sitenin YEK'lerden enerji teminini sağlamak için DA güç entegrasyon yöntemi verimli ve uygulaması kolay olan bir yöntemdir. YEK'lerin yatırım ve bakım maliyetlerinin azalması sonucunda alternatif enerji kaynakları günlük hayatta daha fazla kullanılabilecektir. Geleceğin enerji altyapılarının bir parçası

olarak görülen dağıtık kaynakların, mevcut şebekeye entegrasyonunda DA güç entegrasyon yöntemi dağıtım ölçeğinde etkili bir şekilde kullanılabilecektir.

YEK'lerin güvenirliliğini artırmak bu kaynakların yaygınlaşmasında etkili olan bir diğer faktördür. Akım ve gerilimin karakteristik düzgünlüğü güç kalitesini belirlemektedir. Ani yük artışı veya arıza gibi işletme durumlarında güç kalitesinin korunması güç sisteminin güvenirliliğini artıracaktır. Benzetim sonuçlarından elde edilen bulgulara göre, DA güç entegrasyon yöntemi güç kalitesini korumada yeterli performansı göstermektedir.

5.3. Doğru Akım Güç Entegrasyon Yönteminin İletim Ölçeğinde Performans Analizi

Gelişen teknoloji sayesinde, petrol ürünlerine bağımlılığı azaltacak rüzgar ve güneş gibi alternatif enerji kaynaklarının elektrik üretiminde kullanımı mümkündür. Bu kaynaklar, bölgesel hava koşullarına bağlı olarak her yerde kullanılabildiğinden dağıtık kaynak olarak adlandırılmaktadır. Temiz ve tükenmez enerji kaynakları olan dağıtık kaynaklar, düşük verimleri ve yüksek kurulum maliyetleri nedeniyle tüketici ölçeğinde yeterince rağbet görmese de; devletlerin teşvikiyle üretim ölçeğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, dağıtık kaynakların mevcut şebekeye entegrasyonu önem arz etmektedir. Bu bölümde, DA güç entegrasyon yönteminin iletim ölçeğinde performansı analiz edilmektedir. Mikro şebeke güç üretim elemanlarının geleneksel şebeke yapısıyla bütünleşmesinde, DA güç entegrasyon yönteminin etkinliği ve yeterliliği ele alınmaktadır. Örnek benzetim modelinde, dağıtık kaynaklardan üretilen enerjiyi toplamak için geleneksel şebekeye ek olarak DA iletim hattı kullanılmaktadır. Hedef yöntemde dağıtık kaynakların kullanım amacı, şebekeye bağımlılığı azaltmaktır. Bu yüzden şebeke ve YEK'ler enerji toplama merkezinde entegre edilmektedir. YEK'lerde üretilen enerji şebekeyle desteklenerek talebi karşılamaktadır. Entegrasyon DA formda yapıldığından, frekans ve gerilimi ayarlamak için ek cihazlara ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu yaklaşım, geleneksel şebeke yapılarının dönüşümünü kolaylaştırmakta ve dağıtık kaynakların verimini artırarak yaygınlaşmasında etkili olmaktadır.

Gelişen teknoloji, elektrik kullanım alanlarını ve ortalama kişi başına düşen enerji tüketim miktarını artırmaktadır. Öyle ki, bir ülkenin kişi başı ortalama elektrik kullanım miktarı, o ülkenin gelişmişlik düzeyini gösterdiği kabul edilmektedir. Günümüzde enerji temini ağırlıklı olarak petrol ürünlerinden karşılansa da, YEK sektörü en hızlı büyüyen enerji sektörüdür [200]. YEK'ler gelişmiş kontrol cihazları ve teknikleri sayesinde, kullanıcıları için tükenmez enerji kaynağı olma özelliğine sahiptir. Mevcut şebekenin YEK'lerle birlikte talebi karşılaması, enerji maliyetlerini azaltmakta ve bu yolla sera gazı etkisi kontrol altına alınabilmektedir. Değişen hava koşulları nedeniyle YEK'lerden hasat edilen enerji sürekli olarak değişmektedir. Bu yüzden, bölgesel talebi karşılamada, güneş ve rüzgar gibi birden fazla YEK ile melez mikro şebekenin kullanılması, sadece bir YEK'in kullanılmasından daha verimli olmaktadır [213]. Verimi artan ve kullanım saati gün boyuna yayılan mikro şebekeler, tüketicinin şebekeye bağımlılığını azaltmaktadır. Böylece artan enerji talebine yerinde çözüm bulunmakta ve temiz enerji elde edilmektedir.

YEK'lerin stratejik önemi, üst düzey yönetimler tarafından bilinmekte ve YEK kullanımını artırmak için yeni politikalar geliştirilmektedir. Avrupa birliği, dağıtık kaynakların ve YEK'lerin elektrik üretiminde rolünü açık bir şekilde tanımlamaktadır. Bu tanımlamalara göre, geleneksel şebeke yapılarının verimliliği artırmak amacıyla akıllı şebekelere dönüşmesi için dönüşüm fazına gereksinim vardır [213]. Ada modu veya kendine yetebilen şebeke olarak da adlandırılan bölgesel enerji dengelemeyi gerçekleştirmek için dağıtık kaynaklar ihtiyaç olarak görülmektedir [198, 213]. Elektrik enerjisi ağırlıklı olarak merkezi santrallerde üretilmekte ve üretilen enerji iletim ve dağıtım safhalarından geçtikten sonra tüketiciye ulaşmaktadır. Günümüzde, gelişen teknoloji ve kontrol yöntemleri dağıtık enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Bu sayede güç sistemleri akıllı, dağıtık, yenilenebilir ve esnek bir yapıya sahip olmaktadır. YEK'lerden en çok tercih edilen kaynaklar olan güneş ve rüzgar hava değişimine bağlı olarak farklı üretim karakteristiği göstermektedir. Bu yüzden, bu kaynaklara bağlı olan üretim değerleri her saat değişmektedir. Bu kaynakların kullanılması durumunda, arz ile talebi arasındaki dengeyi korumak için ek donanımlara ihtiyaç vardır. Şebekenin mevcut olduğu yerde, melez YEK'ler şebekeye desteklenebilirken, şebekeye uzak yerlerde batarya veya diğer depolama cihazları kullanılabilmektedir.

Geleneksel şebeke yapılarının akıllı şebekelere dönüşümü, geleceğin enerji alt yapılarını tasarlamada temel konulardan biridir. Güç sistemlerindeki bu dönüşüm üç aşamada gerçekleşebilir. Birincisi, özellikle büyük ölçekli YEK'ler olmak üzere dağıtık kaynakların mevcut şebekeye entegrasyonu. İkincisi, tüketicilerin enerji yönetiminde aktif görev alması [214-215]. Üçüncüsü, küresel ölçekte enerji politikalarının uygulanabilmesi için mikro şebekeler arasında iletişim sağlanması.

Mikro şebekeler, akıllı şebekelerin en küçük parçası ve ikincil kaynaklarıdır. Günümüzde, mikro şebeke çalışmaları, dağıtık kaynakların mevcut şebekeye entegrasyonuna yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmalarda, YEK'lerin verimliliği, depolama cihazlarının optimize edilmesi, kontrol ve yönetim konuları ele alınmaktadır [213-214, 216-220]. YEK'lerin üretime kazandırılması, karbondioksit salınımını, enerji yatırımlarını ve iletim kayıplarını azaltmada ve güç kalitesini artırmada etkili bir çözümdür. Bu çözümün kullanılabilmesi için farklı güç karakteristiğine sahip olan ikincil kaynakların mevcut şebekeye verimli şekilde entegre edilmesi gerekir. Bu konu ile ilgili olarak, araştırmacılar, genlik, frekans, güç sürekliliği, arıza, kontrol ve güvenirlilik gibi konuları ele almaktadır. Akıllı şebekelere geçişte önemli olan bir diğer husus; yeni teknolojilerin mevcut şebeke yapısına uyumlu olmasıdır. Günümüzde kullanılan bütün elektrikli cihazlar, geleneksel elektrik şebekesine uyumlu olarak üretilmektedir. Mikro şebeke yatırımcılarına fazladan maliyet çıkarmamak için yatırım yapılan YEK sisteminin geleneksel şebeke yapısına uyumlu olması gerekir.

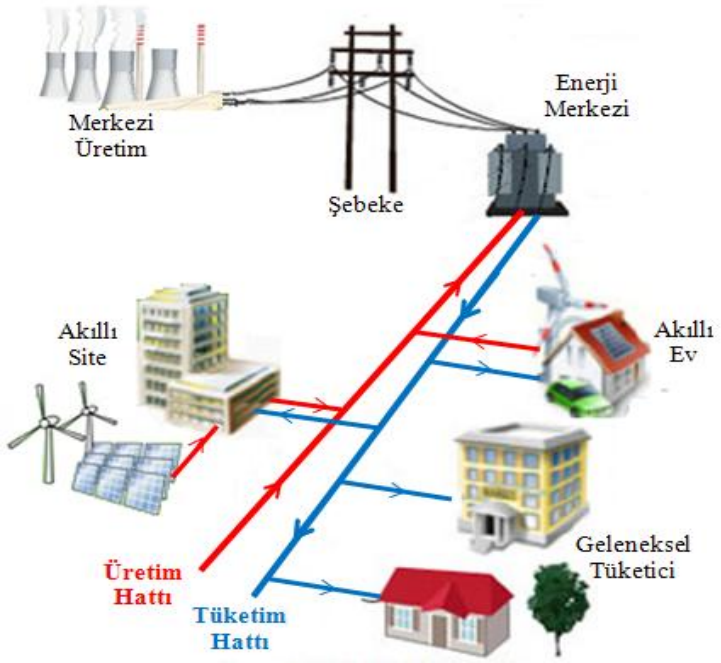
Yakın geçmişte, mikro şebeke sistemlerinin verimliliğini artıracak ve maliyetini düşürecek birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birçoğu, kapasite, batarya, güneş ve rüzgarın ikincil kaynak olarak kullanıldığı ve AA ve DA entegrasyon barası içeren sistemlerden oluşmaktadır [157, 221-226]. AA kaynakları ve yükleri DA barasından beslemek için frekans ve gerilim ayarı gerekmektedir. Ada modunda veya şebeke destekli işletme durumunda frekans ve genlik kontrolü güç kalitesi ve güvenirliliği için önemlidir. DA mikro şebekelerde frekans ve genlik kontrolüne gereksinim yoktur [227-228]. Bu sayede, DA güç entegrasyon yönteminin yapısı daha basit olmakta ve daha az elektronik cihaz kullanıldığından maliyet düşmektedir. DA dağıtımın AA dağıtıma oranla birçok avantajı bulunmasına rağmen yatırım maliyetleri nedeniyle AA sistemler kullanılmaya devam etmektedir. Güç sistemleri ve tüketici cihazları çoğunlukla üç

faz AA sisteme uyumlu tasarlanmaktadır. DA mikro şebekelerin yaygınlaşması ile bu alışkanlık zamanla değişmesi ve üretim ve tüketim tarafında DA kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir.

Bu bölümde, DA üretim ve AA tüketim hattından oluşan bir güç sistemi analiz edilmektedir. Örnek güç sisteminde, evsel YEK'lerin mevcut şebekeye entegrasyonun kolaylaştırılması hedeflenmektedir. Bölgede bulunan bütün dağıtık kaynakların ürettiği enerji DA hattıyla toplanmakta ve bu hat üretim hattı olarak adlandırılmaktadır. Dağıtık kaynaklarda üretilen enerjinin DA formda toplanması enerji dönüşümünü kolaylaştırmakta ve bu sayede ek kontrol cihazlarına ihtiyaç kalmamaktadır. Enerji yönetim merkezine aktarılan enerji, şebekeye uyumlu AA forma dönüştürülerek tüketim hattına verilmektedir. İnverter çıkışında 3 fazlı AA formda olan elektrik, tüketim hattıyla abonelere dağıtılmaktadır. Mikro şebeke güç sistemlerinde ağırlıklı olarak dağıtık kaynakların kullanılması istenir. Bu amaç doğrultusunda YEK'lerden gelen DA gerilimin seviyesi, şebekeden alınan DA gerilim seviyesinden 20 V daha fazla tutulmaktadır. YEK'lerin yetersiz kalması durumunda DA barasının gerilim seviyesi düşmekte ve şebeke devreye girmektedir. Kontrol işleminde mantıksal işlem kullanılmakta ve kontrol yöntemi dinamik tepkiler vermektedir.

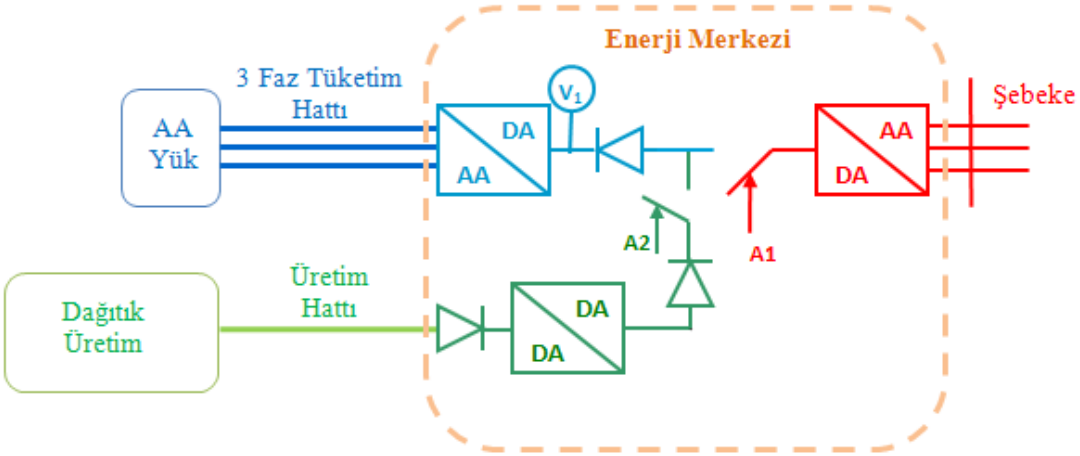
Dağıtık kaynaklarda üretilen enerjinin bir araya toplandıktan sonra şebekeye uyumlu forma dönüştürmenin birçok faydası vardır. En önemlisi her bir dağıtık kaynak için inverter ve AA donanımlarının gerekmemesidir. Bu sayede, sistemde yer alan güç elektroniği elemanlarının sayısı ve bakım maliyetleri azalmakta ve küçük ölçekli YEK'lerin entegrasyonuna imkan doğmaktadır. Enerji yönetim merkezi, dağıtık kaynaklarıyla tüketim hattı arasında köprü vazifesi yapmaktadır. Belirlenen enerji politikaları bu merkezde uygulanarak YEK'lerin enerji yönetiminde aktif görev alması sağlanmaktadır. Şekil 5.24'te dağıtık kaynakların yer aldığı melez mikro şebeke yapısı gösterilmektedir. Tüketim hattı geleneksel olarak kullanılan üç fazlı AA hattan oluşmaktadır. Tüketicilerin kullandığı YEK'lerde üretilen enerjiyi toplamak amacıyla DA formda üretim hattı bulunmaktadır. Dağıtık kaynaklardan toplanan enerji, enerji merkezinde şebekeye entegre edilerek tekrar tüketiciye ulaştırılmaktadır. Enerji kontrolü ve güç akışı değerlendirmeleri enerji merkezinde yapılmaktadır. Sistemin kontrolü için gereken AA/DA, DA/DA ve DA/AA cihazlar enerji merkezinde yer almaktadır.

120 V DA formda toplanan enerji 220 V AA formda tüketim hattına verilmektedir. 120 V DA gerilim seviyesi YEK'lere ve depolama cihazlarına uygun bir gerilim seviyesidir. Tüketim hattında tercih edilen gerilim formu geleneksel olarak kabul gören ve yaygın şekilde kullanılan gerilim formudur.



Şekil 5.24. Üretim ve tüketim hattı içeren melez mikro şebeke yapısı [205]

Şekil 5.25'te enerji merkezinin blok diyagramı gösterilmektedir. DA/DA kıyıcı üretim hattından gelen 120 V enerjiyi 580 V dönüştürmektedir. 580 V DA seviyesi, YEK'lerin entegrasyonu için belirlenen enerji seviyesidir ve şebekeden gelen enerjiden 20 V daha fazladır. AA/DA doğrultucu şebeke gerilimini 560 V DA'ya dönüştürmektedir. Şebeke gerilimin 20 V daha az olması YEK'lerin baskın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. DA entegrasyon barasında toplanan bu iki kaynak inverter yardımıyla üç fazlı 220 V AA forma dönüştürülmektedir. DA entegrasyon barası iki anahtarla kontrol edilmektedir. Önceden belirlenen gerilim limitlerine göre kontrol edilen anahtarlar, gerilim kalitesini korumak amacıyla gerilimin alt limitin üstünde kalmasını sağlar. YEK'lerde yeterli üretim olmadığında, DA bara gerilim seviyesi 550 V seviyesinin altına düşer. Bu durumda, şebeke anahtarı kapanarak şebeke devreye alınır. Şebeke desteğiyle enerji açığı kapatılarak güç kalitesi korunur.



Şekil 5.25. Enerji merkezinin blok diyagramı

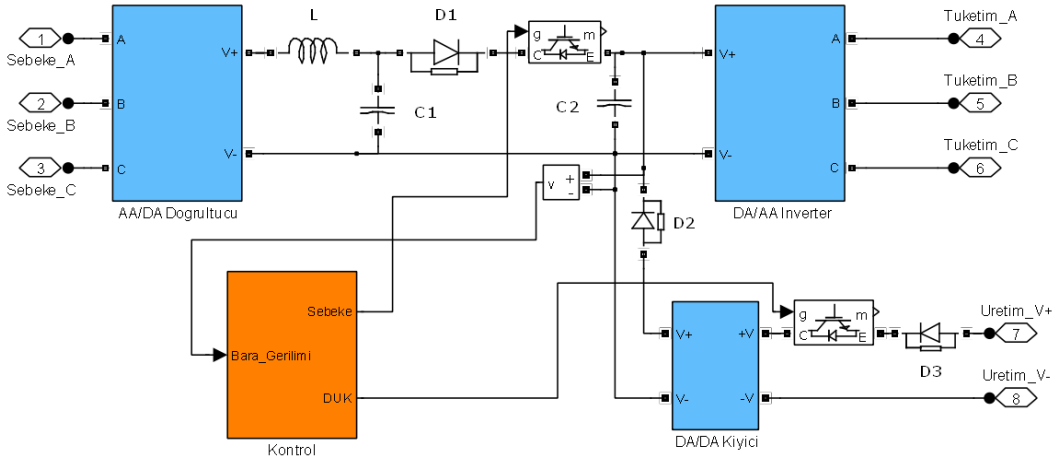
Üretim hattının tüketim hattından ayrılması, sistemlerin birbirini olumsuz etkilemesinin önüne geçmektedir. Şebeke tarafında veya dağıtık kaynaklarda meydana gelebilecek arıza gibi olumsuz durumlar, sistemin geri kalanını etkilememekte ve böylece güç kalitesi korunmaktadır. Şebekede uzun süreli kesintiler meydana gelmesi durumunda, YEK'ler tüketime cevap vermeyi devam ettirmektedir. Bu sistem, şebekeye bağımlılığı azaltmanın yanı sıra YEK'lerin mevcut şebekeye verimli şekilde entegrasyonunu sağlamaktadır.

5.3.1. Benzetim Modeli

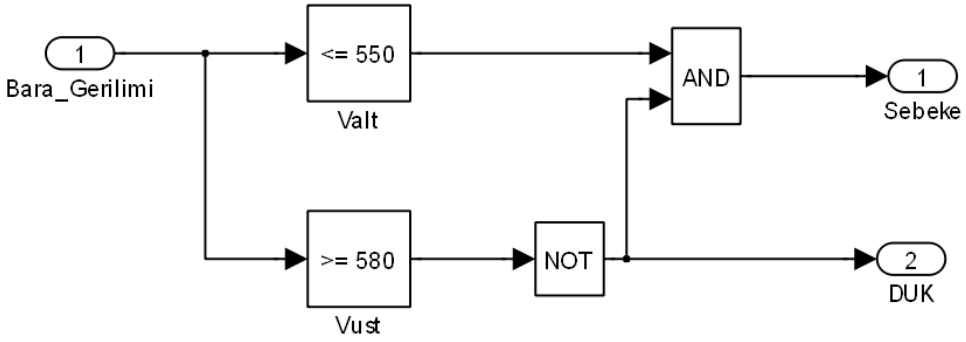
Melez mikro şebekenin benzetim modelini oluşturmak amacıyla Matlab/Simulink benzetim programı kullanılmaktadır. Örnek modelde YEK üretimi, tüketici talepleri, güç elektroniği elemanları ve kontrol merkezi yer almaktadır. Şekil 5.26'ta örnek güç sisteminde yer alan enerji merkezinin Matlab/Simulink benzetim modeli gösterilmektedir. Şebeke enerjisini DA forma dönüştürmede diyotlu AA/DA doğrultucu kullanılmaktadır. İnverter modelinde 6 adet IGBT'ten oluşan devre topolojisi kullanılmakta ve inverter PWM tekniği ile kontrol edilmektedir. İnverterin güç çıkışında harmonikleri elemine etmek amacıyla alçak geçiren filtre kullanılmaktadır. 120 V üretim hattı gerilimini 580 V DA'ya çıkarmak amacıyla transformatörlü (flyback) kıyıcı kullanılmaktadır.

Enerji merkezinin kontrolünde mantıksal işlemler kullanılmaktadır. Şekil 5.27'de enerji merkezinde kullanılan kontrol yönteminin şeması gösterilmektedir.

Kontrol yönteminin hedefi, entegrasyon barasının gerilimini kararlı tutmaktır. Üretimin tüketimi karşılaması durumunda A_1 anahtarı açılarak şebeke devre dışı kalmaktadır. Bu durumda mikro şebeke ada modunda ve şebekeden bağımsız çalışmaktadır. Talebin artması, bara gerilimini düşürerek alt limit seviyesine getirecektir. Bu durumda, A_1 anahtarı kapanarak şebeke devreye alınmakta ve dağıtık kaynakları desteklemektedir. Bu kontrol tekniği, otomatik olarak arz ile talep arasındaki dengeyi sağlamakta ve dağıtık kaynakların kullanımını ön planda tutmaktadır. Dağıtık kaynakların hava koşullarına bağlı olarak yetersiz kalması durumunda şebekeden destek alınarak enerji açığı kapatılmaktadır.



Şekil 5.26. Enerji merkezinin benzetim modeli [205]



Şekil 5.27. Kontrol yönteminin şeması [205]

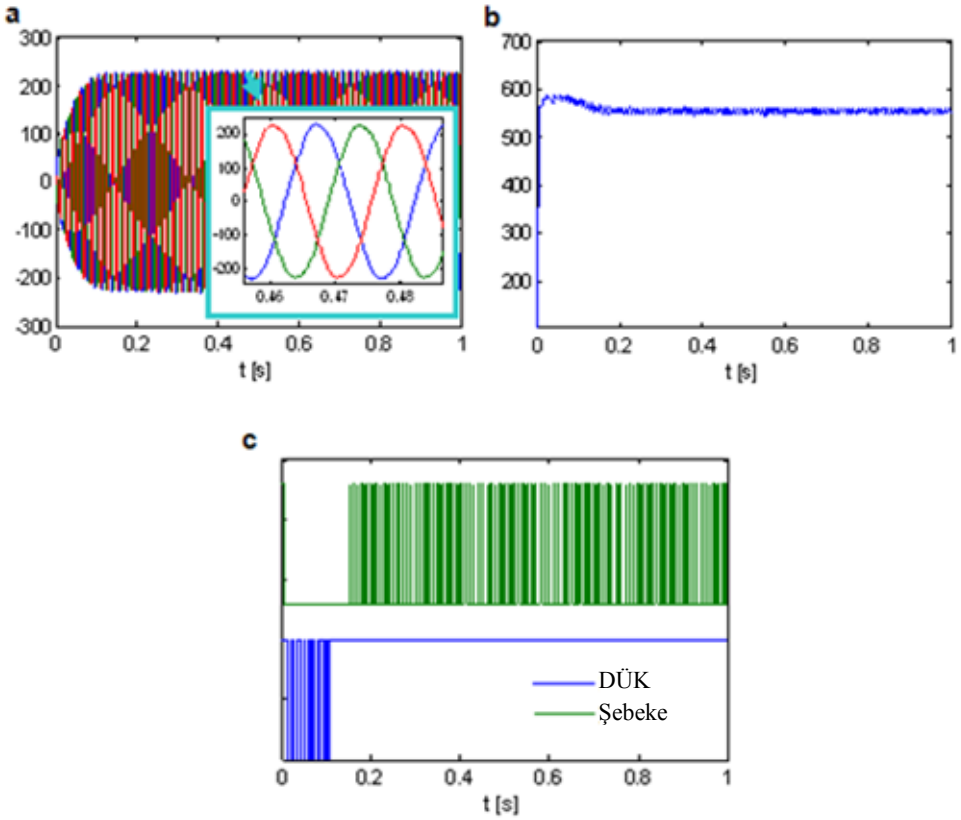
Mantıksal kontrol bloğu, DA bara geriliminin belirlenen gerilim aralığında kalmasını sağlamaktadır. Bara gerilim değeri belirlenen alt limitin altına düşmesi durumunda şebeke devreye alınmakta ve bara geriliminin sınır değerler arasındaki değeri korunmaktadır. Böylece, gerilim düşümünden tüketiciler olumsuz

etkilenmemektedir. Bara gerilimi üst sınırı aştığında, üretimin yeterli olduğu anlaşılmakta ve şebeke devre dışı bırakılmaktadır. Şebeke devre dışı kaldığında, üst limiti aşan gerilim değeri sınır değerler arasına dönmektedir. Bu kontrol yöntemi sayesinde, tüketimde öncelik dağıtık kaynaklardan sağlanan enerjiye verilmektedir. Şebeke ise sadece dağıtık kaynakların yetersiz kaldığı durumlarda devreye girerek güç kalitesini korumada yardımcı olmaktadır. Bara geriliminin sınır değerler arasında yer alması, tüketici hattına verilen enerjinin kalitesini korumaktadır. Bu sayede arz ile talep arasındaki denge, dinamik hesaplamalarla sağlanmaktadır. Kontrol DA bara üzerinden yapıldığından frekans ve genlik kontrolü için harici cihazlara gerek kalmamaktadır. Halbuki, AA entegrasyon yönteminde frekans, faz ve genlik kontrolü için harici donanımlar gerekmekte ve bu cihazlar karmaşık problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. AA entegrasyon yönteminde, dengesiz yüklenme gibi meydana gelebilecek olumsuz işletme koşulları fazladan kayıplara neden olmakta ve güç sisteminin verimini düşürmektedir. Bu yüzden, ada modunda veya YEK ağırlıklı sistemlerde AA güç entegrasyon yöntemi tercih edilmemektedir.

Şekil 5.28'de örnek bir uygulamanın tüketim hattı gerilimi, DA entegrasyon barasının gerilimi ve mantıksal kontrol sinyali gösterilmektedir. Geçici rejimden sonra tüketim hattının gerilim değerinin 220 V değerinde kararlı kaldığı görülmektedir (Şekil 5.28(a)). Bu değer, geleneksel şebekelerde kullanılan AA formun standart değeridir. Şekil 5.28(b), DA bara geriliminin sınır değerler arasında kaldığını göstermektedir. Şekil 5.28(c), şebeke ve dağıtık kaynakların anahtarlama süresini göstererek; kaynakların hangi zaman aralığında devrede olduğunun bilgisini vermektedir.

Dağıtık kaynakların şebekeyi destekleme oranını belirlemek amacıyla, kaynakların kullanım oranını gösteren bağıntılara ihtiyaç vardır. Dağıtık kaynakların kullanım oranını gösteren bağıntı Denklem 5.5'te gösterilmektedir. $E_{DÜK}$ dağıtık üretim kaynaklarının sağladığı toplam gücü, $E_Ş$ şebekenin sağladığı toplam gücü ve S_{DO} dağıtık kaynakların, şebekeye nazaran sağladığı gücün oranını göstermektedir. $S_{DO} = 1$ olması, şebeke ve dağıtık kaynaklardan elde edilen gücün eşit olduğunu ifade etmektedir. $0 < S_{DO} < 1$ olduğu zaman, şebeke sisteme dağıtık kaynaklardan daha fazla enerji sağlamaktadır. Bu durum, dağıtık kaynaklarının enerji talebini karşılamada yetersiz kaldığını gösterir. Dağıtık

kaynaklardan elde edilen enerji zamanla değişim gösterdiğinden ve otomatik kontrol yönteminin dinamik cevap vermesinden dolayı S_{DO} oranı devamlı olarak değişmektedir. Ayrıca S_{DO} oranını değiştiren bir diğer faktör talebin sürekli değişimidir. S_{DO} oranının 1'i aşması, yüklerin ağırlıklı olarak dağıtık kaynaklardan beslendiğini ifade eder. Dağıtık kaynaklarda enerji üretiminin olmaması veya arıza durumunda, S_{DO} karasızlığa gider.



Şekil 5.28. a) tüketim hattı gerilim karakteristiği, b) DA entegrasyon barası gerilim değeri, c) mantıksal kontrolün anahtarlama sinyalleri [205]

$$S_{DO} = \frac{E_{DÜK}}{E_{Şebeke}} \tag{5,5}$$

5.3.2. Benzetim Sonuçları

Örnek uygulamada şebeke ve dağıtık kaynakların sağladığı güç miktarı Şekil 5.29'da gösterilmektedir. Şekil 5.29(a) şebekeden çekilen gücü, Şekil 5.29(b) ise

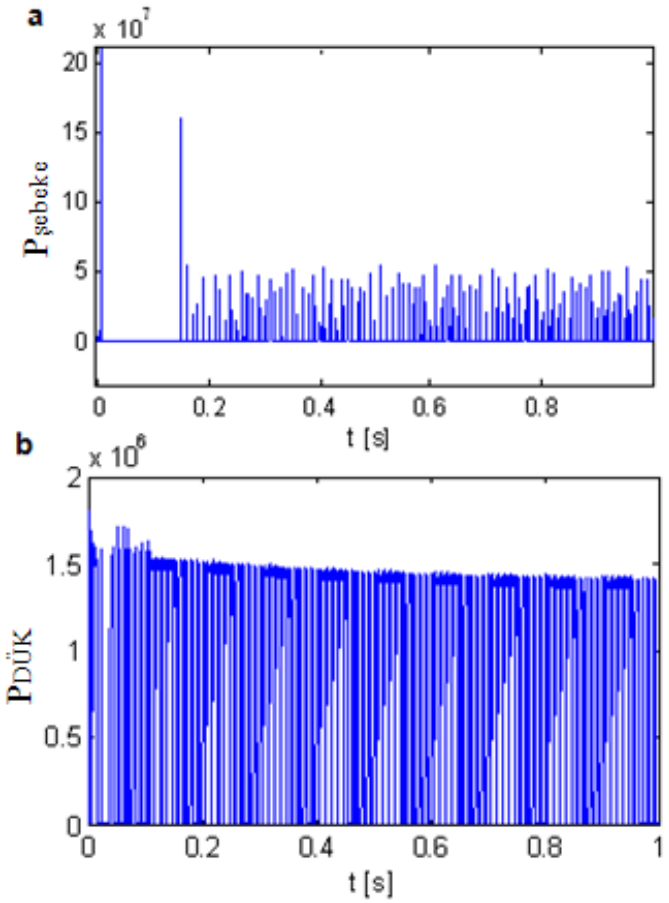
dağıtık kaynaklardan çekilen gücü göstermektedir. Bu uygulamada, $S_{DO} = 15{,}2$ olarak bulunmaktadır. Bu oran, dağıtık kaynakların şebekeden 15,2 kat daha fazla enerji sağladığını ifade eder.

Ani gerilim ve akım değişimlerinde, şebeke işletmesi zorlaşmakta ve güç kalitesini korumak için ek önlemler gerekmektedir. Bu durum, ikincil kaynakların daha çok yer aldığı mikro şebeke yapılarında daha önemli bir sorun haline gelebilmektedir. DA Entegrasyon yönteminin uygulamada kullanılabilmesi, çeşitli işletme koşulları altında yeterli performansı göstermesi ile mümkündür. Sık karşılanan işletme durumlarından biri de şebeke veya dağıtık kaynak tarafında arıza meydana gelmesidir. Arıza sonucunda gerilimin aniden düşmesi, akımın aşırı yükselmesine neden olduğundan, sistem parametrelerini olumsuz etkilemekte ve mikro şebekenin kontrolü zorlaşmaktadır.

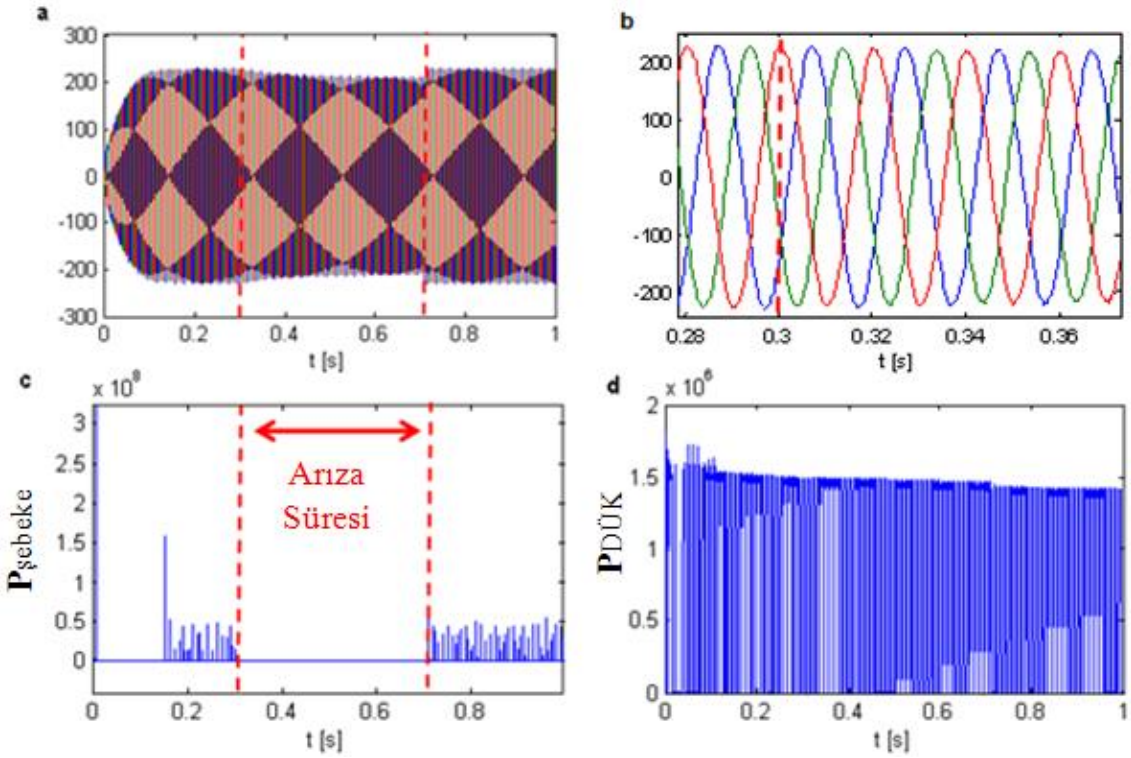
Arıza durumunu test etmek amacıyla, benzetim modelinde faz faz arıza test edilmektedir. Şebeke hattı için öngörülen arıza, 0,3-0,7 saniyeleri arasında uygulanmaktadır. Şekil 5.30 arıza durumunda, enerji merkezinin gerilim karakteristiğini göstermektedir. Arıza süresince, tüketim hattı gerilimi 15 V civarında düşmesine rağmen yükler beslenmeye devam etmektedir. Gerilim karakteristiğinde ve frekansta bozulma meydana gelmemektedir. S_{DO} oranı 15,2'den 20,6'ya yükselmektedir. Bu yükseliş, arıza nedeniyle şebekeye nazaran dağıtık kaynakların daha fazla kullanıldığını gösterir. Şekil 5.31(a)'da DA bara gerilimi ve Şekil 5.31(b)'de enerji merkezinin kontrol sinyali gösterilmektedir. DA bara gerilimi, sınır değerlerin altına düşse de tüketim hattını beslemeye devam etmektedir.

Güneş aydınlatma miktarı, sıcaklık ve rüzgar değişimine bağlı olarak YEK'lerden elde edilen enerji miktarı devamlı olarak değişmektedir. Bu değişim bazen kademeli olabildiği gibi bazen de ani gerçekleşebilmektedir. Bu değişimler, AA entegrasyon yönteminde ek donanımlarla kontrol edilerek güç kalitesi kontrol edilmektedir. DA güç entegrasyon yönteminde, frekans ve genlik kontrolü için ek donananımlar yer almadığından, güç kalitesi enerji merkezi tarafından korunmaktadır. YEK'lerde meydana gelen ani değişimlerde, DA güç entegrasyon yöntemi kullanılan mikro şebekenin performansını test etmek amacıyla yapılan uygulamanın benzetim sonuçları Şekil 5.32'te gösterilmektedir. YEK'lerden elde edilen enerjinin, gün ortasında tüketimi karşılayacak miktarda olduğu

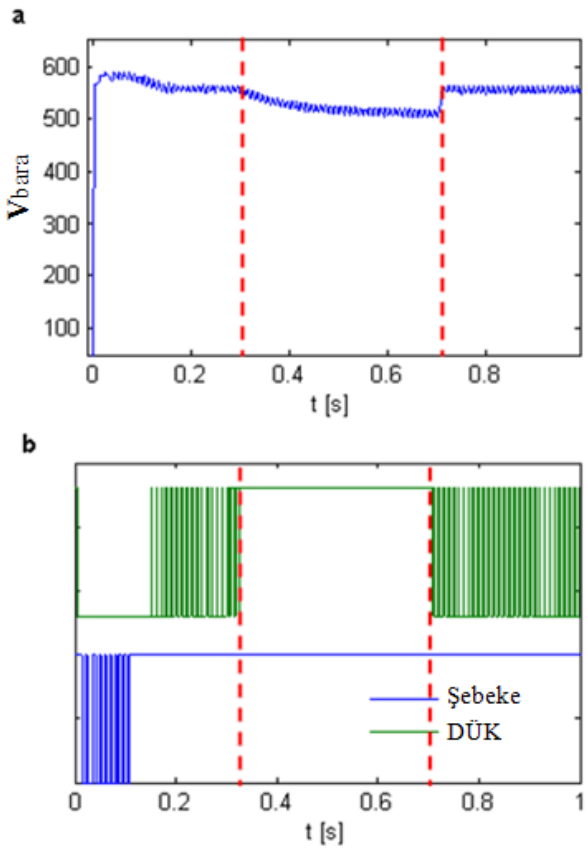
varsayılmaktadır (Şekil 5.32(a)). YEK'lerde yeterli enerji üretildiğinde, şebekeden enerji çekilmediği, Şekil 5.32(b)'de görülmektedir. DA entegrasyon barasının gerilimi Şekil 5.32(c)'de ve üç faz tüketim hattının gerilim karakteristiği Şekil 5.32(d)'de gösterilmektedir. Ada modunda, DA bara geriliminin seviyesi yükselmesine rağmen sınır değerler arasındadır. Tüketim hattının genliğinde, kısmen artış olmakla beraber frekans ve faz ayarında herhangi bir bozulma görülmemektedir. Mikro şebekenin tüketim tarafında yer alan kullanıcıların kaliteli ve gürbüz bir enerjiye sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu benzetim sonuçlarından elde edilen genel bulgular; YEK'lerden elde edilen enerjinin ani artışına rağmen gerilim değerlerinde bir bozulma olmaması, DA bara geriliminin sınır değerler arasında kalması ve mikro şebeke sisteminin ada modunda sağlıklı çalışmasıdır.



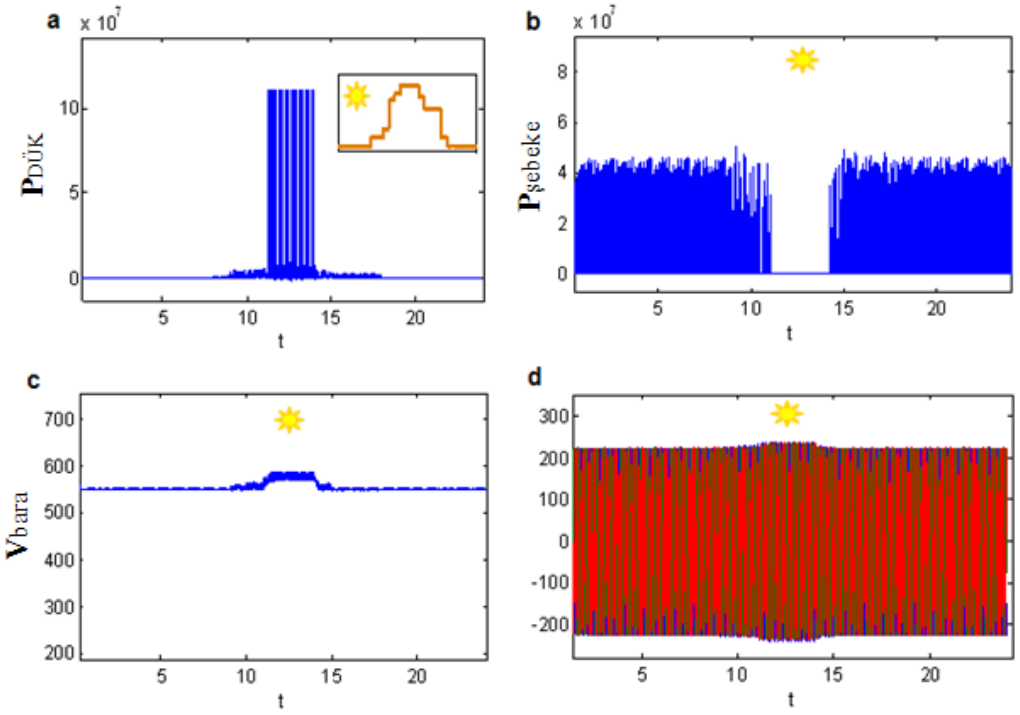
Şekil 5.29. a) Şebekeden çekilen güç, b) dağıtık kaynaklardan çekilen güç [205]



Şekil 5.30. a) Üç fazlı tüketim hattının gerilim karakteristiği, b) üç fazlı tüketim hattına ait gerilim karakteristiğinin ayrıntılı görünümü, c) benzetim süresince şebekeden çekilen güç, d) dağıtık kaynaklardan çekilen güç [205]



Şekil 5.31. a) DA bara gerilim, b) enerji merkezi kontrol sinyali [205]



Şekil 5.32. a) Güneşten elde edilen enerji miktarı, b) Şebekeden çekilen güç miktarı, c) DA entegrasyon gerilimi, d) tüketim hattı gerilim karakteristiği [205]

DA güç entegrasyon yöntemi kullanılan mikro şebeke yapısında, dağıtık enerji kaynakları, sadece bir inverter kullanılarak tüketim hattını beslemektedir. Tek inverter kullanımı, şebekede kullanılan elektronik elemanların sayısını ve sistem maliyetini azaltmakta ve mikro şebekenin kontrolünün daha kolay ve daha verimli olmasını sağlamaktadır. Geleneksel şebekelere uyumlu olan DA güç entegrasyon yöntemi, YEK'lerin mevcut şebekeye entegrasyonunda etkili bir yöntemdir. Dinamik kontrol tekniği, arz ile talep arasındaki dengeyi devamlı olarak koruduğundan güç kalitesinde önemli bozulmalar meydana gelmemektedir. DA güç entegrasyon yöntemi kullanılan mikro şebeke yapısında, YEK'lerin üretiminde meydana gelen dalgalanmalar tüketici tarafını etkilememektedir. Ayrıca arıza gibi ani gerilim değişimine neden olan işletme durumları, tüketici gerilim karakteristiğini olumsuz etkilememektedir.

YEK'ler, güç sistemlerinin esnekliğini artırması ve merkezi üretime bağımlılığı azaltması nedeniyle, üretim ölçeğinde, birçok yerde kullanılmaktadır. YEK'lerin mevcut şebekeye entegrasyonunu kolaylaştıracak ve mikro şebeke sistemlerin verimini artıracak çalışmalar, temiz ve tükenmez olan bu kaynakların daha yoğun kullanılmasının önünü açacaktır. Bu bölümde, YEK sistemlerin verimini artırmak ve potansiyelini daha iyi değerlendirmek amacıyla kullanılan

DA güç entegrasyon yönteminin üretim ölçeğinde performansı analiz edilmektedir. DA güç entegrasyon yöntemi, şebeke ve YEK'leri DA barası üzerinde entegre eden ve arz talep dengesini dinamik kontrolle sağlayan güç entegrasyon yöntemidir. Bu yöntemde, birincil kaynak olarak YEK sistemleri tercih edilmekte ve arıza veya aşırı yüklenme gibi işletme koşullarında şebekenin desteği alınmaktadır. Üretim ölçeğinde ele alınan örnek uygulamalar, DA güç entegrasyon yönteminin şebekeye bağımlılığı azalttığını ve güç sisteminin esnekliğini artırdığını göstermektedir. Şebeke tarafında meydana gelen arıza durumunda, YEK'lerin tüketiciye kaliteli enerji sağlaması ve mikro şebeke sisteminin ada modunda çalışmaya devam etmesi bu yöntemin en önemli özelliklerinden biridir. Bu sayede, YEK'lerin güvenirliliği artmakta ve mevcut güç sistemlerinde kullanımı kolaylaşmaktadır.

DA güç entegrasyon yöntemi kullanılan güç sisteminde, dağıtık enerji kaynaklarından hasat edilen enerji, üretim hattı ile bir merkeze toplanmaktadır. DA barasında şebekeyle entegre edilen bu enerji, tek inverter kullanılarak tüketiciye ulaştırılmaktadır. Enerjinin bir merkezde dönüşümü, sistemi daha verimli ve kontrol edilebilir kılmaktadır. Ayrıca, tek inverter kullanımı, mikro şebekede yer alan güç elektroniği elemanlarının sayısını azaltarak maliyetlerin düşmesine ve bakımların kolaylaşmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, DA güç entegrasyon yöntemi, geleceğin enerji alt yapısı olarak görülen akıllı şebekelerin kurulumunda, mikro şebeke sistemlerin güvenliğini artırarak YEK kullanımını teşvik etmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nüfus yoğunlaşmasına ve teknoloji kullanımına bağlı olarak enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Artan bu talep, ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan karşılanmakta ve bu durum karbondioksit salınımını artırarak çevreyi olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden, mevcut kaynakların daha verimli kullanılması ve temiz ve tükenmez enerji kaynakları olan YEK'lerin yaygınlaştırılması önem arz etmektedir. Gelişen teknoloji bu çalışmaların hız kazanmasını sağlamakta ve yapılan çalışmalar akıllı şebekeler başlığı altında toplanmaktadır. Kontrol, entegrasyon, haberleşme ve ölçüm alt başlıklarına ayrılabilen akıllı şebeke çalışmaları geniş bir araştırma alanına sahiptir. Özellikle güneş ve rüzgar gibi büyük enerji potansiyeline sahip kaynakların kullanımını teşvik eden bu çalışmalar, mevcut şebekenin yükünü azaltacak ve enerji verimliliğini artıracak çözümler içermektedir.

Tüketici tarafında bulunan dağıtık kaynaklar, üretim yelpazesini genişletirken sistemin kontrolünü de zorlaştırmaktadır. Birden fazla enerji kaynağı bulunan güç sistemlerinde arz ile talep arasındaki dengeyi sağlamak için hızlı ve verimli kontrol yöntemlerine gereksinim vardır. Kontrol yöntemleri, sistemin güç kalitesini korumak amacıyla frekans ve genlik ayarını yaparak üretim tarafında yaşanan değişikliklerden tüketicinin olumsuz etkilenmesini önler. Tahmin edilemez üretim karakteristiğine sahip YEK'lerin, güç sisteminde verimli şekilde kullanılması da gelişmiş kontrol yöntemlerinin kullanılması ile mümkündür. Ayrıca ulusal ve bölgesel enerji politikaları, talep taraflı güç yönetimi ve dinamik fiyatlandırma gibi stratejik öneme sahip uygulamalar kontrol yöntemleri üzerinden gerçekleştirilmektedir. Güç yönetiminde geniş bir sorumluluk alanına sahip olan kontrol yöntemleri, akıllı şebeke uygulamalarında beyin görevi görmektedir. Bu yüzden, kontrol alanında yaşanan gelişmeler, güç sistemlerinin verimliliğini ve sürdürebilirliği doğrudan etkilemektedir.

YEK'lerin mevcut şebekeye entegrasyonunda planlama kritik öneme sahiptir. Güvenilir, verimli ve ekonomik mikro şebeke sistemlerin oluşturulması konum, maliyet, güç kapasitesi, hava koşulları ve kullanılan teknoloji gibi şebeke parametrelerinin optimum seviyede değerlendirilmesiyle mümkündür. Literatürde kullanılan şebeke planlama yöntemleri kayıpları azaltma ve üretimde kaynakları

çeşitlendirmeye odaklanmaktadır. Şebekelerde planlama, kayıpları azaltarak güç sisteminin verimini ve enerji kalitesini artırmaktadır. Ayrıca, YEK'lerin güvenirliliğini artırarak tüketiciye ekonomik enerji kaynaklarından yararlanma imkanı sunmaktadır. Şebeke planlamada, güç sistemi elemanlarının etraflıca bilinmesi, gelişmiş kontrol yöntemlerinin kullanılması ve bölgesel potansiyel ve ihtiyaçların göz önünde bulundurulması önem arz etmektedir.

İkincil kaynakların mevcut şebekeyle uyumu, bu kaynakların yaygınlaşmasında en önemli etkendir. YEK'lerin entegrasyonunda birçok yöntem kullanılmakla beraber yaygın olarak kullanılan güç entegrasyon yöntemleri; AA güç entegrasyon, DA güç entegrasyon ve melez (hibrid) güç entegrasyon yöntemleridir. Şebekeye yakın yerlerde kurulan mikro şebekelerde genellikle AA güç entegrasyon yöntemi kullanılmaktadır. Böylece, üretim fazlası olan enerji şebekeye verilmekte ve depolama cihazlarına ihtiyaç kalmamaktadır. Şebekeden uzak olan bölgelerde, mikro şebeke sistemler ada modunda çalışmakta ve güç kalitesini ve güvenirliliğini artırmak amacıyla birden fazla enerji kaynağı kullanılmaktadır. Alternatif enerji kaynakları ve depolama cihazları genellikle DA formda çalışması nedeniyle, bu sistemlerde DA güç entegrasyon yöntemi kullanımı daha verimli olmaktadır. DA güç entegrasyon yönteminde üretilen enerji DA barasında toplandıktan sonra, sadece bir inverter aracılığıyla yüke aktarılmaktadır. Bağımsız tek inverter kullanımı, kontrolü kolaylaştırmakta ve bu sayede frekans, genlik ve faz kalibrasyonu için gerekli olan ek donanımlara ihtiyaç kalmamaktadır. Üretim ve tüketim tarafında çeşitliliğin artması durumunda, sadece bir entegrasyon yönteminin kullanılması verimli olmamakta ve yöntemlerin avantajlarından yararlanmak için her iki yöntem birlikte kullanılarak melez güç entegrasyonu oluşturulmaktadır. Entegrasyon yönteminin seçiminde, üretim ve tüketim karakteristiği etkili olmaktadır. Mikro şebeke sistemin güç elemanlarında elektriksel form ağırlığı DA formda ise DA güç entegrasyon yöntemi, AA formda ise AA güç entegrasyon yöntemi ve çeşitlilik varsa melez sistemler daha avantajlı olmaktadır.

Etkin bir güç entegrasyon yöntemi, çeşitli işletme koşullarına uyumlu olması güç sisteminin sürdürülebilirliği ve güvenliği açısından önemlidir. Bu yüzden, hedef yöntem DA güç entegrasyon yönteminin evsel, dağıtım ve iletim ölçeğinde performansı analiz edilmekte ve arıza ve aşırı yüklenme durumları için sistemin

tepkisi gözlemlenmektedir. Evsel ölçekte performans analizi için dinamik yüklerden oluşan bir ev, DA hattan ve AA hattan beslenmektedir. AA hat geleneksel şebekeden beslenmekte ve herhangi bir ikincil kaynak içermemektedir. DA hat ise şebekeden ve YEK'lerin beslediği depolama cihazından beslenmektedir. Mikro şebeke sistemin arıza tepkisini ölçmek amacıyla, şebekede 0,5-0,8 saniyeleri arasında bir arıza meydana geldiği öngörülmektedir. Arıza süresince, geleneksel şebekelerde olduğu gibi, AA hattın enerjisi kesilmekte ve yükler arızadan doğrudan etkilenmektedir. DA hatta bağlı yük grubu normal işletme koşullarında çalışmasına devam etmektedir. Olağan işletme durumunda bataryadan yükler beslenmekte ve şebeke bataryayı destekler niteliktedir. Bu durum, DA güç entegrasyon yönteminin olağan işletme tepkisini göstermektedir. Arıza süresince, DA hatta bağlı yükler olağan çalışmasına devam etmekte ve gerilim karakteristiğinde herhangi bir bozulma olmamaktadır. Arıza anında güç kalitesinin korunması, DA güç entegrasyon yöntemi kullanılan mikro şebeke sistemin evsel ölçekte güç güvenliğini artırdığını ve YEK'lerin küçük ölçeklerde kullanılabileceğini göstermektedir.

DA güç entegrasyon yönteminin dağıtım ölçeğinde performansını analiz etmek için 15 evden oluşan ve YEK'lerin ikincil kaynak olarak yer aldığı bir sitenin güç akışı incelenmektedir. Hava koşullarının Capo Vado güç senaryolarına uyumlu olduğu örnek modelde, YEK'lerin şebekeye bağımlılığı azalttığı ve sistem güvenirliliğini arttırdığı gözlemlenmektedir. Değişen hava koşulları göz önüne alınarak Capo Vado senaryosu tam, yarım ve çeyrek güç olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmaktadır. YEK'lerin şebekeyi destekleme oranı; tam güçte S_Y = 0,92, yarım güçte S_Y = 0,70 ve çeyrek güçte S_Y = 0,34 olarak belirlenmektedir. Şebeke tarafında meydana gelen ve 17 saat süren arıza durumunda, YEK'ler, sistemi beslemeye devam etmekte ve akıllı sitenin arızadan olumsuz etkilenmesini önlemektedir.

YEK'ler ağırlıklı olarak üretim ölçeğinde kullanıldığı göz önünde bulundurularak, DA güç entegrasyon yönteminin üretim ölçeğinde performansını analiz etmek üzere orta ölçekli YEK'lerin yer aldığı bir bölgenin güç akış değerleri ele alınmaktadır. Arıza ve ani yük değişimi gibi sistem kararlılığını olumsuz etkileyecek senaryolarında yer aldığı örnek modelde, YEK'lerden hasat edilen enerji bir merkezde toplanmakta ve toplanan enerji sadece bir inverter

üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. Şebeke ve YEK'lerin entegre edildiği DA barasından alınan enerjinin sadece bir inverterle tüketiciye ulaştırması, mikro şebeke güç sisteminin kontrolünü kolaylaştırmakta ve güvenirliliğini artırmaktadır. YEK'lerden elde enerjinin bölgesel talebi karşılaması durumunda, sistem ada modunda çalışmakta ve şebekeye bağımlılık en aza inmektedir. Çeşitli güç senaryolarının uygulandığı modelde, tüketim hattına verilen enerjinin gerilim karakteristiği bozulmamakta ve güç kalitesi korunarak sistemin güvenirliliği artmaktadır.

Farklı güç ölçeklerinde ve çeşitli işletme senaryolarında yapılan analizler, YEK'lerin mevcut şebekeye kazandırılmasında DA güç entegrasyon yönteminin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. DA güç entegrasyon yöntemi, üretim ve tüketim tarafında DA formun ağırlık kazandığı şebeke topolojilerinde daha verimli olmakta ve mikro şebeke sistemlerin kontrolünü, merkezi enerji yönetimi sayesinde kolaylaştırmaktadır. DA güç entegrasyon yönteminde bütün kaynaklar için tek bir inverter kullanıldığından frekans ve genlik ayarı için harici donanımlar gerekmemekte ve azalan elektronik cihazlar nedeniyle maliyet düşmektedir. DA güç entegrasyon yöntemi, bu avantajları sayesinde, geleceğin akıllı şebekelerinde sistem güvenliğini ve verimliliğini artırmak, güç kalitesini korumak, YEK'lerin yaygınlaşmasını sağlamak, mevcut şebekenin ağırlaşan yükünü hafifletmek ve tüketicilerin şebekeye bağımlılığını azaltmak için kullanılabilir.

6.1 Konuyla İlgili Yapılabilecek Çalışmalar

YEK'ler doğası gereği kesintili ve tahmin edilemez üretim karakteristiğine sahiptir. Bu dalgalanma şebekeye hızlı bir şekilde yansımakta ve frekans dalgalanması, gerilim dalgalanması ve gerilim dalgacıklarının oluşması gibi olumsuzluklara neden olmaktadır. Bozucu etkilerin güç kalitesini düşürmesi ve sistemde kararsızlıklara neden olması nedeniyle güç düzeltme çalışmaları yapılmaktadır. Literatürde birçok güç düzeltme yöntemi olmakla beraber bu yöntemlerin birçoğunda enerji depolama teknolojileri kullanılmaktadır. Depolama teknolojisi, sistemlerin maliyetini artırmakta ve ekstra güç dönüşümleri gerektirmesi nedeniyle YEK'lerin verimini azaltmaktadır. Enerji depolama

teknolojisi kullanılmadan geliştirilecek olan ekonomik ve verimli güç dönüştürme yöntemleri yakın geleceğin araştırma alanlarından olacaktır. Moment değişimlerini minimize etmek amacıyla frekans, aktif akım, moment kontrol ve açı kontrol literatürde yer alan yöntemlerdendir. Bu kontrol teknikleri ile sezgisel çözümleme yöntemlerinin uygun şekilde bir araya getirilmesi durumunda güç çıkışındaki kararsızlıklar azaltılarak güç sisteminin güvenliği artırılabilecektir.

Maliyet ve bakım kolaylığı nedeniyle YEK'ler genellikle büyük üretim ölçeklerine sahip santrallerde yapılmaktadır. Büyük ölçekli santrallerde, sistem kurulumu ve emniyet mesafesi sağlamak için geniş alanlara ihtiyaç vardır. Bu yüzden bu santraller yerleşim merkezlerinden uzak yerlere kurulmaktadır. Büyük ölçekli santraller büyük çapta yatırımlar gerektirdiğinden evsel ve ticari tüketicilere hitap etmemektedir. Küçük ölçekli YEK'lerde ise enerji birim maliyetinin yüksek olması, bireysel YEK kullanımına olan ilgiyi azaltmaktadır. YEK'lerin kurulum ve işletme maliyetlerinin azalması ve enerji kalitesinin artmasıyla YEK'lere olan güven ve ilgi artacaktır. Bu bağlamda, arıza giderme, entegrasyon ve güç dönüştürücü verimi artırma gibi maliyetleri azaltan ve güvenirliliği artıran çalışmalar bu günlerde akıllı şebeke alanında ilgi gören konular olmaktadır. Maliyetleri azaltma ve güvenliği artırma çalışmaları hem gereksinim hem de gelişime açık bir alandır. Bundan dolayı bu alanda yapılan çalışmaların yakın gelecekte hız kazanarak devam etmesi beklenmektedir.

Depolama teknolojisi, YEK'ler için her ne kadar hayati öneme sahip olsa da bazı dezavantajları vardır. Şarj-deşarj döngü verimi, ekonomik ömrü, kurulum, işletme ve bakım masrafları bu dezavantajlarının en önemlileridir. Uyumlu olmayan yük dağılımlarına ve şebekeyle bütünleşmiş kesintili YEK oranına bağlı olarak dengeleme ve güç kalitesi gereksinimleri değişmektedir. YEK'lerin entegrasyonuyla ilgili birçok problemin çözümünde kullanılan enerji depolama teknolojileri bazı sorunların çözümünde tek başına yeterli olamamaktadır. Depolama teknolojisi geliştirilerek talep karşılama ve enerji maliyetlerinin azalmasına çözüm olan çalışmaların ortaya konulması durumunda, depolamanın YEK'lerde kullanımı ve şebeke uyumu artacaktır. Bu bağlamda, YEK'lerin entegrasyonuna yönelik geliştirilecek etkili ve verimli yöntemler, depolama teknolojisinin yaygınlaşmasında önemli rol oynayacaktır.

Akıllı şebeke teknolojisinde en kritik işlem adımlarından biri ölçmedir. Güç tüketimini görüntüleyen, ana şebekeyle bağlantı kuran ve enerji optimizasyonu için elektrikli cihazları kontrol eden akıllı sayaçlar, ölçmenin anahtar elemanı olarak görev yapmaktadır. Akıllı sayaçlar sayesinde finansal faydalar sağlanmakla birlikte çevreye duyarlı üretim ve tüketim politikaları da geliştirilebilmektedir. Ayrıca akıllı sayaçlar şebekeyle tüketici arasında iki yönlü iletişimi sağlayarak tüketim değerlerini kaydetmekte ve yerel enerji politikalarının uygulanmasında kullanılmaktadır. Talep taraflı yük yönetimi, arıza tespiti, acil durumlarda enerji politikalarının uygulanması ve dağıtım sisteminin yönetimi akıllı sayaçlarla yapılmaktadır. Tüketicinin ve/veya dağıtım şirketinin yararı doğrultusunda tasarlanacak akıllı sayaçlar akıllı şebeke uygulamalarının kontrolünü sağlayarak sistemin daha verimli ve güvenli olmasını sağlayacaktır. Bu amaç doğrultusunda yapılan birçok çalışma olmakla beraber yakın gelecekte bu çalışmaların artarak devam etmesi akıllı şebeke politikalarının etkin bir şekilde uygulanabilmesi için bir gereksinimdir.

Elektrikli araçlar günümüzde kullanılan ve hızla gelişmekte olan yeni bir teknolojidir. Elektrikli araçların sayısının artmasıyla mevcut şebekenin yükü artacak ve sürdürülebilir şebeke yapısı için ek önlemler gerekecektir. Elektrikli araçların dağıtım şebekesine etkilerini inceleyen, uyum süreci için alternatif modeller öneren birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Yapılan çalışmalara bağlı olarak elektrikli araçlar çoğunlukla evsel yük olarak değerlendirilmektedir. Diğer taraftan elektrikli araçların şarj edilmesini kamusal alanda ve ticari olarak değerlendiren çalışmalar da vardır. Bu alternatiflerden birinin kullanılması durumunda elektrikli araçların dağıtım şebekesini etkilemesi kaçınılmazdır. Bu etkiler, aşırı yüklenmeden kaynaklanan trafo ısınmalarından başlayarak yeni yatırım gerektiren önlemlere kadar sıralanabilmektedir. Bu yüzden elektrikli araçların mevcut şebekeye uyum süreci birçok sorunu da beraberinde getirecektir. Bu uyum sürecini yönetmek amacıyla; kaliteli, sürdürülebilir ve güvenli enerji ihtiyacına yönelik çalışmalar literatürde yer almakla beraber yapılacak yeni çalışmalar elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşmasında etkili rol oynayacaktır. Elektrikli araçların uyumu, entegrasyonu, ekonomik etkileri ve teknik analizleri yakın geleceğin ticari ve akademik açıdan önemli konu başlıkları arasında yer alacaktır.

Evsel, ticari, sanayi, tarım ve diğer tüketicilerin elektrik tüketim alışkanlıklarında büyük farklılıklar vardır. Bazen aynı tip tüketiciler arasında bile önemli farklılıklar görülebilmektedir. Elektrik abonelerinin, tüketim alışkanlıklarına göre sınıflandırılması durumunda talep tarafında yer alan belirsizlikler azalmaktadır. Ayrıca sınıflandırma verileri planlama, rekabetçi enerji politikaları belirleme ve üretim-tüketim dengesini sağlama gibi problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Yük sınıflandırmanın diğer bir önemli faydası; tüketicinin kendi tüketim alışkanlıklarını öğrenerek enerjiyi daha verimli kullanma imkanına kavuşmasıdır. Böylece tüketici enerji maliyetlerini azaltabilmekte ve kendine uygun enerji politikaları belirleyebilmektedir. Farklı yük sınıflarında farklı algoritmalar kullanılması gerektiğinden yükleri kümelemek ve verimli kontrol yöntemleri belirlemek enerji optimizasyonu açısından önem teşkil etmektedir. Akıllı şebekede yer alan gelişmiş ölçüm cihazları ve tekniklerinin kullanılmasıyla yük sınıflandırma verileri daha verimli bir şekilde elde edilebilecek ve kontrol algoritmalarının etkinliği artacaktır. Yük sınıflandırma, dağıtık üretim gibi diğer akıllı şebeke konularıyla bütün olarak ele alındığında sistem verimliliğini artıran önemli bir kademe haline gelecektir.

Akıllı şebekeler geniş kullanım alanına sahip ve hızlı gelişen bir teknolojidir. Akıllı şebekelere ait herhangi bir alt başlıkta yaşanan gelişme diğer alt başlıkları etkilemekte, mevcut çalışmaların ufkunu açabilmekte veya yapılan çalışmaların atıl vaziyette kalmasına sebep olabilmektedir. Diğer teknoloji alanları gibi akıllı şebekeler alanında da etkili çalışmalar yapabilmek, mevcut teknolojinin etraflı bir şekilde bilinmesine ve tüketici tercihlerinin doğru yorumlanmasına bağlıdır. Yerel, bölgesel ve genel enerji problemlerinin doğru belirlenmesiyle yapılacak çalışmalar, akıllı şebekeler alanında yapılacak araştırmaları doğru yönlendirilebilecektir. Böylece tüketici ihtiyaçlarına ve enerji politikalarının gereksinimlerine cevap verebilen çalışmalar yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

[1] D.L. Morton, *Reviewing the history of electric power and electrification*, **Endeavour**, 26:2 (2002) 60-63.

[2] K.S. Reddy, Madhusudan Kumar, T.K. Mallick, H. Sharon, S. Lokeswaran, A *review of integration, control, communication and metering (ICCM) of renewable energy based smart grid*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 38 (2014) 180-192.

[3] C.K. Park, H.J. Kim and Y.S. Kim, *A study of factors enhancing smart grid consumer engagement*, **Energy Policy**, 72 (2014) 211–218.

[4] S. Misra and B.J. Oommen, *An efficient dynamic algorithm for maintaining all-pairs shortest paths in stochastic networks*, **IEEE Transaction on Computer,** 55:6 (2006) 686–702.

[5] S. Misra, P.V. Krishna, V. Saritha, H. Agarwal and A. Ahuja, *Learning automata-based multi-constrained fault-tolerance approach for effective energy management in smart grid communication network*, **Journal of Network and Computer Applications,** 44 (2014) 212–219.

[6] Global Wind Report – The global status of wind power in 2013, Global Wind Energy Council, April 2014.

[7] H. Li and Z. Chen, *Overview of different wind generator systems and their comparisons*, **IET Renewable Power Generation**, 2:2 (2008) 123–138.

[8] H. Polinder, F.F.A. van der Pijl, G.J. de Vilder and P. Tavner, *Comparison of direct drive and geared generator concepts for wind turbines*. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 21:3 (2006) 725–732.

[9] G. BoroumandJazi, B. Rismanchi and R. Saidur, *Technical characteristic analysis of wind energy conversion systems for sustainable development*, **Energy Conversion and Management**, 69 (2013) 87–94.

[10] Z. Chen, J.M. Guerrero and F. Blaabjerg, *Review of the state of the art of power electronics for wind turbines*, **IEEE Transaction on Power Electronics**, 24:8 (2009) 1859–1875.

[11] S. Li and T.A Haskew, *Energy capture, conversion, and control study of DFIG wind turbine under weibull wind distribution*, Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, 2009, pp. 1-9.

[12] S. Yang, Y.K. Wu, H.J. Lin and W.J. Lee, *Integrated mechanical and electrical DFIG wind turbine model development*, Industry Applications Society Annual Meeting, Orlando, 2013, pp. 1-10.

[13] M.A. Abdullah, A.H.M. Yatim, C.W. Tan and R. Saidur, *A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16:5 (2012) 3220–3227.

[14] Y. Tian and C.Y. Zhao, *a review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*, **Applied Energy**, 104 (2013) 538–553.

[15] Solarplaza. (2012), http://www.solarplaza.com/top10-monocrystalline-cell-efficiency (Online access on 6 October, 2012)

[16] G. Farivar and B. Asaei, *A new approach for solar module temperature estimation using the simple diode model*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 26(4) (2011) 1118–1126.

[17] A. Keyhani, *Modeling of photovoltaic microgrids for bulk power grid studies*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego,

2011, pp. 1–6
[18] F. Adamo, F. Attivissimo, A. Di Nisio, and M. Spadavecchia, *Analysis of the Uncertainty of the Double-Diode Model of a Photovoltaic Panel*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hangzhou, China, 2011, p. 1–5.
[19] M.G. Villalva, J.R. Gazoli, and E.R. Filho, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 24(5) (2009) 1198–1208.
[20] Y. Mahmoud, W. Xiao and H.H. Zeineldin, *A simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules*, **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 3:1 (2012) 185–186.
[21] M.C. Di Piazza, M. Pucci, A. Ragusa, and G. Vitale, *Analytical versus neural real-time simulation of a photovoltaic generator based on a DC-DC converter*, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 46:6 (2010) 2501–2510.
[22] A. Chatterjee and A. Keyhani, *Thevenin's equivalent of photovoltaic source models for MPPT and power grid studies*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2011, pp. 1–7.
[23] H. Patel and V. Agarwal, *MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 23:1 (2008) 302–310.
[24] S. Lyden, M.E. Haque, A. Gargoom, and M. Negnevitsky, *Review of maximum power point tracking approaches suitable for PV systems under partial shading conditions*, Australasian Universities Power Engineering Conference, Hobart, TAS, Australia, 2013, p. 1-6.
[25] A.K. Abdelsalam, A.M. Massoud, S. Ahmed, and P.N. Enjeti, *High performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids*, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 26:4 (2011) 1010–1021.
[26] A. Safari and S. Mekhilef, *Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter*, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 58:4 (2011) 1154–1161.
[27] S.B. Kjaer, *Evaluation of the 'hill climbing' and the 'incremental conductance' maximum power point trackers for photovoltaic power systems*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 27:4 (2012) 922–929.
[28] T. Esram, J.W. Kimball, P.T. Krein, P.L. Chapman, and P. Midya, *Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control*, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 21:5 (2006) 1282–1291.
[29] Economist. (2012). http://www.economist.comIblogs/graphicdetaiIl20 121I 2/daily-chart -19 (on-line access on 2 June, 2012).
[30] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen and F. Blaabjerg, *A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules*, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 41 (2005) 1292-1306.
[31] D.M. Scholten, N. Ertugrul and W.L. Soong, *Micro-inverters in small scale pv systems:a review and future directions*, Australasian Universities Power Engineering Conference, Hobart, Australia, 2013, p. 10-16.
[32] L. O'Callaghan, M. McKeever and B. Norton, *A Simulation Analysis of Photovoltaic AC Module Integrated Converters in Parallel, under*

Controlled Edge Shading Conditions, 11th international Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, Italy, 2012, p. 699-705.

[33] US Energy Information Administration. Annual energy outlooks 2010 with projections to 2035, Technical Report, US Department of Energy, 2010.

[34] US Energy Information Administration. (2013). http://www.eia.gov/tools/glossary/ (on-line access on 20 Feb, 2014)

[35] E. Ela, M. Milligan and B. Kirby, *Operating reserves and variable generation*, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, 2011.

[36] P. Denholm, E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, The role of energy storage with renewable electricity generation, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, 2010.

[37] P. Meibom, R. Barth, B. Hasche, H. Brand, C. Weber and M. O'Malley, *Stochastic optimization model to study the operational impacts of high wind penetrations in Ireland*, **IEEE Transaction on Power System**, 26 (2011) 1367–1379.

[38] P. Denholm and R. Sioshansi, *The value of compressed air energy storage with wind in transmission-constrained electric power systems*, **Energy Policy**, 37 (2009) 149–158.

[39] P. Varaiya, F. Wu and J. Bialek, *Smart operation of smart grid: risk-limiting dispatch*, **Proceeding of the IEEE**, 99 (2011) 40–57.

[40] P. Denholm and M. Hand, *Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity*, **Energy Policy**, 39 (2011) 1817–1830.

[41] U. Topcu, D. Gayme, S. Low and P. Khargonekar, *Towards smart, flexible and efficient power systems: Vision and research challenges*, Proceedings of the American control conference**,** Washington, DC, 2013, p. 5237–5244.

[42] J.P. Barton and D.G. Infield, *Energy storage and its use with intermittent renewable energy*, **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 19 (2004) 441–448.

[43] S.M. Schoenung, J.M. Eyer, J.J. Iannucci and S.A. Horgan, *Energy storage for a competitive power market*, **Annual Review of Environment and Resources**, 21 (1996) 347–370.

[44] J. Iannucci and S. Schoenung, Energy storage concepts for a restructured electric utility industry, Technical Report, Sandia National Laboratories, 2000.

[45] D. Mohler and D. Sowder, "Energy storage and the need for flexibility on the grid", in Jones L.E. (Ed.), *Renewable energy integration*, Boston, Academic Press, 2014, p. 285–92.

[46] R. Schainker, *Executive overview: energy storage options for a sustainable energy future*, Proceedings of IEEE PES General Meeting, Denver, 2004, p. 2309–2314.

[47] Policy Department Economic and Scientific Policy, Outlook of energy storage technologies, Technical Report, European Parliament, 2008.

[48] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding, *Progress in electrical energy storage system: a critical review*, **Progress in Natural Science**, 19 (2009) 291–312.

[49] D. Rastler, Electricity energy storage technology options, Technical Report, Electric Power Research Institute, 2010.

[50] D. Herman and B. Norris, Comparison of storage technologies for distributed resource applications, Technical Report, Electric Power Research Institute, 2003.
[51] H. Ibrahim and A. Ilinca, *Techno-economic analysis of different energy storage technologies,* Energy storage-technologies and applications, Rijeka, 2013, p. 1–40
[52] V. Scaini, Grid support stability for reliable, renewable power, Technical Report, Eaton Corporation, 2012.
[53] I. Gyuk, S. Eckroad, L. Mears, H. Gotschall and H. Kamath, EPRI-DOE handbook of energy storage for transmission and distribution applications, Technical Report, Electric Power Research Institute and the U.S. Department of Energy, 2003.
[54] T. Yau, L. Walker, H. Graham and A. Gupta, *Effects of battery storage devices on power system dispatch*, **IEEE Trans Power Apparatus and System**, 100 (1981) 375–83.
[55] M. Kintner-Meyer, C. Jin, P. Balducci, M. Elizondo, X. Guo and T. Nguyen, *Energy storage for variable renewable energy resource integration, a regional assessment for the Northwest Power Pool*, IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Arizona, USA, 2011, p. 1–7.
[56] S. Sundararagavan and E. Baker, *Evaluating energy storage technologies for wind power integration*, **Solar Energy,** 86 (2012) 2707–2717.
[57] M. Ghofrani, A. Arabali, M. Etezadi-Amoli and M.S. Fadali, *Energy storage application for performance enhancement of wind integration*, **IEEE Transaction on Power System,** 28 (2013) 4803–4811.
[58] S. Tripathy, *Improved load-frequency control with capacitive energy storage*, **Energy Conversion and Management**, 38 (1997) 551–562.
[59] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen and G. Strbac, *Technical impacts of embedded generation on the distribution system*, Embedded Generation, London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 2000, p. 11–2.
[60] M. Bragard, N. Soltau, S. Thomas and R.W.D. Doncker, *The balance of renewable sources and user demands in grids: power electronics for modular battery energy storage systems*, **IEEE Transaction on Power Electronics**, 25 (2010) 3049–56.
[61] E. Drury, P. Denholm and R. Sioshansi, *The value of compressed air energy storage in energy and reserve markets*, **Energy**, 36 (2011) 4959–4973.
[62] S. Schoenung and J. Eyer, Benefit/cost framework for evaluating modular energy storage, Technical Report, Sandia National Laboratories, 2008.
[63] A. Rouhani, *Composite generation and transmission expansion planning with distributed generation consideration*" M.S. thesis, Zanjan University Iran, 2010.
[64] A. Rouhani, S.H. Hosseini and M. Raoofat, *Composite Generation and Transmission Expansion Planning Considering Distributed Generation*, **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, 62 (2014) 792-805.
[65] G. Liu, H. Sasaki and N. Yorino, *Application of Network Topology to Long Range CEP of Generation and Transmission Lines***, Electrical Power System Research**, 57 (2001) 157–162.

[66] V.V.S.N Murty and A. Kumar, *Mesh Distribution System Analysis in Presence of Distributed Generation with Time Varying Load M*odel, **Electrical Power and Energy Systems**, 62 (2014) 836–854.

[67] J. Naveen, S.N. Singh and S.C. Srivastava, *Particle Swarm Optimization Based Method for Optimal Siting And Sizing of Multiple Distributed Generators*, 16th National Power Systems Conference, Osmania University, Hyderabad, 2010, p. 669-674.

[68] S. Hasanpour, R Ghazi and M.H. Javidi, *A New Approach for Cost Allocation and Reactive Power Pricing in A Deregulated Environment*, **Electrical Engineering**, 91 (2009) 27–34.

[69] L.D. Arya, A. Koshtil and S.C. Choube, *Distributed Generation Planning Using Differential Evolution Accounting Voltage Stability Consideration*, **Electrical Power Energy System**, 42 (2012) 196–207.

[70] G. Durga and M. Nadarajah, *Optimal DG Placement in Deregulated Electricity Market*, **Electrical Power System Research**, 77 (2007) 1627–1636.

[71] W. El-khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy and M.M.A. Salama, *Optimal Investment Planning For Distributed Generation in a Competitive Electricity Markets*, **IEEE Transaction on Power System**, 19:3 (2004) 1674–1684.

[72] N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulananthan. *An Analytical Approach for DG Allocation in Primary Distribution Network*, **Electrical Power Energy System**, 20:2 (2005) 750–757.

[73] P.M. Lalitha, V.C. Reddy, S. Reddy N and U. Reddy, *DG Source Allocation by Fuzzy and Clonal Selection Algorithm for Minimum Loss in Distribution System*, **Distribution and Generation Alternative Energy**, 26:4 (2011) 17–35.

[74] Q. Kejun, Z. Chengke, A. Malcolm and Y. Yue, *Effect of Load Models on Assessment of Energy Losses in Distribution Generation Planning*, **Electrical Power System Research**, 33:2 (2011) 1243–1250.

[75] M. Sadighizadeh and A. Rezazadeh, *Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile*, **Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology**, 27 (2008) 251–256.

[76] A.A. Abou El-Ela, S.M. Allam and M.M. Shatla, *Maximum Optimal Benefits of Distribution Generation Using Genetic Algorithms*, **Electrical Power System Research**, 80:7 (2010) 869–877

[77] K. Nagaraju, S. Sivanagaraju, T. Ramana, S. Satyanarayana and P.V. Ramana, *A Novel Method for Optimal Distributed Generator Placement in Radial Distribution System*, **Journal of Distribution and Generation Alternative Energy**, 26:1 (2011) 7–19.

[78] T. Gozel, M. Hakan Hocaoglu, *An Analytical Method for the Sizing and Siting of Distributed Generators in Radial Systems*, **Electrical Power System Research**, 79 (2009) 912–918.

[79] T. Ramana, V. Ganesh and S. Sivanagaraju, Distributed Generator Placement and Sizing in Unbalanced Radial Distribution System, **Cogeneration and Distributed Generation Journal**, 25 (2010) 52–71

[80] K.I. Satish and N.P. Kumar, an Efficient Method for Optimal Placement and Sizing of Multiple Distributed Generators in a Radial Distribution Systems, **Distributed Generation & Alternative Energy Journal**, 27(3)

(2012) 52–71.
[81] R.R. Srinivasa, K. Ravindra, K. Satish and S.V.L. Narasimham, Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation, **IEEE Transaction on Power System**, 28(1) (2013) 17–325
[82] A. Parizad, A. Khazali and M. Kalantar, Optimal Placement of Distributed Generation with Sensitivity Factors Considering Voltage Stability and Losses Indices, **in Proceeding of IEEE of ICEE 2010**, Guangzhou, China, May 11–13 (2010) 1–8.
[83] K. Qian, C. Zhou, M. Allan and Y. Yuan, Effect of Load Models on Assessment of Energy Losses in Distributed Generation Planning, **Electric Power Energy Systems**, 33 (2011) 1243–1250.
[84] J.H. Teng, Y.H. Liu, C.Y. Chen and C.F. Chen, Value-Based Distributed Generator Placements for Service Quality Improvements, **Electric Power Energy Systems**, 29 (2007) 268–274.
[85] C.L.T. Borges and D.M. Falcao, Optimal Distributed Generation Allocation for Reliability, Losses, and Voltage Improvement, **Electric Power Energy Systems**, 28 (2006) 413–420.
[86] A. Kumar and W. Gao, Optimal Distributed Generation Location Using Mixed Integer Non-Linear Programming in Hybrid Electricity Markets, **IET Generation Transmission & Distribution Journal**, 4(2) (2010) 281–298.
[87] L. Ji, D.X. Niu, M. Xu and G.H. Huang, *An optimization model for regional micro-grid system management based on hybrid inexact stochastic-fuzzy chance-constrained programming*, **Electrical Power and Energy Systems**, 64 (2015) 1025–1039.
[88] M. Motevasel and A.R. Seifi, *Expert energy management of a micro-grid considering wind energy uncertainty*, **Energy Conversion and Management**, 83 (2014) 58–72.
[89] A. Baziar and A. Kavousi-Fard, *Considering uncertainty in the optimal energy management of renewable micro-grids including storage devices*, **Renewable Energy**, 59 (2013) 158–166.
[90] M.A. Munoz, M.C. Alonso-Garcı, N. Vela and F. Chenlo, *Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions*, **Solar Energy**, 85 (2011) 2264–2274.
[91] N. Pandiarajan and R. Muthu, *Mathematical modeling of photovoltaic module with simulink*, 1st International Conference on Electrical Energy Systems, Chennai, Tamilnadu, India, 2011, p. 258–263.
[92] H.L. Tsai, C.S. Tu, and Y.J. Su, *Development of generalized photovoltaic model using Matlab/Simulink*, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, San Francisco, USA, 2008, p. 846-851.
[93] T. Salmi, M. Bouzguenda,A. Gastli, and A. Masmoudi, *Matlab/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell*, **Renewable Energy Research**, 2:2 (2012) 213–218.
[94] H.L. Tsai, *Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab-Simulink*, **Solar Energy**, 84 **(**2010) 1318–1326.
[95] I.H. Altas, and A.M. Sharaf, *A photovoltaic array simulation model for Matlab-Simulink GUI environment*, International Conference on Clean Electrical Power, Capri, 2007, p. 341–345.
[96] C. Keles, B. B. Alagoz, M. Akcin, A. Kaygusuz, A. Karabiber, *A*

photovoltaic system model for Matlab/Simulink simulations, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013, p.1643-1647.
[97] F.A. Farret and M.G. Simoes, *Integration of Alternative Sources of Energy*, Hoboken, New Jersey, 2006.
[98] Z. Chen and F. Blaabjerg, *Wind energy – the world's fastest growing energy source*, **IEEE Power Electronics Society**, 18:3 (2006) 15-19.
[99] A. Cuerva and A. Sanz-Andr, *The extended Betz–Lanchester limit***, Renewable Energy,** 30 (2005) 783–794
[100] B. Avcı and T.B. Yılmaz, *Rüzgar türbini kanat tasarımı ve analizi*, Lisans Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
[101] I. Zubia, X. Ostolaza, A. Susperregui and G. Tapia, *Complete wind farm electromangetic transient modelling for grid integration studies*, **Energy Conversion and Management**, 50:3 (2009) 600-610.
[102] M. Martins, A. Perdana, P. Ledesma, E. Agneholm and O. Carlson, *Validation of fixed speed wind turbine dynamics models with measured data*, **Renewable Energy**, 38:8 (2007) 1301-1316.
[103] Mathworks. (2014). http://www.mathworks.com/products/matlab (on-line access on 30 December, 2014).
[104] T.B. Reddy and D. Linden, Linden's Handbook of Batteries, fourth edition, McGraw Hill Professional, New York, 2011, p. 1.3-1.17.
[105] A.A. Mohamad, N.S. Mohamed, Y. Alias, A.K. Arof and J. Alloys, *Studies of alkaline solid polymer electrolyte and mechanically alloyed polycrystalline Mg2Ni for use in nickel metal hydride batteries*, **Alloys and Compounds,** 337 (2002) 208–213.
[106] A.A. Mohamad, N.S. Mohamed, Y. Alias and A.K. Arof, *Mechanically alloyed Mg2Ni for metal-hydride–air secondary battery*, **Power Sources**, 115 (2003) 161-166.
[107] A.A. Mohamad, *Degradation in Polymer Ni-MH Battery*, **Ionics**, 11 (2005) 294-300.
[108] J. Yan, J. Wang, H. Liu, Z. Bakenov, D. Gosselink and P. Chen, *Rechargeable hybrid aqueous batteries*, **Power Sources**, 216 (2012) 222-226.
[109] W. Li and J.R. Dahn, *Lithium-Ion Cells with Aqueous Electrolytes*, **Electrochemical Society**, 142:6 (1995) 1742-1746.
[110] J.R. Dahn, U. von Sacken, M.W. Juzkow and H. Al-Janaby, Rechargeable LiNiO2 / Carbon Cells, **Electrochemical Society,** 138:8 (1991) 2207-2211.
[111] R. Ruffo, C. Wessells, R. A. Huggins and Y. Cui, Electrochemical behavior of LiCoO2 as aqueous lithium-ion battery electrodes, **Electrochemical Community,** 11 (2008) 247-249.
[112] C.H. Mi, X.G. Zhang and H.L. Li, *Electrochemical behaviors of solid LiFePO4 and Li0.99Nb0.01FePO4 in Li2SO4 aqueous electrolyte*, **Electroanalytical Chemistry**, 602 (2007) 245-254.
[113] Nurhaswani Alias, Ahmad Azmin Mohamad, Advances of aqueous rechargeable lithium-ion battery: A review, Journal of Power Sources 274 (2015) 237-251.
[114] Aarkstore Enterprise, *Advanced Rechargeable Battery Market: Emerging Technologies and Trends Worldwide*, 2009.
[115] J. Jung, *Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011, p. 111-174.

[116] J. Gartner and C. Wheelock, *Electric Vehicles: 10 Predictions for 2010*, Pike Research LLC, 2009.
[117] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun and C. Chen, *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery*, **Power Sources**, 208 (2012) 210-224.
[118] Y. Hou, X. Wang, Y. Zhu, C. Hu, Z. Chang, Y. Wu and R. Holze, *Macroporous LiFePO4 as a cathode for an aqueous rechargeable lithium battery of high energy density*, **Materials Chemistry A**, 46 (2013) 14713-14718.
[119] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, *Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 21:2, (2006) 504-511.
[120] B. Singh, B.N. Singh, , A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, *a*nd D.P. Kothari, *A review of three-phase improved power quality AC–DC converters*, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 51:3 (2004) 641-660.
[121] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electric Power Systems, IEEE Std. 519, 1992.
[122] Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 3: Limits—Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current <16A per Phase), IEC1000-3-2 Document, 1995.
[123] Draft-Revision of Publication IEC 555-2: Harmonics, Equipment for Connection to the Public Low Voltage Supply System, IEC SC 77A, 1990.
[124] H. Akagi, *New trends in active filters for power conditioning*, **IEEE Transaction on Industrial Application**, 32 (1996) 1312–1322.
[125] B. Singh, A.K. Al-Haddad and A. Chandra, *A review of active filters for power quality improvement*, **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, 46 (1999) 960–971.
[126] M. El-Habrouk, M.K. Darwish and P. Mehta, *Active power filters: a review*, **Processing IEE—Electronic and Power Application**, 147 (2000) 493–413.
[127] S. Kim, P.N. Enjeti, P. Packebush, and I.J. Pitel, *A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface*, **IEEE Transaction on Industrial Application**, 30 (1994) 1557–1564.
[128] M. Villablanca and J. Arrillaga, *Single-bridge unit-connected HVDC generation with increased pulse number*, **IEEE Transaction on Power Delivery**, 8 (1993) 681–687.
[129] C. Keles, A. Karabiber, M. Akcin, A. Kaygusuz, B.B. Alagoz and O. Gul, *A smart building power management concept: Smart socket applications with DC distribution*, **Electrical Power and Energy Systems**, 64 (2015) 679–688.
[130] A.M. Amjad and Z. Salam, *A review of soft computing methods for harmonics elimination PWM for inverters in renewable energy conversion systems*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 33 (2014) 141–15.
[131] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde and J. Gomez, *Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: a review*, **Renewable and Sustainable Energy Review**, 15 (2011) 1753–1766.
[132] P. Pezzini, O. Gomis-Bellmunt and A. Sudria-Andreu, *Optimization*

techniques to improve energy efficiency in power systems, **Renewable and Sustainable Energy Review**, 15 (2011) 2028-2041

[133] M. Fadaee and M.A.M. Radzi, *Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: a review*, **Renewable and Sustainable Energy Review**, 16 (2012) 3364–3369.

[134] E. Butun, T. Erfidan and S. Urgun, *Improved power factor in a low-cost PWM single phase inverter using genetic algorithms*, **Energy Conversion and Management**, 47 (2006) 1597–1609.

[135] S. Barkat, E.M. Berkouk and M.S. Boucherit, *Particle swarm optimization for harmonic elimination in multi-level inverters*, **Electrical Engineering**, 91 (2009) 221–228.

[136] N. Bahari, Z. Salam and T. Taufik, Application of differential evolution to determine the HEPWM angles of a three phase voltage source inverter, Proceedings of the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, USA, 2010, p. 2683–2688.

[137] D. Van Hertem and M. Ghandhari, Multi-terminal VSC.HVDC for the European super grid: obstacles, **Renewable and Sustainable Energy Review**, 14 (2010) 3156–3163.

[138] I. Colak, E. Kabalci and R. Bayindir, Review of multi-level voltage source inverter topologies and control schemes, **Energy Conversion and Management**, 52 (2011) 1114–1128.

[139] R. D. Middlebrook, *Power electronics: topologies, modeling, and measurement*, Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, April 1981.

[140] S. Cuk, *Basics of switched-mode power conversion: topologies, magnetics, and control*, **Advances in Switched-Mode Power Conversion**, 2 (1981) 279-310.

[141] R.W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, New York: Chapman and Hall, 1997.

[142] R. Severns and G. E. Bloom, *Modern Dc-to-Dc Switchmode Power Converter Circuits*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.

[143] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, 1995.

[144] R.W. Erickson, *DC–DC Power Converters*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2007.

[145] P. Dondi, D. Bayoumi, C. Haederli, D. Julian and M. Suter, *Network integration of distributed power generation*, **Power Sources**, 106:1 (2002) 1–9.

[146] R. Zamora and A.K. Srivastava, *Controls for microgrids with storage: review, challenges, and research needs*, **Renewable and Sustainable Energy Review**, 14:7 (2004) 2009–2018.

[147] H. Jiayi, J. Chuanwen and X. Rong, *A review on distributed energy resources and Microgrid*, **Renewable and Sustainable Energy Review**, 12:9 (2008) 2472–2483.

[148] J. Schonberger, R. Duke and S.D. Round, *DC-Bus signaling: a distributed control strategy for a hybrid renewable nano grid*, **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, 53:5 (2006) 1453–1460.

[149] A. Banerji, S.K. Biswas and B. Singh, *Enhancing quality of power to sensitive loads with micro grid*, Proceedings of the joint international

conference on power electronics, India, December 2010, pp.1–7.
[150] J. Driesen and F. Katiraei, *Design for distributed energy resources*, **IEEE Power Energy Management**, 6:3 (2008) 30–40.
[151] M. Meiqin, T. Yinzheng, C. Liuchen, Z. Yongchao and J. Peng, *An intelligent static switch based on embedded system and its control method for a microgrid*, Proceedings of the IEEE innovative smart grid technologies, 2012, pp.1–6.
[152] D. Zhao, N. Zhang and Y. Liu, *Micro-grid connected/islanding operation based on wind and PV hybrid power system*, Proceedings of the IEEE innovative smart grid technologies, Florence, Italy, May 2012, pp.1–6.
[153] B. Kroposki, C. Pink, J. Lynch, V. John, S.M. Daniel, E. Benedict and etal., *Development of a high-speed static switch for distributed energy and microgrid applications*, Proceedings of the power conversion conference, Nagoya, April 2007, pp.1418–1423.
[154] I. Patrao, E. Figueres, G. Garcera and R. Gonzalez-Medina, *Microgrid architectures for low voltage distributed generation*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 43 (2015) 415–424.
[155] E. Alegria, T. Brown, E. Minear, R.H. Lasseter, *CERTS microgrid demonstration with large-scale energy storage and renewable generation*, **IEEE Transaction on Smart Grid**, 5:2 (2014) 937–943.
[156] F. Katiraei, M.R. Iravani and P.W. Lehn, *Micro-grid autonomous operation during and Subsequent to islanding process*, **IEEE Transaction on Power Delivery**, 20:1 (2005) 248–257.
[157] J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, J. Matas, andM. Castilla, *Hierarchical control of droop-controlled AC and DC Microgrids: a general approach to ward standardization*, **IEEE Transaction Industrial Electronics**, 58:1 (2011) 158–172.
[158] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg and P. Guez, *Control of power converters in AC microgrids*, **IEEE Transaction Industrial Electronics**, 27:11 (2012) 4734–4349.
[159] D. Salomonsson and A. Sannino, *Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage DC systems*, **IET Electrical Power Applications**, 1 (2007) 690–696.
[160] M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg and S. Mangold, *Low voltage DC distribution system compared with 230 V AC*, IEEE Electrical Power and Energy Conference, Canada, 2011, pp. 340–345.
[161] K. Techakittiroj and V. Wongpaibool, *Co-existence between AC-distribution and DC-distribution: in the view of appliances*, International Conference on Computer and Electrical Engineering, Thailand, 2009, pp. 421–425.
[162] M. Ryu, H. Kim, J. Kim, J. Baek and J. Jung, *Test bed implementation of 380V DC distribution system using isolated bidirectional power converters*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, USA, 2013, pp. 2948–2954.
[163] G.C. Lazaroiu and D. Zaninelli, *A control system for dc arc furnaces for power quality improvements*, **Electrical Power Systems Research**, 80 (2010) 1498–1505.
[164] G.F. Reed, *DC technologies: solutions to electric power system advancements*, IEEE Power Energy Magazine, 10 (2012) 10–17.
[165] B.T. Patterson, DC, come home: *DC microgrids and the birth of the*

enernet, **IEEE Power Energy Magazine**, 10 (2012) 60–69.
[166] T. Wu, C. Chang, L. Lin, G. Yu and Y. Chang, *DC-bus voltage control with a three-phase bidirectional inverter for DC distribution systems*, **IEEE Transaction on Power Electronics**, 28 (2013) 1890–1899.
[167] C. Dierckxsens, K. Srivastava, M. Reza, S. Cole, J. Beerten and R. Belmans, *A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems*, **Electrical Power Systems Research**, 82 (2012) 54–58.
[168] M. Aragües-Penalba, A. Egea-Àlvarez, S.G. Arellano and O. Gomis-Bellmunt, *Droop control for loss minimization in HVDC multi-terminal transmission systems for large offshore wind farms*, **Electrical Power Systems Research**, 112 (2014) 48–55.
[169] A. Al-Diab and C. Sourkounis, *Integration of flywheel energy storage system in production lines for voltage drop compensation*, IEEE 37th Annual Conference Industrial Electronics, Australia, 2011, pp. 3882–3887.
[170] B.H. Kenny, R. Jansen, P. Kascak, T. Dever and W. Santiago, *Integrated power and attitude control with two flywheels*, **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 41(2005) 1431–1449.
[171] D. Becker and B. Sonnenberg, *DC microgrids in buildings and data centers*, IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference, 2011, pp. 1–7.
[172] G. Ailee and W. Tschudi, *Edison redux: 380 V dc brings reliability and efficiency to sustainable data centers*, **IEEE Power Energy Magazine**, 10 (2012) 50–59.
[173] D. Kim, T. Yu, H. Kim, H. Mok and K. Park, *300V DC feed system for Internet datacenter*, IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, Korea, 2011, pp. 2352–2358.
[174] A. Pratt, P. Kumar and T. Aldridge, *Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency*, IEEE 29th International Telecommunication Energy Conference, Rome, Italy, 2007, pp. 32–39.
[175] L. Zhang, F. Jabbari, T. Brown and S. Samuelsen, *Coordinating plug-in electric vehicle charging with electric grid: valley filling and target load following*, **Power Sources**, 267 (2014) 584–597.
[176] C. Liu, K.T. Chau, D. Wu and S. Gao, *Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies*, **Proceedings of the IEEE**, 101 (2013) 2409–2427.
[177] Y. Ota, H. Taniguchi, J. Baba, A. Yokoyama, *Implementation of autonomous distributed V2G to electric vehicle and DC charging system*, **Electrical Power System Research**, (2014), http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.05.016.
[178] M.A. Lopez, S. Martín, J.A. Aguado and S. de la Torre, *V2G strategies for congestion management in microgrids with high penetration of electric vehicles*, **Electrical Power System Research**, 104 (2013) 28–34.
[179] L. Drude, L.C. Pereira Junior, and R. Rüther, *Photovoltaics (PV) and electric vehicle-to-grid (V2G) strategies for peak demand reduction in urban regions in Brazilian a smart grid environment*, **Renewable Energy**, 68 (2014) 443–451.
[180] M. A. Pedrasa and T. Spooner, *A survey of techniques used to control microgrid generation and storage during island operation*, Australian Universities Power Engineering Conference, December 10–13, 2006.

[181] F. Katiraei and M.R. Iravani, *Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units*, **IEEE Transaction on Power Systems**, 21:4 (2006) 1821-1831.
[182] D.J. Hammerstrom, *AC versus DC distribution systems: did we get it right?*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Tampa, Florida, USA, 2007, pp. 1–5.
[183] M.R. Starke, L.M. Tolbert and B. Ozpineci, *AC vs. DC distribution: a loss comparison*, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Pittsburgh, PA, USA, 2008, pp. 1–7.
[184] D.M. Larruskain, I. Zamora, A.J. Mazon, O. Abarrategui1 and J. Monasterio, *Transmission and distribution networks: AC versus DC*, 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering, Marbella, Spain, 2005, pp. 1–6.
[185] W. Li, X. Mou, Y. Zhou and C. Marnay, *On voltage standards for dc home microgrids energized by distributed sources*, IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, Harbin, China, 2012, pp. 2282-2286.
[186] H. Kakigano, M. Nomura, T. Ise, *Loss evaluation of dc distribution for residential houses compared with AC system*, International Power Electronics Conference, Sapporo, 2010, pp. 480-486.
[187] TEIAS. (2014). www.teias.gov.tr/yukdagitim/2013yiliuretimtuketimgecici.xlsx (Online access on 12 December, 2014)
[188] REN21. (2014). http://www.ren21.net/portals/0/documents/resources/gsr/2014 (Online access on 13 December, 2014)
[189] S. Mohammadia, B. de Vriesaa and W. Schaefera, *Modeling the allocation and economic evaluation of PV panels and wind turbines in urban areas*, **Procedia Environmental Sciences**, 22 (2014) 333 – 351.
[190] S. Essalaimeh, A. Al-Salaymeh and Y. Abdullat, *Electrical production for domestic and industrial applications using hybrid PV-wind system*, **Energy Conversion and Management**, 65 (2013) 736–743.
[191] Z. Li, A. Reynolds and F. Boyle, Domestic integration of micro-renewable electricity generation in Ireland - The current status and economic reality, **Renewable Energy**, 64 (2014) 244-254.
[192] M. Herrando, C. N. Markides and K. Hellgardt, A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance, **Applied Energy**, 122 (2014) 288–309.
[193] D. Zhang, S. Liu, Lazaros and G. Papageorgiou, *Fair cost distribution among smart homes with microgrid*, **Energy Conversion and Management**, 80 (2014) 498-508
[194] A. Tascikaraoglu, A.R. Boynuegri and M. Uzunoglu, *A demand side management strategy based on forecasting of residential renewable sources: A smart home system in Turkey*, **Energy and Buildings**, 80 (2014) 309–320.
[195] Q. Zhang, T. Tezuka, K.N. Ishihara and B.C. Mclellan, *Integration of PV power into future low-carbon smart electricity systems with EV and HP in Kansai Area, Japan*, **Renewable Energy**, 44 (2012) 99-108.
[196] Z. Li, A. Reynolds and Fergal Boyle, *Domestic integration of micro-renewable electricity generation in Ireland-The current status and economic reality*, **Renewable Energy**, 64 (2014) 244-254.

[197] S.M. Amin and B.F. Wollenberg, *Toward a smart grid: power delivery for the 21st century*, **IEEE Power and Energy Magazine,** 3 (2005) 34–41.
[198] B.B. Alagoz, A. Kaygusuz and A. Karabiber, *A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications*, **Energy**, 44 (2012) 167–177.
[199] G. Chicco and P. Mancarella, *Distributed multi-generation: a comprehensive view*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** 13 (2009) 535–551.
[200] Energy Information Administration of United States, International Energy Out-look, 2011, September 19.
[201] R.M. Moharil and P.S. Kulkarni, *A case study of solar photovoltaic power system at Saga deep Island, India*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13 (2009)673–681.
[202] J. Aghaein and M.I. Alizadeh, *Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: a review*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 18 (2013) 64–72.
[203] K. Kurohane, A. Uehara, T. Senjyu, A. Yona, N. Urasaki, T. Funabashi and C.H. Kim, *Control strategy for a distributed DC power system with renewable energy*, **Renewable Energy,** 36 (2011) 42–49.
[204] N. Eghtedarpour and E. Farjah, *Control strategy for distributed integration of photovoltaic and energy storage systems in DC micro-grids*, **Renewable Energy**, 45(2012) 96–110.
[205] A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz and B.B. Alagoz, *An approach for the integration of renewable distributed generation in hybrid DC/AC microgrids*, **Renewable Energy**, 52 (2013) 251–259.
[206] I.H. Choi, J.H. Lee and S.H. Hong, *Implementation and evaluation of the apparatus for intelligent energy management to apply to the smart grid at home*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hangzhou, China, 2011.
[207] N.K.C. Nairb and L. Jing, *Power quality analysis for building integrated PV and micro wind turbine in New Zealand*, **Energy and Buildings**, 58 (2013)302–309.
[208] M. Ordenes, D.L. Marinoski, P. Braun and R. Ruther, *The impact of building-integrated photovoltaic on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil*, **Energy and Buildings**, 39 (2007) 629–642.
[209] N. Mithraratne, *Roof-top wind turbines for micro generation in urban houses in New Zealand*, **Energy and Buildings**, 41 (2009) 1013–1018.
[210] N.W.A. Lidula and A.D. Rajapakse, *Microgrids research: a review of experimental microgrids and test systems*, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15(2011) 186–202.
[211] A. Kaygusuz, C. Keles, B.B. Alagoz and A. Karabiber, *Renewable energy integration for smart sites*, **Energy and Buildings**, 64 (2013) 456–462
[212] H. Dagdougui, R. Minciardia, A. Ouammi, M. Robbaa and R. Sacilea, *Modelling and control of a hybrid renewable energy system to supply demand of a green-building*, International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Ottawa, Ontario, Canada, 2010.
[213] P. Jozef, B. Piotr and K. Mariusz. *Hybrid power systems-an effective way of utilizing primary energy sources*, **Renewable Energy**, 34 (2009) 2414-2421.

[214] S. Grijalva and M.U. Tariq, *Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry*, IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference, Anaheim, 2011, pp. 1-6.
[215] K. Tanaka, A. Yoza, K. Ogimi, A. Yona, T. Senjyu, T. Funabashi vd, *Optimal operation of DC smart house system by controllable loads based on smart grid topology*, **Renewable Energy**, 39 (2012) 132-139.
[216] M.S. Carmeli, F. Castelli-Dezza, M. Mauri, G. Marchegiani and D. Rosati, *Control strategies and configurations of hybrid distributed generation systems*, **Renewable Energy**, 41 (2012) 294-305.
[217] H. Morais, P. Kada, P. Faria, Z.A. Vale and H.M. Khodr, *Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming*, **Renewable Energy**, 35 (2010) 151-156.
[218] E. Dursun and O. Kilic, *Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system*, **Power and Energy Systems**, 34 (2012) 81-89.
[219] B.I. Rani, G.S. Ilango and C. Nagamani, *Power flow management algorithm for photovoltaic systems feeding DC/AC loads*, **Renewable Energy**, 43 (2012) 267-275.
[220] A. Llaria, O. Curea, J. Jimenez and H. Camblong, *Survey on microgrids: unplanned islanding and related inverter control techniques*, **Renewable Energy**, 36 (2011) 2052-2061.
[221] B. Dong, Y. Li, Z. Zheng and L. Xu, *Control strategies of microgrid with hybrid DC and AC buses*, Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham, 2011, pp. 1-8.
[222] B. Dong, L. Yongdong and Z. Zedong, *Energy management of hybrid DC and AC bus linked microgrid*, 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, China, 2010, pp. 713-716.
[223] B. Dong, L. Yongdong and Z. Zedong, *Composite converter of hybrid storage in distributed renewable energy generation system*, International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011, pp. 1-4.
[224] Z. Jiang and X. Yu, *Hybrid DC and AC-linked microgrids: towards integration of distributed energy resources*, IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, Georgia, 2008, pp. 1-8.
[225] Z. Jiang and X. Yu, *Active power voltage control Scheme for islanding operation of inverter-interfaced microgrids*, IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Alberta Canada, 2009, pp. 1-7.
[226] X. Liu, P. Wang and P.C. Loh, *A Hybrid AC/DC Microgrid and its Coordination Control*, IEEE Transactions on Smart Grid, 2 (2011) 278-286.
[227] D. Salomonsson, L. Soder and A. Sannino, *Protection of low-voltage DC microgrids*, IEEE Transactions on Power Delivery, 24 (2009) 1045-1053.
[228] A. Mohamed, M. Elshaer and O. Mohammed, *Bi-directional AC-DC/DC-AC converter for power sharing of hybrid AC/DC systems*, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan, USA, 2011, pp.1-8.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Abdulkerim KARABİBER

Doğum Yeri ve Tarihi: Erzurum 19.07.1983

Adres: Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bingöl

Lisans: Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Tesisleri ABD

Mesleki Deneyim: 2006 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinden mezun oldu. Aralık 2007'de askerliğini yedek subay olarak tamamladı. Aralık 2007 ile Kasım 2010 tarihleri arasında enerji sektöründe faaliyet gösteren firmalarda şantiye şefi olarak görev aldı. Aralık 2010 tarihinden itibaren Bingöl Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

1. A. Kaygusuz, C. Keleş, B.B. Alagöz, A. Karabiber, Renewable Energy Integration for Smart Sites, Energy and Buildings, 64 (2013) 456-462.

2. A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz, B.B. Alagöz, An Approach for The Integration of Renewable Distributed Generation in Hybrid DC/AC Microgrids, Renewable Energy, 52 (2013) 251-259.

3. C. Keles, A. Karabiber, M. Akcin, A. Kaygusuz, B.B. Alagoz, O. Gul, A smart building power management concept: Smart socket applications with DC distribution, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 64 (2015) 679-688.

4. C. Keles, B.B. Alagoz, M. Akçin, A. Kaygusuz, A. Karabiber, A Photovoltaic System Model for Matlab/Simulink Simulations, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG'2013, 13-17 May 2013, Istanbul, Turkey.

DİĞER YAYINLAR

5. B.B. Alagoz, A. Kaygusuz, A. Karabiber, A User-Mode Distributed Energy Management Architecture for Smart Grid Application, Energy, 44 (2012) 167-177.

6. B.B. Alagoz, C. Keles, A. Kaygusuz, Y. Kaplan, A. Karabiber, Power regulated DC/DC driver design by hierarchical control, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, DOI: 10.3906/elk-1312-19, Available online, 2014.

7. M. Akçin, B.B. Alagoz, C. Keleş, A. Karabiber, A. Kaygusuz, Dağıtık Kontrol ile Akıllı Şebekelerde Geniş Alan Yönetimi ve Geleceğe Dönük Projeksiyonlar, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2013.

8.A. Kaygusuz, B.B. Alagoz, M. Akcin, C. Keles, A. Karabiber, O. Gul, Monte Carlo Simulation-Based Planning Method for Overload Safe Electrical Power System, Journal of Electrical Engineering, 2014.

9. B.B. Alagoz, C. Keles, A. Kaygusuz, Y. Kaplan, A. Karabiber, Hiyerarşik Kontrol ile Güç Regülasyonlu DC/DC Sürücü Tasarımı, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı ve Sergisi, TOK'13, 26-28 Eylül 2013, Malatya, Türkiye.

10. M. Akçin, A. Kaygusuz, C. Keles, A. Karabiber, B.B. Alagöz, Akıllı Şebekelerde Kontrol ve Haberleşme: Günümüzden Geleceğe Fırsatlar, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı ve Sergisi, TOK'13, 26-28 Eylül 2013, Malatya, Türkiye.

11. A. Karabiber, O. Gul, A. Kaygusuz, M. Akçin, B.B. Alagoz, Newton Raphson Yöntemi Çözümlerinin Bulanık Mantık Desteğiyle Hızlandırılması, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı ve Sergisi, TOK'13, 26-28 Eylül 2013, Malatya, Türkiye.