



**T.C.**  
**NECMETTİN ERBAKAN**  
**ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Akıllı Şebekeler İçin Ultrakapasitör Entegreli  
Batarya Yönetim Sistemi**

**Muhammed YAŞKIR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**11-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed YAŞKIR tarafından hazırlanan “Akıllı Şebekeler İçin Ultrakapasitör Entegreli Batarya Yönetim Sistemi” adlı tez çalışması 11/11/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

.....

#### Danışman

Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAYA

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun ....../.../20.. gün ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

FBE Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Muhammed YAŞKIR

Tarih: 01/11/2022

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## AKILLI ŞEBEKELER İÇİN ULTRAKAPASİTÖR ENTEGRELİ BATARYA YÖNETİM SİSTEMİ

**Muhammed YAŞKIR**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç.Dr. Mustafa YAĞCI**

**2022, 100 Sayfa**

**Jüri**

**Doç. Dr. Nurettin Çetinkaya**

**Doç. Dr. Mustafa YAĞCI**

**Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ÖZKAN**

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı, elektrikli araç teknolojisinin gelişmesi ile birlikte enerji depolama teknolojilerinin önemi ortaya çıkmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısı ve çevresel faktörlere bağlı olarak verimliliğinin değişmesi depolama birimleriyle kullanımını ihtiyaç haline getirmiştir. Aynı şekilde elektrikli araçların yaygın kullanımının önündeki en büyük engel olan batarya boyutları depolama teknolojilerindeki gelişimi ve değişimi beraberinde getirmiştir.

Tüm bu sebepler doğrultusunda günümüz artan enerji talebini karşılayacak ve gelişen teknolojiye uyum sağlayacak bir depolama teknolojisi olan Hibrit Enerji Depolama Sistemleri geliştirilmiştir. Hibrit Enerji Depolama sistemlerinde birden fazla depolama ünitesi birbirleriyle uyum içerisinde çalışmakta ve tek tip depolama birimlerine göre oldukça avantajlı olmaktadır.

Bu çalışmada da bu yeni depolama teknolojisi olan Hibrit Enerji Depolama Sistemleriyle bir simülasyon çalışması yapılmış ve yapılan bu çalışmada bazı kritik parametreler Parçacık Sürü Optimizasyonu kullanılarak belirlenmiştir. Ultrakapasitör ve Batarya grubunun birbirlerini destekleyecek bir şekilde çalışması ve uzun batarya ömrü ve optimum batarya çalışma değerleri elde edilmesi hedeflenmesi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akıllı Şebekeler, Batarya, Batarya Yönetimi, Optimizasyon, Hibrit Enerji Depolama, Ultrakapasitör

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

## **ULTRACAPASITOR INTEGRATED BATTERY MANAGAMENT SYSTEM FOR SMART GRIDS**

**Muhammed YAŞKIR**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE ELECTRICAL ELECTRONIC  
ENGINEERING**

**Advisor: Assoc. Prof. Mustafa YAĞCI**

**2022, 100 Pages**

**Jury**

**Assoc. Prof. Nurettin ÇETİNKAYA**

**Assoc. Prof. Mustafa YAĞCI**

**Asst. Prof. Dr. Ali Osman ÖZKAN**

With the increasing use of renewable energy sources and the development of electric vehicle technology, the importance of energy storage technologies has emerged. The intermittent nature of renewable energy sources and the change in efficiency due to environmental factors have made the use of storage units a necessity. Likewise, battery sizes, which are the biggest obstacle to the widespread use of electric vehicles, have brought about the development and change in storage technologies.

In line with all these reasons, Hybrid Energy Storage Systems, a storage technology that will meet today's increasing energy demand and adapt to developing technology, has been developed. In Hybrid Energy Storage systems, more than one storage unit works in harmony with each other and is very advantageous compared to single type storage units.

In this study, a simulation study was carried out with this new storage technology, Hybrid Energy Storage Systems, and some critical parameters were determined using Particle Swarm Optimization in this study. It is aimed to operate the Ultracapacitor and Battery group in a way that supports each other and to obtain long battery life and optimum battery operating values.

**Keywords:** Smart Grid, Battery, Battery Management, Optimization, Hybrid Energy Storage

## ÖNSÖZ

Yenilenebilir enerji sistemlerine ve depolama teknolojilerine farklı bir bakış açısı sunması hedeflenen bu çalışmada optimizasyon yöntemiyle ultrakapasitör ve batarya gurubundan oluşan hibrit enerji depolama sistemi oluşturulmuştur.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme ve tez çalışması süresince maddi manevi her türlü destekleriyle yanımda olan kıymetlim Dr. Nazlı Nur GÖÇEN' e sonsuz teşekkürler ederim.

Tez çalışmalarım süresince çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mustafa YAĞCI' ya teşekkür ederim.

MUHAMMED YAŞKIR  
KONYA-2022

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>4</b>
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>7</b>
3.1. Akıllı Şebekeler .....	7
3.1.1. Akıllı şebekelerin tanımı.....	8
3.1.2. Akıllı şebekelerin yapıları.....	9
3.1.3. Akıllı şebekenin zorunluluğu.....	13
3.1.4. Mikro şebeke yapıları .....	20
3.1.5. Dağıtık üretim şebeke yapısı.....	23
3.2. Enerji Depolama Teknolojileri .....	25
3.2.1. Elektriksel enerji depolama sistemleri.....	25
3.2.2. Diğer elektriksel enerji depolama sistemleri .....	33
3.2.3. Termal enerji depolama sistemleri.....	37
3.2.4. Hibrit enerji depolama sistemi.....	40
3.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu.....	43
3.3.1. Optimizasyon nedir? .....	43
3.3.2. Parçacık sürü optimizasyonu .....	44
3.3. Yöntem.....	46
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>48</b>
4.1. Sistemin Algoritması ve Modellemeleri.....	48
4.1.1. Algoritma yapısı .....	48
4.1.2. Kullanılan blok yapıları .....	49
4.1.3. Sistem Modellemeleri .....	53
4.2. Simülasyon Senaryoları .....	63
4.2.1. Deşarj modunda .....	64
4.2.2. Şarj modunda .....	70
4.3. Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinde (HEDS) Parçacık Sürü Optimizasyonun (PSO) Kullanılması.....	75
4.3.1. PSO ile simülasyon.....	76
4.3.2. PSO algoritmasının modellenmesi ve çalışma prensibi.....	78

<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>82</b>
5.1. Sonuçlar .....	82
5.2. Öneriler .....	83
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>85</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>89</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

V	:Volt
A	:Amper
W	:Watt
$\Omega$	:Ohm
GW	:Giga watt
GWh	:Giga watt saat
kW	:Kilo watt
kWh	:Kilo watt saat
MVA	:Mega volt amper
MW	:Mega watt
MWh	:Mega watt saat
TEP	:Ton eşdeğer petrol
VAr	:Volt amper reaktif

## Kısaltmalar

AA	:Alternatif Akım
AB	:Avrupa Birliği
ABD	:Amerika Birleşik Devletleri
AG	:Alçak Gerilim
APK	:Araştırma, Planlama ve Koordinasyon
BTK	:Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu
CBS	:Coğrafi Bilgi Sistemleri
DA	:Doğru Akım
DUS	:Dağıtık Üretim Santralleri
EA	:Elektrikli Araç
EDAŞ	:Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
ETKB	:Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EÜAŞ	:Elektrik Üretim Anonim Şirketi
EV	:Electric Vehicle(Elektrikli Araç)
GPRS	:General Packet Radio Service (Genel Paket Radyo Hizmeti)
HEDS	:Hibrit Enerji Depolama Sistemi
HES	:Hidroelektrik Santrali
IEEE	:The Institute of Electric Electronic Engineering (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
OSOS	:Otomatik Sayaç Okuma Sistemi
OG	:Orta Gerilim
RF	:Radyo Frekansı
SCADA İzleme Sistemi)	: Supervisory Control and Data Acquisition (Uzaktan Kontrol ve
STB	:Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

TEİAŞ	:Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TSE	:Türk Standartları Enstitüsü
YG	:Yüksek Gerilim
YEK	:Yenilenebilir Enerji Kaynakları

## 1. GİRİŞ

Dünyada elektrik enerjisinin büyük çoğunluğu uzun yıllardır fosil yakıtlardan üretilmektedir. Ancak fosil yakıtlar sınırlı olduklarından, kısıtlı rezervlere sahip olduklarından ve en önemlisi de fosil yakıtların çevreye zarar veren gazlar oluşturmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır (Divya ve ark, 2009). Hidrolik kaynaklar yenilenebilir enerji dendiğinde akla ilk gelendir. Ancak hidroelektrik santraller çevresel faktörlerin uygun olduğu yerlerde uygulanabilmektedir. Teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte iki önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr ve güneş enerjisinin kullanımı için yapılan çalışmalar oldukça yaygınlaşmış ve bu çalışmalarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Ferreira, 2013). Fosil yakıtların sınırlılığına karşın yenilenebilir kaynaklar olan rüzgâr ve güneş enerjisi devamlılık açısından eşsizdir. Rüzgâr ve güneş enerjisinden elektrik üretimi yapan tesisler son yıllarda hızla artmakta ve tüm Dünyada şebeke sisteminin önemli bir parçası haline gelmektedir (Kamali ve ark, 2013). Ancak rüzgâr ve güneş enerjisinin de dezavantajları bulunmaktadır. Bunların başında kurulum maliyeti ve enerji üretiminin doğa olaylarına bağlı olması gelmektedir (Aktaş, 2016).

Elektrik enerjisinin, güvenilir, zamanında, ekonomik, sürekli ve kaliteli bir biçimde karşılanması büyük önem arz etmektedir (Bayındır, 2016). Günümüzdeki şebeke yapılarına baktığımızda, 1883'te Tesla'nın tasarım ilkelerine göre kurgulanmış olan, günümüz ihtiyaçlarının istenilen düzeyde karşılanamadığı bir yapı mevcuttur. Geçmiş yıllardaki talep kontrolü ve tek yönlü iletim şebekesi bugünün kullanıcılarının taleplerini yeterince karşılamamaktadır (Akcanca, 2013).

Türkiye'de dahil olmak üzere ve dünyadaki birçok ülkede elektrik şebekesi elektriğin uzun iletim hatlarıyla birbirine bağlandığı enterkonnekte yapı şeklindedir (Gabash, 2014). Enterkonnekte şebekede tesis alternatif akımla işletiliyor olup, şebekenin herhangi bir noktasında frekans kayması, gerilim kararsızlığı vb. sebeple kısmi veya genel arıza meydana gelmesi durumunda, yaşanan kararsızlık ve dengesizlik bütün sistemin devre dışı kalmasına, ülkede ve enterkonnekte sisteme bağlı diğer ülkelerde enerji kesintilerine neden olabilmektedir (Demirkol, 2019).

2003 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) meydana gelmiş olan elektrik arızası sebebi ile Amerika'da 50 milyondan fazla insan elektriksiz kalmıştır. Birbirine bağlı bir şekilde meydana gelen arızalar sonucunda oluşan genel blackout durumu, yedi dakikadan daha kısa bir sürede ortaya çıkmış ve komşu ülke Kanada'da

elektrik kesintisine neden olmuştur (Gabash, 2014). Bu açıdan, güç problemlerinin sistemdeki akıllı ve dinamik sensörler aracılığı ile anlık olarak tespiti, herhangi bir kesinti olmadan hattın beslenebilmesi, iletim ve dağıtım hattındaki kayıpların en aza indirilmesi, verimliliğin artırılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla elektrik enerjisi elde edilebilmesi için mevcut elektrik şebekelerinin revize edilmesi ve geliştirilmesi, acil bir şekilde yapılması gerekli hususlar olarak ifade edilebilir (Gabash, 2014).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu kararsız, dalgalı ve kesintili yapısı enerjinin devamlılığı konusunda önemli sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerji, genel enerji talebi ile örtüşmemektedir (Ferreira, 2013).

Bu sebeplerden ötürü tüketiciler tarafından enerjinin talep edilmediği ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen tepe enerji miktarının çok yüksek olduğu durumda enerji depolama sistemlerinin önemi ortaya çıkmaktadır (Gaurav ve ark, 2014). Yenilenebilir enerji kaynakları ve depolama sistemleri birlikte kullanılırsa, üretilen enerji depolanarak tüketiciler için enerjinin devamlılığı sağlanmış olmaktadır. Böylelikle enerji depolama sistemleri kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı yük talebi sürekli olarak karşılanabilmektedir (Divya, 2009).

Enerji depolama sistemleri elektrik şebekeleri için farklı farklı faydalar sağlayabilmektedir. Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri mevcut elektrik şebekelerinin işletilmesini çok daha verimli hale getirmektedir (Ferreira, 2013). Verimli bir sistem ile, maliyetler daha da düşer ve güvenilir ve çevreci bir sistem sağlanmış olur. Fosil yakıtlı enerji kaynakları; kömür veya doğalgaz santralleri gibi, yük talebinin pik değerleri için devreye alınmakta ve hemen hemen hiçbir zaman tam kapasite çalıştırılmamaktadırlar (Kamali, 2013). Bu ilk kurulum sırasında gereğinden fazla boyutlandırma ile enerji maliyetlerinin artışı ve çevreyi kirletici etki yaratılması anlamına gelmektedir. Ayrıca bu tip santrallerin hemen devreye girememesi ani yükselen talep değerlerinin karşılanmasına tam olarak yanıt verememekte ve ufak çapta kesintilere veya güç kalitesi sorunlarına neden olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları enerji depolamada önemli bir konuma sahiptir (Gaurav ve ark, 2014). Çoğunlukla yenilenebilir enerji kaynakları kesintili ve sürekli değişken güç karakteristiğine sahiptir. Enerji depolama sistemleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi depolanarak ihtiyaç duyulan zamanda kullanıma sunulabilir böylece yenilenebilir enerji kaynakları (YEK), geleneksel enerji

santrallerinde olduğu gibi sevk edilebilirlik özelliği kazandırılmış olur (Chen, 2009). Ayrıca depolama sistemleri ile frekans regülasyonu gerçekleştirilerek güç kalitesi problemleri giderilebilmektedir. Elektrik dağıtım şirketleri, enerji depolama sistemleri ile elektriğin ucuz ve talebin az olduğu zamanlarda depolanmasını ve puant zamanlarda ihtiyaç duyulduğunda buradan beslenmesini sağlayabilirler (Barsali, 2015).

Hibrit enerji depolama sistemlerinde (HEDS) amaç farklı depolama uygulamalarının avantajlarını birleştirmektir. Batarya ve ultrakapasitör ile kullanılan HEDS'ler bataryanın enerji yoğunluğu, ultrakapasitörün ise güç yoğunluğu açısından sağladığı avantajlardan faydalanılmaktadır (Aktaş, 2016). Anlık yüksek güç ihtiyacının olduğu zamanda yükün ihtiyaç duyduğu akımı karşılamada batarya ve ultrakapasitör destekli HEDS'nin kullanılması oldukça önemlidir. Bu özelliği sayesinde ultrakapasitör, aşırı akım çeken yüklerin devreye girmesi ile yaşanan gerilim düşümlerinin ortadan kaldırılmasında ve yükün çektiği yüksek akımı karşılamada etkili olmaktadır.

Bu tez çalışmasında tasarlanan HEDS ile kesintisiz ve sürekli enerji akışı sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla MATLAB/Simulink ile farklı senaryolarda optimizasyon algoritmaları ile çalışmalar yapılmış ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Böylelikle, akıllı şebeke ile hibrit enerji depolama biriminin birleşimi ve geliştirilen Akıllı Enerji Yönetimi Algoritması ile sistem kontrolü akılcı bir şekilde yönetilerek enerjinin sürekliliği ve kaliteli üretimi sağlanmaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Aktaş (2016) yaptığı çalışmada; 3 fazlı 4 telli şebeke bağlantılı batarya ve ultrakapasitör depolama birimlerinden oluşan HEDS tasarlayarak akıllı mikro şebeke alt yapısı oluşturmuştur. Tasarlanan HEDS’de kullanılan dönüştürücü birimleri için kontrol algoritmaları oluşturarak özgün bir akıllı enerji yönetim algoritması geliştirmiştir.

Bayındır ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada; HEDS ile beslenen bir elektrikli araç sisteminin MATLAB/Simulink programında benzetimini yapmışlardır. Belirli bir parkurun hız profilini izlemek üzere, sürüş/fren modlarında, iç içe hız ve akım PID kontrolörleri ile sürüş kontrolü yapmışlardır. İki yönlü DA/DA dönüştürücüler aracılığıyla kurulan batarya/ultrakapasitör sistemiyle tahrik motoru arasında enerji alışverişi, akım paylaşımına dayalı bir stratejiyle yönetmişlerdir.

Khaligh ve arkadaşları (2010); çalışmalarında batarya, ultrakapasitör ve yakıt hücresi teknolojilerini karşılaştırarak bu sistemlerin enerji depolamadaki avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Batarya ve ultrakapasitör teknolojilerini kendi arasında voltaj, SOC kullanımı, iç direnç, kilogram başına enerji açısından değerlendirmişlerdir.

Kılıç ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada; DA-DA yükselten tip dönüştürücü kullanarak elektrikli araçlar için bir batarya şarj cihazının tasarımı ve simülasyon işlemini sunmuşlardır. Batarya paketi ve şarj cihazının modellenmesi, kontrol şeması tasarımı ve performansının değerlendirilmesini MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirmişlerdir.

Bahçeci ve arkadaşları (2017) çalışmalarında; 30 baralı dağıtım şebekesine bağlanmış rastgele seçilmiş 3 üreticinin dağıtım şebekesine etkilerini araştırmışlardır. Bu üreticilerin yenilenebilir enerji kaynaklarını enerji depolama sistemi ile birlikte kullanmaları durumunda gerilim seviyelerinde ve hat kayıplarındaki iyileşmede artış olacağını ortaya koymuşlardır. Ayrıca güneş panelleri gibi sınırlı zamanlarda enerji üretimi yapan üretim sistemlerinden elde edilen enerjinin puant zamanlarda şebekeye verilmesini sağlayacak olan enerji depolama sistemlerinin, hem lisanssız üretici için elde edilecek geliri arttıracığını hem de klasik üretim sistemlerinden karşılanacak olan enerji miktarını düşüreceğini ve bu alandaki maliyetlerinin azalacağını tespit etmişlerdir.

Srdjan ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada; elektrikli araçlar ve hibrit elektrikli araçların gelişen yapısıyla enerji depolama sistemleri üzerinde durarak batarya çeşitlerini voltaj, akım, şarj durumu açısından inceleyerek avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Düşük voltaj koruma, aşırı voltaj koruma, kısa devre koruması, termal koruma gibi konulardan bahsederek batarya yönetiminin önemi üzerinde durmuşlardır.

Aktaş ve arkadaşları (2020) bu çalışmalarında elektrikli araçlarda kullanmak amacıyla 20 hücreli batarya paketi için pasif hücre dengeleme metodunu temel alarak Batarya Yönetim Sistemi (BYS) tasarlamış ve üç hücreli BYS uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Li-İon bataryalar kullanılarak tasarımda 20 adet seri batarya hücresinin dengelenmesini pasif şekilde yapabilecek; aşırı gerilim, düşük gerilim ve sıcaklık koruması olan ve ayrıca bataryaların şarj durumlarını belirleyebilen, merkezi BYS yapısında bir kartın tasarımını gerçekleştirmişler ve donanımsal devrenin gerçek çalışma durumunu test etmişlerdir.

Vural ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada; yakıt hücreli elektrikli taşıtlar için enerji depolama sistemi olarak Ultrakapasitör (UK) kullanılması durumunda ultrakapasitörün DC baraya bağlanmasında farklı iki topoloji için simülasyon çalışmaları yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır.

Al-Barazanchi ve Vural (2015), dizel, güneş, rüzgâr ve bataryadan oluşan hibrit sistem tasarlamışlardır. Tasarlanan sistem off-grid sistemdir. Çevresel faktörlere göre; rüzgâr hızı, güneşlenme süresi, ışıınım miktarı, tasarlanan hibrit sistemin frekans, gerilim, akım gibi elektriksel değerleri değişmektedir. Bunun için enerji kalitesini iyileştirmek ve hibrit sistemdeki istenmeyen sonuçları ortadan kaldırmak amacıyla bir kontrol algoritması geliştirmişlerdir. Bu kontrol algoritmasının akım, gerilim ve frekans değerlerini kontrol edebilmesi için farklı ortam şartlarında denemeleri yapılmış ve Proportional Integral Derivative (PID) denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Akıllı kontrol algoritmasının PID denetleyiciye göre avantajları simülasyon çalışmalarıyla ortaya konulmuştur.

Zhang ve arkadaşları (2017), güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve pompalı depolama sistemiyle entegrasyonu sağlanmış hibrit enerji depolama sistem oluşturmak amacıyla çok hedefli zamanlama optimizasyonu oluşturmuştur. Rüzgâr enerjisi tesisinin, fotovoltaik hücrelerin, gaz türbini, pompalı depolama sisteminin hibrit enerji depolama sistemine entegrasyonu sağlanmıştır. Pompalı depolama enerji sistemi, yükün arz durumuna göre güneş panelleri ve rüzgâr enerji santralinin mevcut gücüne göre pompalı

enerji depolama sistemini optimize eder ve yük eğrisinin, tepe noktasını belirleyebilecek katsayılar oluşturur. Bu değerler, güneş panelleri ve rüzgâr enerji santralının kararsızlığını giderecek mantıklı katsayılar belirler ve farklı risk durumlarına sahip karar vericiler için, değişken zamanlı karar araçları sağlar, böylelikle ekonomik faydalar en yüksek düzeye çıkarılabilir ve operasyon riskleri en düşük seviyeye indirilebilir.

Saji ve arkadaşları (2019), bataryaların sürekli şarj deşarj durumlarında arızalanmalarını engellemeye yönelik çalışma yapmışlardır. Elektrik batarya hücrelerindeki akım akışı şarj kontrol cihazı ile kontrol altında tutulabilir. Solar şarj kontrol cihazı bu noktada önemli bir rol oynar ve enerji santrallerinin güvenliğini, verimini ve performansını iyileştirmeye yarar. Bu çalışma, güneş enerji sistemiyle entegre edilmiş mikrodenetleyici yapısı ile bataryanın şarj ve deşarj durumlarını iyileştirmeyi hedeflemiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı uygulamada bazı dezavantajları da beraberinde getirmiştir. Bu enerji kaynaklarının kesintili yapısı ve çevresel faktörlere göre (rüzgâr hızı, güneşlenme süresi vb) verimliliğin değişmesi kullanım alanlarını oldukça kısıtlamaktadır.

Ayrıca günümüzde oldukça yaygınlaşan ve yakın gelecekte fosil yakıtlı araçların yerini alması tahmin edilen elektrikli taşıtların en büyük dezavantajı da batarya boyutlarının çok büyük olması ve sürekli şarj-deşarj durumlarında bataryaların ömrünün oldukça kısalmasıdır.

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda enerji depolama sistemlerinin gelişmesi ve iyileştirilmesi yadsınamaz bir gerçek haline gelmiştir. Bu çalışmada batarya ve ultrakapasitör entegrasyonundan oluşan bir HEDS geliştirilerek uygulamadaki bu problemlerin çözüme kavuşması amaçlanmıştır. Geliştirilen bu hibrit enerji depolama uygulamasında Parçacık Sürü Optimizasyonu ile sayısal değerler belirlenmiş ve literatürdeki çalışmalardan farklı olarak gerçek değerlere daha yakın bulunmuştur. Bu sebeple çalışmada kullanılan materyaller akıllı şebeke kavramı, enerji depolama teknolojileri, parçacık sürü optimizasyonu ve çalışmanın yöntemi bu başlık adı altında incelenmiştir.

#### 3.1. Akıllı Şebekeler

Güncel şebeke sistemlerimize çağımızdaki bilgisayar teknolojisi ve ağ sisteminin entegre edilerek elde edilmiş olan şebekeye “Akıllı Şebeke” denilmektedir. Akıllı şebekede, bilgi ve haberleşme sistemlerinin bütünleştirilmesi ile şekillendirilmiş olan elektrik dağıtım şebekesidir. Akıllı şebekeler enerji üretim süreci ile tüketim sürecine kadar tüm kademelerde gerçek zamanlı olarak iki taraflı bilgi transferi sağlamaktadır. Akıllı şebekeler iş gücünü azaltır, ekonomik açıdan verimlilik sağlar, yüksek kalite ve güvenli bir enerji ağı sunar

### 3.1.1. Akıllı şebekelerin tanımı

En kolay tanım ile akıllı şebeke (smart grid); çok daha verimli ve modern revize edilmiş bir elektrik şebekesi demektir. Buna ek olarak, akıllı şebekenin fonksiyonel ve teknolojik özellikleri açısından ve de birtakım faydaları bakımından çeşitli tanımlamalar yapılmaktadır (Çoksürer, 2013). Avrupa Birliği (AB) akıllı şebekeyi; elektrik şebekesinin daha verimli, ekonomik ve güvenli şekilde olması için tüm kullanıcıların davranışlarını ve faaliyetlerini koordine eden akıllı elektrik ağı biçiminde tanımlamıştır (Çoksürer, 2013). Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Enerji Bakanlığı'na göre ise akıllı şebeke; elektrik enerjisinin üretildiği noktadan tüketiciye iletilmesine kadar olan aşamalarda, elektrik şebekesinin verimliliğini, güvenliğini, güvenilirliğini daha fazla artırabilmek adına kullanılan akıllı dijital teknolojidir (Kırmızıoğlu, 2014). Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) ise akıllı şebekeyi; elektrik enerjisinin üretimi, dağıtım ve tüketimi sırasında iletişim ve bilgi teknolojilerinin artan bir şekilde kullanımıyla oluşan yeni nesil şebeke sistemi olarak tanımlamıştır (Kırmızıoğlu, 2014).

Bunun yanında, literatürdeki farklı akıllı şebeke tanımlarına bakıldığında zaman; “Verimli, güvenilir ve birbirleri ile uyum içinde çalışabilen, her biri uzaktan kontrol birimleri ile kontrol edilebilen birden fazla iletim ve dağıtım sisteminden meydana gelmiş bir güç sistemidir”, “Acil durum sırasında kendi kendini iyileştirme özelliklerine sahip ve üretim/ iletim/ dağıtım şirketleriyle enerji sektörünün taleplerine cevap verebilen bir güç sistemidir”, “Sayısı milyonları bulan tüketiciye hizmet veren ve gelişmeye devam eden dijital ekonominin ihtiyacına paralel olarak zamanında, güvenilir ve regüle edilebilir data transferini sağlayabilen, akıllı ve kontrol edilebilir haberleşme altyapısına sahip güç sistemidir” tanımlarıyla karşılaşılmaktadır (Çoksürer, 2013).

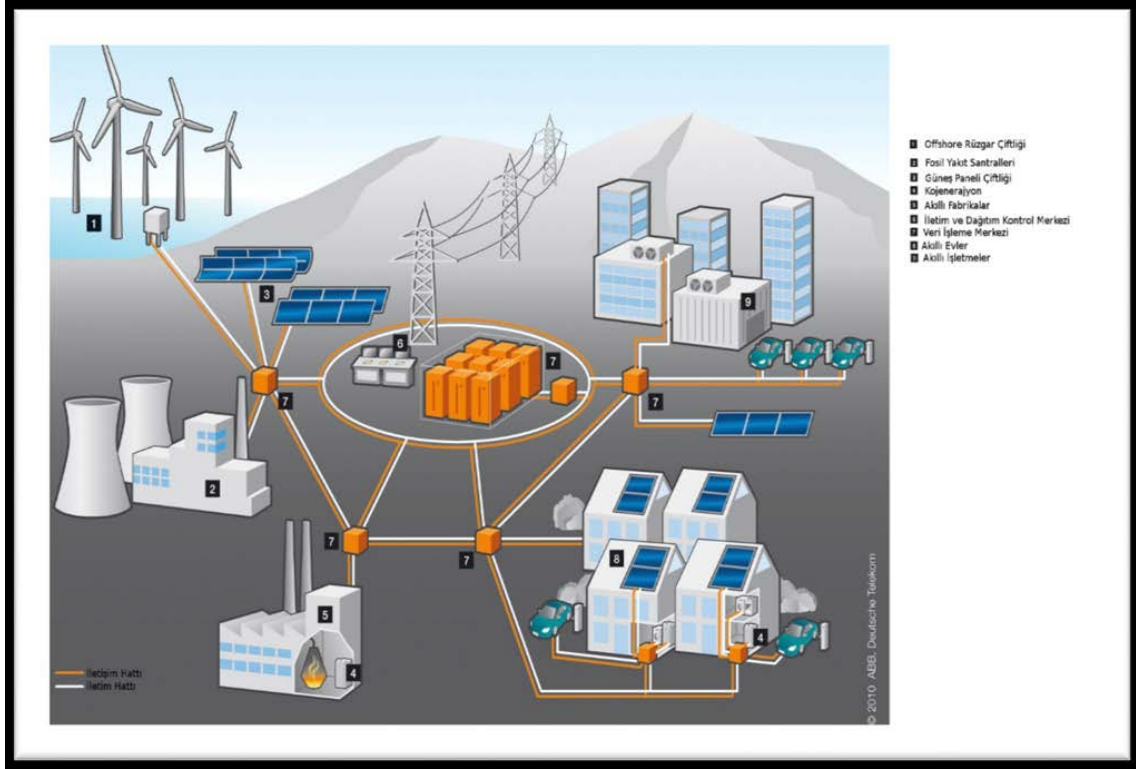
Söz konusu tanımların hepsi de akıllı şebekelerin tanımlaması için doğrudur. Bazı otoriteler ise akıllı şebeke ifadesini “enernet (enerji interneti)” şeklinde tanımlamaktadır. Tüm bu ifadeler doğrultusunda akıllı şebekeyi şu şekilde tanımlayabiliriz:

Kendisine fiziksel olarak bağlı tüm kullanıcıların;

- Maliyetin etkili bir şekilde sisteme entegre edildiği,
- Teknolojik araçlar ile geliştirilmiş,
- Tüm sistemin anlık kontrol ve takip edildiği ve en az kesintinin olduğu,

- Hizmet kalitesi ve güvenilirliği artırılmış,
- Kullanıcının hem tüketici hem üretici konumunda olduğu elektrik şebekesidir.

Özetle, Akıllı Şebekeyi elektrik şebekesinin modernize edilmiş hali olarak düşünebiliriz. Şekil 3.1’de bir akıllı şebeke sistemi gösterilmiştir.



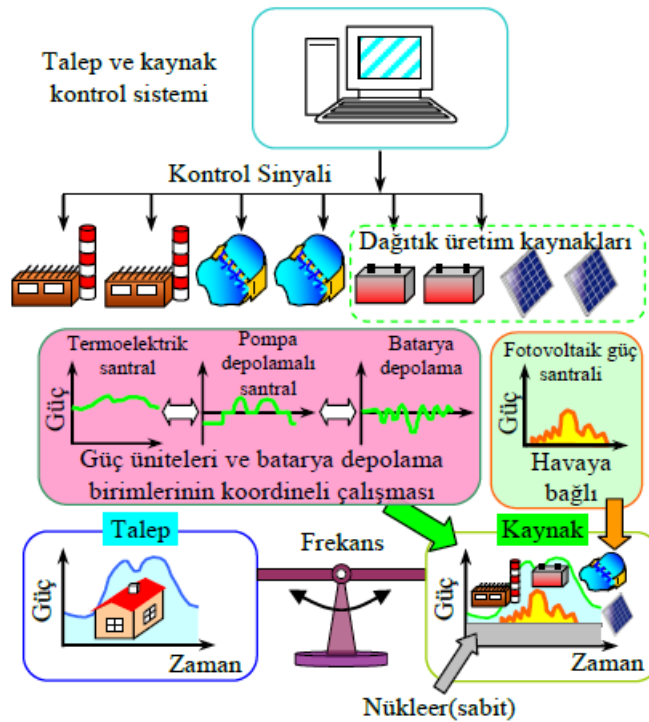
Şekil 3.1. Akıllı şebeke genel tasarımı

### 3.1.2. Akıllı şebekelerin yapıları

Akıllı şebeke; elektrik güç sistemindeki tüm birimlerin veya noktaların (üretim santralleri, trafo merkezleri, dağıtım merkezleri, tüketim noktaları gibi) aktif, adaptif (değişen şartlara uyum sağlayan), esnek, dinamik ve her türlü üretim veya tüketim tesislerinin rahatlıkla bağlanabileceği, güçlü bir yapı olarak tanımlanabilir (Çetinkaya, 2012). Ayrıca terim olarak Akıllı Şebeke kavramı; merkezi ve dağıtık üretim noktalarından yüksek gerilim iletim hatları aracılığıyla sanayi tesislerine, bina ve yapıların enerji yönetim birimlerine, enerji depolama uygulamalarına, son tüketiciler ile onların elektrikli araçlarına, cihazlarına ve diğer ev aletlerine kadar birbirine bağlı tüm parçalarının işletimini gözleyerek, koruma yapacak ve kendiliğinden optimize edecek

şekilde elektrik güç sisteminin modernizasyonu anlamına gelmektedir. Hâlihazırdaki iletim ve dağıtım şebekelerinin tasarımı akıllı şebeke mantığında değildir. Akıllı şebekelerin ihtiyaçları fazlasıyla farklıdır ve bu nedenle geleneksel şebeke için yeniden detaylı bir çalışmaya gereksinim vardır. Geleneksel şebekenin geliştirilip revize edilmesi, bakım-onarım faaliyetleri, dağıtık üretim ve depolama birimlerinin entegrasyonu ile geniş kapsamlı bir çift yönlü haberleşme sisteminin modernizasyonuna yönelik adımlar içermektedir (Aktaş, 2016). Bu anlamda akıllı şebeke içeren bir elektrik iletim altyapısı Şekil 3.2’de görülmektedir.

Akıllı şebeke yapısı ile elektriğin tüm kullanıcılara yeterli, devamlı, yüksek kaliteli, ekonomik ve çevre konusundaki hassasiyetleri dikkate alan bir şekilde sunulması gerekmektedir. Tüketici memnuniyetini karşılayacak kalitede ve yeterli düzeyde elektrik iletim ve dağıtım hizmetlerinin verilmesi sağlanmalıdır. Küresel ısınma ve çevresel faktörlerin, enerji sektörünün her alanındaki faaliyetleri göz önünde bulundurularak gerekli tedbirler alınmalıdır. Elektrik enerjisinin üretim santralinden üretilip son kullanıcıya ulaşınca kadarki tüm sürecinde kayıpların asgariye indirilmesi ve yüksek verim elde edilmesi akıllı şebeke yapısı için önemli bir konudur. Kaynak çeşitliliğinin artırılması, yenilenebilir ve yerli kaynakların büyük ölçüde kullanılması akıllı şebeke sistemini güçlendirici etkilerde bulunacaktır (Shawkat, 2013).



Şekil 3.2. Akıllı şebeke elektrik iletim yapısı (Akanca, 2013)

Bir akıllı Şebeke, ihtiyaç duyulduğunda gerekli birimleri seçici olmakla birlikte devreye alıp çıkarabilir. Akıllı Şebeke sistemi içinde farklı birimler birbirleri ile haberleŐmektedir. Sistemdeki tüm g noktaları kontrol edilerek, güç akışı düzgün Şekilde yönlendirilebilmektedir. Akıllı Şebeke anlık durumları analiz edip tahminler oluşturabilir, bunlara göre önlemler oluŐturup, işletme ve bakım kolaylığı sağlar. Ayrıca akıllı Şebeke sistemi yüksek güç kalitesi, güvenlik ve verimlilik sağlamaktadır. Akıllı Şebeke yapısında, enerji arzının sağlanması, dıŐa bağımlılıktan dolayı oluşabilecek risklerin azaltılması, iklim değişikliği ve küresel ısınma ile mücadelenin etkisinin artırılması ve çevrenin korunması hedefleri doğrultusunda, enerji üretiminden son kullanıcı tüketime kadar olan süreçte birçok deėiŐime ihtiyaç duyulmaktadır. Akıllı Şebeke olgusuyla birlikte elektrik enerjisi üretimi-iletimi-dağıtımında sistem kayıplarının asgari düzeye indirilmesi ve dağıtımda kaçak elektrik kullanımın önlenmesi sağlanmaktadır. Ayrıca tüketim tarafı yönetimi ile ilgili geliŐtirmeler yapılarak son tüketicisi memnuniyeti arttırılmaktadır.

Grldğu gibi akıllı Şebeke yapısı elektrik altyapımızın geleceğini oluŐturacak olan bir kavramdır ve multidisipliner teknoloji bileŐenlerini içermektedir. Bu bileşenler; yüksek kalite enerji yönetimi, akıllı iletim sistemi, uzaktan izleme ve kontrol birimi, dijital kontrol ve Őalt otomasyonu, dağıtım sistemi, enformasyon teknolojisi temelli enerji servisleri, dağıtık üretim yapısı ve bunların güç elektroniği arayüzleri, mikro Şebeke sistemleri gibi sıralanabilir. Tablo 3.1'de akıllı elektrik Şebeke yapısının mevcut geleneksel elektrik Őebekesinden farklı yönleri verilmiştir (Uzunoğlu, 2013).

**Tablo 3.1** Geleneksel ve akıllı şebeke sistemlerinin karşılaştırılması

<b>Konvansiyonel Şebeke Yapısı</b>	<b>Akıllı Şebeke Yapısı</b>
Tüketiciler enerji tüketimi ve maliyetleri azaltmak konusunda yeterince seçeneğe sahip değildir	Detaylı fiyat bilgisi mevcuttur, birçok program, fiyat ve ödeme süresi arasından seçim yapılır
Büyük miktarda merkezi üretim kullanılmaktadır, yüksek oranda kısıtlı dağıtık üretim ve depolama mevcuttur.	Farklı dağıtık üretim kaynakları merkezi üretime ek olarak sistem içerisinde yer almaktadır.
Yeni teknolojik gelişmelerin entegrasyonu bakımından sınırlı bir toptan satış pazarı mevcuttur.	Teknolojik gelişmeleri ve değişimleri ve farklı üretim opsiyonlarını dikkate alan, yeni elektrik pazarlarının gelişimi sağlanmaktadır.
Güç kalitesinden daha fazla kesintilere odaklanır.	Güç kalitesi, akıllı şebekeler için bir önceliktir.
Kısıtlı şebeke yapay zekâsı ve otomatik kontrol mevcuttur.	Şebeke yapay zekâsının yönetim uygulamalarına entegrasyonu ile birlikte etkinlik ve verimlilik artar.
Arızadan sonra, varlıkların korunmasına odaklanır.	Arızadan önce, arıza durumunu önleyecek önlemler alır, arıza durumlarındaki etkileri minimize eder ve işletim sürekliliği sağlar.
Doğal afetlere ve diğer tehditlere karşı oldukça zayıftır.	Doğal afet ve saldırı gibi tehlikeli zamanlarda sistem kendini hızlı bir şekilde toparlayarak işleme devam eder.

Mevcut elektrik şebekesinin modernizasyonunda bazı etkenler bulunmaktadır. Akıllı şebekelerin uygulanmasında, hükümetin düzenlemeleri ile oluşan bürokratik ve kanuni etkenler büyük önem taşımaktadır. Akıllı şebeke olgusunda ortaya çıkacak yapı, yeni iş alanlarını ve iş modellerini ortaya çıkaracaktır. Kullanıcı memnuniyeti, hizmet kalitesi ve devamlılığı bakımından, enerji güvenliği ve güvenilirliğinin her zaman sağlanması konusu akıllı şebekelere talep oluşturan önemli bir etkidir. Akıllı şebeke kavramının başlıca hedeflerinden biri de tüketici tarafındaki gelişmeler olup kullanıcının kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Dağıtık ve yenilenebilir üretimin

şebekeye eklenmesiyle birlikte, akıllı şebeke olgusunda çevresel faktörler açısından önemli adımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

### 3.1.3. Akıllı şebekenin zorunluluğu

Enerji gereksinimi, nüfustaki artışa nazaran daha fazla artmakta, 2060 yılına doğru bitmesi beklenen konvansiyonel yakıtlarla maksimum düzeye ulaşacaktır. Bu artış ile birlikte kaynak sıkıntıları meydana gelecektir. Teknolojik gelişmelerle beraber, kalitesi yüksek enerjiye talep artacak, kaybolan enerji takibi, tasarruf ve yeniden kullanılabilirlik ve ek olarak yenilenebilir enerji kaynakları kullanımıyla yeniden oluşacak ve bir noktada çözüme kavuşacaktır. Bu yönüyle akıllı şebekeler, akıllı üretim, tüketim ve iletimdeki gücün kalitesi, enerjinin devamlılığı, etkili enerji yönetimiyle bu kısımda oldukça önemlidir.

Günümüzde, kaynakları fosil yakıtlardan oluşan elektrik üretimi, büyük enerji santrallerinin kurulması ile sağlanmaktadır. Ancak enerjinin üretilmesinde CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılması, su döngüsünde meydana gelen dengesizlik ve çevre kirliliğinin durdurulması için farklı enerji kaynakları ve doğal kaynaklar daha çok önemlidir. Mevcut durum bu iken, akıllı şebekeler, çeşitli enerji kaynakları ile enterkonnekte yapısıyla büyük değer kazanmaktadır.

Güç sistemleri hakkında olumlu sonuçların meydana gelmesi, mevcut sistemlerin daha da karmaşık hale gelen şartlar beraberinde, yeni sistemlerin oluşturulmasıyla sağlanacaktır. Kontrol sistemleri, haberleşme, bilgi teknolojileri gibi yapılan çalışmalar, elektrik şebekelerini daha çok verimli, güvenli ve yönetilmesi olası duruma getirecektir. Tüm bunlara ek, kişinin günlük gereksiniminde enerjiye olan ihtiyacının artış göstermesi, bu doğrultuda dünyadaki nüfusun artışı ve teknolojiye gelişmeler, biten fosil yakıtlarla çeşitli farklı enerji kaynakları meydana getirecek ve Akıllı Şebeke teknolojisini meydana getirecektir (Ayvazoğlu, 2015).

Tüm bu araştırmalar ışığında, Akıllı Şebekeler konvansiyonel şebekelerden tarafsız bir şekilde meydana gelip, kontrol edilmesi kolay, dağılmış güç kaynaklarındaki yönetimle yenilenebilir yük akışı elde etmek, farklı enerji kaynaklarının kullanılmasına teşvik eden, modüler, istek yönetimi ve enerjideki güç akışını kontrol edebilir yapısıyla enerjinin maksimum kazançla kullanılmasını sağlayan şebeke modeli biçiminde karşımızdadır. Akıllı şebekeler böylelikle; enerji akışında düzenleme yapabilen, tüketici giderlerini daha azaltan çevre merkezli bir şebeke oluşmasına ve anlık haberleşme

sistemiyle hattın aşırı yüklerini çözümlenebilen, yenilenebilir enerji kaynaklarından daha çok faydalanılması noktasında ihtiyaç olan optimizasyonun sağlanmasına imkân oluşturacaktır (Çoksürer, 2013).

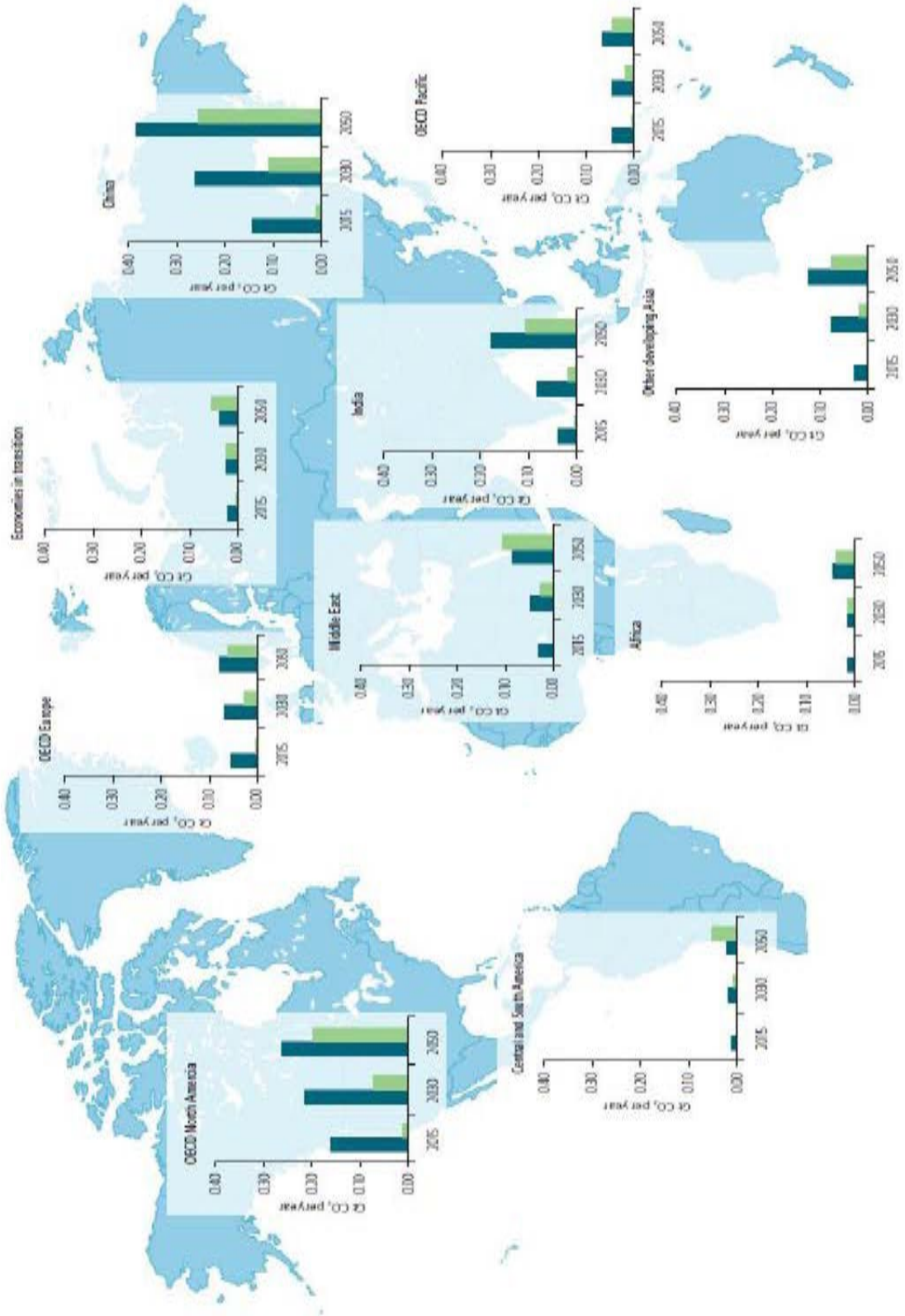
### 3.1.3.1 CO<sub>2</sub> azaltım hedefleri

Akıllı şebekelere dikkatlerin çevrilmesindeki en büyük sebeplerden birisi de CO<sub>2</sub> salınımının sera etkisi oluşturmasıdır. CO<sub>2</sub> salınımını azaltmak için yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynakların ne denli önemli olduğunu tekrar ortaya koymuştur. Haberleşme arayüzleri ile birbirleriyle sürekli iletişim halinde olan akıllı şebeke alt yapısı, gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını küresel ölçekte daha da arttıracaktır. Böylece CO<sub>2</sub> salınımının sera etkisi fazlasıyla azalacaktır. Örnek verecek olursak, Amerika Birleşik Devletleri'nde akıllı şebeke sistemleri ile birlikte, karbon salınımı miktarının % 25 azalacağı bir noktada olacağı hesap edilmiştir. Bu bağlamda CO<sub>2</sub> salınımı açısından 160 milyon hektardan fazla yeşil alan temiz bir hava için çalışabilecek hale gelecektir. Bu sebeple 130 milyon aktif taşıtın yollardan çekilmiş olması ile benzer çevreci sonuç ortaya çıkacaktır. Yaklaşık 10 yıl sonra dünyada enerji ihtiyacının % 90 oranından fazla artacağı tahmin edilmekte olup önemli sorunlardan birinin de mevcut karbon salınım miktarı artmadan söz konusu ihtiyaç artışının nasıl karşılanabileceği hususudur (Çoksürer, 2013).

Mevcut şebeke altyapısı uzun zaman önce tasarlanmasından ötürü, enerji kesintisi yaşamamak, güç kayıplarını en aza indirmek, güvenilirliği ve güvenliği sağlamak ve sistem verimliliğini üst düzeye çıkarmak adına şebekenin teknolojik olarak revize edilmesi gerekmektedir.

Şebekenin daha gelişmiş, daha güncel, daha modern akıllı bir yapıda olması gerekmektedir. Mevcut durumda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, yapısal olarak çok sağlıklı değildir. Buna ek olarak; güneş, jeotermal, dalga ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, dünya ve atmosfer var oldukça yenilenmeye ve enerji kaynaklarından biri olarak kullanılmaya devam edecektir. Esas sormamız gereken ise temiz ve süreğen enerji arzı hedeflerine ne kadar ulaşılabildiği konusudur. Pasif bir yapıya sahip olan elektrik enerjisi, akıllı şebeke sistemi ile canlı dinamik, akıllı ve yaşamakta olan ve ne yapılması gerektiğini analiz edebilen bir yapı haline dönüşmektedir (Çoksürer, 2013).

Akıllı şebekeler ile birlikte, küresel ölçekte önemli miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu azalmasına yarar sağlayacaktır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi doğrudan ve etkili azalılar olarak ikiye ayrılan aşağıdaki fonksiyonların akıllı şebekeler ile gerçekleşmesi sonucunda temel amaçlardan biri olan CO<sub>2</sub> salınımının azaltımının gerçekleşmesi amaçlanmaktadır.

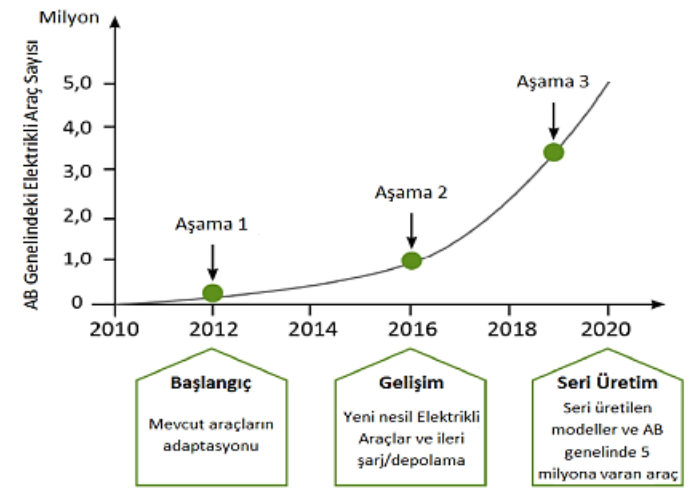


Şekil 3.3. Akıllı şebekeler ile bölgesel CO<sub>2</sub> salınımı azaltım hedefleri (Akcanca, 2013)

### 3.1.3.2. Elektrikli araçların yaygınlaşması

Küresel olarak elektrikli araçların (EA) genel ülke politikalarının araştırılması sonucunda; EA'ların yaygın şekilde kullanılıyor olmasının amaçlandığı, ulaşım işkolunda petrol kaynaklarına bağımlılık oranının en aza indirgenmesi, ulaşım giderinin asgari seviyeye indirgenmesi, gürültü ve çevre kirliliğinin en düşük düzeye getirilmesinin hedeflendiği görülmektedir (Ou, 2010). Çevresel endişeler, duyarlılıklar gibi sebeplerle, yıllık bazda yüksek oranda petrol tüketimi gerçekleşen ülkelerin oluşturacağı yasal mecburiyetlerle, hibrit ve elektrikli araç satışlarının 2035 senesinde, totalde yeni araç satış oranının %15 - 20'si büyüklüğünde bir düzeye ulaşması tahmin edilmektedir (Aydemir, 2014).

Avrupa Birliği'yle ilişkili EA araştırmaları incelendiğinde, bir yol haritası çıkarıldığı ve üç kademededen meydana gelen planlama yapıldığı gözlenmektedir (Zehir, 2013). Buna göre; 2012 yılında başlangıç düzeyi olarak eldeki araçların uyum sağlaması, 2016 yılında gelişim kademesi olarak yeni nesil elektrikli araçların ve ileri depolama-şarj yöntemlerinin çalışılması ve 2020 yılında seri üretim modellerinin meydana getirilmesi hedeflenmekte olup, AB genelinde yaklaşık beş milyona varan araç adedine ulaşılması amaçlanmaktadır (Zehir, 2013).



Şekil 3.4. AB'nin EA ile ilgili yol haritasının başlıca adımları

EA satışlarının % 80 artış göstererek yaklaşık 320 bine ulaştığı 2014 senesinde, EA'ların vazgeçilmeyecek bir teknoloji olduğunun ispatlandığı düşünülmektedir. 2015 yılı itibariyle dünya genelinde ortalama bir milyon EA'ın yollara çıktığı söylenirken, 2016 senesi sonrasında bu sayı 2 milyonu aşmış bulunmaktadır (Zehir, 2013).

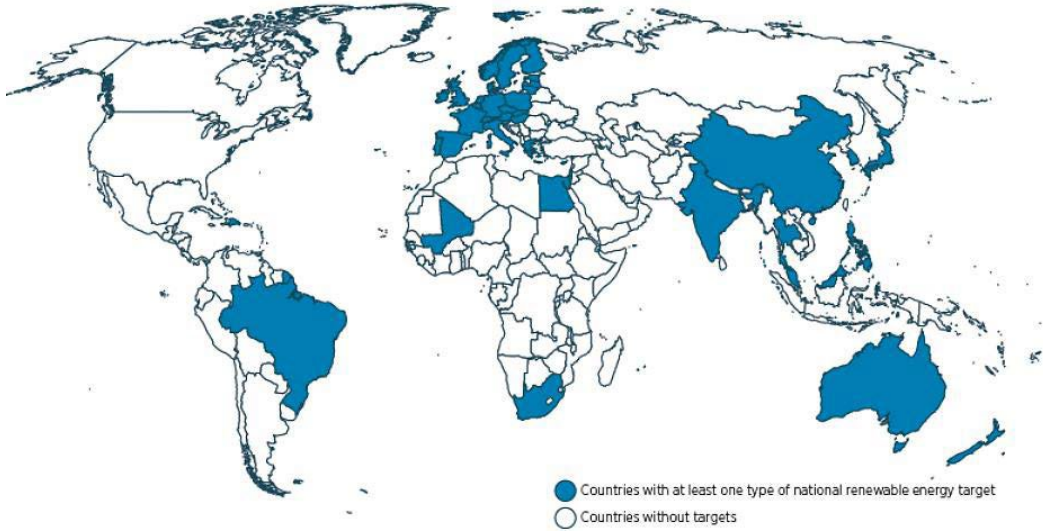
Bu durum, pek çok yüksek istekli yükün şebekeye çeşitli zamanlarda çeşitli noktalardan bağlanması manasına gelmektedir. İhtiyaç gücü kW'lar derecesinden başlangıç yapan bu yüklerin elektrik enerjisinin genel harcama içindeki seviyesi, hâlihazırda yapılarda bulunan standart yüklere nazaran daha fazladır. Pek çok EA barındıran bir şebekede yeni puant ihtiyaç vakitleri gözlenebilir ve harcamada dalgalanmalar oluşabilir. Bu sebeplerden dolayı, elektrikli araç ihtiyaç profili varsayımları ve toplu şarj birimlerinin yönetimiyle ilişkili araştırmalar oldukça değer arz etmektedir. Ayrıca şarj esnasında, yapının içindeki diğer yüklerin kontrolüyle yapıların puant ihtiyaçlarının sınırlandırılması sağlanabilir (Zehir, 2013).

Plansız ve kontrolsüz olarak EA'ların şarj edilmesinin, önemli etkilerinin elektrik dağıtım sistemi tarafından olacağı tahmin edilmektedir. Bu husus, elektrik dağıtım sistemi unsurlarının ömrünü direkt etkileyecektir. Bu durumda, EA'ların yaygınlaşması noktasında, akıllı şebeke teknolojisiyle elektrik organizmasında oluşabilecek teknik sorunların-kısıtların en aza indirilmesi ve şebekenin daha istenilen biçimde çalışması sağlanabilecektir.

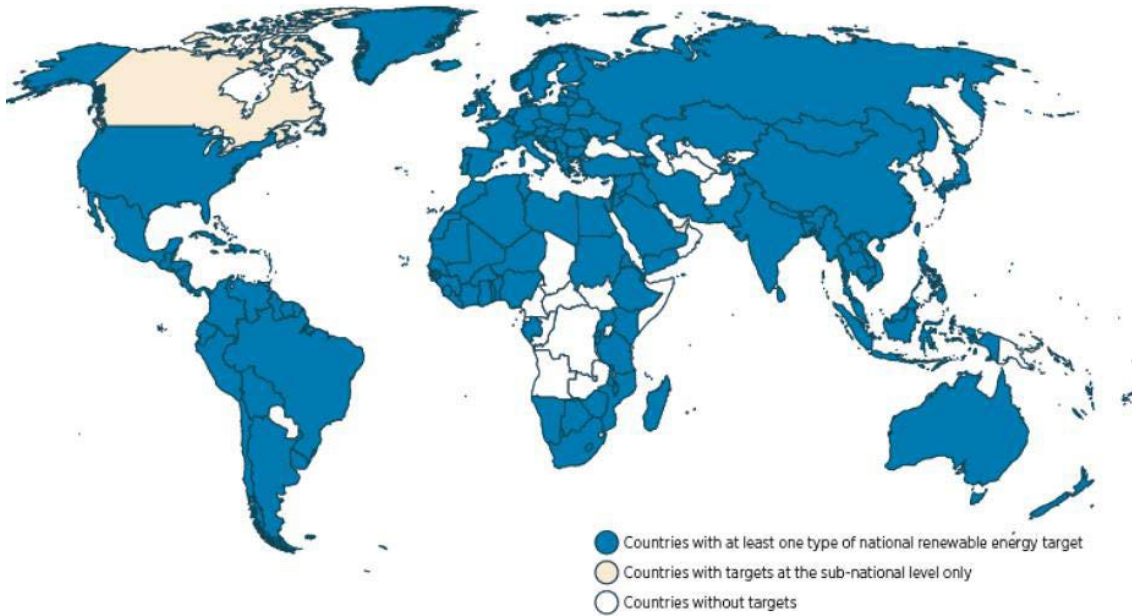
### **3.1.3.3. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı**

Dünyadaki elektrik üretiminin ortalama beşte birine denk gelen yenilenebilir enerji, küresel enerjiler arasında önemli bir kaynak olarak bulunmakta olup, özellikle devamlılığı sağlanabilir ve güvenli enerji sistemlerinin meydana gelmesinde gelecekte de gelişmeye devam edecektir. Dünyada yenilenebilir enerji teknolojilerinin, enerjideki geleceğin çevreci, devamlılığı olan ve güvenli bir biçimde sürdürülmesinde önemli bir rol oynadığı ve bu alanda ülkelerin amaçlar/politikalar belirlediği gözlenmektedir.

Şekil 3.5 ile Şekil 3.6'den da görüleceği üzere, ülkeler açısından yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanması konusunda ciddi amaçlar ve politika değişimleri olduğu görülmektedir. (Mavi olan yerler, en az bir tane yenilenebilir enerji kaynağında amaçları olan ülkelerdir (24th World Energy Congress , 2019).



Şekil 3.5. Ulusal yenilenebilir enerji (tüm çeşitler) hedeflerine ilişkin küresel harita



Şekil 3.6. Ulusal yenilenebilir enerji (tüm çeşitler) hedeflerine ilişkin küresel harita

Dünyadaki genel yönelimin; yenilenebilir enerji kaynaklarının uygulanmasının daha çok artış göstermesi, fosil yakıtların uygulanmasının azaltılması sağlanarak sera gazı salınımının kontrol edilmesi, tüketim kontrolü yapmak aracıyla pazara katılmalarını içine alan geniş bir enerji verimliliği bakış açısının gerçekleştirilmesi biçiminde olduğu söylenebilir. Konvansiyonel şebekelerde anlık oluşan talep değişikliklerinin düzenlenmesi için fazla miktarlarda üretim ve iletim kapasitesi ayırmak gereklidir ki, bu da milyarlarca dolarlık oluşacak yeni santral ve dağıtım/iletim

hattı inşası manasına gelmektedir. Günümüzde ise fazla miktarda rezerv imkânı ayırabilmek bir lüks haline gelmiştir (Eroğlu, 2010).

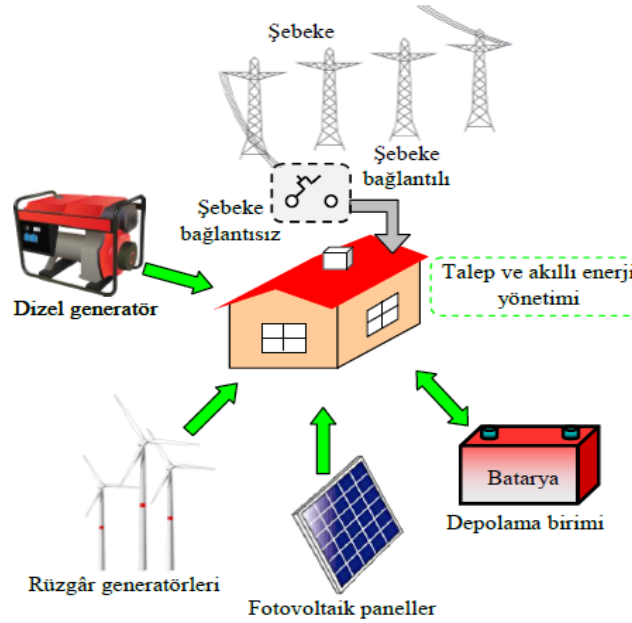
Bu sorunların giderilebilmesi için bütün dünya ülkeleri, hâlihazırda elektrik şebekelerini akıllı ve dağıtık bir şebeke yapısına çevirme uğraşı içindedirler. Bu yeni kuşak şebeke yapısında, üretim yapanlar düşük gerilim de içinde olmak üzere bütün düzeylerden şebekeye katılabileceklerdir. Tüketiciler ihtiyaç yönetimi oluşturarak enerji verimliliğine yardımda bulunabileceklerdir. Şebeke dengelemesi, işletimi ve izlemesi o an yapılabilecek; sıkışıklıklar, arızalar ve kullanılabilir hat gücü akıllı algoritmalar ve ilerlemiş sensörlerle anlık saptanabileceklerdir (Eroğlu, 2010). Dolayısı ile, akıllı şebeke teknolojilerinin uygulanmasıyla beraber, yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretimi tesislerinin yapıya uyumunun en uygun seviyede sağlanması hedeflenmektedir. Bahsedilen bu uygulama doğrultusunda, hâlihazırdaki şebekelerin kuvvetlendirilmesi ve yeni gereksinimlere cevap verebilecek düzeye ulaştırılması gerekmektedir. Akıllı şebekeye transformasyon eğilimi de bu noktada gelişim göstermeye başlamıştır. Otomatik sayaç okuma yöntemiyle seksenli yıllarda başlangıç yapan bu değişim, günümüzde de şebekenin bütün elemanlarının aralarında etkileşimli iletişimini temel alan tasarruf ve verim merkezli bir organizmaya doğru sürmektedir.

#### **3.1.4. Mikro şebeke yapıları**

Akıllı şebekeyi oluşturan önemli alt birimlerden biri de mikro şebeke yapısıdır. Mikro şebeke olgusuna farklı tanımlamalar getirilebilir. Mikro şebeke akıllı enerji yönetim yapısıyla yerel enerji üretim birimlerinde, kendi enerjisini üreterek, yüklerin kararlı ve kontrol edilebilir bir şekilde, beslenmesini sağlayabilen ve bu fonksiyonu şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız anlarda da devam ettirebilen ticari ve konut yapılarının elektrik sistemleri de mikro şebeke olarak tanımlanabilir. ABD merkezli bazı kaynaklar için mikro şebeke olgusu; üretim ve tüketim yapılarının uyum içinde tek bir yapı olarak işletildiği ve kullanıcılara aynı zamanda hem ısı, hem de güç sunulabilen yapılar olarak tanımlanabilmektedir (Kuşdoğan, 2009). Buna ek olarak, kendi içinde üretici ve tüketici birimlerinin akıllı sistemlerle kontrol edilen, ana elektrik şebekesiyle bağlantısı koptuğunda ise kararlı bir işletme sistemi sağlayan yerel bir dağıtım sistemi mikro şebeke olarak tanımlanır. Mikro şebeke sistemine, örnek bir topoloji, Şekil 3.7'de verilmektedir.

Mikro Şebeke, bulunduğu yerde g¼c ¼retim kaynağı yani dağıtık ¼retim, yerel y¼kler ve anahtarlama elemanlarından oluşmaktadır. Akıllı mikro Şebeke elektrik enerjisi ¼retimi, iletimi, dağıtımı ve b¼lgesel elektrik kullanıcılara verilen elektrik akıŐının yapılmasını daha akıllı bir yol ile yapan elektrik Şebekesi olarak tanımlanabilir. Akıllı mikro Şebekenin faydaları, g¼venilirlik artışı, artan verim, s¼rd¼r¼lebilirlik artışı ve kazanç olarak aŐıklanabilir. B¼ylelikle, elektrik g¼c sistemlerinde, yeni daĐıtılmıŐ enerji kaynaklarının, Şebekeye uyumu kolaylaŐmakta ve enerji maliyetleri ve kısıntılarının azalması ve enerji kalitesinin artması sağlanmaktadır (TutuŐ, 2012).

Mikro Şebeke sistemindeki en ¼nemli sorunlardan bazıları; daĐıtılmıŐ elektrik enerjisi ¼retim kaynaklarının senkronizasyonu, y¼klerin (trafo ve motor tipi y¼kler)  ektikleri demeraj akımları ve ¼c fazlı y¼k dengesizliği problemleridir (3-fazlı sistemdeki bir fazlı y¼kler ve k¼c¼k g¼c¼l¼ pv elektrik enerjisi ¼retim kaynakları vb.). Bir akıllı Şebeke sisteminde, dağıtık enerji ¼retim kaynaklarıyla, elektriksel depolama sistemlerinin senkronizasyonu oluŐturularak, tesisteki kaynak sayısı arttırılabilir. Akıllı Şebekelerde elektrik ¼retilirken ve t¼kutilirken meydana gelen kararsızlıklar DC iletim hattına bağlı elektrik enerji depolama birimleri sayesinde kolayca karŐılanabilir. Şebeke yapısında bulunan dağıtık ¼retim tesisiyle, y¼klere y¼ksek g¼c kalitesi iletilerek, talep edilen taraftaki y¼kler gerilim harmonikleri, ¼c fazlı kararsızlık ve gerilim dalgalanmalarından etkilenmez. Uzun s¼ren elektrik kesintisi esnasında eğer g¼c ihtiyacı ¼retimden fazlaysa, mikro akıllı Şebeke sistemi, ¼nemli ihtiyaÇları karŐılayabilmek için, bazı y¼kleri devre dışı bırakarak elektrik enerjisinin devamlılığı saĐlanabilmiŐ olur. Şebekede bulunan bir y¼kte geçici bir aşırı y¼klenme durumunda, y¼k¼ besleyen kısım farklı bir g¼c iletim hattı ¼zerinden talep g¼c¼n¼ karŐılayabilmiŐ olur (Aktaş, 2016).



Şekil 3.7. Mikro şebeke elektrik iletim yapısı

Mikro şebeke sistemi, çok fazla bileşenden oluşmasından ötürü bir sınıflandırma ihtiyacı duyulmuştur. Bundan ötürü mikro şebeke sistemleri, ev tipi, dağıtım merkezi, ticari ve sanayi ve uzak bölge mikro şebekeler olarak sınıflandırılır (Moore, 2012).

Ev tipi mikro şebekeler, akıllı bileşenler ile üretici ve tüketici elemanlarının yönetildiği enerji yönetim aygıtları bulunduran, akıllı ev sistemlerinin gelişimiyle, yeterince örtüşen, bir etkileşim içerisindedir. Mikro şebeke olgusunun tanımında anlaşıldığı gibi, akıllı konutlarda da kontrol edilebilir ara yüzle, akıllı konut yapısında yerel üretici birimleri, enerji depolama üniteleri ve yükler, bölgesel dağıtım şebeke sistemine bağlanmaktadır. Ev tipi mikro şebeke sisteminde, kullanım zamanı, enerji maliyetleri veya tarifeleri gibi, etkenleri analiz ederek yerel üretim tesisinde üretilen elektrik enerjisi, enerji depolama ünitesinde depolanan enerji veya şebekeden çekilecek enerji arasında, en ekonomik ve güvenli, işletmeyi sağlamayı hedefleyen tercihleri gerçekleştirir (Damjanovic, 2011).

Dağıtım şebekesi mikro şebeke yapılarının, konut bölgesi için veya sanayi bölgesi için, kısmi bir bölümü de olarak ele alınabilir. Böyle mikro şebeke yapılarında büyüyen bölgesel yüklerle karşı, yerel dağıtım üretim santrallerinin (rüzgâr santralleri, biyogaz santralleri, enerji depolama üniteleri v.b.) uygun şekilde işletiminin yapılmasıyla dağıtım şebekesindeki meydana gelebilecek olası problemler (aşırı yüklenme gibi) yönetilebilir (Moore, 2012). Dağıtım şebekesinin belirli parçalarının mikro şebeke şeklinde işletilebilmesi, bakım veya kesinti durumlarında bu parçaları da

ada modunda çalıştırma yeteneği ile, kullanıcılara sağlanan hizmet kalitesi bakımından büyük bir fayda sağlamaktadır (Damjanovic, 2011).

Endüstriyel ve ticari mikro şebekelerdeyse özellikle hassas ve kritik yükler barındıran kullanıcılar için mikro şebeke sistemi enerji güvenilirliği oluşturabilir. Özellikle üniversite, alışveriş merkezleri, okul, hastane gibi tüketimin fazla olduğu yapılarında mikro şebeke kullanımları ile sistemlerindeki bütün enerji tüketim elemanlarını tam bir şekilde kontrol edebilme yararı oluşturabilir. Böylece tam kontrollü bir organizmada farklı uygulamalarla enerji tasarrufu oluşturulabileceği gibi ekonomik yarar da oluşturulabilir (Moore, 2012).

Uzak bölgeler için mikro şebekeler, elektrik şebekesinin ana bölümüyle zayıf bir bağlantısı olan ya da hiç bağlantısı olmayan uzak bölge yerleşimleri olabilir. Bu tür kesimlerde mümkün olduğunca yerli enerji kaynaklarından faydalanmaları sağlanarak ana şebekeye mümkün mertebe az yüklenilmesi sağlanmalıdır. Bu tür yerleşim kesimleri için yenilenebilir yerli dağıtık üretim yapılarının bütünleşmesi ve bütün sistemin kontrolde olması açısından mikro şebeke kullanımı çok uygun olabilir ( Damjanovic, 2011).

### **3.1.5. Dağıtık üretim şebeke yapısı**

Dağıtık üretim şebeke türleri, mikro şebeke ve akıllı şebekelerin bir parçasını oluşturmaya başlamıştır. Elektrik güç organizmasında son yıllarda meydana gelen gelişmeler, dağıtım düzeyinden güç organizmasına bağlanan enerji üretim ünitelerini ve enerji depolama ünitelerini teşvik eder vaziyettedir. Bu çalışmalar beraber incelendiğinde dağıtık üretim birimleri şeklinde tanımlanmaktadır. Dağıtık üretim birimi olarak kullanılacak yeni teknolojiler ticari biçimde piyasaya sürülüp kullanmaya başlamış olmakla beraber bu sistemlerin şebekeye bütünleşmesi, daha verimli uygulanabilmeleri ve giderlerin azaltılabilmesi için farklı araştırmalar devam etmektedir. Dağıtık üretim birimi çeşitlerine örnek olarak yakıt hücreleri, mikro türbinler, dizel jeneratörler, rüzgar türbinleri, gaz türbini sistemleri, fotovoltaiik organizmalar gösterilebilir.

Meydana gelen bu teknolojik ilerlemelerle birlikte, elektrik güç sistemi bütünüyle değişim göstermektedir. Bu değişimin amaçları; yenilenebilir ve temiz enerji gücünün en fazla miktarda değerlendirilmesi, tüketicilere daha kaliteli ve güvenilir enerji aktarılması, akıllı sistemlerin uygulanmasıyla ölçüm, işletme, denetim, bakım

işlemlerinin başarısı yüksek bir biçimde gerçekleştirilmesi, organizmada yaşanan kesintiler ve arızaların engellenmesi olarak sayılabilir (Kethani, 2011).

### **3.1.5.1. Dağıtık üretim sistemlerinde depolama uygulaması**

Akıllı mikro şebeke sistemleri için enerji depolama organizması çok değerlidir. Şebekedeki yüklerin düzgün çalışmasını oluşturmak için uygulanan enerji depolama organizması aynı zamanda güç niteliğini de arttırabilir. Enerji depolama uygulamalarıyla çıkış gücü, iklim koşullarına bağlı farklılaşan rüzgâr türbinleri, sadece gündüz çalışabilen ve hava koşullarına göre değişiklik gösteren güneş enerji yapıları gibi yenilenebilir enerji organizmalarından kaynaklanan güç değerlerindeki dalgalılıkla/değişimle baş edebilir. Yenilenebilir enerji zeminli akıllı mikro şebeke görüşü, kaynaklardan yararlanmanın ve fosil yakıt harcamasının azaltılmasında iyi bir yöntemdir. Enerji depolama yürütümlerinin kullanılması, yüklere nitelikli güç oluşturulması için mikro şebekelerin uygulanmasıyla zaruri hale gelmektedir. Mikro şebekelerde, şebekeye bağlı ve ada/izole modu şeklinde isimlendirebileceğimiz iki işletme yapısı bulunmaktadır. Ada/izole yapıli işletme mühletince enerji depolama biriminin temel yükümlülüğü enerji dengesinin oluşturulmasıdır. Şebekeye bağımlı mod mühletince hedef yenilenebilir enerji kökenlerinin kesintili ve yük dalgalanmasının, şebekeyi yayılmasının/etkilenmesinin engellenmesidir. Tek tür enerji depolamayla yenilenebilir güç kullanan mikro şebekede bu fonksiyonların bütünü verimli/etkili bir biçimde meydana getirilemez. PV gibi kesintili türdeki yenilenebilir enerji kaynakları, çok yüksek enerji, yoğunluklu saklama uygulamasını gerektirmektedir. Aynı zamanda, yükteki hızlı/ani dalgalanmalar/değişimler fazla güç yoğunluklu depolama uygulaması talep eder. Bu çalışmada öne sürülen ultrakapasitör ve bataryadan meydana gelen HEDS, yüksek enerji ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bir birleşik enerji depolama birimi olarak tasarlanmıştır. Bu hibrit yapı akıllı mikro şebeke uygulamaları için enerji depolama sistemlerinin gerçekleştirilmesinde oldukça gelecek vaat eden bir seçenektir.

### 3.2. Enerji Depolama Teknolojileri

Dünyadaki enerji gereksiniminin günümüzde büyük bir kısmı kömür, petrol ve doğalgaz gibi geleneksel enerji kaynaklarıyla giderilmektedir. Bunun yanında dünyadaki enerji gereksinimi gün geçtikçe artmakta, bu olay da geleneksel yakıt gereksinimini giderek arttırmaktadır. Öbür taraftan konusu geçen geleneksel yakıtların depoları dünya üzerinde kısıtlıdır ve artış gösteren enerji gereksinimine bağımlı bir şekilde giderek tükenmektedir. Bu olay da ilerleyen zamanda ki üretim ve tüketim arasındaki dengenin sağlanmasını riske sürükler. Tüm bunların yanında geleneksel yakıtların kullanılması, sera gazı oluşumunun önemli seviyede artış göstermesine ve buna bağlı şekilde küresel ısınma gibi tüm dünyayı etkisi altına alabilecek önemli neticelerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu bakımdan günümüzde önde rüzgâr ve güneş tabanlı sistemler olmak kaydıyla yenilenebilir ve alternatif enerji sistemleri, çevreye dost ve devamlılığı sağlanabilir bir işletim oluşturduklarından dolayı gelecek yönünden oldukça önemli değerlendirilen enerji kaynakları pozisyonundadır (Hadjipaschalis, 2009).

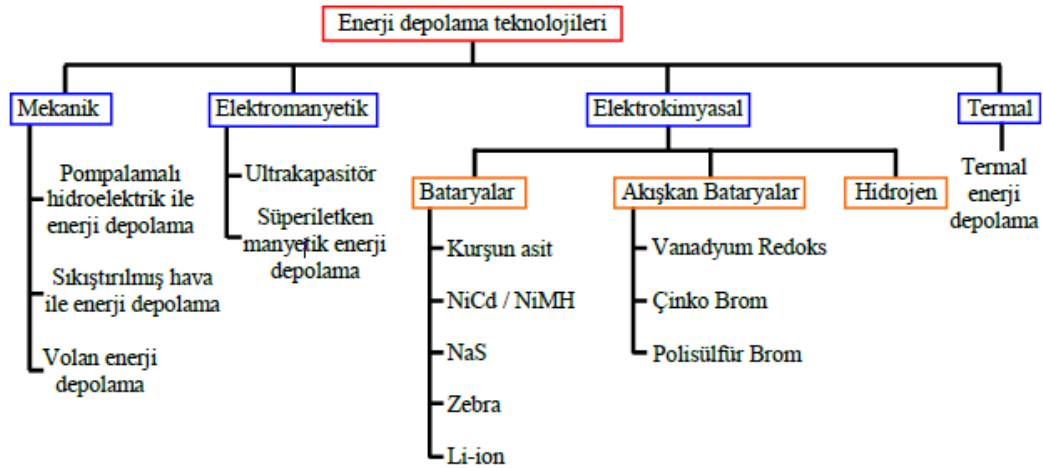
Fakat konusu geçen farklı enerji kaynaklarının pek çoğu doğa şartlarına oldukça bağımlıdır. Bu sebeple bu kaynaklarla üretilmiş olan enerji günlük, sezonluk ve hatta anlık olacak şekilde bile büyük değişiklikler sergileyebilmektedir. Bu olay da üretilmiş olan enerjinin genel enerji ihtiyacıyla tam biçimde örtüşmemesine sebep olabilmektedir. Bu bakımdan, yükün enerji gereksiniminin her koşulda başarıyla karşılanması için enerji depolama sistemleri çok büyük değere sahiptir. Bahsedilen alternatif enerji kaynaklarından üretilmiş olan fazla enerji farklı çeşit enerji depolama sistemlerine aktarımı sağlanmaktadır. Depolanmış olan bu enerjyise ana kaynakların halihazırda bulunmadığını veya yetersiz kaldığı olaylarda yük gereksiniminin karşılanmasında kullanılmaktadır. Enerji depolama sistemlerinin incelenmesi ve araştırılması özellikle şebekeye bağlı olmayan uygulamalar için oldukça fazla değer arz etmektedir (İbrahim, 2008).

#### 3.2.1. Elektriksel enerji depolama sistemleri

Enerji depolama sistemleri dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar mekanik, elektromanyetik, termal ve elektrokimyasal gruplarıdır. Bu gruplandırma depolama teknolojisinde uygulanan malzeme ve teknik alt yapısına bağlı şekilde yapılmaktadır.

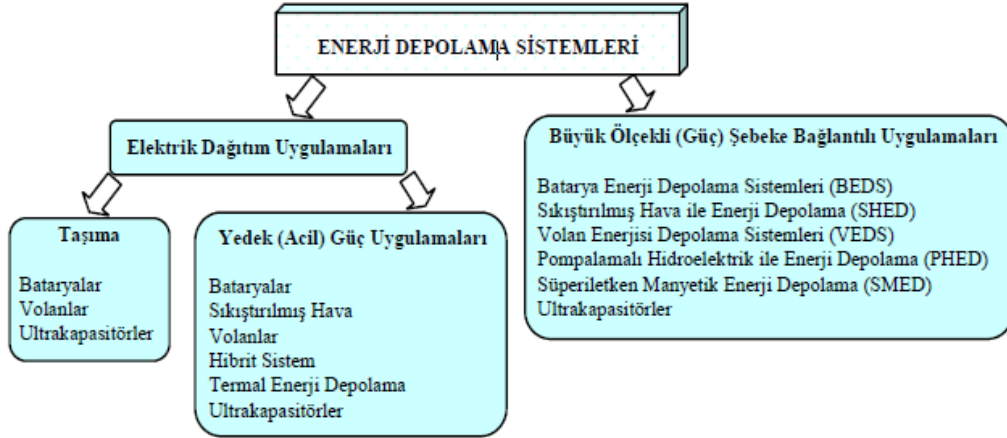
Şekil 3.8’de uygulanan enerji depolama teknoloji sınıflandırılması ayrıntılı biçimde verilmektedir.

Değişken enerji depolama teknolojileri arasından gereksinime en uygun özellikteki teknoloji, performans-maliyet oranı göze alınarak belirlenmektedir. Enerji depolama uygulamaları güç ve enerji kökenli uygulamalar olarak temel gereksinime yanıt verecek biçimde sınıflandırılmaktadır (Divya, 2009).



Şekil 3.8. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması

Enerji kökenli uygulamalar, birkaç saatlik deşarj (servis) zamanı gerektiren, uzun zamanlı enerji gereksinimine yanıt verebilecek ve gereksinim zamanında cevap süresi (devreye girmesi) oldukça hassas yükler haricinde bir dakika dolaylarında olması kabul görebilen depolama uygulamalarıdır. Güç kökenli uygulamalarda yük ihtiyacının karşılanmasından ziyade, gücün kalitesinin düzeltilmesine özgü kullanılan depolamalardır. Şebeke frekans kararlılığının oluşturulması, aniden meydana gelen güç ve gerilim değişimlerinin baskılanması gibi hedeflerle kullanılan depolama uygulamalarıdır. Bu tür uygulamalarda yanıt zamanı ms seviyesinde olması beklenirken uzun servis zamanına ihtiyaç duyulmayabilir ve yaklaşık birkaç dakika servis süreleri gereksinime göre kabul görebilmektedir. Güç sistemlerinde uygulanan değişken enerji depolama teknolojileri, depolama kullanımlarının türü ve uygulama sahalarının genişliği dikkate alınarak Şekil 3.9’da ayrıntılı şekilde listelenmektedir (Dustmann, 2004).



Şekil 3.9. Enerji depolama sistemleri diyagram gösterimi (Dustmann, 2004)

### 3.2.1.1. Batarya

Batarya üniteleri, elektrik enerjisini, kimyasal biçimde depolamanın en eski türlerinden biridir. Bataryalar kamera, telefonlar, dizüstü bilgisayarlar vb. elektronik cihazlardan, elektrikli taşıt sistemlerine kadar farklı alanlarda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Çeşitli uygulamalardaki gereksinimleri gidermek bakımında farklı batarya çeşitleri üretilmiş durumdadır (Uzunoğlu, 2011).

#### 3.2.1.1.1. Kurşun asit bataryalar

Kurşun asit bataryalı depolama ünitelerinin temelleri, Carl Wilhelm Siemens ve Wilhelm Josef Sinstedten'in, 1852 - 1854 yıllarında yaptıkları çalışmalara dayanmaktadır (Baker, 2008). Uygulamada kullanılabilecek, kurşun-asit ilk şarj edilebilen bataryaysa Fransız fizikçi Gaston Planté, 1860 yılında geliştirmiştir (Kurzweil, 2010). Bu tarihten itibaren kurşun asit bataryalar elektrik depolama sistemlerinde, yoğun olarak kullanılmaktadırlar (Kurzweil, 2010). Kurşun asit bataryalar, elektrik enerjisinin depolanmasında en eski ve en yaygın teknolojidir. Düşük maliyet bütün şarj edilebilir bataryalar içerisinde en az öz-deşarja sahip olması ve görece daha kolay bakımı yapılması gibi avantajlarından ötürü, birçok alanda depolama sorunlarının çözüme kavuşmasında, kurşun asit batarya üniteleri kullanıcılar tarafından fazlasıyla tercih edilmektedir (Nair, 2010). Bu batarya teknolojisinin dezavantajlarıysa sınırlı şarj-deşarj ömrü, daha düşük enerji yoğunluğu, yüksek ve düşük ortam sıcaklıklarında performans azalması, deep-deşarja karşı duyarlılık ve çevreye zarar verebilecek asit elektroliti ve kurşun elementini içermesidir (Nair, 2010). Bununla

birlikte her kurşun asit batarya hücresinin hemen hemen 2 V çıkış gerilimi vardır. Bu durum hücreleri daha yüksek gerilim seviyesine sahip olan Li-On bataryalara göre dezavantaj oluşturmakta ve aynı gerilim seviyesine ulaşabilmek için daha fazla kurşun asit batarya hücresinin kullanımına sebep olmaktadır. Kurşun asit batarya üniteleri, 50-150 Euro/kWh arasında fiyatlanmaktadır (Divya, 2009). Günümüzde yeni batarya teknolojileri hızla gelişmekte olmasına rağmen kurşun asit bataryaların yaygın kullanım alanlarına sahip olmalarında dolayı çoğu uygulamada daha uzun süreler kullanılacağı öngörülmektedir.

### **3.2.1.1.2. Nikel-Kadmiyum bataryalar**

Nikel kadmiyum bataryalar, kurşun asit bataryalarla kıyaslandıklarında yüksek enerji yoğunluklarına, uzun saykıl ömrü ve düşük bakım ihtiyaçları sahip olduklarından dolayı uygulamalarda alternatif oluşturmaktadır (Baker, 2008). Uzun çevrim ömrü, yüksek enerji yoğunlukları, düşük bakım ihtiyaçları ile kurşun-asit bataryalar ile yarışır hale gelmişlerdir. Önceki yıllarda nikel kadmiyum batarya sistemleri bazı elektrikli araç uygulamaları ve taşınabilir elektrikli cihazlarda kullanım alanı bulmuşlardır. Fakat kadmiyum bileşeninin çevreye zararlı olması ve buna bağlı olarak geri dönüşümünün olumsuzlukları nikel kadmiyum bataryaların yaygın kullanımını oldukça azaltmıştır (Baker, 2008).

### **3.2.1.1.3. Nikel metal hidrit bataryalar**

Nikel metal hidrit batarya sistemleri iyileştirilmiş performansları ve çevresel etki açısından daha avantajlı olmaları sebebiyle cazip bir batarya alternatifi olmaktadır. Nikel metal hidrit batarya sistemleri, diğer batarya çeşitleri gibi, kadmiyum, kurşun veya cıva gibi zararlı elementler içermediklerinde ötürü, nikel kadmiyum ve kurşun asit bataryalara göre daha çevreci yapıya sahiptirler. Nikel metal hidrit batarya teknolojisi nikel-kadmiyum bataryalara oranla %28-32 daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Fakat lityum iyon bataryalara karşı bu konuda dezavantajlı durumdadırlar. Ayrıca self-deşarj konusundaki sorunları nikel metal hidrit bataryaları uzun süreli enerji depolaması bakımından daha dezavantajlı duruma getirmektedir. Ama maliyet söz konusu olduğundan lityum iyon bataryalardan daha iyi konumdadırlar (Nair, 2010). Tüm bu avantajları ve dezavantajları ile göz önünde bulundurulduğunda nikel metal hidrit

batarya teknolojisi gelecekte özellikle yenilenebilir enerji alanında sıklıkla kullanılabilir duruma gelecektir.

#### **3.2.1.1.4. Sodyum sülfür bataryalar**

Sodyum sülfür batarya sistemleri sıvı sodyum içeren bir pozitif elektrot ve sıvı sülfür içeren bir negatif elektrot ile oluşturulmuşlardır (Baker, 2008). Sodyum sülfür bataryalar 300 °C' den fazla sıcaklıkta işletilirler. Yüksek sıcaklıklarda sorunsuz çalışabilmesi bu teknoloji sayesinde. Bu batarya teknolojisinin şarj deşarj verimliliği hemen hemen %100 olarak kabul edilmektedir. Fakat sodyum-sülfür batarya sisteminin, çalışma sıcaklığı gerektiğinde dışarıdan bir ısıtma sistemi ile yüksek tutulması gerekmektedir (Baker, 2008). Buna ek olarak sıra sodyum-sülfür batarya sistemlerinin yüksek maliyete sahip olması bir dezavantaj olarak görülmektedir (Divya, 2009). Sodyum sülfür bataryalar uzun yıllardır araştırılmaktadır. Sodyum sülfür bataryalar özellikle Japonyada yaygın olarak kullanılmaktadırlar ama Kuzey Amerika'da da bu bataryaların kullanımı artış eğilimindedir. Japonya'da bir Hitachi markasına ait otomotiv tesisinde 8 MW - 58 MWh'lik kurulu olan sistem bu teknolojinin dünyadaki en büyük örneğidir (Baker, 2008). Sodyum-sülfür teknolojisi ile alakalı iyileştirme çalışmaları birçok araştırma ekibinin günümüzde ilgi odağıdır.

#### **3.2.1.1.5. Lityum-İyon bataryalar**

1991 senesinde Sony tarafından ticari amaçla üretimi başlatıldığından beri Li-On bataryaların kullanımı az zamanda pek çok çeşitli sahada yaygınlaşmıştır. Li-On bataryaların diz üstü bilgisayarlar, cep telefonları ve MP3 müzik çalarlar gibi elle taşınabilir elektronik araçlardaki kullanımının oldukça yaygın görülmesinin yanı sıra elektrikli araçlarda ve alternatif enerji kaynakları baz alınan uygulamalarda bu teknolojinin bulundurulması yakın zamanda daha da hızlı olacak biçimde artacağı düşünülmektedir. Bu bakımdan senelik olarak milyarlarca Li-On batarya sistemi üretilmektedir (Scrosati, 2010). Li-On bataryalar yaklaşık %100'e yaklaşacak şekilde bir enerji depolama kazancına ve diğer batarya teknolojileriyle karşılaştırılınca en fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Li-On bataryalar ağırlığı az bir yapıya, bir hücreye yaklaşık 4 V'luk oranla yüksek bir gerilim düzeyine ve 100-150..Wh/kg'lık bir enerji düzeyine sahiptir. Fakat bu teknolojinin avantajlı olmayan yanları, yüksek ilk yatırım harcaması

ve hassas çalışma sınırlarından dolayı karışık şarj yönetim, sistemidir (Scrosati, 2010). Lityum, bataryaların gideri değişkenlik göstermektedir (Divya, 2009). 360-1000 Euro/kWh arasındadır. Bunun yanında, Li-On bataryalarda bulunan elektrolit yapıları termodinamik açıdan düzensiz yapıdadır. Fazla şarj gibi olaylar Li-On bataryaların bünyesinde oldukça kalıcı zararlar meydana gelmesine neden olabilmektedir (Scrosati, 2010). Ayrıca, düşük çevrim ömrü, performansın sıcaklık etkeninden daha fazla etkilenmesi ve iç bünyesinde kullanılan materyalin olmasının kıyasla zor olması Li-On bataryaların bugünde daha da sık uygulanmasının önünde bulunan ciddi bir engel durumundadır. Li-On bataryaların hassas kimyasal bünyelerini iyileştirmek ve özellikle, elektrikli araç uygulamaları gibi dayanıklılık etkeninin ön planda bulunduğu yapılarda daha çok kullanımı sağlamak bakımından yapılan çalışmalar günümüzde fazlaca devam etmektedir. Bu araştırmalar özellikle Li-On bataryaların elektrot yapısında kullanılması üzere alternatif materyallerin oluşturulması ve giderin azaltılması üzerine dikkatleri toplamış durumdadır (Scrosati, 2010). Lityum kökenli bataryaların bünyesinde kullanılmak için lityum-tin.(Li-Sn), Lityum-silikon.(LiSi) ve benzeri materyaller sıkça araştırılmaktadırlar. Ayrıca Li-On bataryaların bünyesindeki lityum kobalt oksit ve grafit gereçlerinin daha yüksek yetili ve daha düşük giderli alternatifleri ile başkalaştırılması sıkça üzerine konuşulan bir konudur (Scrosati, 2010). Yapılan geliştirme ve araştırmalarla beraber Li-On batarya ünitelerinin ilerleyen dönemde de önde gelen batarya çeşitlerinden olması düşünülmektedir.

### **3.2.1.2. Ultrakapasitörler (Süperkapasitör)**

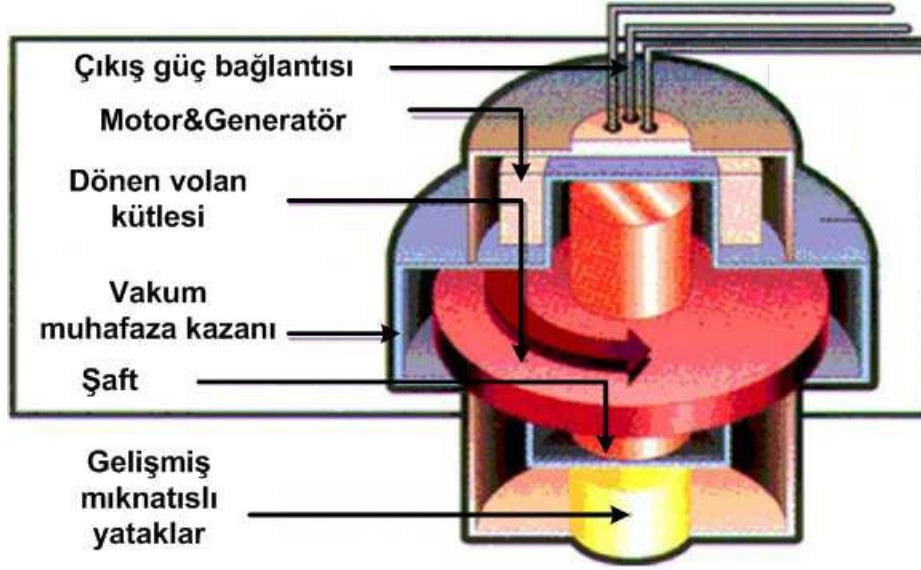
Ultrakapasitörlerin (UK) oluşum sürecinin kökeni olarak kabul edilen, elektro-kimyasal kapasitörler, Becker tarafından, 1957 senesinde gerçekleştirilen patent başvurusu ile literatüre katılmıştır. İlk UK modelleriyse 1982 senesinde “Pinnacle Araştırma Enstitüsü”nde askeri hedeflerde kullanılmak amacıyla geliştirilmiştir (Burke, 2000). UK’lar esas olarak, elektrik enerjisinin depolanmasının sağlandığı çift zeminli elektro-kimyasal bir yapıda çok sayıdaki gelişigüzel elektrotlardan ve bir adet ayırıcı yüzey kısmından meydana gelmektedir. Ayırıcı yüzey elektrotlar içindeki teması fiziksel yönden engellemekte, ancak iyon geçişine müsaade etmektedir. UK’nın yapısındaki yüzeyel elektrotlar nano ebatlarda olup yüzey alanını ve bu duruma bağlı olan kapasite değerini fazlaca seviyelere çıkarmaktadır (Kötz, 2000). UK’lar, pek çok küçük üniteye yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat UK’ların artıları, özellikle

elektrikli araç sistemleri gibi yapılar incelendiğinde daha belirgin biçimde meydana gelmektedir. UK'lar bünyelerinde kimyasal bir reaksiyon gerçekleştirmediğinden dolayı araçlarda oldukça hızlı oluşan frenleme olayında meydana gelen enerjiyi verimli bir biçimde geri kazanmada, bataryalar arasında kimyasal yapıya sahip olanlardan çok daha etkilidirler. Bataryalarda oluşan hızlı değişen yüklere bataryaların yeterli hızda yanıt oluşturamaması, UK'ların kıyasla daha değerli bir duruma gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca tekrar şarj edilebilme özelliğine sahip bataryalar, içlerindeki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle genelde birkaç bin çevrimlik yaşama sahip iken, UK'lar bir milyon çevrime varana dek çok yüksek bir yaşama sahiptirler. UK'ların oldukça değerli yararlarından biri de çalışmasının sıcaklık değişkenliklerinden neredeyse hiç etkilenmiyor olmasıdır. UK'lar, batarya için oldukça kötü çalışma koşullarından birisi olan,  $-40^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık düzeylerinde bile başarı ile çalışmalarını gerçekleştirebilmektedirler (Schindall, 2007). Ticari olarak bugünde üretilen UK'lar, aynı ağırlık ve ebattaki bir batarya ile karşılaştırıldığında oldukça yoğun bir güce sahiptirler. Ancak enerji yoğunlukları dikkate alındığında, UK'lar bataryalara kıyasla dezavantajlıdır. Aynı ağırlık ve ebattaki bir batarya ile kıyaslandığında UK'nın depolayabildiği enerji tutarı, bataryanın depolayabildiği enerji tutarının yalnızca %5'i kadardır. UK'ların sahip olduğu düşük enerji yoğunluklarında artış olmasını amaçlayan çalışmalar bugünde yoğun bir biçimde sürmektedir. UK'lerin yapısına daha farklı bileşenler eklenerek enerji yoğunluğunda artış sağlama hedefiyle detaylı araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle ultrakapasitör yapısındaki karbon maddesi yerine nanotüpler getirildiğinde bir UK'lerin, aynı ağırlık ve ebattaki bir bataryanın depolayabileceği enerji tutarının en az %25'ine, hatta yaklaşık %50'sine varacak oranlarda enerji deposunun sağlanabileceği düşünülmektedir (Schindall, 2007). Bünyesinde barındırdığı yüksek kapasite değeriyle beraber UK'lar pek çok yönden geleneksel kapasitörlerden daha yararlı duruma gelmiş, pek çok uygulama sahasında da batarya sistemlerinin yerini almaya başlamıştır.

### 3.2.1.3. Volan

Volan, bir enerjiyi kinetik enerji yapısında mekanik olacak şekilde depolayabilen ve bir eksende dönme hareketi gerçekleştiren bir kütledir. Volanlar NASA kurumunun 1961'deki açıklamış olduğu çalışma raporunun hemen arkasından uzay uygulamalarında kullanılmıştır (Liu, 2007). Sonraki dönemlerde pek çok farklı

türde volan sistemlerinin kullanılabilirliği sınanmıştır. Volanın mekanik şekilde hareketlendirilebilmesi ve döndürülebilmesi için bir enerjiye ihtiyaç vardır. Volan dönme eylemini başlattığında dönme ataleti ve hızına bağlı olarak belli bir tutarda enerjiyi depolayan “mekanik bir batarya” şeklinde çalışma sağlamaktadır. Volan ne kadar hızla dönüyor ise o kadar çok tutarda enerjiye sahip olmuş demektir. Depolanan bu enerji istendiğinde volanın yavaşlatılması sağlanarak ve bu sayede bulunan kinetik enerjinin istenilen bölümü generatör modunda çalışmaya başlayan bir elektrik motorunu dürtülemekte kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir.



Şekil 3.10. Bir volan sisteminin şematik görünümü

Şekil 3.10’da temel etmenleri görülmekte olan volan üniteleri hızı düşük (6000 d/dk’dan küçük) ya da hızı yüksek, (50000 d/dk kadar) şekilde üretimi sağlanabilmektedir. Hızı düşük volan ünitelerinden yaklaşık 5 Wh/kg bir enerji yoğunluğu meydana getirilmektedir. Hızı yüksek volan üniteleriyle ise yaklaşık 100 Wh/kg’lık bir enerji yoğunluğuna varılabilmektedir. Ayrıca volan üniteleri dakika seviyesinde bir zamanda hızlanış gösterebilmekte ve şarj edilmesi için bazı zamanlar saatler isteyen batarya sistemlerine nazaran bu bakımdan avantaj oluşturabilmektedir. Volan kökenli enerji depolama ünitelerinin temel faydaları çevrim ömrünün uzun olması ve yapılarının yüksek şarj-deşarj hızına uygun olmalarıdır. Volanların çevrim ömürleri 10<sup>5</sup>’ten başlayıp 10<sup>7</sup> çevrime varana dek olan geniş ve uzun bir aralıkta değişkenlik göstermektedir (Liu, 2007). Ancak mekanik yönden volan ünitesinin ömrü 20 yıl olacak şekilde kabul görmektedir. Ayrıca yukarıda da bahsedildiği gibi 100 Wh/kg’a ulaşan yüksek güç yoğunluklarının olması da volan ünitelerinin faydaları

arasındadır. Volan ünitelerinin nominal güçteki getirileri %90 dolaylarındadır. Volanların hızlı yanıt verebilme yetileri şebeke frekansında dengenin oluşmasında volanların kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Düzeni olmayan bir güç çıkışı sahibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlığının artmasıyla beraber bu konu daha da kıymetli düzeye varacaktır (Liu, 2007). Volan ünitelerinin en olumsuz dezavantajlarıysa fiyat yüksekliği ve boştaki kayıplarının çok fazla olmasıdır. Volanların bir saatlik boştaki kayıpları %20 düzeylerine varabilmektedir. Bu olay çevrim sürekli oluşmadığında, yani volan ünitesi boşta kaldığında enerji verimliliğini büyük miktarda azaltmaktadır. Bu sebeple volan üniteleri uzun zamanlı enerji depolanması amacına uygun değildirler. Fakat, volanlardan güç ünitelerinde kısa zamanlı yedek güç ünitesi olarak faydalanılabilmektedir.

### **3.2.2. Diğer elektriksel enerji depolama sistemleri**

#### **3.2.2.1. Hidrojen enerjisi depolama üniteleri**

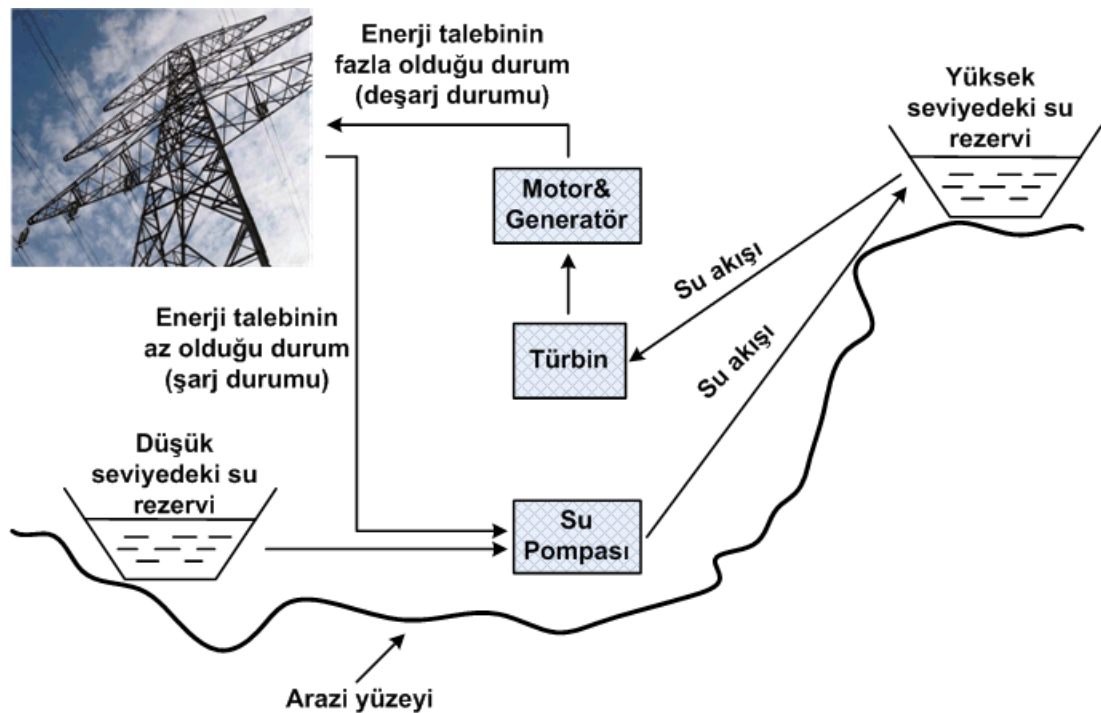
Alternatif (ek) enerji kaynaklarının dağıtık sistemlerde uygulandığı kullanımlarda elektrik enerjisinin hidrojen yapısına dönüştürülerek depo edilmesi bugünde çalışmacılar için dikkat çeken bir alternatiftir. Bu tarz organizmalarda güneş, rüzgar gibi ana alternatif (ek) enerji kaynaklarının meydana getirdiği enerjinin yük ihtiyacının dışında kalan fazla bölümü bir elektrolizör sistemi üzerinden hidrojen oluşturmak için kullanılmaktadır. Oluşan hidrojen, değişken yapılardaki hidrojen tanklarında depo edilebilmekte ve gereksinim duyulduğunda bir yakıt hücresi ünitesi tarafından elektrik enerjisine dönüştürülerek yük ihtiyacının karşılanması bakımından kullanılabilir. Fakat hidrojen depolaması çözümünün bugünde birkaç önemli sorunu vardır. Hidrojen depolamasıyla ilişkili sorunlar, seçilen depolama tekniğine göre değişkenlik göstermektedir. Bilinmekte olan hidrojen depolama yöntemleri; hidrokarbonlar, yüksek basınç altında sıkıştırma, karbon nano tüpler, hidrürler, ve sıvılaştırma. Hidrojen depolamada fazlaca bilinen teknik, hidrojenin yüksek basınç altında sıkıştırılmasıyla alüminyum bazlı, karbon kompozit ya da çelik tüplerde depo edilmesidir (Barbir, 2005). Alüminyum bazlı ve çelik tüplerde depo edilen hidrojenin depo ağırlığına oran %2-5 iken, karbon kompozit özellikteki tüplerde bu %11,3'e varan oranda yükseliş göstermektedir. Hidrojen depo etmede başka bir teknik olan sıvılaştırmada; düşük sıcaklıklarda ve sıkıştırma tekniğine oranla daha düşük basınç

altında sıvılaşımayla depo edilen hidrojen gazıdır (Barbir, 2005). Bu teknikte depo edilen hidrojenin, depolama tankının ağırlığına oranı %26 civarındadır. Fakat, sıvılaştırma büyük tutarlarda hidrojen depo etmek için çok pahalı bir tekniktir. Bu teknikte depo edilecek hidrojen miktarı için gerekli olan enerji, aynı hidrojen tutarından meydana gelecek enerjinin yaklaşık %28'idir. Hidrojenin alaşımlarda, ara metallerde ve metallerde hidrür şeklinde depo edilebilmesi de büyük bir fayda sunmaktadır. Fakat, bu teknikte tüp ağırlığı önemli bir problem meydana getirmektedir. Günümüzde ticari amaçla kullanılan metal hidrür tüplerde depo edilen hidrojenin oranı yaklaşık %4,5' tur. Bununla beraber tekrarlanan doldur-boşalt sayısına bağlı olacak şekilde bu oran giderek azalış göstermektedir. Bu sebeple, ağırlığının %10,5 oranında hidrojen depo etmeye yarayan sodyum bor hidrür ile ilişkili araştırmalar daha ön plandadır. Sodyum bor hidrür ile hidrojen depo etmenin en önemli yararı, depo edilen hidrojenin oda sıcaklığında geri alınıyor olması ve bunun katalizör (metal oksit karışımlar, nikel, kobalt, platin ya da rutenyum) yardımıyla kontrol altına alınabilmesidir. Bu teknolojiyle meydana getirilen ve depo edilen yakıtın patlama tehlikesi yoktur. Böylece hidrojenin yüksek basınç altında depo edilmesinde oluşabilecek patlama tehlikesiyle birlikte gelen güvenlik sorunu da ortadan kalkmış olur. Ayrıca bu teknolojiyle beraber birim hacimde hidrojen depo etme verimliliği artış göstermekte ve böylelikle gereksinim duyulan hidrojen depo etme sistemi azalış göstermektedir. Bu durum, araç sistemleri gibi birkaç uygulamada hidrojen depo etme ünitesinin kapladığı yerden ötürü meydana gelen sorunu da önemli düzeyde azaltmaktadır (Barbir, 2005). Sodyum bor hidrür kullanımındaki dezavantajlardan en önemlisiyse hidrojen ayrışımında meydana gelen metaboratı tekrardan sodyum bor hidrüre çevirmek için yüksek enerji ihtiyacıdır.

Nano teknolojik gelişimlerle beraber olarak hidrojen depo etmede üzerinde çalışmalar yapılan başka bir yöntemse karbon nano tüplerdir. Karbonun gözenekli küçük partiküller şekline dönüştürülebilmesi, karbon nano tüp yöntemiyle hidrojen depolamayı makul hale getirmektedir (Darkrim, 2002). Bu sayede yaklaşık %68'i depo edilebilmektedir. Ağırlık oranları incelendiğinde hidrojen karbon nano tüp yönteminin bugünde dezavantajlarından en önemlisiyse maliyetlerinin oldukça fazla olmasıdır. Hidrojen depo etme üniteleri, bulunan şuanki sorunların çözümü ile beraber ilerleyen dönemin önemli enerji depo etme yöntemlerinden birisi olarak görülmektedir.

### 3.2.2.2. Pompalanmış su tabanlı elektrik enerjisi depolaması

Pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemi, çeşitli yüksekliklerde olan rezervlerdeki suyun hareketinin sağlanmasıyla elektrik enerjisinin depo edilmesi ve üretilmesi kökenine dayanmaktadır. Elektrik ihtiyacının az olduğu koşullardaki fazla enerji yüksek olan rezerve suyu pompalamakta kullanılmaktadır (Şekil 3.11). Yüksek enerji ihtiyacındaysa su, aşağı yerleşkedeki rezerve doğru tekrardan serbest bırakılmakta ve buradaki bir türbin aracılığıyla elektrik enerjisi üretilmektedir.(İbrahim, 2008)



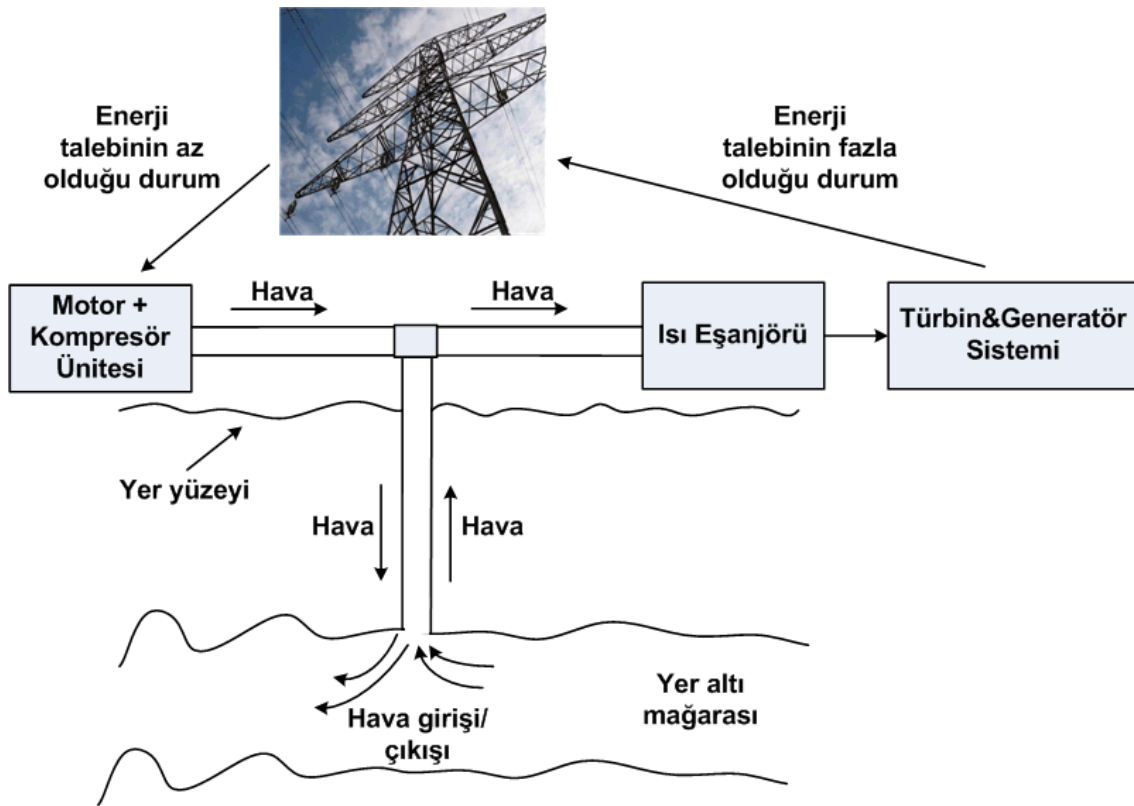
Şekil 3.11. Tipik bir pompalanmış su tabanlı enerji depolama ünitesinin şematığı

Bu teknolojinin avantajlarından en önemlisi, gereken sistemlerin değişen bir formda halihazırda kurulu olması durumudur. Bu teknoloji bazı GW'lık yüksek güce sahip uygulamalarda sıkça kullanılan organizmadır (İbrahim, 2008). Pompalanan su tabanlı enerji depolama sistemleri kullanılan donanımların karakteristiklerine göre yaklaşık %65-80 oranında değişkenlik gösteren bir verime sahiptir. Açıklanacak olursa; 3 kWh'lik enerji oluşturabilecek bir suyun pompalanabilmesi için 4 kWh civarında enerji verilmesi gerekmektedir. Depo etme kapasitesi, suyun pompalandığı üst aşamanın yüksekliği ve suyun hacmi olmak kaydıyla iki değişkene bağlıdır. 100 metreden aşağıya bırakılmış olan bir ton suyla 0.272 kWh'lik bir enerji üretilebilmektedir. Bu teknolojinin

dezavantajlarından en önemlisi, farklı su seviyeleri meydana getirebilecek geniş bir araziye gereksinim olmasıdır (İbrahim, 2008).

### 3.2.2.3. Sıkıştırılmış hava tabanlı enerji depolaması

Sıkıştırılmış hava tabanlı enerji depolanma sistemi pek çok yüksek güce sahip projede uygulanmış bir enerji depo etme teknolojisidir. Standart bir gaz türbininin uygulandığı bir güç santrali o anki gücünün 2/3'lük civarındaki bir bölümünü yanma havasını sıkıştırmak üzere harcamaktadır. Bu sebeple işlemleri zamansal ayrıştırarak elektrik enerjisi ihtiyacının az olduğu koşullarda elektrik enerjisinin havayı sıkıştırmak üzere kullanılması (enerji depolaması), elektrik enerjisi gereksiniminin yüksek olduğu zamanlardaysa bu sıkıştırılmış havanın serbestliğinin sağlanmasıyla standart gaz türbinlerinin kullanıldığı koşullara göre aynı yakıt gideriyle 3 kat daha fazla enerji üretimi gerçekleştirmek mümkündür. Bu eyleme ait şematik diyagram Şekil 3.12'te gösterilmektedir (İbrahim, 2008).



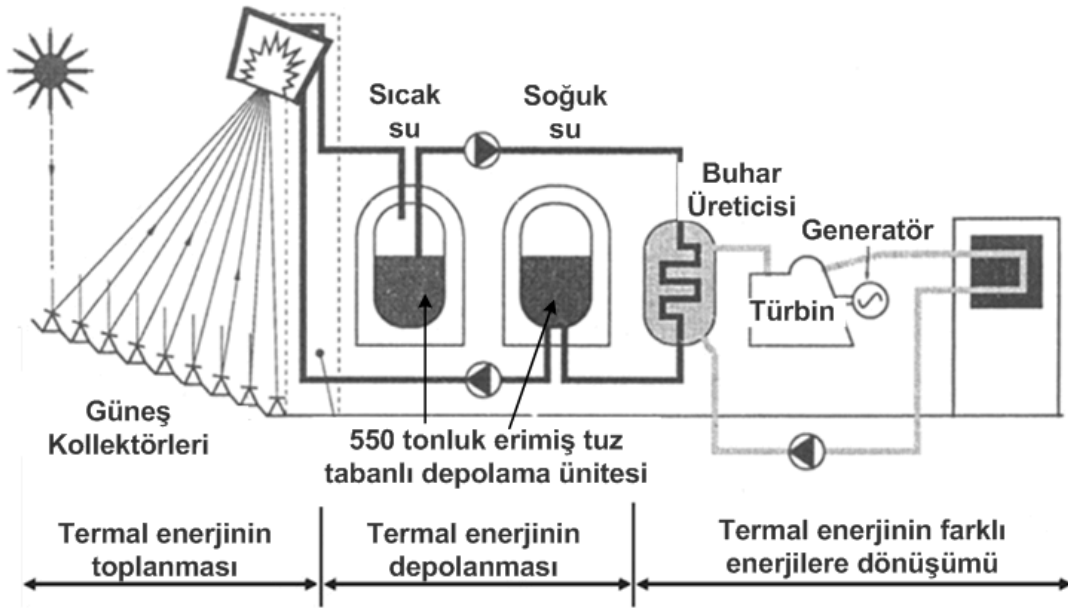
Şekil 3.12. Sıkıştırılmış hava tabanlı enerji depolaması yönteminin şematik gösterimi

Sıkıştırılmış hava depolaması oldukça yüksek basınçlarla (40-70 bar) oluşmaktadır. Bu olay depolama sisteminin daha az yer kaplamasına olanak tanımaktadır. Yeraltında kayaların yüksek kaliteli olanlarından meydana gelen büyük mağara yapıları, çok eski zamanlardan günümüze gelen yer altı doğalgaz yatakları ve tuz madenleri, sıkıştırılmış hava tabanlı enerji depo edilmesi için seçeneklerin en iyisi durumundadır. Şekil 3.12’de görüldüğü üzere yerin alt tabakalarında bulunan bu kaymanlara havanın yollanması ve tekrar yüzeye çıkartılması taşıyıcı boru üniteleriyle meydana gelmektedir. Fakat son dönemlerde yerin daha çok altında bulunan bu jeolojik yapılara ihtiyaç olmadan havanın yerin hemen alt kısmında yüksek basınçlı borular içinde sıkıştırılmış şekilde depo edilmesi ve bu sayede işletim ve kurulum maliyetlerinde azalış olması üzerine yapılan araştırmalar da epey artış göstermiştir. Sıkıştırılmış hava tabanlı olarak yapılmış bir ünitenin enerji yoğunluğu, 12 kWh/m<sup>3</sup> ve verimiye yaklaşık %70’dir. Verimlilikte artış sağlamak için özellikle bataryalarda bulunan self-deşarj benzer şekilde hava kaçaklarında azalma sağlayacak teknolojilerin geliştirilmesi çok önemlidir (İbrahim, 2008). Sıkıştırılmış hava tabanlı depolama sistemi barındıran ilk enerji santrali Almanya’nın Bremen şehri civarında 1978 senesinin Kasım ayından bu yana işletimdedir. 1991 senesindeyse Amerika’nın Alabama vilayetinde kullanılmış olan bir santralde 226 saatlik bir zaman süresince 100 MW’lık bir güç oluşmuştur. Bu santralde dışarda bulunan hava, yüzeyin 700 metre altında 2.555.000 m<sup>3</sup>’lük bir mağarada 40-70 bar arasındaki bir basınçta depo edilmiş ve sıkıştırılmıştır. Yaz aylarında ünite hafta içi günlerde günlük yaklaşık on saat süresince enerji üretmiştir. Depo olarak kullanılan mağaraysa hafta içindeki günlerde gece saatlerinde kısmen, haftanın sonlarındaysa tamamen tekrar havayla doldurulmuştur. Ünite yılda yaklaşık 1770 saat işletimde olmaktadır (İbrahim, 2008).

### 3.2.3. Termal enerji depolama sistemleri

Tüm bulunan yenilenebilir enerji teknolojileri içinde güneşten elde edilen enerji, kaynak potansiyeli en çok bulunan enerji türüdür. Bu bakımdan güneşten gelen enerjinin çeşitli formlarda kullanılabilir duruma getirilmesi, dünya için devamlılığı sağlanabilir bir enerji kaynağı oluşturulabilmesi bakımından oldukça önem arz etmektedir. Bu çeşitli formlar içinde güneşten oluşan enerjinin termal şekilde depo edilmesi, üzerinde sık sık araştırma yapılan bir alandır. Termal enerji depolama

sistemleri, hissedilir erime sıcaklığı veya sıcaklığın kullanılmasına göre iki çeşittir. Erime sıcaklığı zeminli termal enerji depolama sistemleri, bir materyalin belirli bir sıcaklık altında katı-sıvı hal değişiminden yararlanmaktadır. Depo etme esnasında madde katı halden sıvı hale dönüşmekte ve bu şekilde depolanmaktadır. Tam tersi durumda üniteye enerji verildiğindeyse sıvı halden katı hale dönüştürülmektedir. Depolama ünitesiyle dış ortam aralığındaki ısı devri bir ısı devri akışkanı aracılığıyla sağlanmaktadır. Enerji, belli bir sıcaklıkta depo edilmekte ve bu sıcaklık artış gösterdikçe konsantrasyon da artış göstermektedir. Bu sebeple erime sıcaklığı yüksek öğeler bu depolama şeklinde tercih edilmektedir. Bu konuda yüksek erime sıcaklığı, uygun kademedeki ısı iletkenliği ve çok düşük buhar basıncıyla sodyum hidroksit depolama sıvılarında iyi olarak görülmektedir. 120-360°C'lik sıcaklıklar aralığında bu materyal 1333 MJ/m<sup>3</sup>'lük. bir termal enerji depo etme yapısına sahiptir (İbrahim, 2008). Hissedilebilir sıcaklık zeminli termal enerji depo etme sistemleriye depolama işlemi sırasında sıcaklığı değişiklik göstermeyen erimiş tuz, sodyum gibi bir dökme aracın ısıtılması ile hareket göstermektedir. Meydana gelen ısı sonrasında su buharı oluşturulmasında ve beraberinde bir jeneratör-motor ünitesinin tahrikinin sağlanmasında uygulanabilmektedir. Termal enerjinin direkt soğuk veya sıcak su yapısında depo edilmesi de farklı kapasitelerde denemesi gerçekleştirilmiş iyi bilinen bir tekniktir. Özellikle ısı ünitelerinde ve bütünleşik güçte, güç üretiminde meydana gelen ısının bulunan su rezervinin ısıtılmasında ve böylelikle sıcak su oluşumunun sağlanmasında kullanılması çoğunlukla uygulanmış bir yaklaşımdır. Benzer biçimde yine meydana gelen ısının gerekli mekanik donanımlarla beraber soğutma enerjisi oluşumunda kullanılması da muhtemeldir. Bu sayede iklimlendirme ekipmanlarının tükettiği enerji önemli miktarda azaltılabilmektedir (Baker, 2008).



Şekil 3.13. Termal enerjinin kullanıldığı Themis Santrali'nin şematiği

Şekil 3.13'te Fransa'daki Themis Santrali'nin şematiği bulunmaktadır. Santralde güneş ışınlarından oluşan termal enerjisi güneş kolektörü yardımıyla toplanmakta ve bu enerjinin depo edilmesi erimiş tuz ile sağlanmaktadır. Ünite ihtiyaç halinde depolanan termal enerjiyi elektrik enerjisi olarak şebekeye iletmektedir. Bu ünite yaklaşık bir gün ışığının bir gündeki enerjisi olan 40100 kWh'lik bir enerjiyi depo edebilecek kabiliyette olan 560 ton erimiş durumdaki tuzun kullanılması ile meydana getirilmiştir.

Termal enerji depol etme sistemlerine ilişkin zaman sabiti genelde veya gün, bazende haftalar ya da aylar kademesindedir. Bu sebeple termal enerji depol etme üniteleri mevsimlik depo etme imkanı sağlayabilmektedir (Baker, 2008). Daha verimli ve farklı hal değiştiren malzemelerin termal enerji depo etme ünitelerinde kullanılması için yapılan yoğun araştırmalarla beraber termal enerji ünitelerinin toplam enerji depo etme sistemleri içindeki oranının uzun dönemde önemli düzeyde artış gösterebileceği düşünülmektedir.

Bu bölüme kadarki sayılmış olan enerji depo etme yaklaşımlarının özet incelemesi Tablo 3.1'de bulunmaktadır.

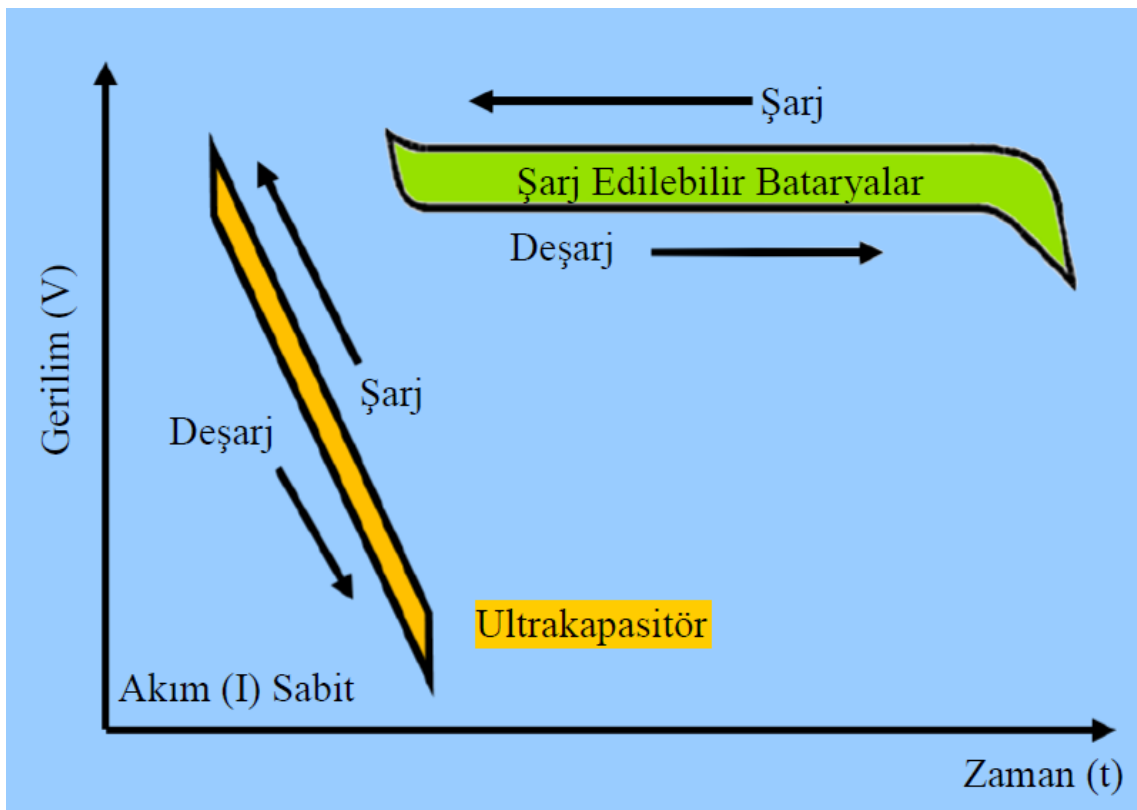
**Tablo 3.1.** Farklı enerji depolama birimlerinin değerlendirmesi

<b>Enerji Depolama Ünitesi</b>	<b>Başlıca Avantajı</b>	<b>Başlıca Dezavantajı</b>	<b>Potansiyel Kullanım Alanı</b>
<b>Batarya</b>	En yaygınlaşmış elektrik enerjisi depolama teknolojisi	Düşük çevrim ömrü	Elektrikli taşıtlar, taşınabilir cihazlar, küçük güçlü yenilenebilir enerji sistemleri
<b>UK</b>	Uzun çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu	Elektrikli taşıtlar
<b>Volan</b>	Yüksek güç yoğunluğu	Boştaki yüksek kayıplar	Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonu, bazı uzay ve elektrikli taşıt uygulamaları
<b>Pompalanmış su ve sıkıştırılmış hava yaklaşımları</b>	Oldukça büyük miktartlı depolama olanağı	Gerekli arazi koşulları	Çok büyük güçlü yenilenebilir enerji sistemleri
<b>Termal enerji</b>	Büyük kaynak potansiyeli	Depolama ve şarj süresinin sınırsız olması	Büyük ölçekli enerji depolaması

### 3.2.4. Hibrit enerji depolama sistemi

Birçok enerji depo etme ünitesi birbirini tamamlayacak performans özellikleriyle beraber kullanıldığında meydana gelen sistem bir hibrit enerji depolama sistemi (HEDS) olmaktadır. Batarya; maliyet açısından en elverişli enerji depo etme teknolojilerinden bir tanesidir. Bununla birlikte bataryaların enerji temin edicisi şeklinde kullanılması, ani güç değişimlerine yanıt verebilmektedir. Ancak bu ani güç değişiklikleri bataryaların kullanım ömürlerini önemli düzeyde azaltmaktadır. Bir

UK'de enerji depo edilmesi, bataryada olduğu gibi bir elektrokimyasal süre yerine bir statik yüklenme durumuyla meydana gelmektedir. Bu sebeple UK'ler bataryalara kıyasla daha yüksek güç konsantresine sahiptir. Bu sebepten ötürü daha iyi enerji ve güç performansı için bu her iki depo etme aracını birleştirmek yararlı olacaktır. Ultrakapasitör ve batarya ya da gücün elverişli biçimde ikisi arasında pay edilmesiyle aynı anda şarj ya da deşarj olabilmektedir. Şekil 3.14'de ultrakapasitör ve batarya depo etme teknolojisinin süreye bağlı olarak terminal uçlarındaki değişikliği verilmektedir. Bataryanın çok daha uzun süreçte enerji sağladığı saptanırken UK'ler çok kısa süreçte enerji verebilmektedir.



Şekil 3.14. Batarya ve ultrakapasitörün zamana göre şarj/deşarjı

Anlık yüksek güç gereksiniminin olduğu zamanlarda yükün ihtiyaç duyduğu akımı karşılamada UK ve bataryadan meydana gelen hibrit enerji depo etme ünitesinin kullanılması önem oluşturmaktadır. Böyle bir koşulda UK'nin ve bataryanın güç yoğunluklarına bakmak bizlere fikir verecektir. Bataryalar genellikle 10-1200W/kg güç yoğunluğu barındırırken, UK'ler 10-108W/kg'lık güç yoğunluğuna sahiptirler. HEDS kullanıldığında UK, bataryanın tekken karşılayamayacağı büyüklükteki güç ihtiyacına

destek verecektir. Bu olayın bir sonucu da aşırı zorlanmalarla karşılaşmayan bataryaların ömrünün uzamasıdır.

Bazı koşullarda uzun süreli fakat yüksek güç ihtiyacı bulunmayan yüklerin gereksinimlerinin karşılanması gerekmektedir. Böyle bir olayda enerji depo etme ünitesi olarak yalnızca UK kullanmak yeterli düzeyde olmayacaktır. Düşük enerji yoğunluğu barındıran UK'ler uzun süreli yüklerin gereksinimlerini karşılamakta yetersiz olmaktadır. Bataryalar UK'lere kıyasla 110 kata varan daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptirler. Bu sebeple UK sisteminin yanında yüksek enerji yoğunluğu barındıran batarya sınıfının da eklenmesi uygun olacaktır (Burke, 2010).

Batarya enerji depo etme üniteleri pek çok alanda kullanılmaktadırlar. Fakat bu ünitelerin önemli iki dezavantajı vardır. Bunlardan bir tanesi sınırlı deşarj derinliği iken diğeri çevrim ömrü şeklinde isimlendirilen her bir çevrim esnasında azalış gösteren depo etme kapasitesidir. UK enerji depo etme sistemleri ise bu dezavantajlardan herhangi birine sahip değildir. Bununla beraber UK'li enerji depo etme üniteleri hızlı tepkiye sahiptir ve güçte yüksek seviyelere çıkabilirler. İlâveten UK'ler yüksek vibrasyona ve sıcaklığa da bataryalardan daha dayanıklıdırlar. UK'lerin önemli niteliklerinden biri de büyük güç değerlerini oldukça kısa bir sürede üzerine alabilmeleridir. UK'lerin kullanıldığı en büyük sahalardan bir tanesi de elektrikli araçlardır. Özellikle dünya üzerinde çığır açıcı özellikte yeraltı treni organizmalarında kullanılmaktadır. Halihazırda bilinen yeraltı treni enerji şebekelerinin ortadan kaldırılmasında UK'ler büyük görev üstlenmektedir. Durakta yolcu indirme-bindirme sırasında kendini şarj ederek bir sonraki durağa kadar rastgele bir havai hattan enerji alımı olmayan yeraltı treni organizmalarında gelişmiş ülkelerde kullanılmaya başlanmıştır. Bunun haricinde UK'lerin elektrikli araçlardaki bir başka uygulama sahasıysa avantajlı frenlemedir. Büyük kütlelere sahip araçların kısa sürede durduruluyor olması anlık olarak büyük güçlerin meydana gelmesi anlamındadır. Bataryalara birkaç saniye içerisinde bu yüksek enerji değerlerinin depo edilmesi imkan dışındadır. Fakat UK'ler yapıları bakımından bu enerjiyi depo edebilmektedirler. Bu sayede enerji üretiminde verimliliğe katkı sağlamaktadırlar (Kötz, 2010).

Bir hibrit enerji depo etme ünitesi meydana getirebilmek için, farklı özellikler ve teknolojik alt yapılara sahip iki depo etme sisteminin dönüştürücü yada doğrudan birimler ile bir araya getirilmesi yeterli olmaktadır. Depo etme teknolojileri birbirleri bakımından değişik özellikler göstermektedir.

Teknik açıdan incelendiğinde; kimyasal, manyetik, elektriksel ve kinetik olarak depo etme yetisine sahip yapılar bulunmaktadır. Ayrıca her bir depo etme ünitesi enerjisini elektriksel olacak şekilde farklı formlarda iletebilmektedir. Batarya, UK, manyetik enerji depolama birimleri ve hidrojenli yakıt pilleri elektriksel olarak doğru akım olarak depo ederken; pompalamalı su, volan depolama birimi ve sıkıştırılmış hava alternatif akım olarak enerjisini depo edebilmektedir. Kullanılacak ihtiyaç ve sisteme göre bu depo etme teknolojileri doğru akım ya da alternatif akım bir barada ihtiyaçsa güç dönüştürücüleri de uygulanarak birleştirilmektedir.

Bu çalışmada iyi bir performans sağlamak için batarya ve ultrakapasitör içeren bir hibrit enerji depolama sistemi gerçekleştirilmektedir. Batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminden faydalanarak hem batarya boyutları düşürülebilir hem de daha yüksek şarj durumu sağlanabilir. Ultrakapasitör bataryaya göre çok daha büyük güç yoğunluğuna sahip olduğundan daha kısa zaman periyodunda çok daha büyük güç desteği sağlayabilir. Buna karşın batarya daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ultrakapasitörle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji depolayabilir ve daha uzun süre enerji sağlayabilir. HEDS ile tepe güç ihtiyacı ultrakapasitörlerden karşılanır ve bataryalar daha uzun süreli/sürekli, daha düşük güç ihtiyacını karşılarlar.

### **3.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu**

#### **3.3.1. Optimizasyon nedir?**

Optimizasyon, bir problem için olabilecek çözümlerin arasından probleme en uygun çözümü belirlemek ile ilgilenen bir disiplin türüdür. En uygun çözüm yöntemi probleme ve problemi çözen kişiye göre bir ya da birden fazla kritere bağlı olacak şekilde belirlenir. Örneğin mühendislik problemlerinden yapısal olanlarının çözümü mühendislikteki temel özelliklere göre belirlenebileceği gibi yapıyı dizayn eden bireyin estetik zevkine göre de belirlenebilir. Kısıtlamalar problemin kendisine veya kullanan kişiye bağlıdır. Eğer gerçekleştirilen çözüm bütün kısıtlamaları karşılıyor ise bu optimal çözümdür. Optimizasyon problemlerinin çeşitli yapıları ve barındırdığı matematiksel karakteristikleri, devamlılık, dış bükeylik, nonlineerlik gibi ortak özellikleri bulunan özel problemlerin çözülmesinde uygulanacak algoritmaların oluşturulmasını ihtiyaç haline getirmiştir. Günümüzde, değişken problem çeşitlerinin çözülmesi için

oluşturulmuş olan algoritmalar halihazırda mevcuttur. Bununla birlikte problemin aynı tipi için farklı örneklerinde de uygulanmak üzere çeşitli, hesaplama teknikleri de geliştirilmiştir. Bu sebeple de optimizasyon teorisi ve optimizasyon uygulamaları için gelişmiş daha özel görüş ve tekniklere olan gereksinim devam etmektedir (Aranza, 2016).

### 3.3.1.1. Optimizasyon probleminin çeşitleri

Bir fonksiyon genel anlamda,  $F: A \rightarrow Y$  olarak tanımlanır. (A: Tanım kümesi, Y: Değer kümesi olmak üzere.) Literatürde pek çok optimizasyon probleminde, tanım kümesi..n- boyutlu Euclid uzayı,  $R_n$ ,..ve değer kümesi reel sayıların bir kümesini oluşturan fonksiyonların minimize edilmesini ihtiyaç kılar. Optimizasyon problemleri genel anlamda amaç. fonksiyonunun formuna göre çeşitlilik gösterir. Bunların en değerlileri aşağıda belirtildiği gibidir:

Lineer optimizasyonu: Kısıtlar ve amaç fonksiyonu doğrusal olduğunda.

Non-linear optimizasyonu: Optimizasyon probleminde. en az bir adet lineer olmayan fonksiyon olduğu koşulları irdeler.

Konveks optimizasyonu: Uygun küme ve amaç fonksiyonu konveks olduğu koşulları irdeler.

Kuadratik optimizasyonu: Amaç fonksiyonu kuadratik, kısıtlar doğrusal olduğu koşulları irdeler.

Stokastik optimizasyonu: Parametre ve kısıtların herhangi bir değişkene bağlı olduğu koşulları irdeler (Solihin, 2017).

### 3.2.2. Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu kökeninde topluluktaki bireylerin birbirlerini geliştirmesine uzanan bir algoritmadır. Bu algoritma sürü olarak hareket eden böceklerden ve balıklardan ilham alınarak Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından 1995 senesinde oluşturulmuştur. Sürü şeklinde hareket sağlayan hayvanların güvenlik ve gıda hayati gereksinimlerini giderirken herhangi yaptıkları bir hareketin, sürüdeki diğer canlıları etkilediğini ve sürünün hedefine daha kolay ulaşmalarını sağladığı gözlenmiştir. Her canlıya parçacık denilmektedir ve bu parçacıkların meydana getirdiği popülasyona da sürü denilmektedir (mühendisbeyinler.net, 2022).

Bu teknikte grup bulunan her bir bireyin hareketi, meydana gelen karmaşık yapıya karşın, genlerinde gizli olan basit bilgiye dayanmaktadır.

Örneğin bir kuş sürüsü uçuşu sırasında kuşlardan herbirinin anlık komşularına ve hedefe olan uzaklığını koruma davranışına göre basit bir biçimde, kabaca modellenebilir. Bu uzaklık sürülerin ebatına ve beklenen davranışın ne olduğuna göre değişmektedir. Örneğin; bir balık sürüsü risk altında değil iken balıklar aralarında fazla uzaklıklarda hareket ederken, balık sürüsü yırtıcı bir hayvan riskiyle karşı karşıya geldiğinde daha küçük bölüklere ayrılıp yapısını değiştirerek kendisini korumaya almaktadır.

Amaç sürüdeki konumu iyi olan parçacığın yer tespitinin yapılıp diğer parçacıkların da o tarafa hareket etmesinin sağlanmasıdır. Parçacıklar daha sonraki konumunu geçmişteki edindiği tecrübeler ve sürü içindeki en iyi konuma sahip bireye dayanarak iyileştirmeyi amaçlar.

Algoritma temel olarak aşağıdaki basamaklardan oluşur;

- Rastgele üretilen başlangıç pozisyonları ve hızları ile başlangıç sürüsü oluşturulur.
- Sürü içerisindeki tüm parçacıkların uygunluk değerleri hesaplanır.
- Her bir parçacık için mevcut jenerasyondan yerel en iyi (pbest) bulunur. Sürü içerisinde en iyilerin sayısı parçacık sayısı kadardır.
- Mevcut jenerasyondaki yerel eniyiler içerisinde küresel en iyi (gbest) seçilir.

### 3.2.2.1. Kullanıldığı yerler

Bu optimizasyon yöntemi Eberhart ve Kennedy'nin ardından pek çok optimizasyon probleminin çözümlenmesinde de kullanılmıştır. Bunlardan bazıları; atış problemleri, lineer ve lineer olmayan problemlerin çözülmesi, endüstriyel problemlerin çözülmesi ve çok bilinmeyenli denklemlerin köklerinin bulunmasıdır (Aranza, 2016).

Performans bakımından gözlemlendiğinde diğer optimizasyon yöntemlerine göre daha avantajlıdır.

Yaptığımız bu çalışmada da PID kontrolörün optimum kazanç değişkenlerinin saptanması için PSO algoritmasıyla seçilmiştir. Bu konular ile ilişkili yapılmış olan çalışmalardan birkaçı aşağıda verilmiştir.

Shi ve Eberhart 1998 yılında ilk kez “sabit eylemsizlik ağırlığı” getirerek eylemsizlik ağırlığı görüşünü tanıttılar (Shi ve Eberhart, 1998). Eylemsizlik ağırlığı,

yerel ve global arama süreci arasındaki dengeyi kurabilmek için en önemli değişkendir. Global arama sürecini büyük eylemsizlik ağırlığı iyileştirirken, yerel arama sürecini ise küçük eylemsizlik ağırlığı iyileştirir. Eberhart ve Shi, 2002 yılında PSO'nun verimliliğinde artış sağlamak amacı ile gelişigüzel bir eylemsizlik ağırlığı stratejisini öne sürdüler (Eberhart ve Shi, 2002). 2009 yılında Xin ve diğerleri ise PSO ile eylemsizlik ağırlığının doğrusal olarak azaltılmasının stratejisini öne sürdüler (Xin, 2009). Araştırmacılardan bazıları, parametre seçiminde uygun parametre seçiminin güçlüğüne aşmak amacı ile adaptif parçacık sürüsü optimizasyonunu öne sürmüşlerdir (Arumugam ve Rao, 2006). 6 2006 yılında Junfeng Chen ve diğerlerinin yaptığı çalışmada PID kontrolör değişkenlerini ayarlayabilmek için adaptif PSO algoritması kullanmışlardır (Chen ve ark, 2006). Yine 2006 yılında Tamer ve Karakuzu tarafından gerçekleştirilen çalışmada “parçacık sürüsü optimizasyonu” ve “benzetim örnekleri” görüşülmüştür (Tamer ve Karakuzu, 2006). Belgin tarafından 2007 yılında yapılan çalışmada PSO algoritması ve sezgisel diğer yaklaşımlar üzerine bir çok bilgi sunmuştur (Belgin, 2007). Allaoua ve diğerleri tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada DA motor hız kontrolünü yapmak amacıyla kullanılan PID değişkenlerini bulmak için PSO algoritmasını uygulamışlardır (Allaoua ve ark, 2009). 2010 yılında Gözde ve diğerlerinin yaptığı çalışmada iki bölgeye sahip ara ısıtılmalı termal güç sisteminde yük-frekans denetimi için kullanılmış olan PI kontrolör değişkenlerini bulmak amacıyla PSO algoritmasını uygulamışlardır (Gözde ve ark, 2010). 2011 yılında ise Özyön ve diğerleri PSO algoritmasını termik birimlerden meydana gelen çevresel ekonomik güç dağıtım sorunlarına uygulamışlardır (Özyön ve ark, 2011).

### 3.3. Yöntem

Akıllı Şebekeler İçin Ultrakapasitör Entegreli Batarya Yönetim Sistemi gerçekleştirebilmek için batarya, ultrakapasitör, DA/DA dönüştürücü, elektronik devre elemanları kullanılmış ve simülasyon çalışması Matlab Simulink programında yapılmıştır. Geliştirilmiş olan akıllı enerji yönetim algoritması ile batarya grubunun şarj ve deşarj olurken akım ve gerilim kontrolü yapılmıştır. Batarya benzetiminde Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan batarya modeli kullanılmıştır. Bu model, çeşitli batarya tiplerini gerilimini, kapasitesini ve batarya doluluk durum (state of charge SOC) parametrelerini girerek benzetimini gerçekleştirmektedir. Ultrakapasitör benzetiminde de aynı şekilde Matlab/Simulink kütüphanesinde bulunan Ultrakapasitör

modeli kullanılmıştır. Bu model ultrakapasitörün nominal kapasitansını, eşdeğer DA seri iç direncini, nominal ve başlangıç gerilimini, sızıntı akımını, çalışma sıcaklığı ve seri-paralel kapasite gibi parametreleri girerek benzetimi gerçekleştirmektedir. Simülasyon çalışması yapılacak olan enerji depolama sistemi modelinde ultrakapasitör ve batarya hibrit çalışmıştır. Anlık yüksek güç gerektiren durumlarda güç yoğunluğu yüksek olan ultrakapasitör devreye girmiş, uzun süreli ancak yüksek güç gerektirmeyen durumlarda enerji yoğunluğu yüksek olan batarya devreye girmiştir. Ultrakapasitör ve bataryadan oluşan hibrit enerji depolama sisteminden faydalanarak hem batarya boyutları düşürülebilmesi hem de yüksek şarj durumu sağlanabilmesi hedeflenmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada ultrakapasitör ve bataryadan oluşan bir Hibrit Elektrik Depolama Sistemi oluşturulması amaçlanmıştır. Oluşturulan bu sistem ile batarya boyutlarının küçültülmesi ve batarya ömrünün artırılması hedeflenmiştir.

Matlab/Simulink ortamında simülasyonu yapılan çalışma batarya grubu, ultrakapasitör grubu, evirici ve filtre, DC/DC dönüştürücü, aktif doğrultucu, şebeke ve yüklerden oluşturulmuştur. Çeşitli senaryolar ile test edilen sistem oldukça olumlu yanıtlar vermiştir. Bataryanın şarj-deşarj durumu, yüklerin artıp azalması gibi farklı farklı senaryolar uygulanmış tüm senaryoların sonuçları gözlenmiş ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak bir optimizasyon yönteminden de yararlanılmıştır. Sistemin istendiği gibi çalışması için evirici ve dc/dc dönüştürücü devrelerinin bobin ve kapasitör değerleri ve kontrol sisteminde PID katsayıları özel bir optimizasyon yöntemi ile (parçacık sürü optimizasyonu) simülasyon 3000 kez tekrar tekrar çalıştırılarak elde edilmiştir.

Sistemin algoritma yapısı ve kullanılan modellemeler aşağıda detaylıca açıklanmıştır.

### 4.1. Sistemin Algoritması ve Modellemeleri

#### 4.1.1. Algoritma yapısı

“Batarya/Ultrakapasitör Depolama Sistemi” geleneksel batarya ile depolama sistemlerinde anlık yük artışlarının akıma duyarlı olan bataryaya zarar vermesini engellemek üzere tasarlanmıştır. Bu hedefi yerine getirmek için bataryaya paralel olarak başka bir enerji depolama çeşidi olan ultrakapasitör bağlanır. Ultrakapasitör, herhangi bir zarar almadan kendilerinden çok yüksek akımlar çekilmesini mümkün kılarlar fakat dezavantajları da bataryalara oranla çok daha düşük depolama kapasitesine sahip olmalarıdır. Bu amaçla bataryalı enerji depolama sistemlerine paralel olarak bağlanırlar.

Bu projede de bir simülasyon yazılımı olan MATLAB/Simulink üzerinde birer yeniden şarj edilebilir batarya ve ultrakapasitör oluşan enerji depolama sistemi kurularak sistemin farklı senaryolarda nasıl reaksiyon gösterdiği gözlemlenmiştir.

İlk olarak projenin mümkün olduğunca gerçekçi koşullara göre hazırlanması amaçlanmıştır. Devre elemanlarına pratikte mümkün değerler verilmiştir. Benzetimi

yapılan senaryolar da – kurulan sisteme sadık kalmak şartıyla – gerçekçi tutulmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda simülasyon mümkün olduğunca anlaşılabilir ve parametreleri gözlemlenebilir şekilde hazırlanmıştır.

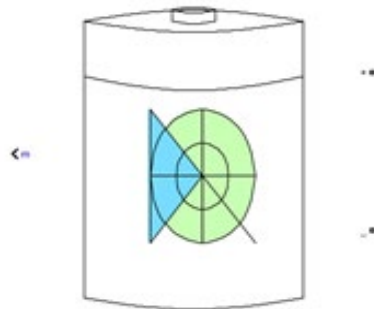
Projede hedeflenen yapı aşağıdaki maddelerde sıralanmıştır;

- Simülasyonda birbirine paralel olarak ultrakapasitör ve batarya çifti bulunacaktır.
- Bu enerji depolama elemanları ortak bir baraya “çift yönlü DC/DC dönüştürücüler” ile bağlanacaktır.
- Baradan geçen doğru akım bir evirici aracılığı ile üç faz alternatif akıma dönüştürülecektir.
- Dönüştürülen bu güç kademeli olarak artan yükleri besleyecektir.
- Şebekeyi temsil eden sonsuz güçlü bir üç faz kaynak da sisteme paralel olarak bağlanacaktır. Bu kaynak ile istendiğinde hem yük hem de depolama sistemi beslenecektir.

#### 4.1.2. Kullanılan blok yapıları

İlk olarak simülasyonda kullanılmak üzere gerekli elemanları belirlenmiştir;

##### 4.1.2.1. Batarya

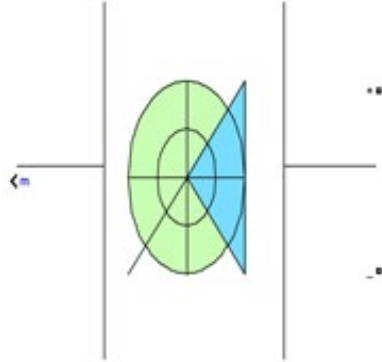


Şekil 4.1. Batarya Modeli

Batarya olarak Simulink yazılımı ile hazır gelen “Battery” bloğu kullanılmıştır. Bu blokta gerilim, kapasite, batarya tipi, başlangıç yükü parametreleri değiştirilebilmektedir.

$V_{\text{nominal}} = 480\text{V}$     Kapasite = 100Ah    Tip = Li-Ion     $I_{\text{nominal}} = 43\text{A}$

#### 4.1.2.1. Ultrakapasitör



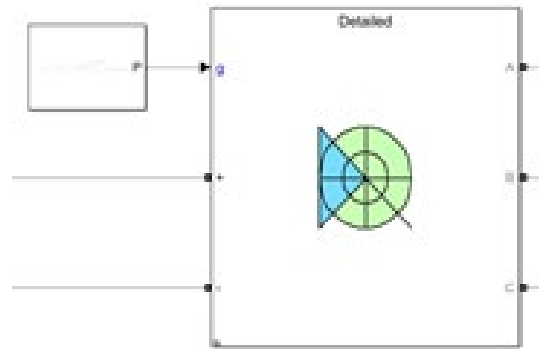
Şekil 4.2. Ultrakapasitör Modeli

Ultrakapasitör olarak da Simulink'te hazır bulunan "Supercapacitor" bloğu kullanılmıştır. Bu blokta da ultrakapasitör anma gerilimi ve kapasitansı değiştirilebilmektedir.

$V_{\text{anma}} = 400\text{V}$

Kapasitans = 100F

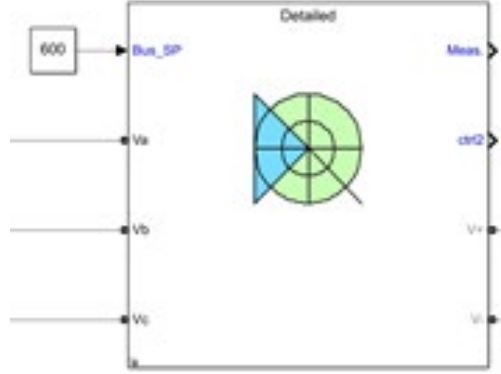
#### 4.1.2.2. Evirici



Şekil 4.3. Evirici Modellemesi

Üç faz evirici devresini temsil etmesi için kullanılan “Three-Phase Inverter” bloğu, 6 adet anahtarlama devre elemanı ile bir eviriciyi simüle eder. Anahtarlama elemanı olarak IGBT’ler kullanılmıştır. Bloğun “g” portundan 13,5 kHz frekansla PWM sinyali gönderilir. Çıktıdan da iki seviyeli evrilmiş sinyal elde edilir.

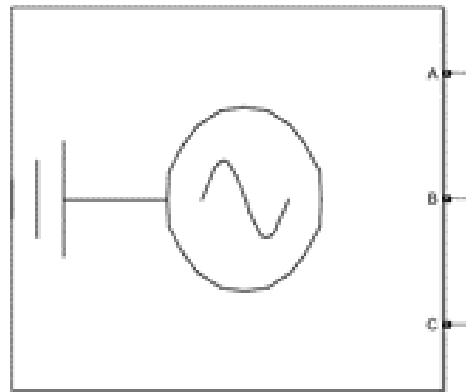
#### 4.1.2.3. Aktif doğrultucu



Şekil 4.3. Aktif doğrultucu modeli

Şebekeden gelen AC güç ile Batarya-SC sistemini şarj etmek üzere bir de eviriciye paralel doğrultucu bağlanmıştır. Geleneksel tam dalga doğrultucular yerine yine PWM sinyali ile aktif doğrultma yapan “Active Rectifier” bloğu kullanılmıştır. Bloкта gerilim regülasyonu için “PI” değerleri, anahtarlama elemanı ve frekans gibi parametreler değiştirilebilmektedir. Aynı zamanda “Bus\_SP” portundan da referans DC geriliminin değeri girilmektedir.

#### 4.1.2.4. Üç faz güç kaynağı



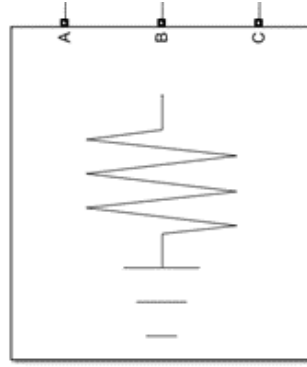
Şekil 4.4. Üç faz güç kaynağı modeli

Şebekeyi temsil etmek üzere “Three-Phase Source” bloğu kullanılmıştır. Kaynağın iç empedansı, gerilimi, frekansı ve faz açısı belirlenebilmektedir. Bu proje için Türkiye standartları örnek alınmıştır.

$$V_{L-L (RMS)} = 381V$$

$$\text{Frekans} = 50 \text{ Hz}$$

#### 4.1.2.5.Üç faz yük



Şekil 4.5. Üç faz yük modellemesi

Son olarak yükü temsil etmesi için de “Three Phase Series RLC Load” bloğu kullanılmıştır. Bloktan üç adet farklı seviyelerde belirlenen yükler paralel olarak bağlanmıştır. Reaktif yük kısmı da değiştirilebilmektedir. Bu projede yalnızca Aktif yük kullanılmıştır.

$$\text{Yük}_1 = 12 \text{ kW}$$

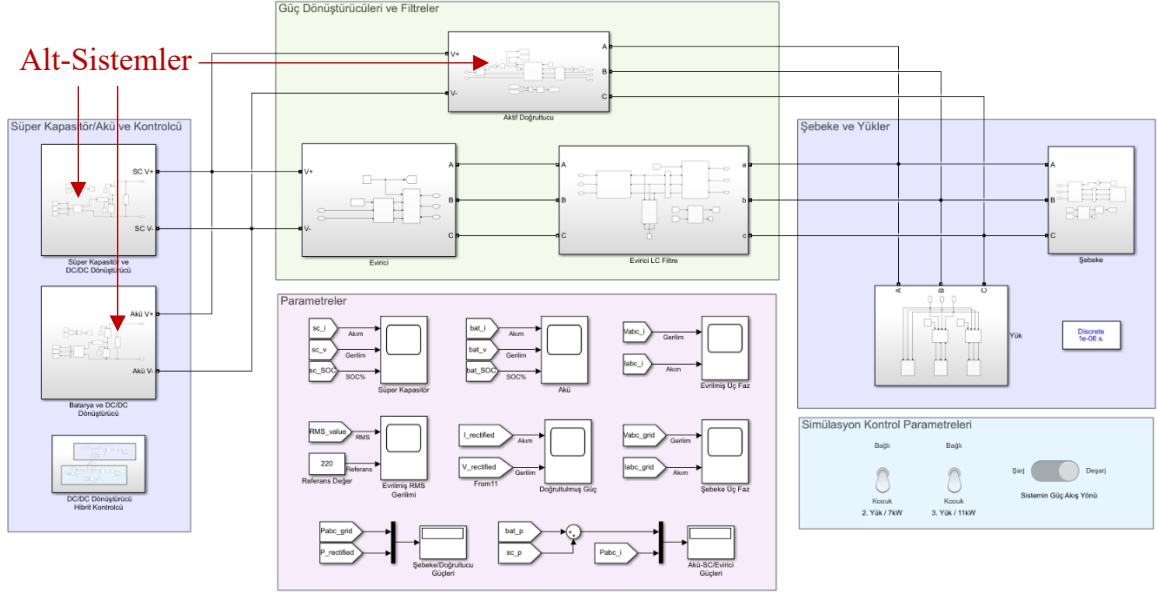
$$\text{Yük}_2 = 7 \text{ kW}$$

$$\text{Yük}_3 = 11 \text{ kW}$$

Batarya 480V ve 100Ah değerleriyle, tek başına en fazla 20kW’lık yükü besleyebilmektedir. 20kW’ı aşan yükler devreye girdiğinde batarya yetersiz kaldığı için ultrakapasitör güç aktarmaya başlamaktadır. Bu yüzden değerler bataryanın en fazla besleyebildiği güce göre farklı senaryolar oluşturmak için bu şekilde belirlenmiştir.

### 4.1.3. Sistem Modellemeleri

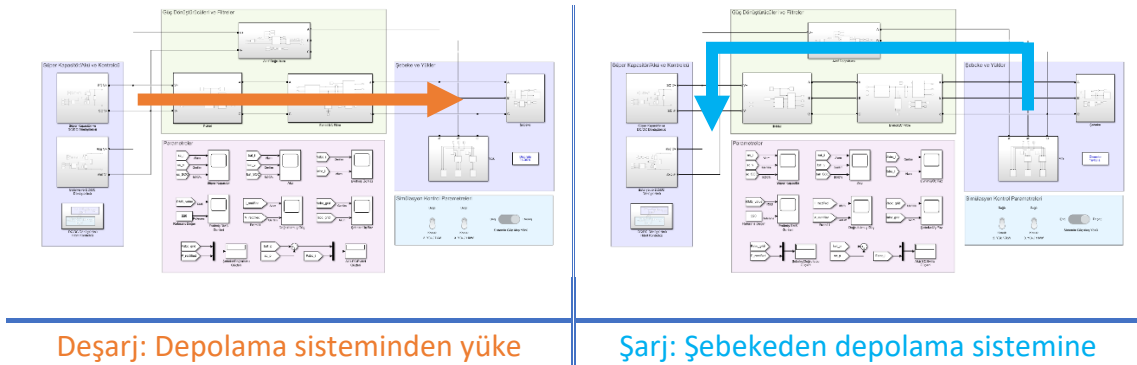
Simülasyonun tamamlanmış haliyle birlikte genel modeli aşağıdaki gibidir;



Şekil 4.6. Simülasyon Modeli: Genel Görünüm

Simülasyonun sol tarafında batarya ve ultrakapasitör den oluşan depolama sistemi, ortada güç dönüştürücüleri, sağda ise şebeke ve yükler bulunmaktadır. Aşağıda ise görüntüleme ve kontrol için kullanılan görüntüleyiciler ve anahtarlar bulunmaktadır.

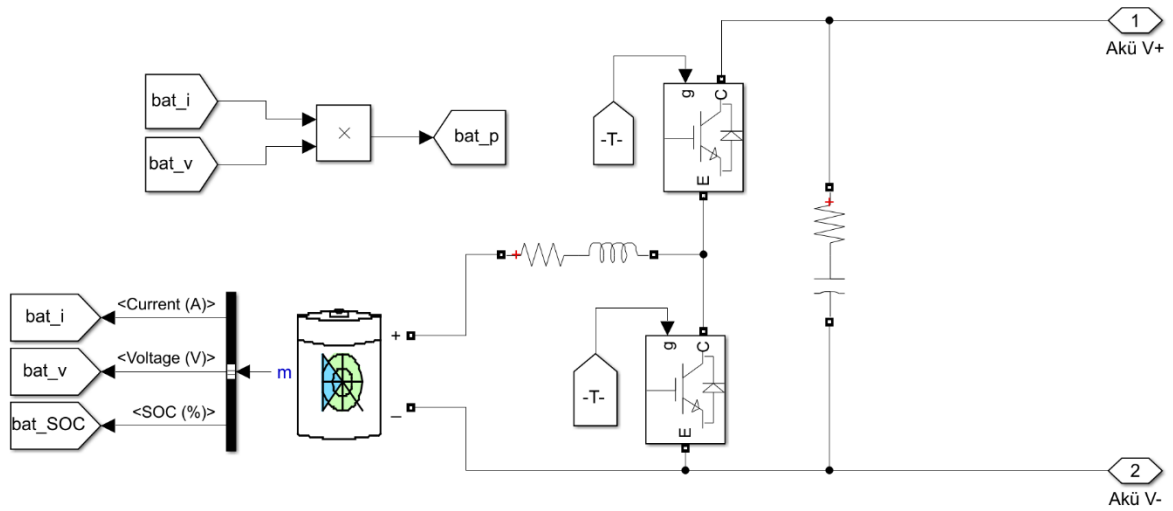
Sistem, deşarj ve şarj olmak üzere iki modda çalışmaktadır. Deşarj modunda güç akışı depolama sisteminden yüklere doğru olur iken; şarj modunda şebekeden hem yüke hem de depolama sistemine olmaktadır. Simülasyonda bu yapıyı elde edebilmek için çeşitli yerlere birbirlerine zıt koşullarda açılıp kapanan kesiciler yerleştirilmiştir. Sonra bu kesicilerin durumunu belirleyen değişken, bir anahtara atanmıştır.



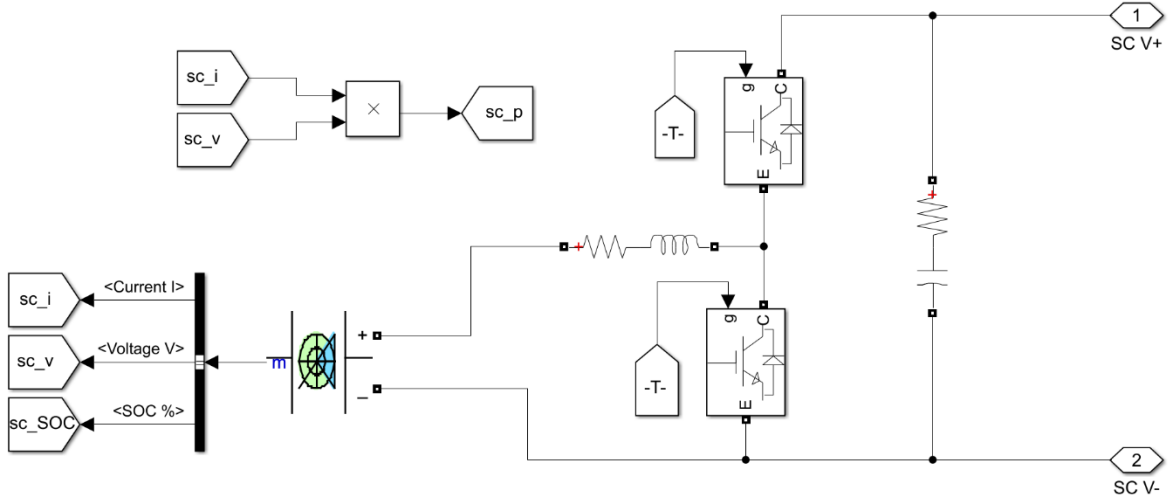
Şekil 4.7 Sistem güç akışı

### 4.1.3.1. Depolama sistemi modeli

Depolama sisteminin tasarımı depolama elemanı ve çift yönlü DC/DC dönüştürücüden oluşmaktadır.



Şekil 4.8. Simülasyon Modeli: Batarya

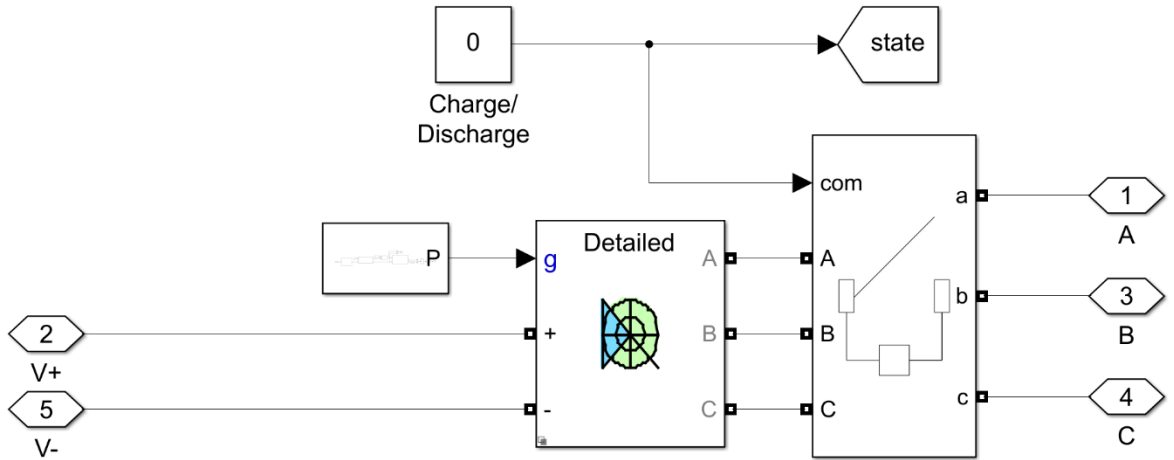


Şekil 4.9. Simülasyon Modeli: Ultrakapasitör

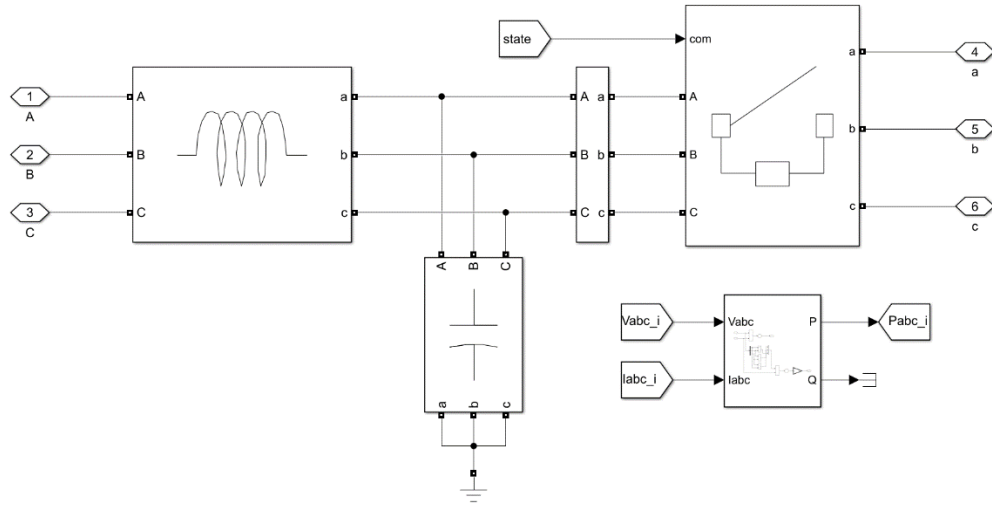
Yukarıdaki şekillerden de görüleceği üzere geleneksel bir dönüştürücüye bağlı batarya ve ultrakapasitör ile bir ortak baraya bağlantı kurulmaktadır. Aynı zamanda depolama elemanlarından gerilim, akım ve kapasite bilgisi elde edilmektedir. Verim hesaplaması için de gerilim ve akım toplam üretilen gücü elde etmek üzere çarpılıp “bat\_p” ve “sc\_p” bloklarına atanacak şekilde ayarlanmıştır.

### Evirici ve Filtre Modeli

Evirici, kesici ve PWM bloğu bir alt-sisteme, Filtre için kullanılan bobin ve kapasitör bloğu başka bir alt-sisteme atanmıştır;



Şekil 1.10. Simülasyon Modeli: Evirici

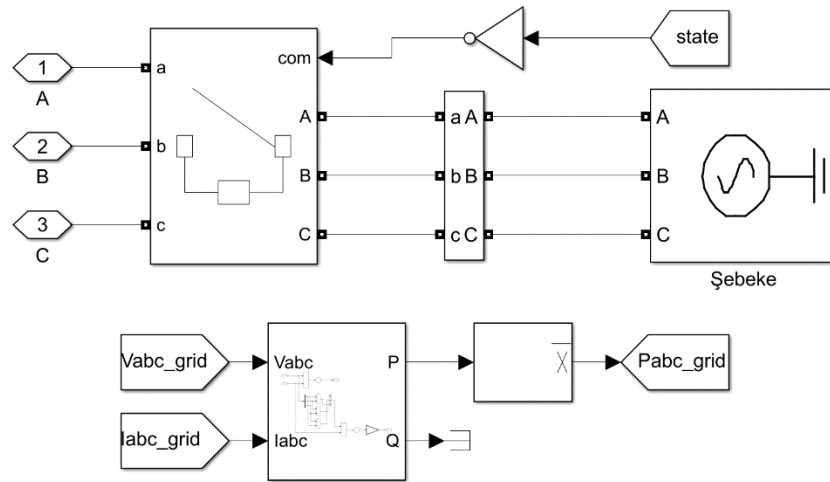


Şekil 4.11. Simülasyon Modeli: Evirici Filtresi

Evirici “g” girdisinden PWM verisini almaktadır. Kendi içerisinde IGBT olarak belirlenen anahtarlama elemanlarına PWM sinyalini ileterek iki seviyeli üç faz DC/AC evirme işlemi yapmaktadır. Modelin üstünde bulunan “Charge/Discharge” bloğu, sistemin yönünü kesiciler ile belirlemeyi sağlayan değişken bloğudur. Değişken değeri bir anahtara bağlanarak sistemin yönünü belirlemek mümkün kılınmıştır. Sistem, değişken “1” değerinde iken deşarj, “0” değerinde iken ise şarj modunda çalışır.

Filtre ise sinüzoidal bir yapıda olmayan evrilmiş gerilim ve akımı sinüzoidal yapıya çevirmek için kullanılır. Geleneksel sistemlerde üç çeşit filtre bulunmaktadır, “L – LC – LCL”. Bu sistemde LC filtre yeterince düzgün bir sinüzoidal çıktı verebildiği için tercih edilmiştir. Bobin ve kapasitörün değerleri ise önce hesaplanıp ardından deneme yanılma ile en düzgün çıktıyı veren değerlere getirilmiştir.

## Şebeke

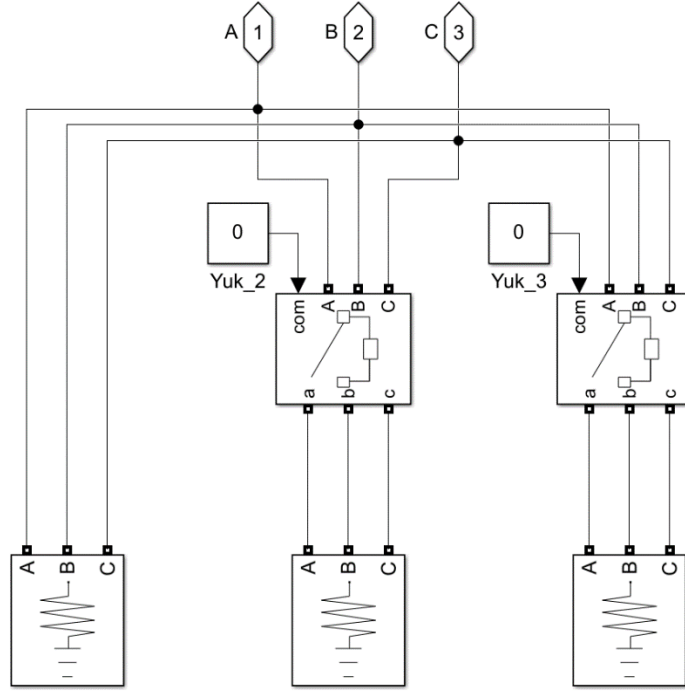


Şekil 4.12. Simülasyon Modeli: Şebeke

Şebeke alt-sisteminde ise şebekeyi temsil eden üç faz kaynağı, gerilim-akım ölçüm bloğu, kesici ve güç hesaplama bloğu bulunmaktadır. Ölçüm bloğundan çıkan “Vabc\_grid” ve “Iabc\_grid” değerleri güç hesaplayıcı üzerinden hesaplanıp anlık gücün ortalaması alınarak “Pabc\_grid” bloğuna atanmaktadır. Ortalama alınmasının sebebi, anlık değer sürekli değişkenlik göstermesinin okunabilirliği azaltmasından dolayıdır.

## Yükler

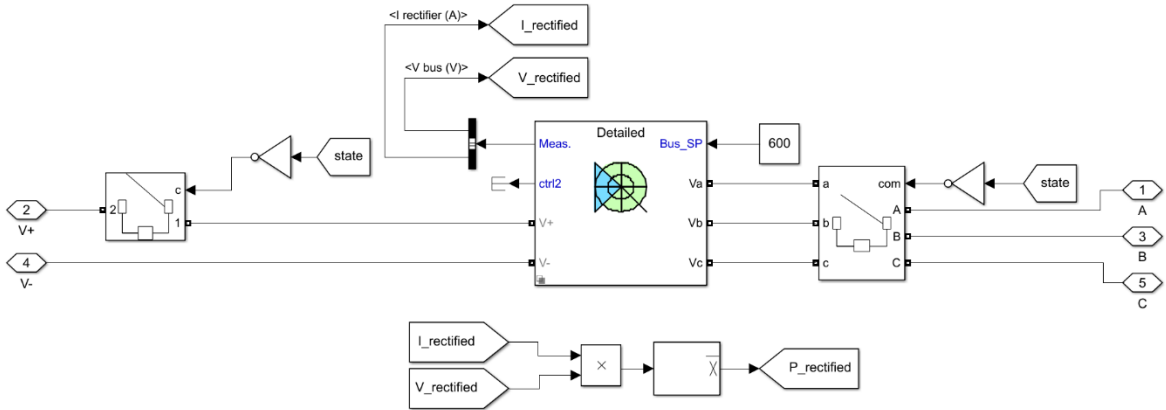
Yük alt-sistemi üç ayrı yükten oluşur;



Şekil 4.13. Simülasyon Modeli – Yükler

Yükler, sadece ilki sürekli sistemde bulunacağı için bir kesiciye bağlanmamış şekilde ortak baraya çıkarlar. İkinci ve üçüncü yük, sisteme bağlanmadan önce bağımsız kesicilere bağlanmışlardır. Bu kesicileri açıp kapatan değişken blokları ise anahtarlara bağlanmıştır. Bu sayede istendiğinde istenen yük direkt olarak devreye sokulabilmektedir.

## Aktif Doğrultucu

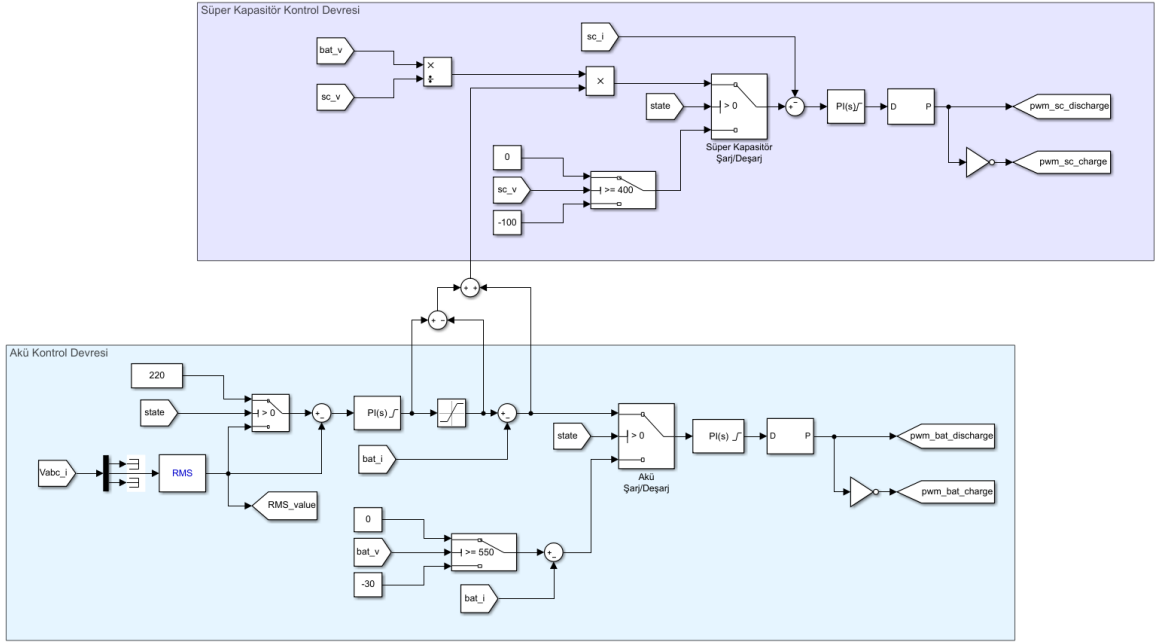


Şekil 4.14. Simülasyon Modeli: Aktif Doğrultucu

Aktif doğrultucu ise “Bus\_SP” adında bir referans DC gerilim girilen değişkenin dışında “Measurement ve Control” adında iki adet durum sinyali çıkarmaktadır. Böylece doğrultulmuş gerilim ve akım değerlerine ulaşılmıştır. Değişkenler hemen bloklara atanmıştır. Ayrıca doğrultucudan çıkan gücü test etmek için de gerilim ve akımın çarpımı hesaplanmıştır. Bunun haricinde biri üç faz diğeri tek faz kesiciler bulunmaktadır.

## DC/DC Dönüştürücü Kontrolcüsü

Batarya ve ultrakapasitörün baraya giden ve baradan gelen gerilim değerlerinin belirlendiği DC/DC dönüştürücülerin kontrol devresi;

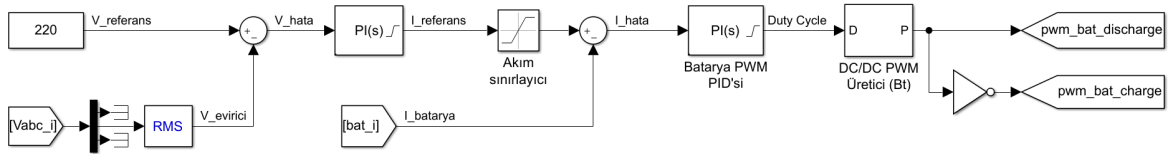


Şekil 4.15. Simülasyon Modeli: Kontrolcü

Simülasyonun en karmaşık alt-sistemi olarak yorumlanabilecek olan kontrolcü devresi, DC/DC dönüştürücülerin anahtarlama elemanlarına, istenen çıkış gerilimini ve akımını elde etmek üzere, PWM sinyali göndermek üzere tasarlanmıştır.

Modelin aşağı kısmı batarya dönüştürücüsünü sürer iken yukarı kısım da ultrakapasitörün dönüştürücüsünü sürmektedir. Ultrakapasitör bataryanın akım değerine göre güç aktardığı için sistemler birbirlerine de bağlıdır. Kontrolcü alt-sistemi parçalara ayrılarak anlatılacak olursa;

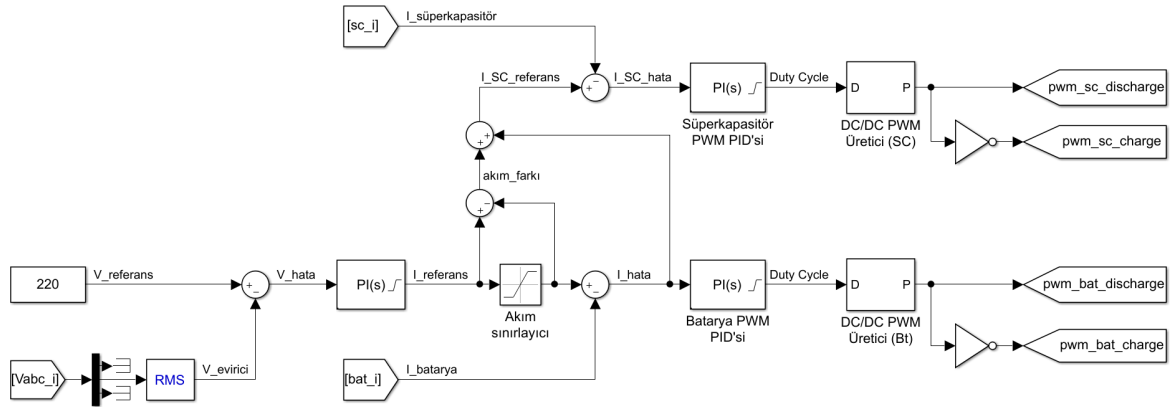
**Temel devre yapısı:** Kontrolcü temelinde iki adet PID kontrolcüsünden oluşmaktadır;



Şekil 4.16. Örnek Batarya Kontrolcü Devresi

Eviriciden çıkan AC gerilimin RMS'i hesaplanarak Türkiye standardı olan  $220V_{RMS}$  referans değeri ile farkı hesaplanır. Bu değer sonra PID kontrolcüsünden geçerek bataryanın harcaması gereken referans akım değerini gönderir. Batarya akıma duyarlı olduğu için referans sinyal bir akım sınırlayıcıdan geçer ve bataryadan çıkan akım değeri ile farkı hesaplanır. Bu fark da ikinci PID kontrolcüsünden geçerek PWM sinyalinin üreteceği referans oranı gösterir. Buna göre PWM sinyali üretilir.

**Ultrakapasitör ile temel devre yapısı:** Bataryanın yüke yeteri kadar akım gönderemediği veya yeterince hızlı cevap veremediği durumlarda ultrakapasitör devreye girecek şekilde ek bir kontrol devresi temel devreye dahil edilir;



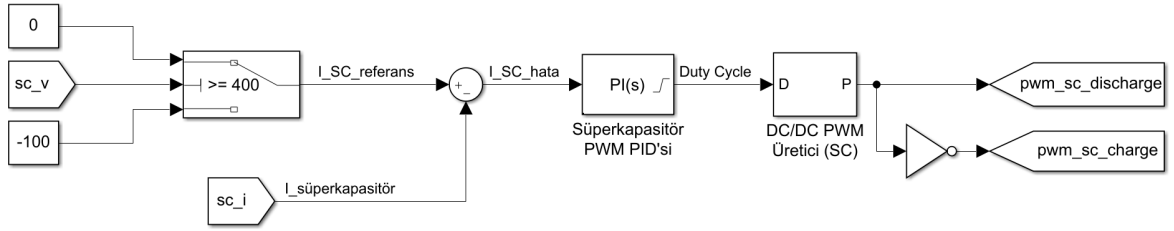
Şekil 4.17. Örnek Batarya/SC Kontrolcü Devresi

Yukarıdaki örnek sistemde görüldüğü üzere temel sistemden farklı olarak ultrakapasitör devresi yalnızca bir PID üzerinden sürülmektedir. Bunun sebebi, bataryanın evirici gerilimini referans alırken, ultrakapasitörün ise sadece batarya akımını referans almasındandır.

Ultrakapasitör, bataryanın " $(I_{referans} - I_{sınır}) + I_{hata}$ " değerini kendisine referans akım değeri olarak alır. " $I_{referans} - I_{sınır}$ " bataryanın yetişemediği akımı, " $+ I_{hata}$ " ise bataryanın referans akım ile olan farkını gösterir. Bu iki akım değerinin toplamı ultrakapasitörün sisteme aktarması gereken "ek" akımı tanımlar.

Ayrıca referans akımı güçlendirmek için ayrıca oransal çarpımlar da yapılabilir. Bu simülasyonda ultrakapasitörün sisteme ilettiği akımı biraz daha artırmak için " $\frac{V_{bat}}{V_{SC}}$ " oranı ile referans akım değeri çarpılmıştır.

**Şarj için temel devre yapısı:** Şarj sırasında ise enerji depolama elemanlarına, belli bir gerilim değerine ulaşılan kadar, sabit akım iletmek üzere şarj kontrol devresi tasarlanmıştır;



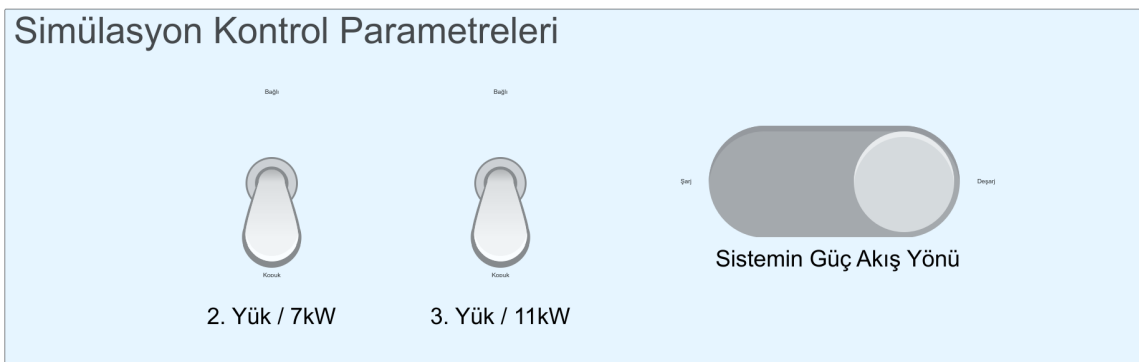
Şekil 4.18. Örnek Şarj Kontrol Devresi

Bu devre yapısı, geleneksel şarj kontrol devrelerinden farklı olsa da bu proje için yeterli bir kontrol sağlamaktadır. Yukarıdaki örnekte görüldüğü üzere referans akım değeri “koşullu anahtar”a bağlanmıştır. Ultrakapasitör gerilimi 400V’a ulaşana kadar referans akım  $-100A$ ’e sabitlenmiştir. Ultrakapasitör gerilimi 400V’u geçtiğinde ise referans akım 0A olacaktır. Yani herhangi bir besleme gerçekleşmeyecektir. Aynı yapı batarya sistemi için de 550V’tan uygulanmıştır.

Parça parça anlatıldığı üzere özetle: kontrolcü devresi deşarj modunda iken, bataryadan evirici gerilimi  $220V_{RMS}$ ’e ulaşana kadar gerekli gücü çekmektedir. Batarya gerekli akımı veremediği zaman ise ultrakapasitör eksik kalan gücü iletmeye başlanmaktadır. Şarj durumunda ise depolama birimleri maksimum gerilime ulaşana kadar sistemden sabit akım çekmektedirler.

### Sistem Kontrol Anahtarları

Sistemin güç akış yönünü ve yüklerin devreye girip girmemesini kontrol etmek üzere basit anahtar blokları simülasyona eklenmiştir;

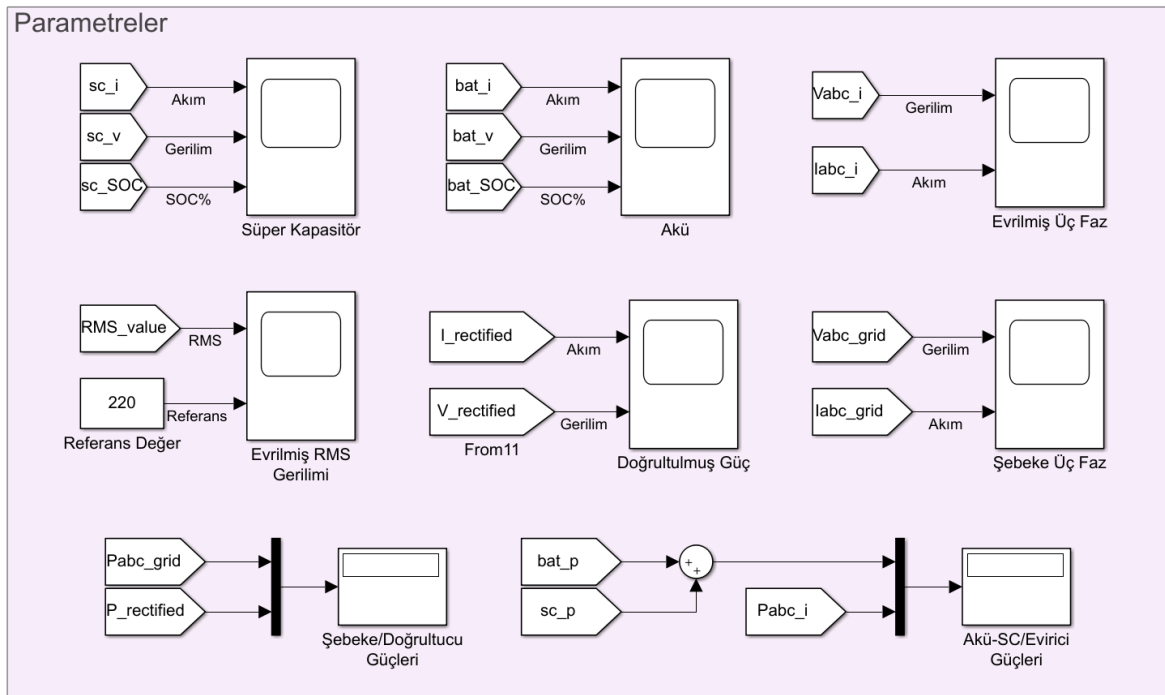


Şekil 4.19. Simülasyon Modeli: Kontrol Anahtarları

Güç akış anahtarı sağda iken deşarj, solda iken şarj modunu temsil etmektedir. Aynı zamanda ikinci ve üçüncü yükün kesicileri de soldaki anahtarlara bağlanmıştır. Anahtarlar yukarıda iken yükler sisteme bağlı, aşağıda iken kopuk durumdadırlar.

## Gözlem Blokları

Son olarak sistem parametrelerini kontrol etmek ve çıkarımlarda bulunmak üzere gözlem blokları eklenmiştir;



Şekil 4.20. Simülasyon Modeli: Gözlem Blokları

## 4.2. Simülasyon Senaryoları

Sistemin farklı koşullar altında nasıl çalıştığını, depolama sisteminin çeşitli durumlarda nasıl reaksiyon gösterdiğini tespit etmek üzere farklı senaryolar geliştirilmiştir;

### 1. Deşarj Modunda;

- 1.1. Sistem sabit yükte iken (Bataryanın maksimum gücünün altında ve üstünde)
- 1.2. Sistem sürekli artan yüke maruz kalacak şekilde
- 1.3. Sistem önce artıp sonra azalan yüke maruz kalacak şekilde

## 2. Şarj Modunda;

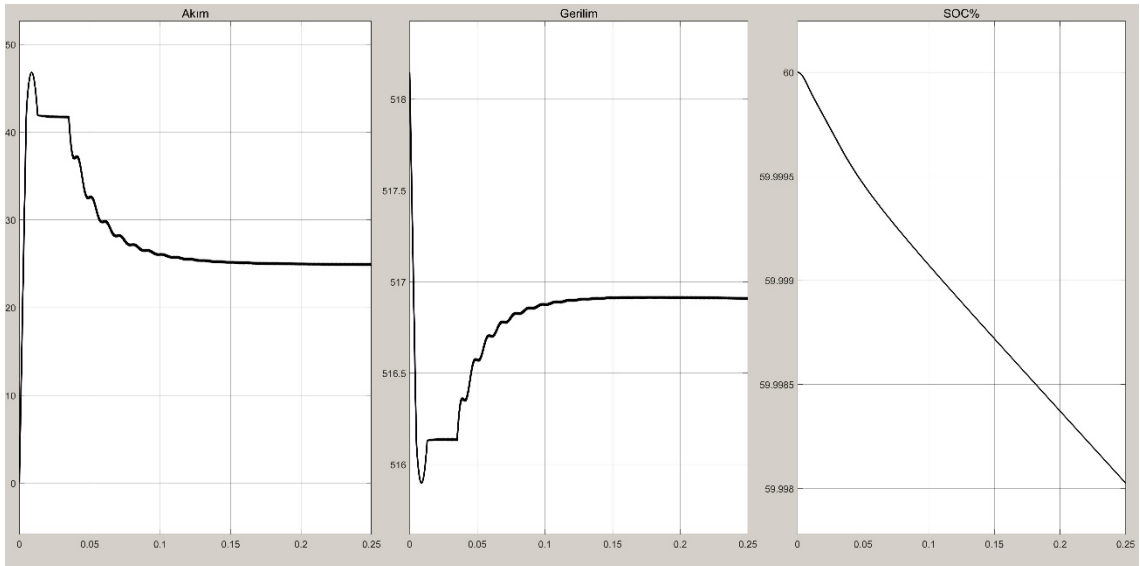
2.1. Depolama sistemi sabit bir şekilde şarj olurken

2.2. Depolama sistemi şarj olurken, sabit yükte deşarj moduna geçildiğinde

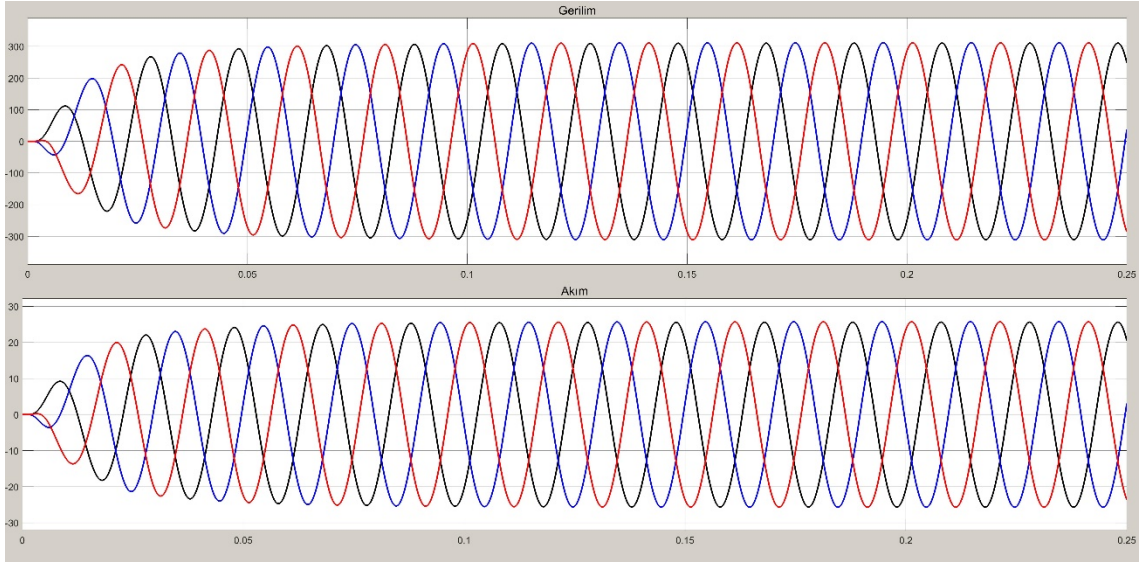
### 4.2.1. Deşarj modunda

#### 4.2.1.1. Sistem sabit yükte iken

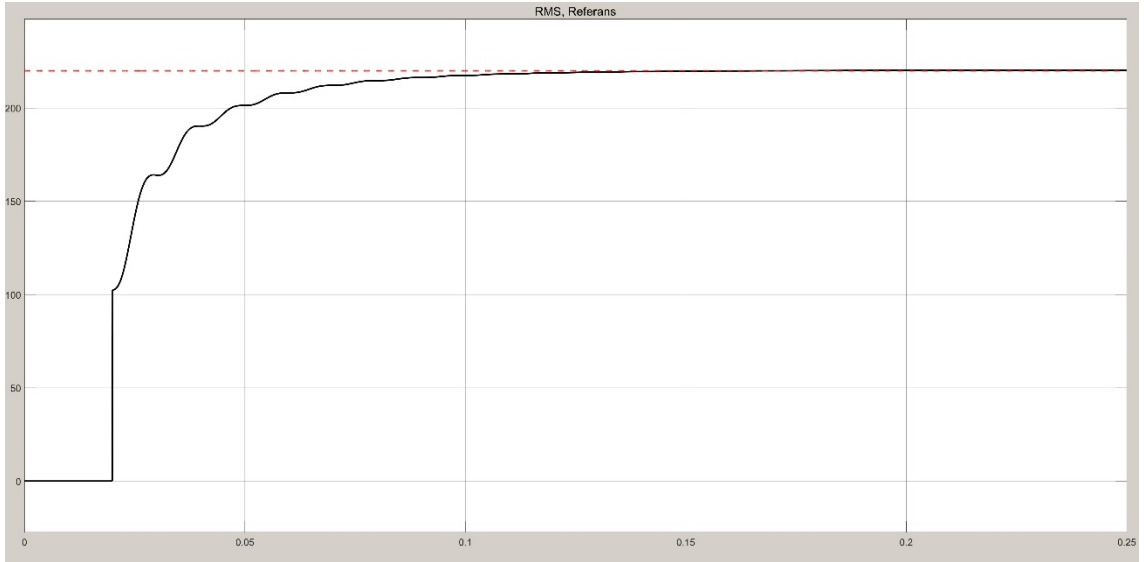
Simülasyon süresi 0.25 saniye ve sistemde yük değeri sabit 12kW iken; Maksimum batarya akımı 45A, maksimum ultrakapasitör akımı 255A değerleri elde edilmiştir. Sistem toparlanma süresi oldukça kısa bir şekilde 0.1s sürede gerçekleşmiştir. Evirici çıkışından tam sinüzoidal dalga elde edilmiş herhangi bir harmonik oluşumu gözlemlenmemiştir. Ultrakapasitör batarya grubuna, başlangıçta pasif devre elemanlarını beslemek için destek olmuş durumdadır.



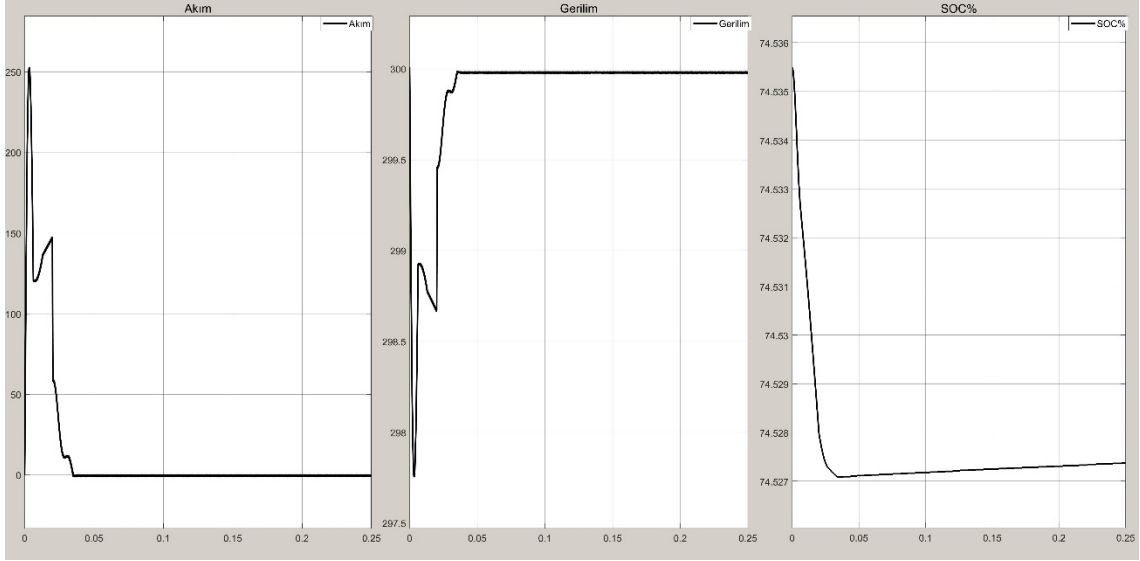
Şekil 4.21. Sabit Yükte Batarya Akım Gerilim ve SOC Değerleri



Şekil 4. 22. Evirici Çıkışı



Şekil 4.23. Sabit Yük RMS Değeri



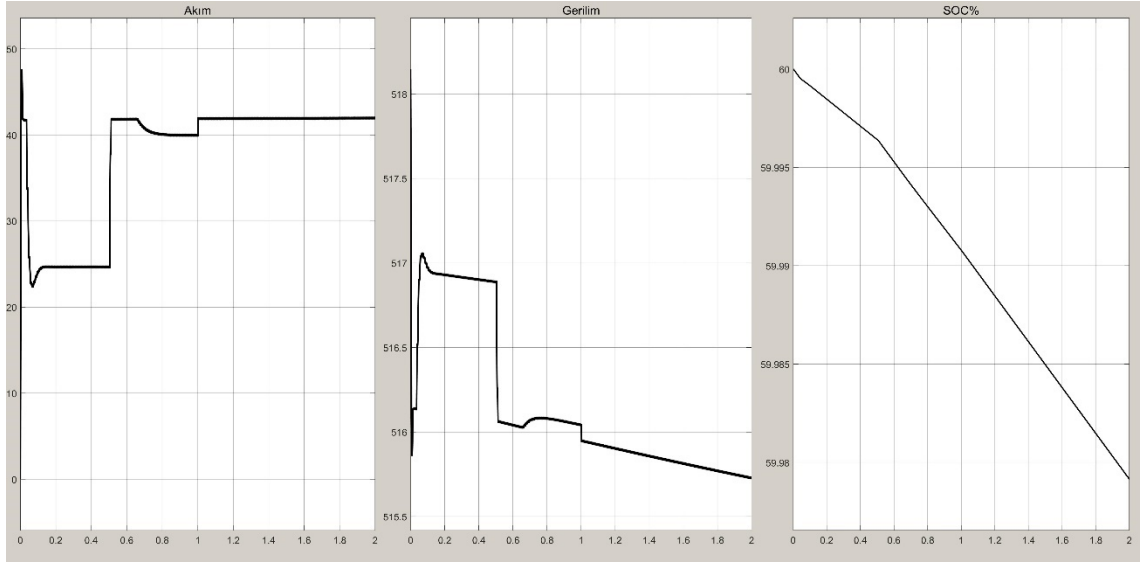
Şekil 4.24. Sabit Yük Ultrakapasitör Akım Gerilim ve SOC Değerleri

#### 4.2.1.2. Sistem artan yükte iken

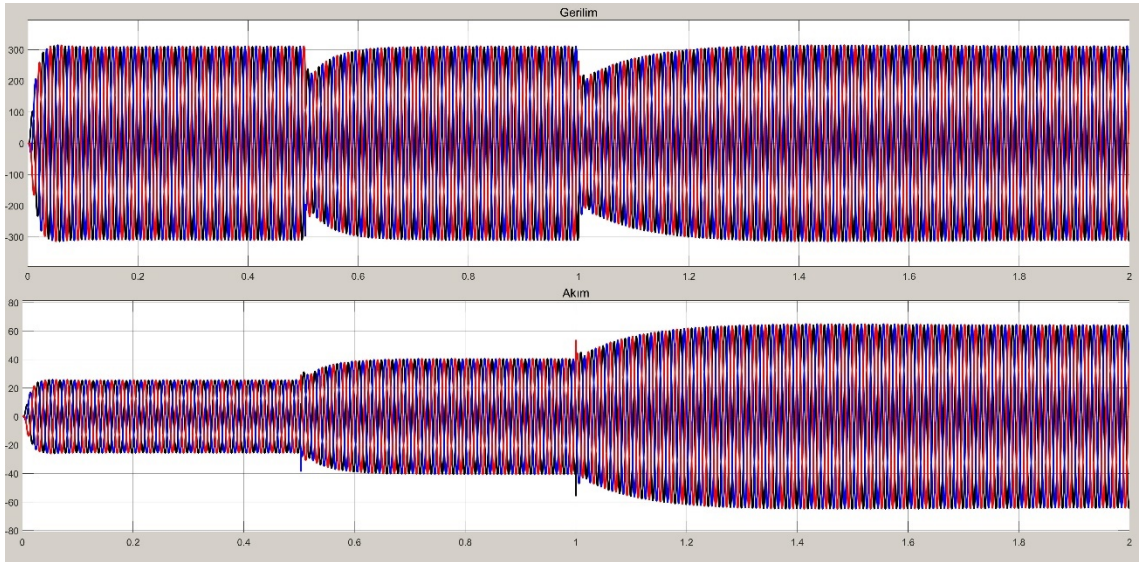
Simülasyon süresi 2 saniye sürmüştür. Yük değeri başlangıçta 12kW olarak ayarlanmış, 0.5 saniyede 7kW yük sisteme dahil olmuş ve toplam yük 19kW olmuştur. 1 saniyede 11kW yük sisteme dahil olmuş ve toplam yük 30kW'a ulaşmıştır. Bu durumda maksimum batarya akımı 46,5A ve maksimum ultrakapasitör akımı 280A olmuştur. Sistem toparlanma süresi 12kW için 0.1 saniye +7kW için 0.2 saniye ve +11kW için 0.3 saniye olarak elde edilmiştir.

Üçüncü yük devreye girdikten sonra batarya bütün yükleri besleyememeye başladığından ultrakapasitörden anlık değil sürekli akım çekilmeye başlanmıştır.

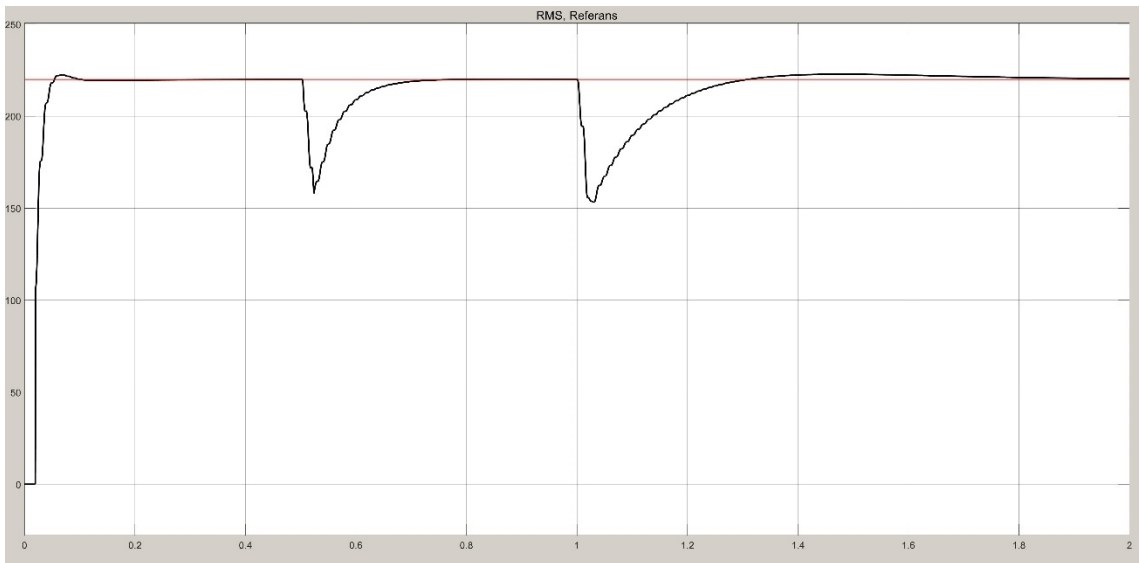
Batarya akım sınırlayıcıdan ötürü sürekli olarak en fazla 42A iletebilmektedir. Bu durum bataryanın sağlığını korumak için böyle yapılmıştır.



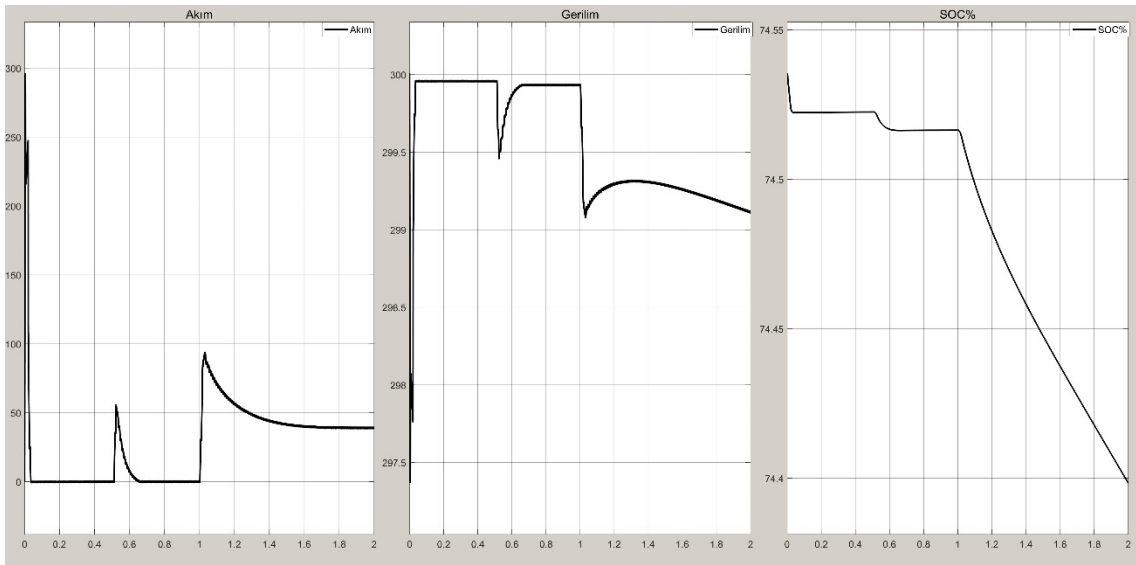
Şekil 4.25. Artan Yük Batarya Akım Gerilim SOC Değerleri



Şekil 4.26. Artan Yük Evirici Çıkışı



Şekil 4.27. Artan Yük RMS Değeri

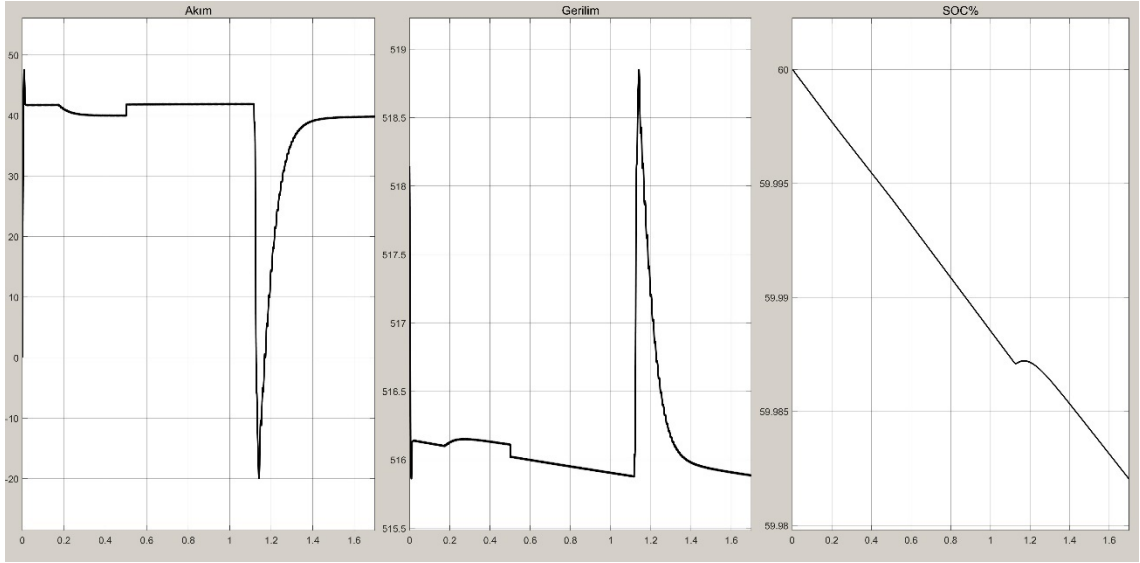


Şekil 4.28. Artan Yük Ultrakapasitör Akım Gerilim Ve SOC Değerleri

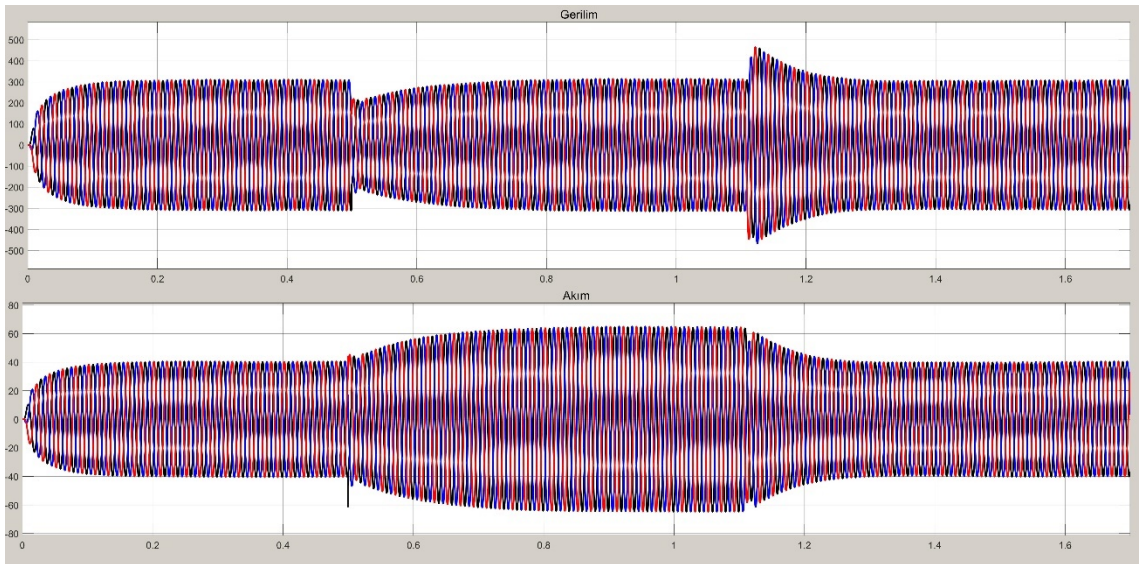
#### 4.2.1.3. Sistem artıp azalan yükte iken

Simülasyon süresi 1.7 saniye sürmüştür. Sistem başlangıçta 19kW yük beslemektedir. 0.5 saniyede sisteme 11kW yük dahil olmuştur ve sistemin beslediği yük 30kW'a ulaşmıştır. 1.1 saniyede sistemden 11kw yük ayrılmıştır ve sistem başlangıçta olduğu gibi 19kW yük beslemeye başlamıştır. Maksimum batarya akımı 46,5A ve maksimum ultrakapasitör akımı 280A değerlerine ulaşmıştır. Sistem toparlanma süresi ilk durum 19kW için 0.2 saniye 30kW için 0.3 saniye son durum 19kW için 0.2 saniye olmuştur.

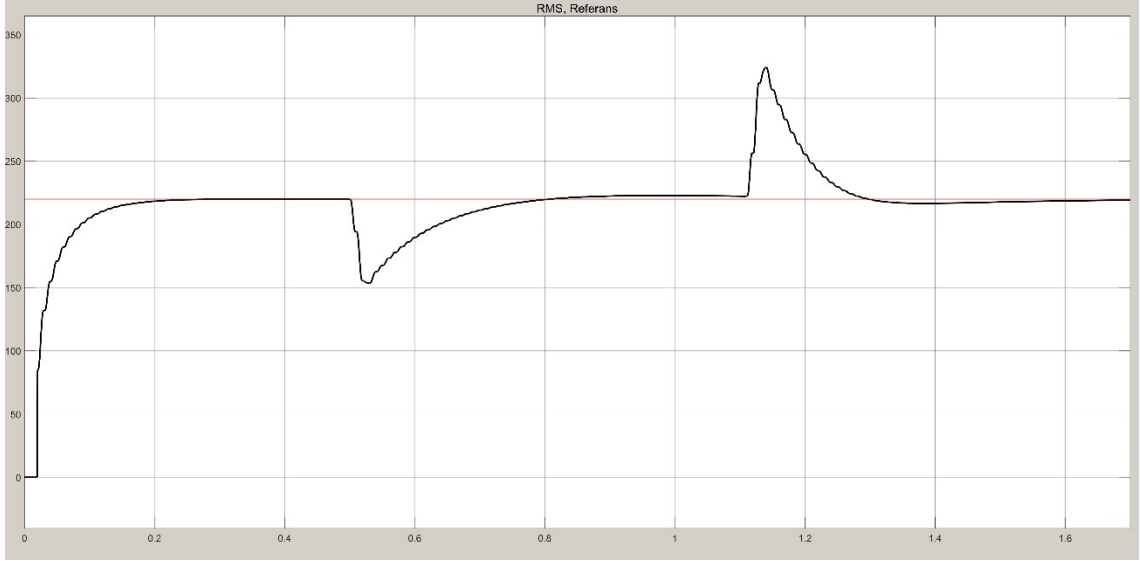
Sonuçta grafiklerden anlaşıldığı üzere batarya ve ultrakapasitör yük artışında, artan yük senaryosunda olduğu gibi reaksiyon verirken, yük düşüşünde ultrakapasitör akım değerini 0'lamıştır. Batarya ise eviriciden akan fazla gücü düşürmek için negatif akıma düşmüştür (Şekil 4.29).



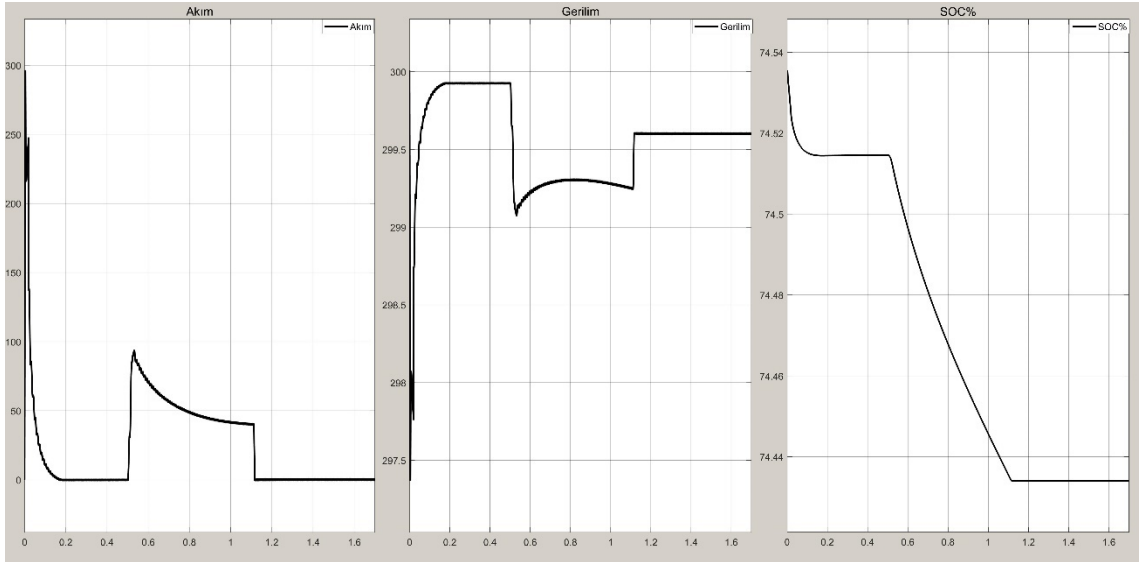
Şekil 4.29. Artıp Azalan Yükte Batarya Akım Gerilim ve SOC Değerleri



Şekil 4.30. Artıp Azalan Yükte Evirici Çıkışı



Şekil 4.30. Artıp Azalan Yük RMS Değeri



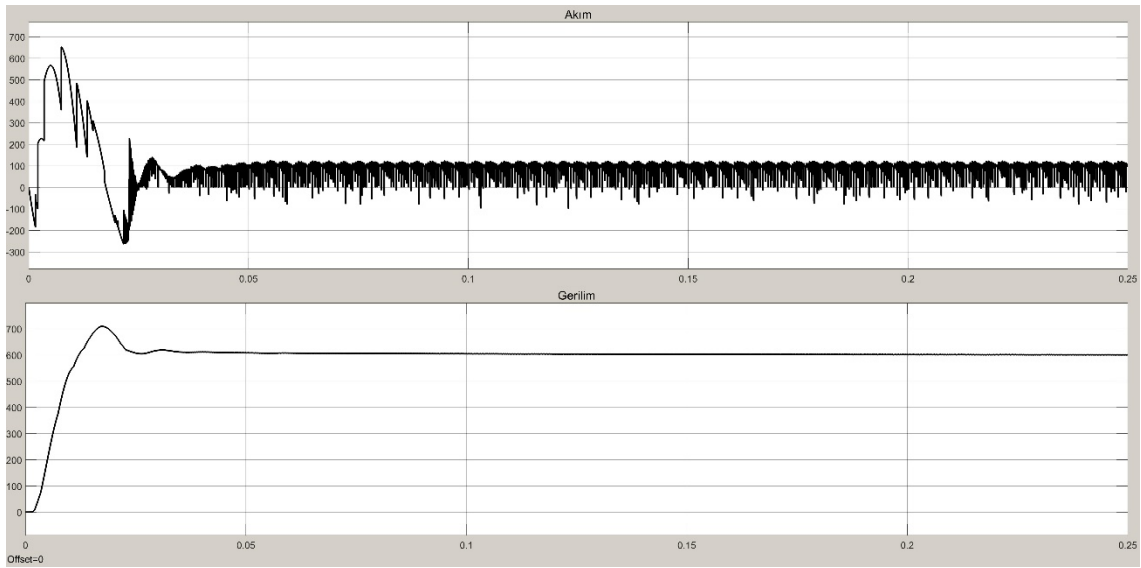
Şekil 4.31. Artıp Azalan Yük Batarya Akım Gerilim ve SOC Değerleri

## 4.2.2. Şarj modunda

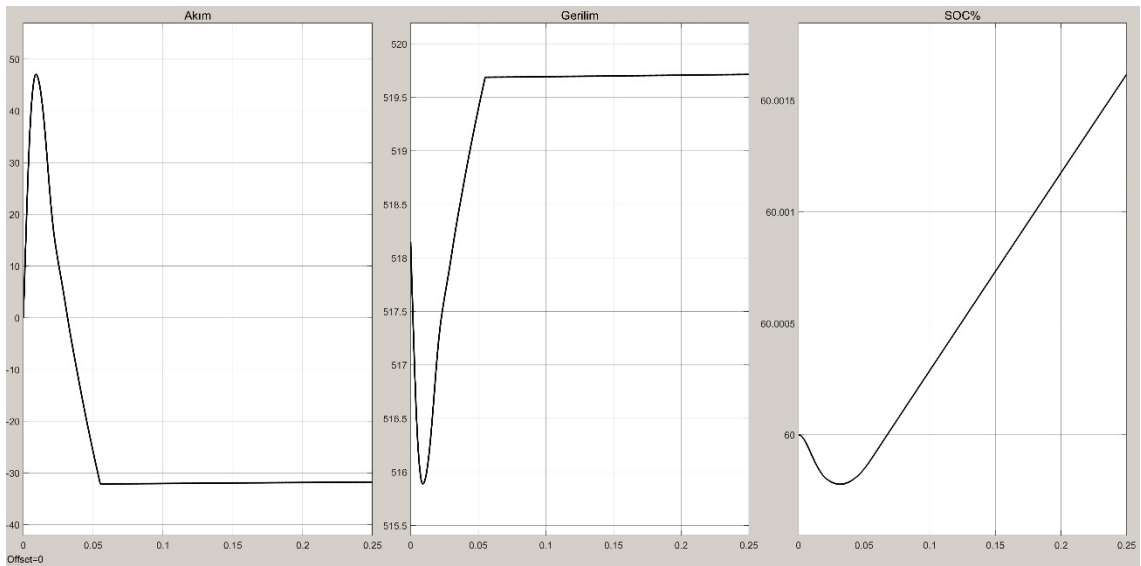
### 4.2.2.1. Depolama sistemi sabit şarj olurken

Sistem şarj modunda stabil olarak çalışmakta, batarya ve ultrakapasitör şarj olmaktadır. Simülasyon süresi 0.25 saniye sürmüştür. Bu koşullarda batarya şarj akımı -32A ve ultrakapasitör şarj akımı -100A olmaktadır. Sistem toparlanma süresi 0.06 saniye olarak ölçülmüştür. Doğrultucu verimi yaklaşık %84'tür.

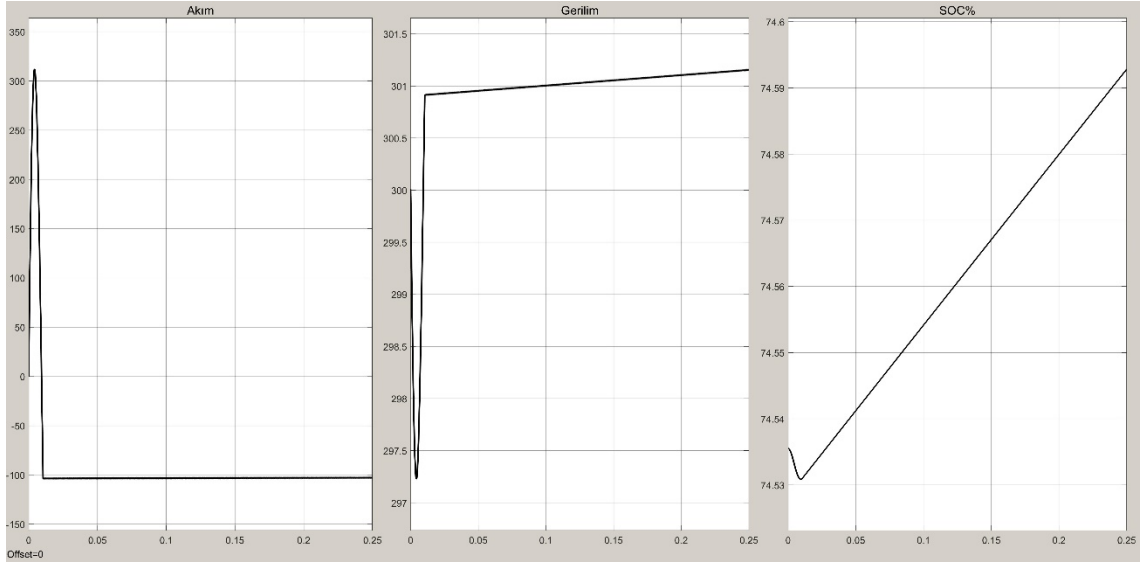
Doğrultucu devreleri şebeke akımında çok büyük harmoniklere sebep olmaktadır. Bunu azaltmak adına kullanılan aktif doğrultucu ana harmonikleri büyük oranda düşürmektedir. Doğrultucudan çıkan gerilim sabit 600V iken, akımın çok gürültülü bir görüntüye sahip olmasının sebebi DC/DC dönüştürücü anahtarlama devrelerinden ötürüdür. Depolama elemanlarına sabit akım iletildiği için sorun teşkil etmemektedir. Bataryanın şarj akımı 30A'e ultrakapasitörün şarj akımı ise 100A'e sınırlanmıştır. Sistem beklendiği gibi çalışmaktadır.



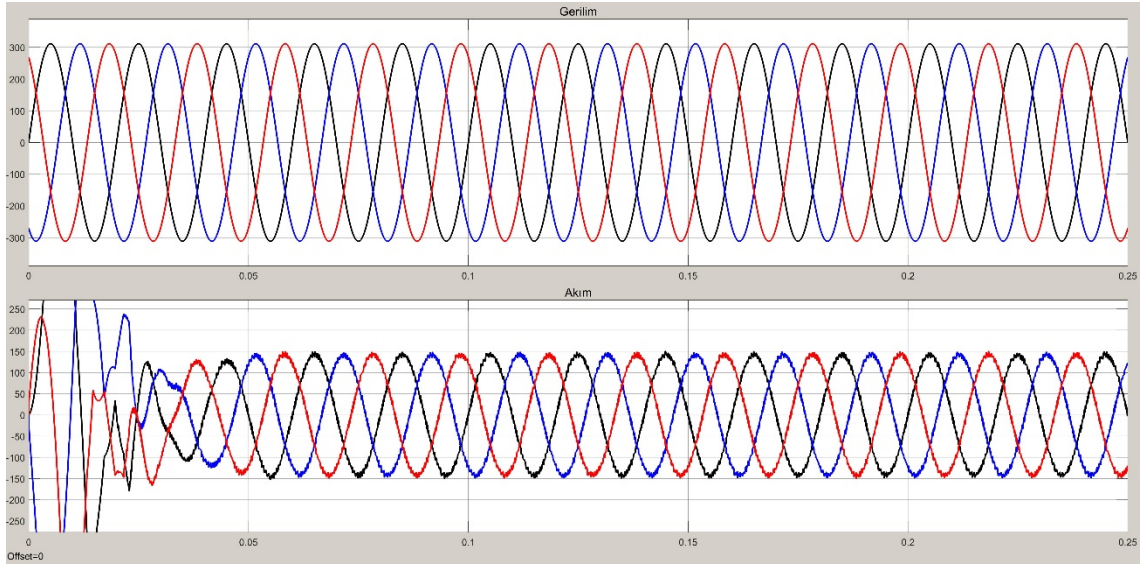
Şekil 4.32. Sistem Şarj Durumunda Doğrultucu Akım ve Gerilim Değerleri



Şekil 4.32. Sistem Şarj Durumunda Batarya Akım Gerilim ve SOC Değerleri



Şekil 4.33. Sistem Şarj Durumunda Ultrakapasitör Akım Gerilim ve SOC Değerleri

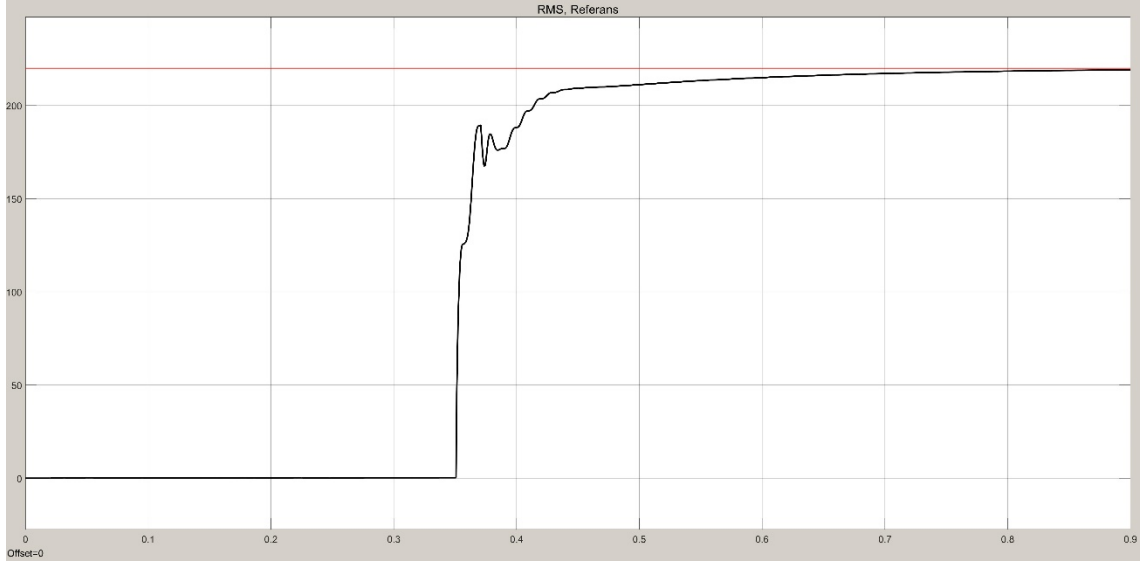


Şekil 4.33. Sistem Şarj Durumunda Şebeke Çıkışı

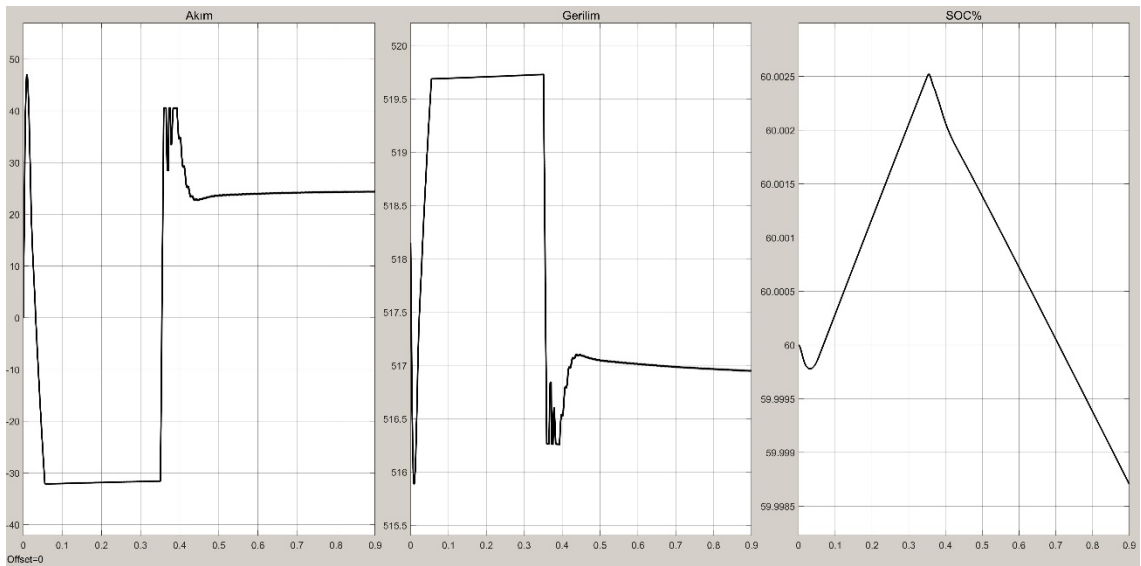
#### 4.2.2.2. Sistem şarj olurken sabit yükte deşarj moduna geçtiğinde

Simülasyon süresi 0.9 saniye sürmüştür. Sistem ilk olarak şarj modunda çalıştırılmıştır. Sisteme 0.35 saniyede 12kW yük dahil olmuştur ve sistem deşarj moduna geçmiştir. Sistem toparlanma süresi şarj durumunda 0.06 saniye iken 12kW yük eklenip deşarj durumuna geçtiğinde 0.25 saniye olmuştur.

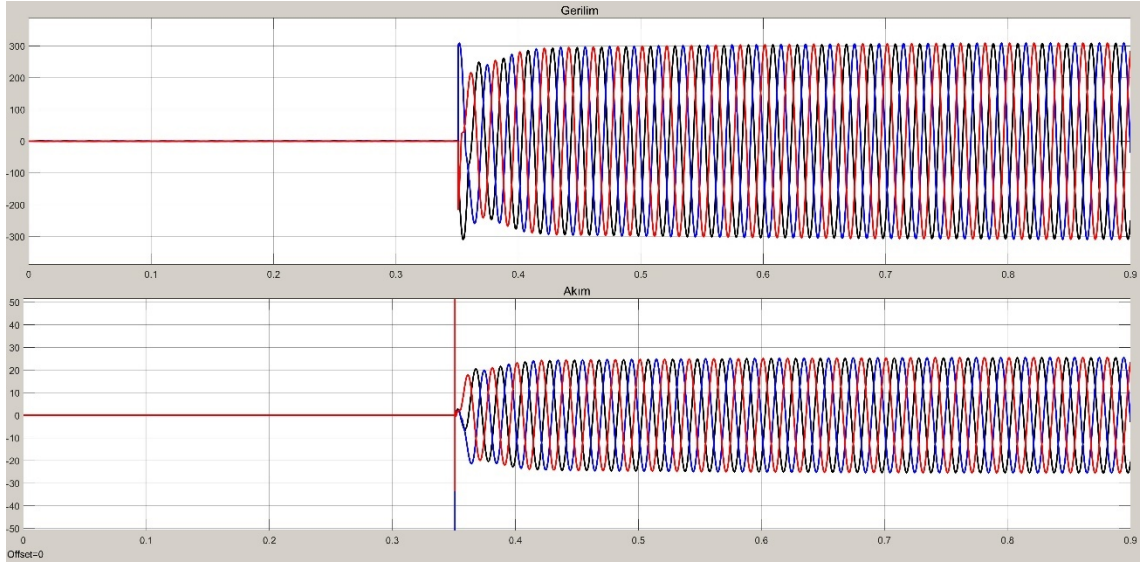
Bu modda batarya negatif akımdan pozitif akıma geçiş yaşadığı için toparlanma biraz daha uzun sürmektedir. Batarya akım sınırlayıcıdan ötürü 42A'ı geçmez iken, ultrakapasitör bataryaya destek amaçlı 175A'e kadar güç iletmiştir.



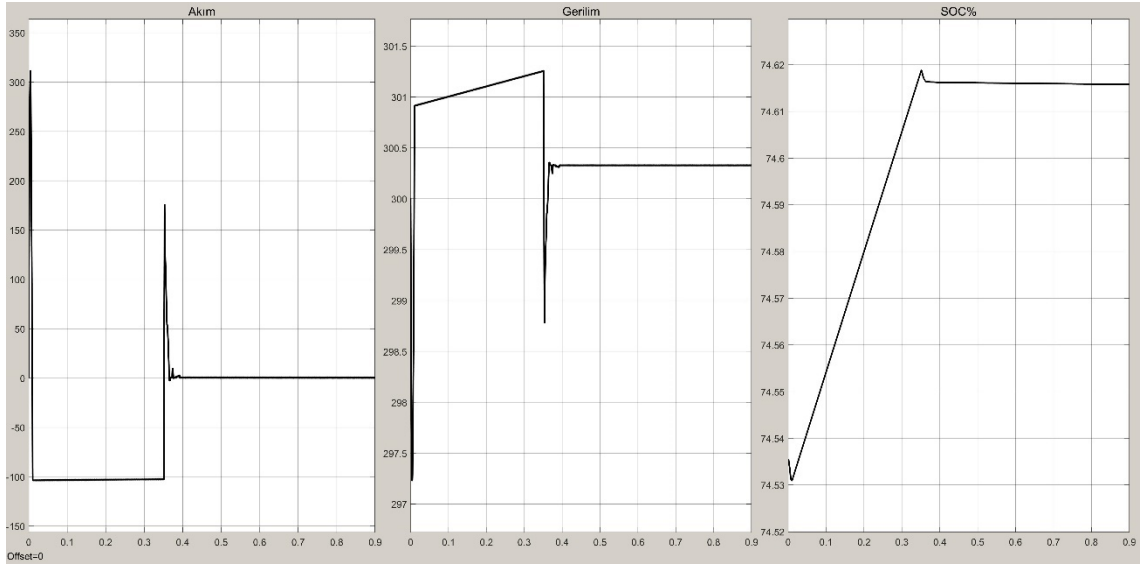
Şekil 4.34. Sistem Şarj Modundan Deşarj Moduna Geçtiğinde RMS Değerleri



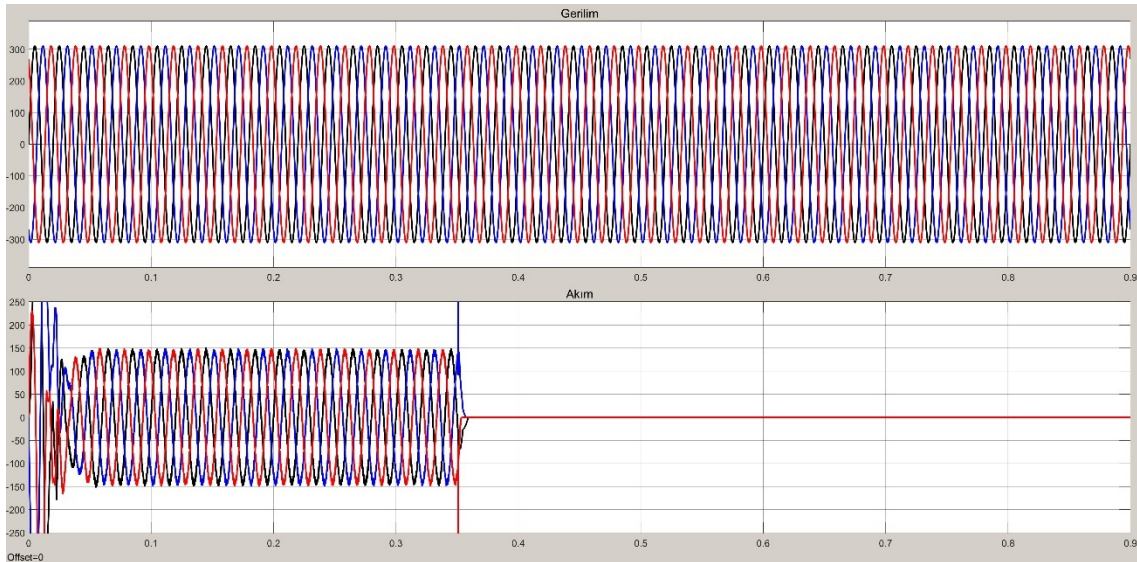
Şekil 4.35. Sistem Şarj Modundan Deşarj Moduna Geçtiğinde Batarya Akım Gerilim ve SOC Değerleri



Şekil 4.36. Sistem Şarj Modundan Deşarj Moduna Geçtiğinde Evirici Çıkış Değerleri



Şekil 4.37. Sistem Şarj Modundan Deşarj Moduna Geçtiğinde Ultrakapasitör Akım Gerilim ve SOC Değerleri



Şekil 4.38. Sistem Şarj Modundan Deşarj Moduna Geçtiğinde Şebeke Çıkış Değerleri

### 4.3. Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinde (HEDS) Parçacık Sürü Optimizasyonun (PSO) Kullanılması

Hibrit Enerji Depolama Sistemlerinde önemli kriterlerden birisi de kullanılan materyallerin gerçek değerlere uygun olması ve en uygun değerlerin seçilmesidir. Bir problemin çözüme kavuşturulmasında en optimum çözümlerin elde edilebilmesi için optimizasyonlardan yararlanır. Günümüzde çeşitli tipte optimizasyonlar farklı farklı problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise PID parametrelerinin ve batarya ve ultrakapasitör değerlerinin seçilmesinde Parçacık Sürü Optimizasyonunda yararlanılmıştır.

Kısaca PID, bir diferansiyel denklem ile formüleştirelebilen herhangi bir sistemde girişteki referans değerini baz alarak çıkışta bu referans değerini verilmesini sağlamaktadır. Girişteki referans değerinden çıkış değerini çıkardığımızda elimizde hata değeri bulunmaktadır. PID kontrolörü ise bu hata değerini oransal, integral ve türevsel olarak toplar ve her bir toplamı kendi sisteme özel seçilmiş kazançları ile çarparak ‘en kısa sürede ve en stabil şekilde’ hata oranını sıfıra çekmeye çalışır. Böylece referans değerinin çıkışta gözükmesini sağlar.

Bu oransal, integral ve türevsel kazançların seçimi sistemin cevabını belirler. Öyle ki, oransal kazanç çok yüksek olduğu durumda başlangıçta aşırı kontrol değerleri uygulanır, integral kazancı çok yüksek olduğunda salınımına sebep olur ve türevsel

kazancın fazla sistemin gürültüye aşırı tepki vermesine sebep olur ve çıkışı referans değerden uzaklaştırır.

#### 4.3.1. PSO ile simülasyon

Devrenin çıkışta referans değeri vermesindeki performansı ölçemez isek PSO ile PID ayarı yapamayız. Algoritmanın doğruluğunu ölçmek için bir maliyet fonksiyonu gereklidir. Bu maliyet fonksiyonu olarak kullanabileceğimiz PID'nin performansını ölçmek için "fitness function" adı verilen birkaç hesaplama yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılan dört tanesi;

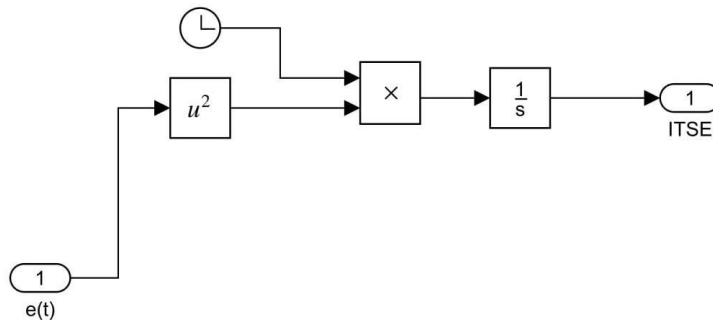
- ISE: Integral Square Error
- IAE: Integral Absolute Error - ITAE: Integral Time Absolute Error
- ITSE: Integral Time Square Error'dur.

Araştırmalarım sonucunda yukarıdaki yöntemden ISE ve IAE'nin fazla aşımaya sebep olduğunu öğrendim. ITAE ile ITSE arasından ise ITSE'nin daha az hata sunan bir maliyet fonksiyonu olduğu kararına vardım ve çalışmalarımı bu maliyet fonksiyonu üzerinden yaptım.

ITSE'nin formülü aşağıdaki gibidir;

$$\int t. [e(t)]^2. dt \quad (\text{Formül 1})$$

Simülasyonda tasarlanan şekli ise aşağıdaki gibidir;



Girişteki hatanın önce karesi alınmakta ardından zaman ile çarpılıp integrali alınmaktadır. Bu fonksiyon çalıştıktan sonra belirlenen kazanç değerlerine göre oluşturduğu hata değeri workspace'e gönderilmektedir.

Simulink'ten workspace'e iletilen veri yalnızca ITSE değeri değildir. PID'nin ayarlanması sırasında oluşabilen bir sorun da Bataryadan kendisine zarar verecek kadar akım çekilmesidir. Bu durum simülasyonda göz ardı edilebilir fakat pratikte büyük sorunlar oluşturur. Ayarlama ile neredeyse ideal bir çıktı elde edilebilir fakat batarya akımı kontrol edildiğinde gerçek dışı değerlerin bataryadan çekildiği görülür. Bunu filtrelemek için ileride anlatacağım şekilde workspace'e Threshold olarak bir sınır değeri de iletilir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu'nun iteratif adımlarla en iyi PID kazançlarını bulması için yazılacak MATLAB Script'i aşağıda açıklanmıştır;

Script kodu yorumlarla kendini açıklamaktadır. Kısaca burada algoritmadan bahsetmek gerekirse;

1. Başlangıç Koşulları Ayarlanır; a. Parçacık sayısı,  
b. İterasyon sayısı,  
c. Parçacıkların konum boyutu (bat\_V\_P, bat\_V\_I, bat\_D\_P, bat\_D\_I, sc\_P ve sc\_I olmak üzere 6 adet),  
d. Atalet katsayısı ve sabit katsayı değerleri (w, c1, c2),  
e. Konum ve hız sınırları ( 0 ile 6 değerleri arasında) ve  
f. Parçacık unsurları tanımlanır (Konum, Hız, Kişisel en iyi konum, kişisel en iyi hız, hata değeri, kişisel en iyi hata değeri)

## 2. Ana Döngüye Geçilir;

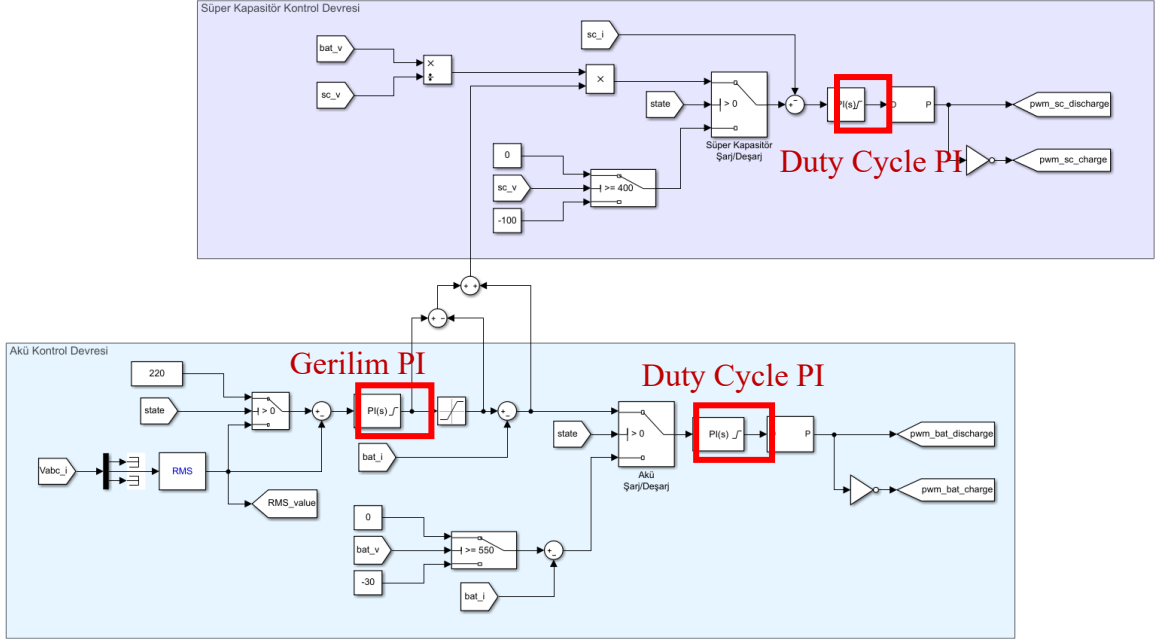
- a. İterasyon sayısı ve Parçacık Sayısı boyunca yeni hız vektörleri ve konumlar
- b. Global en iyi güncellenir.

PSO formülüne göre hesaplanır ve unsurlar güncellenir.

3. Sonuçlar İterasyon Sayısı tamamlandığında elde edilir.

### 4.3.2. PSO algoritmasının modellenmesi ve çalışma prensibi

Dönüştürücü kontrol devresinde (Şekil 4.39) kullanılan PID değerlerinin hesaplanmasında simülasyondan bağımsız bir optimizasyon algoritmasından yararlanılmıştır.



Şekil 4.39. Dönüştürücü Kontrol Devresi

Yukarıdaki şekilde kutu ile işaretlenmiş PI blokları, dönüştürücü devrelerinin anahtarlama elemanlarına gönderilecek sinyali belirler. PID'nin ana amacı (bu örnekte sadece PI) gerçek değeri en kısa sürede istenen değere getirmektir. Bu PI değerlerinin büyüklüğü sistemin ne kadar kısa sürede istenen değere geleceğini belirler. Bu toparlanma süresini en aza çekmek için ise "Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)" isimli bir algoritmadan yararlanılmıştır.

Bu algoritma yalnızca PI değerlerinin belirlenmesinde bir rol oynamıştır, simülasyondan tamamen bağımsızdır.

### 4.3.2.1. Algoritmanın çalışma şekli

Algoritma bir kod ile Matlab ortamına aktarılmıştır. Kod çalıştırıldığında kendisi otomatik olarak simülasyonu başlatıp istediği hata ve sınır değerlerini simülasyondan çekecektir. Hata değeri algoritmanın istenen değerden farkını gösterir. Sınır değeri ise bataryanın maksimum akımını gösterir.

```
nPop 50. sim;
Threshold is 108.3799;
Cost is 20.4275;
-----
Main 51. sim;
Threshold is 108.327;
Cost is 17.7448;
-----
Main 52. sim;
Threshold is 64.7934;
Cost is 13.0707;
-----
Main 53. sim;
Threshold is 108.3262;
Cost is 20.8722;
-----
Main 54. sim;
Threshold is 108.2999;
Cost is 21.5466;
-----
```

Şekil 4.40. – Algoritma Çalıştırıldığında Komut Satırı Çıktısı

Her bir simülasyondan sonra komut satırında kaçınıcı simülasyonun çalıştırıldığı, sınır değeri ve maliyet değeri (hata değeri) yazar. Simülasyon “Popülasyon × İterasyon” çarpımını kere tekrarlanır ve her iterasyonda hata değeri biraz daha azalır.

Simülasyon süresinin 0.5’ten aşağı çekilmesi tavsiye edilmez. Popülasyon ve iterasyon sayısı kodun 18. Ve 19. Satırlarındadır;

```
18 - nPop    = 50;           % Parçacık popülasyonu
19 - MaxIt  = 30;           % İterasyon Sayısı
```

Şekil 4.41. Matlab kodu

Algoritmada hesaplanacak bataryanın gerilim PI, Duty Cycle PI değerleri ve ultrakapasitörün Duty Cycle PI değerleri algoritmaya değişkenler olarak tanıtılmıştır;

```

62 % Başlangıç Konumu parametrelerini simülasyona
63 % PID katsayıları olarak aktarma
64 - bat_V_P = particle(i).X(1); % Batarya Gerilim PI P değeri
65 - bat_V_I = particle(i).X(2); % Batarya Gerilim PI I değeri
66 - bat_D_P = particle(i).X(3); % Batarya Anahtarlama PI P değeri
67 - bat_D_I = particle(i).X(4); % Batarya Anahtarlama PI I değeri
68 - sc_P = particle(i).X(5); % Süperkapasitör Anahtarlama PI I değeri
69 - sc_I = particle(i).X(6); % Süperkapasitör Anahtarlama PI I değeri

```

Şekil 4.42. Matlab kodu

Simülasyonda bu değerler **PID bloklarının içerisinde** yazmaktadır.

Algoritma çalışıp tamamlandıktan sonra en iyi değerler workspace'teki GlobalBest değişkeninden çekilebilir;

The screenshot shows the Matlab Workspace with the following variables and values:

Name	Value
bat_D_I	0.7600
bat_D_P	1.0337
bat_V_I	4.1245
bat_V_P	1.3937
BestCost	30x1 double
c1	1.4800
c2	1.4800
counter	54
GlobalBest	1x1 struct
i	5
it	1
MaxIt	30
nPop	50
nVar	6
particle	50x1 struct
sc_I	0.3599
sc_P	0.3832
Threshold	108.2999
VarMax	[20,20,6,6,6,6]
VarMin	[0,0,0,0,0,0]
VarSize	[1,6]
VelMax	[2,2,0.6000,0.6000,0.6...
VelMin	[-2,-2,-0.6000,-0.6000...
w	0.7000

The GlobalBest variable is expanded to show the following fields and values:

Field	Value
X	[0.7619, 4.1245, 1.0337, 0.7600, 0.3599, 0.3832]
C	11.7027

Şekil 4.42. Matlab Workspace

Bu GlobalBest.X'teki değerler sırasıyla;

- bat\_V\_P
- bat\_V\_I
- bat\_D\_P
- bat\_D\_I
- sc\_P
- sc\_I'dır.

Sonuç olarak simülasyon bu ayrık optimizasyon algoritmasına entegre edilerek PID değerleri için optimal sonuçlar elde edilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bir önceki bölümde anlatılan senaryoların uygulanması sonucunda sistemin gerçek hayatta kabul edilebilir sonuçlara sahip olduğu ve sadece bataryadan oluşan bir sisteme göre avantajlarının olduğu görülmüştür.

Sistem, başlangıç sırasında dönüştürücülerin ve eviricinin pasif devre elemanlarını beslemek üzere çok yüksek akım çekmektedir. Bu yüksek akım batarya yerine ultrakapasitör tarafından karşılanmıştır. Bu şekilde batarya korunmuştur.

Sistem, – bataryanın besleyebileceği yük değerleri altında iken – anlık yük artışlarında kapasitör bataryadan önce yük ihtiyacına cevap vererek bataryayı anlık akım artışlarından korumuştur.

Sistem, – bataryanın besleyemeyeceği yük değerlerine çıkmış iken – ekstra güç ihtiyacını ultrakapasitör tarafından karşılamış olup bataryanın nominal akım değerinin üstüne çıkmasını engelleyerek bataryayı sürekli akım artışlarından korumuştur.

Sistem, – şarj modunda iken – bir anda deşarj moduna geçildiğinde gücün akış yönü değiştiği için bataryanın anlık olarak negatif akımdan pozitif akıma geçişini yumuşatarak bataryanın sağlığına pozitif etkide bulunmuştur.

## 5.2. Öneriler

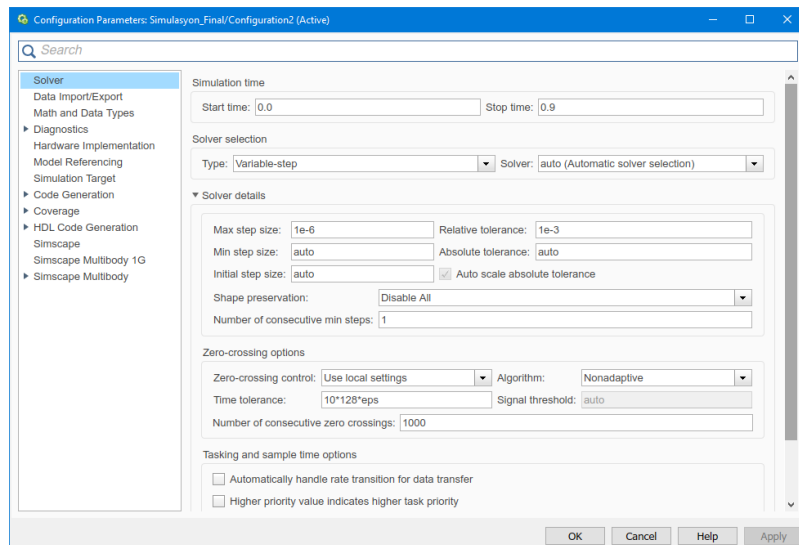
Bataryanın gerilimi ne kadar yüksekse, sistem o kadar stabil çalışmaktadır. 480V batarya gerilimi bu yüzden seçilmiştir. 360V'a kadar inilebilir. 360V'un aşağısı önerilmez. Ayrıca ultrakapasitörün maksimum gerilimi de bataryanın maksimum geriliminden az tutulmalıdır. (Örn.: 480V'a 400V, 360V'a 300V)

Yüklerin değerleri bataryanın iletebildiği maksimum güce göre belirlenmiştir (20kW). 20kW'ın üstünde batarya ile ultrakapasitör de sürekli güç harcamaktadır.

Kontrolcü devresinin tasarımında kullanılan parametreler algoritmalar ve deneme yanılma yöntemi ile bulunmuştur. PID'lerin değerleri değiştirildiğinde sistemin yük değişimlerine cevabı da değişmektedir. (Özellikle batarya gerilim PID'si).

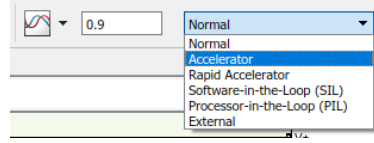
Eviriciden çıkan üç faz gerilim ve akım değerleri LC filtre değerleri düzeltilerek tam sinüzoidal sinyale dönüştürülmüştür. Ayrıca doğrultucu akımı da düzeltilmiştir.

Simülasyonun en fazla  $1e^{-5}$  modunda çalıştırılması önerilir. PWM sinyallerinin frekansı 100kHz'e ulaştığı için  $1e^{-5}$ 'in üstündeki değerlerde sistem yanlış çalışabilir.



Şekil 5.1. Simülasyon konfigürasyon parametreleri

Yukarıdaki görsele “model configuration parameters (dişli şekilde)” erişilmektedir. Buradan “max step size:” parametresi  $1e-5$  yapılarak simülasyonun daha hızlı çalışması sağlanabilir. Aynı zamanda;



Şekil 5.2. Simülasyon hız ayarı

Bu kısımdan accelerator modu seçilerek de simülasyon hızı artırılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Aktaş, A., 2016, Şebeke bağlantılı fotovoltaik tabanlı batarya ve ultrakapasitörlü hibrit sistemin akıllı enerji yönetimi, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 15-30.
- Akcanca, M.A., Taşkın, S., 2013, Akıllı Şebeke Uygulanabilirliği Açısından Türkiye Elektrik Enerji Sisteminin İncelenmesi, *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesi'nin Geleceği Sempozyumu*, Ankara.
- Aktaş, M., Baygüneş, B., Kıvrak, S., Çavuş, B., Sözen, F., 2020, Elektrikli araç için düşük maliyetli bir batarya yönetim sistemi tasarımı ve gerçekleştirilmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 227-238.
- Aranza, M. F., Kustija, J., Trisno, B. and Hakim, D. L., 2016, Tuning PID controller using particle swarm optimization algorithm on automatic voltage regulator system, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 128, 1–9.
- Aydemir, T., 2014, Elektrikli Araçların Çevresel Etkilerinin ve Yakıt Avantajlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 28.
- Bahçeci, S., Dalbadan, F., 2017, Dağıtım şebekelerinde güneş panelleri ve enerji depolama sistemi uygulaması, *El Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 308-313
- Baker, J., 2008, New technology and possible advances in energy storage, *Energy Policy*, 36(12), 4368–4373.
- Barbir, F., 2005, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, California, USA.
- Barsali S., Ceraolo M., Giglioli R. and Poli D., 2015, Storage applications for Smartgrids, *Electric Power Systems Research*, 120, 109-117.
- Başkent Elektrik Dağıtım A.Ş., 2016, Enerjisa Pilot Proje Çalışmaları Verileri, *Ar-Ge ve Otomasyon Müdürlüğü Raporları*, Ankara.
- Bayındır, İ. M., Kuzu, Z., 2019, Batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji depolama sisteminden beslenen elektrikli aracın akım paylaşımlı enerji yönetimi, *MAS 10<sup>th</sup> International European Conference on Mathematics, Engineering Natural & Medical Sciences*, Izmir, Turkey, 31-41.
- Bayındır, R., Demirbaş, Ş., Irmak, E., Çetinkaya, Ü., Ova, A., Yeşil, M., 2016, Effect of Renewable Energy Sources on the Power Systems. *Power Electronics and Motion Control Conference*, Varna.
- Bayındır, R., Yesilbudak, M., Cetinkaya, R., 2015, Modeling and Analyzing of Electricity Transmission Infrastructure of Ankara, Turkey: A Case Study on the Critical Line Scenarios. *Gazi University Journal of Science*, 28(4), 587-597.

- Burke A., 2000, Ultracapacitor: why, how and where is the technology, *J. Power Sources*, 91(1), 37-50.
- Chen H., Cong T. N., Tan C., Li Y. and Ding Y., 2009, Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, 19, 291-312.
- Çetinkaya H. B., 2012, Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği Açısından Akıllı Şebekeler ve SCADA Uygulamaları, 3. *Ulusal Enerji Verimliliği Forumu ve Fuarı*, İstanbul, 12-13.
- Çoksürer, Y., 2013, Akıllı Şebekeler ve Orta Gerilim Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-16, 29-30.
- Damjanovic N., 2011, Smart Grid Functionality of a PV- Energy Storage System, Master Thesis, *University of South Florida, Department of Electrical Engineering*, USA.
- Darkrim, F. L., Malbrunot, P. and Tartaglia, G. P., 2002, Review of hydrogen storage by adsorption in carbon nanotubes, *Int. J. Hydrogen Energy*, 27(2), 193-202.
- Demirkol, Ö.F., 2019, Akıllı Şebeke Teknolojilerinin İncelenmesi ve Türkiye Açısından Durum Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Divya K. C. and Ostergaard J., 2009, Battery energy storage technology for power systems-An overview, *Electric Power Systems Research*, 79, 511-520.
- Divya, K. C. and Ostergaard J., 2009, Battery energy storage technology for power systems—An overview, *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511–520.
- Dustmann, C. H., 2004, Advances in ZEBRA batteries, *J. Power Sources*, 127(1-2), 85-92.
- Energystorage, 2022, <http://energystorage.org/energy-storage/technology-applications/frequency-regulation> (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2022).
- Energystorage, 2022, <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories> (Ziyaret tarihi: 18 nisan 2022).
- Energystorage, 2022, <http://energystorage.org/energy-storage/technology-applications/electricity-storage-and-plug-vehicles> (Ziyaret tarihi: 14 Nisan 2022).
- Eroğlu, A., 2010, Akıllı Şebekelerde Birlikte Çalışabilirlik, *Uzmanlık Tezi, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*, Ankara, 17-19, 2-3.
- Ferreira H. L., Garde R., Fulli G. and Lopes J. P., 2013, Characterization of electrical energy storage technologies, *Energy*, 53, 288-298.

- Gabash, A., Li, P., 2014, On the Control of Main Substations Between Transmission and Distribution Systems, *14th Environment and Electrical Engineering International Conference (EEEIC)*, Krakow.
- Gaurav H. S., 2014, Energy Storage Technology for Power Systems-An Overview, *International Journal of Innovative Research in Technology*, 1, 1863-1868.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. and Efthimiou, V., 2009, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1513–1522.
- Ibrahim, H., Ilinca, A. and Perron, J., 2008, Energy storage systems—Characteristics and Comparisons, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221–1250.
- Kamali S. K., Tyagi V. V., Rahim N. A., Panwar N. L. and Mokhlis H., 2013, Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 135-165.
- Khaligh, A., Zhihao Li., 2010, Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art', *Information Theory, IEEE Transactions on*, 2806 – 2814
- Kılıç, E., 2019, DA-DA yükselten dönüştürücü ile elektrikli araç batarya şarj cihazı tasarımı, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 282-287.
- Kırmızıoğlu, E., 2014, Ülkemizin 2023 Stratejik Vizyonu Doğrultusunda Akıllı Şebekeye Geçilmesi İçin Öneriler. *Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekeler Kongre ve Fuarı*, İstanbul.
- Kötz, R. and Carlen M., 2000, Principles and applications of electrochemical capacitors, *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2483-2498.
- Kurzweil, P., 2010, Gaston Planté and his invention of the lead–acid battery—The genesis of the first practical rechargeable battery, *J. Power Sources*, 195(14), 4424–4434.
- Liu, H. and Jiang, J., 2007, Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability, *Energy and Buildings*, 39(5), 599–604.
- Masaud T. M., Keun L. and Sen P. K., 2010, An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future?, *North American Power Symposium (NAPS)*, Arlington, USA, 26-28.
- Moore A. T., 2012, Design, Implementation and Evaluation of A Microgrid In Island and Grid Connected Modes With A Fuel Cell Power Source, Master Thesis, *University of Western Ontario, Electrical and Computer Engineering*, Canada.

- Mühendisbeyinler, 2022, <http://www.muhendisbeyinler.net/parcacik-suru-optimizasyonu/> (Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2022).
- Nair, N. K. C. and Garimella, N., 2010, Battery energy storage systems: Assessment for small-scale renewable energy integration, *Energy and Buildings*, 42(11), 2124-2130.
- Ou, X., Zhang, X., Chang, S., 2010, Scenario Analysis on Alternative Fuel Vehicle for China's Future Road Transport: Life-Cycle Energy Demand and GHG Emissions, *Energy Policy*, 38(8), 3943-3956.
- Özdemir, D., 2013, Akıllı Şebekelerde Örnek Uygulamalar, *Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekeler Kongre ve Sergisi*, İstanbul.
- Özdemir, D., 2014, Akıllı Şebekelerde İletişim Teknolojileri, *Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekeler Kongre ve Fuarı*, İstanbul.
- Schindall, J., 2007, The charge of the ultracapacitors-Nanotechnology takes energy storage beyond batteries, *IEEE Spectrum*, 38-42.
- Scrosati, B. and Garche J., 2010, Lithium batteries: Status, prospects and future", *J. Power Sources*, 195(9), 2419–2430.
- Shawkat A. B., 2013, Smart grids, opportunities, developments and trends, 1st ed., Springer, New York.
- Solihin, M. I, Tack, L. F. and Kean, M. L., 2011, Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO), *International Conference on Advanced Science, Engineering and Information*, Malaysia.
- Srdjan M. L., Ali E., 2008, Charging ahead, *Industrial Electronics Magazine*, 2, 22–31.
- Uzunoğlu M. ve Erdinç O., 2013, Akıllı Şebekelere Giriş, Nobel Yayınları, Ankara.
- Uzunoğlu M., 2010, Yakıt hücreli ve ultra-kapasitörlü hibrit taşıtlar için enerji yönetim sisteminin tasarım ve uygulaması, *TÜBİTAK 1001 Projesi*, 107M355, 1-156.
- Vural, B., Uzunoğlu, M., Nakir, İ., 2008, Yakıt hücreli elektrikli taşıt sistemleri için enerji depolama ünitesi olarak ultrakapasitörlerin kullanılması, *II. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 45-58.