

**SÜPERKAPASİTÖR İÇERİKLİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN
DAĞITIM ŞEBEKESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

ELİF KAVUŞ DEMİR

MAYIS 2025

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜPERKAPASİTÖR İÇERİKLİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN
DAĞITIM ŞEBEKESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

ELİF KAVUŞ DEMİR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

MAYIS 2025

DİYARBAKIR

SÜPERKAPASİTÖR İÇERİKLİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Elif KAVUŞ DEMİR tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Doç. Dr. Heybet KILIÇ
Danışman, **Elektrik ve Enerji Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (*)
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Heybet KILIÇ (**)
Elektrik ve Enerji Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Emin ASKER
Elektrik ve Enerji Bölümü, Dicle Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 27 / 05 / 2025

(*) Jüri Başkanı.
(**) Tez Danışmanı.



Aileme sevgiyle...

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: ELİF KAVUŞ DEMİR

İmza:

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi sürecinde bilgi, deneyim ve rehberliğiyle bana her zaman ilham veren, akademik gelişimime önemli katkılar sağlayan danışmanım Doç. Dr. Heybet KILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tezimin tüm aşamalarını büyük bir dikkatle takip eden, destek ve katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Cem HAYDAROĞLU'na da şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın saha uygulamalarıyla birlikte hayata geçirilmesini ve ölçüm, veri analizlerinin gerçekleştirilmesini mümkün kılan kurumum Dicle Elektrik'e teşekkür ederim. Aynı zamanda bu süreçte deneyim ve desteklerini esirgemeyen değerli yöneticilerime ve birlikte çalışmaktan büyük mutluluk duyduğum kıymetli çalışma arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim.

Yüksek lisans yolculuğumu benimle birlikte heyecanla takip eden değerli anneme, her zaman güç ve ilham kaynağım olan babama, sevgili kardeşlerim Veysel Salih, Navdar, Zeynep Zer ve Hasan Ali'ye destekleri ve sevgileri için minnettarım.

Bu zorlu ve yoğun süreçte her zaman yanımda olan, desteğiyle bana güç veren, sabrıyla, anlayışıyla ve motivasyonuyla bu yolculuğu benimle birlikte yaşayan kıymetli eşim Yusuf'a özel olarak teşekkür etmek isterim. Gerek moral verici sözleriyle, gerekse hayatın yoğun temposu içinde bana zaman ve alan tanıyarak bu tezin tamamlanmasında en büyük destekçilerimden biri olmuştur. Varlığı, bu süreci daha anlamlı ve katlanabilir kılmıştır.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Küresel Enerji Talebi ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları	1
1.2 Enerji Depolama ve Küresel Gelişmeler	2
1.2.1 Enerji depolama teknolojileri.....	3
1.2.2 Batarya teknolojilerindeki gelişmeler	4
1.2.3 Süperkapasitör teknolojisi.....	5
1.3 Motivasyon.....	7
1.4 Tezin Katkıları.....	7
1.5 Tezin Yapısı	9
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	10
2.1 Enerji Depolama Sistemlerinin Şebeke Entegrasyonundaki Rolü ve Gelişen Teknolojik Eğilimler	10
2.2 Hibrit Depolama Sistemleri ve Enerji Yönetim Stratejileri	13
2.3 Süperkapasitörlerin Akıllı Enerji Sistemlerindeki Rolü: Uygulamalar, Modeller ve Entegrasyon Stratejileri	16
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1 Enerji Depolama Sistemleri.....	18
3.1.1 Enerji depolamanın amacı ve faydaları.....	20
3.1.2 Elektrik enerjisi depolama teknolojileri	22
3.1.3 Kimyasal enerjili depolama teknolojileri	30

3.2	Elektrik Dağıtım Şebekesinde Enerji Depolama Sistemleri.....	38
3.2.1	Elektrik dağıtım şebekesinde depolamanın optimum kullanımı	38
3.2.2	Elektrik dağıtım şebekesine uygun hibrit depolama sistemi tasarımı ..	40
3.3	Hibrit Enerji Depolama Prototipi ve Kullanılabilirlik Testleri.....	54
3.4	Ölçüm ve Analizler	57
3.4.1	Test süreçlerinde kullanılan yüksek hassasiyetli ölçüm cihazı	58
3.4.2	Saha testi uygulama koşulları ve ölçüm lokasyonu	60
3.4.3	Ölçüm aşamaları ve veri toplama yöntemi.....	61
3.5	Ölçüm Sonuçlarının Analizi ve Sistem Davranışları	63
3.5.1	Şebekeden enerjilendirme durumunda ölçüm sonuçları	63
3.5.2	Hibrit enerji depolama sistemi ile enerjilendirme durumunda ölçüm sonuçları	78
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	91
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
5.1	Sonuçlar.....	93
5.2	Öneriler.....	94
5.2.1	Sistem tasarımı ve bileşen seçimi açısından öneriler	94
5.2.2	Dağıtım şebekesi uygulamaları açısından öneriler	94
5.2.3	Güç kalitesi izleme ve standartlara uygunluk açısından öneriler.....	94
5.2.4	Akademik ve endüstriyel çalışmalar açısından öneriler.....	95
	KAYNAKLAR	96
	ÖZGEÇMİŞ	105

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Küresel elektrik talebi [1]	2
Şekil 1.2 Enerji depolama teknikleri	3
Şekil 1.3 Akıllı şebekede depolama topolojisi	4
Şekil 3.1 Enerji türleri	18
Şekil 3.2 Kapasitörde enerji depolama prensip şeması[57]	23
Şekil 3.3 Kapasitörün enerji depolarken şematik görüntüsü.....	25
Şekil 3.4 Kapasitörlerin yaygın türlerinin sınıflandırılması[59]	25
Şekil 3.5 Kapasitör türleri[62].....	28
Şekil 3.6 Bataryaların temel yapısı [50].....	31
Şekil 3.7 Kurşun-asit batarya yapısı[67]	33
Şekil 3.8 Bir Akış Pili'nin Şematik Diyagramı [68]	34
Şekil 3.9 Lityum-iyon piller çalışma şeması [70]	35
Şekil 3.10 Lityum İyonlarının Değişimi[71].....	37
Şekil 3.11 Batarya paketi tasarımı	42
Şekil 3.12 Batarya paketi tasarımı	43
Şekil 3.13 LFP pil devre şeması.....	43
Şekil 3.14 Süperkapasitör devre şeması.....	44
Şekil 3.15 Batarya paketi devre şeması.....	45
Şekil 3.16 Batarya yönetim sistemi bileşenleri [74]	46
Şekil 3.17 Batarya yönetim sistemi devre tasarımı	46
Şekil 3.18 İnvertör sistemi devre tasarımı.....	48
Şekil 3.19 İnvertör, sigortaların bağlantı şeması ve hibrit invertör şeması.....	49
Şekil 3.20 Batarya şarj cihazı, sigortaların bağlantı şeması.....	50
Şekil 3.21 Hibrit depolama sistemi devre şeması	53
Şekil 3.22 Hibrit enerji depolama sistemi tasarımı	53
Şekil 3.23 Hibrit enerji depolama sistemi prototipi	56
Şekil 3.24 BMS anlık izleme ekranları	57
Şekil 3.25 Güç kalite ölçüm cihazı	58
Şekil 3.26 Test lokasyonu	61
Şekil 3.27 Güç kalite cihazı pano bağlantı şeması	62
Şekil 3.28 Frekans ölçümü.....	65

Şekil 3.29 Gerilim ölçümü	66
Şekil 3.30 Gerilim dengesizliği grafiği	68
Şekil 3.31 a) L1 fazı harmonik değer yüzdesi b) L2 fazı harmonik değer yüzdesi c) L3 fazı harmonik değer yüzdesi	71
Şekil 3.32 a) L1 fazı süperharmonik salınım yüzdesi b) L2 fazı süperharmonik salınım yüzdesi c) L3 fazı süperharmonik salınım yüzdesi	74
Şekil 3.33 ITIC analizi	77
Şekil 3.34 Frekans ölçümü	79
Şekil 3.35 Gerilim dengesizliği oranı	81
Şekil 3.36 a) L1 fazı harmonik değer yüzdesi b) L2 fazı harmonik değer yüzdesi c) L3 fazı harmonik değer yüzdesi	84
Şekil 3.37 a) L1 fazı süperharmonik salınım yüzdesi b) L2 fazı süperharmonik salınım yüzdesi c) L3 fazı süperharmonik salınım yüzdesi	85
Şekil 3.38 ITIC analizi	88

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1 Süperkapasitör ve lityum iyon pillerinin kıyaslanması.....	5
Tablo 3.1 Enerji depolama teknolojileri ve uygulamaları.....	22
Tablo 3.2 Batarya türleri ve temel özellikleri	32
Tablo 3.3 Lityum-iyon pil türleri ve kıyaslaması	36
Tablo 3.4 Şebeke Frekansı Ölçümleri.....	64
Tablo 3.5 Gerilim değişiklikleri tablosu	65
Tablo 3.6 Gerilim dengesizliği ve flicker değerleri	67
Tablo 3.7 Harmonik ölçümleri.....	69
Tablo 3.8 Yüksek frekanslı harmonik ölçümleri.....	73
Tablo 3.9 Hibrit depolama entegre frekans ölçümleri	79
Tablo 3.10 Gerilim değişiklikleri tablosu	80
Tablo 3.11 Gerilim dengesizliği ve flicker değerleri	80
Tablo 3.12 Harmonik ölçümleri.....	82
Tablo 3.13 Yüksek frekanslı harmonik ölçümleri.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
-------	----------

C	Cloumb
F	Farad
V	Gerilim

Kısaltma	Açıklama
----------	----------

AC	Alternatif Akım
BYS	Batarya Yönetim Sistemi
EDLC	Çift Katmanlı Kapasitörler
EDS	Enerji Depolama Sistemleri
EMI	Elektromanyetik Girişim
DC	Doğru Akım
HEDS	Hibrit Enerji Depolama Sistemleri
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
ITIC	Information Technology Industry Council
LFP	Lityum Demir Fosfat
PLT	Uzun Süreli Flicker
PST	Kısa Süreli Flicker
PQD	Power Quality Data
SAG	Gerilin Düşmesi
SOC	Stade of Charge
SOH	Stade of Health
SWELL	Gerilim Yükselmesi
THD	Toplam Harmonik Bozulma
TM	Trafo Merkezi

ÖZET

SÜPERKAPASİTÖR İÇERİKLİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN DAĞITIM ŞEBEKESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

KAVUŞ DEMİR, Elif

Yüksek Lisans, Elektrik & Elektronik Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Heybet KILIÇ

Mayıs 2025, 119 sayfa

Günümüzde hızla artan enerji talepleri, elektrik dağıtım şebekelerinde güç kalitesi, enerji sürekliliği ve yük dengeleme konularında ciddi zorluklar doğurmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegre edilmesiyle birlikte, şebeke dinamikleri daha karmaşık hale gelmiş ve ani yük değişimlerine karşı daha esnek, hızlı tepki verebilen, güvenilir sistem çözümlerine olan ihtiyaç artmıştır. Enerji depolama sistemleri; farklı enerji yoğunlukları ve tepki sürelerine sahip bileşenleri aynı yapıda birleştirebilme kabiliyetleri sayesinde dikkat çeken bir çözüm alternatifi hâline gelmiştir. Bu tez çalışmasında, alçak gerilimli dağıtım şebekelerinde güç kalitesini artırmak ve şebeke kararlılığını desteklemek amacıyla, lityum demir fosfat (LFP) batarya ve süperkapasitör bileşenlerinden oluşan bir hibrit enerji depolama sistemi tasarlanmış ve gerçek saha koşullarında uygulanarak değerlendirilmiştir. Sistem, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu dengesine uygun olarak yapılandırılmış; inverter aracılığıyla şebekeye paralel şekilde entegre edilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde, yalnızca şebeke enerjisi ile çalışan sistem ve hibrit sistem aktifken çalışan sistem olmak üzere iki farklı senaryo ele alınmıştır. Yapılan ölçümler; frekans ve gerilim stabilitesi, gerilim dengesizliği, harmonik ve süperharmonik bozulmalar, geçici olaylar ve ITIC eğrisi çerçevesinde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, hibrit sistemin şebekeye zarar vermeden entegre edilebildiğini, voltaj dalgalanmalarını sınırlayarak güç kalitesini iyileştirdiğini ve geçici olaylara karşı sistem performansını artırıcı etkide bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma, hibrit enerji depolama sistemlerinin yalnızca enerji yönetimi açısından değil, aynı zamanda güç kalitesinin sürekliliği ve sistem güvenliği açısından da önemli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, bu sistemlerin dağıtım şebekelerinde daha yaygın ve ölçeklenebilir biçimde uygulanabileceğine yönelik teknik bir temel oluşturmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama, Süperkapasitör, Güç Kalitesi, Dağıtım Şebekesi

ABSTRACT

EFFECTS OF HYBRID STORAGE SYSTEMS WITH SUPERCAPACITORS ON THE DISTRIBUTION NETWORK

KAVUŞ DEMİR, Elif

Master of Science in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Heybet KILIÇ

May 2025, 119 pages

In the contemporary context, the escalating demand for energy has given rise to significant challenges pertaining to the quality of power, the continuity of energy supply, and the balancing of loads within electricity distribution networks. This is particularly evident in the context of integrating renewable energy sources into the system, which has resulted in a more complex grid dynamics and an increased need for flexible, fast-response, reliable system solutions to sudden load changes. Energy storage systems have become an attractive solution alternative thanks to their ability to combine components with different energy densities and response times in the same structure. This thesis proposes a hybrid energy storage system, comprising a lithium iron phosphate (LFP) battery and a supercapacitor. The system has been designed and evaluated in real field conditions with a view to improving power quality and supporting grid stability in low voltage distribution networks. The configuration of the system is achieved through the balancing of energy and power density, and it is integrated in parallel with the grid via an inverter. The experimental setup encompassed two distinct scenarios: the system's operation exclusively on grid energy and its operation with the hybrid system enabled. The measurements were analysed in terms of frequency and voltage stability, voltage instability, harmonic and superharmonic distortions, transients and ITIC curve. The findings demonstrate that the integration of the hybrid system into the grid does not result in grid damage, enhances power quality by constraining voltage fluctuations, and optimises system performance in the face of transient events. The findings of this study demonstrate that hybrid energy storage systems provide a significant solution, not only in terms of energy management, but also in terms of power quality continuity and system security. The findings provide a technical basis for a more widespread and scalable implementation of these systems in distribution networks.

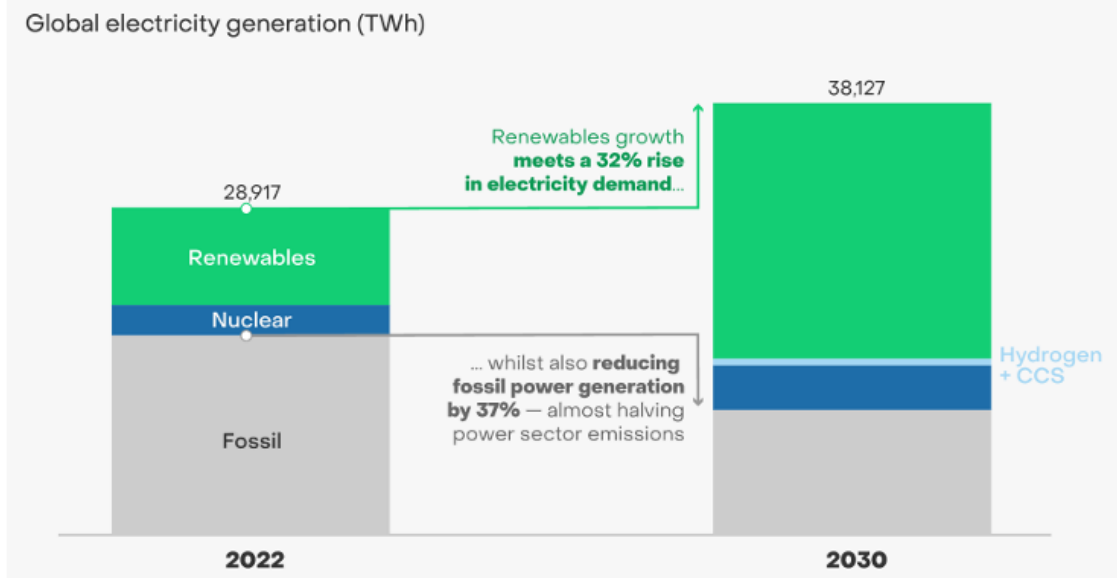
Keywords: Energy Storage, Supercapacitor, Power Quality, Distribution Network

1. GİRİŞ

1.1 Küresel Enerji Talebi ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Farklı Günümüzde, artan nüfus ve sanayileşmeden kaynaklanan enerji ihtiyacı ülkemizin kısıtlı kaynaklarıyla karşılanamamakta, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark hızla büyümektedir. Fosil yakıt rezervlerinin giderek tükenmesi ve çevresel etkilerinin artması, küresel enerji politikalarında köklü değişimlere yol açmaktadır. Fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesi ve çevresel etkilerinin giderek daha fazla hissedilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi artırmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi sürdürülebilir enerji kaynakları, hem enerji arz güvenliğini sağlamak hem de çevreye duyarlı bir enerji politikası izlemek açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu süreçte, yenilenebilir enerjiye olan talep artmakta; güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi kaynaklar enerji üretiminde daha büyük bir pay almaktadır. Enerji depolama ve batarya teknolojilerindeki ilerlemeler, yenilenebilir enerjinin fosil yakıtların yerini almasını hızlandırırken, enerji bağımsızlığı ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ülkeler, düşük karbonlu enerji kaynaklarına yönelmektedir. Bu dönüşüm, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Ember tarafından hazırlanan Global Elektrik İncelemesi 2024 raporuna göre, yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi, küresel elektrik üretimindeki payını artırarak toplam üretimin %30'una ulaşmıştır. Küresel elektrik talebinin, elektrikli araçlar, ısı pompaları ve veri merkezleri gibi teknolojilerin yaygınlaşmasıyla artmaya devam edeceği öngörülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) senaryosuna göre, yenilenebilir enerji üretimindeki artışın yarısından fazlası, küresel elektrik talebinde beklenen %32'lik büyümeyi karşılamak için kullanılacaktır. 2030 yılına kadar elektrik talebinin 9.000 TWh artması beklenmektedir (Şekil 1.1). Yenilenebilir enerjinin bu genişlemesi, sadece elektrik üretiminde değil, ulaşım ve bina gibi sektörlerde de petrol ve gazın yerini alarak fosil yakıt tüketimini azaltacaktır. COP28 zirvesinde belirlenen hedefler doğrultusunda, 2030 yılına kadar küresel yenilenebilir enerji kapasitesinin üç katına çıkarılması planlanmakta olup, bu süreç enerji sektörünün karbonsuzlaştırılması ve sürdürülebilir enerjiye geçişin hızlandırılması açısından kritik bir öneme sahip olacaktır. [1].



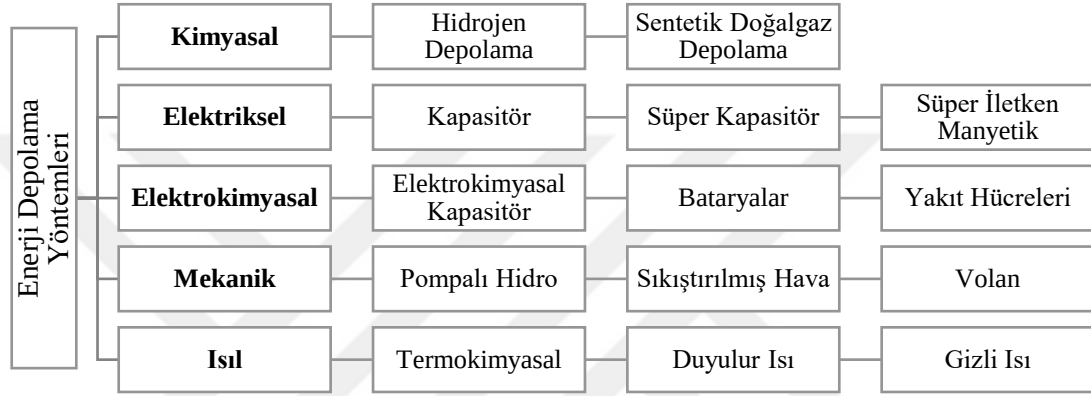
Şekil 1.1 Küresel elektrik talebi [1]

1.2 Enerji Depolama ve Küresel Gelişmeler

Enerji talebindeki artış, dünyada petrol, doğalgaz ve kömür gibi yüksek rezervuarlı kurulu güce sahip santrallerin rezervlerinin azalması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi hızla arttırmaktadır. Artan talep ile yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanması gerekmektedir. Dünya çapındaki enerji depolama kurulumları, 2030'un sonunda kümülatif 358 GW / 1.028 GWh'ye ulaşacak ve 2020'nin sonunda devrede olan 17 GW / 34 GWh'lik kapasiteden yirmi kat daha büyük olacak. Bu öngörü, sabit enerji depolamasının 262 milyar dolardan fazla yatırım gerektireceğini belirten araştırma şirketi BloombergNEF'in en son çalışmasında yer almaktadır [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen enerji sezonluk, günlük ve hatta anlık olarak bile büyük değişimler gösterebilmektedir. Üretilen enerjinin genel enerji talebi ile tam olarak örtüşmemesine neden olabilmektedir. Yükün enerji ihtiyacının her durumda başarı ile karşılanabilmesi, yük değişimlerinin şebekede yarattığı problemler için enerji depolama üniteleri oldukça büyük öneme sahiptirler.

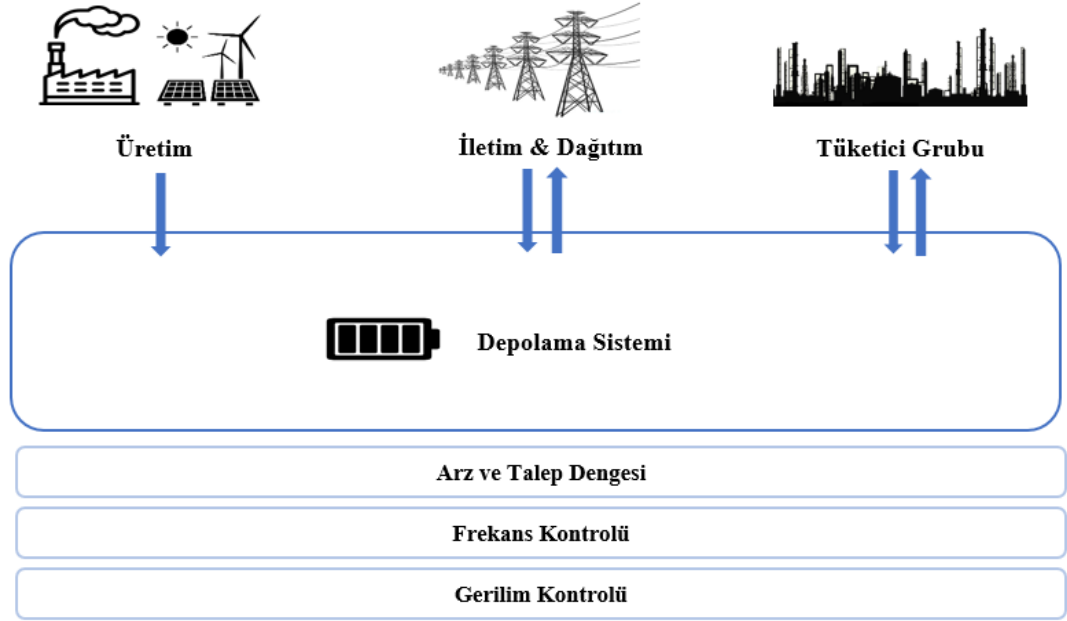
1.2.1 Enerji depolama teknolojileri

Depolama teknolojileri; elektrik şebekelerinin üretim, iletim ve elektrik dağıtım aşamalarında farklı uygulamaları olup, akıllı şebekelerin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Enerji depolama teknikleri Şekil 1.2’de verilmiştir. Enerji depolama teknikleri 5 ana bölüme ayrılabilir; kimyasal, elektrokimyasal, elektriksel, mekanik ve ısı depolama [3].



Şekil 1.2 Enerji depolama teknikleri

Akıllı şebekelerde depolama tesislerinin hedefleri; yük talebine karşılık kesintisiz güç sağlamak, şebeke kapasitesini optimize etmek için elektrik enerjisinin arz ve talep tarafını daha iyi dengelemek, yük eğrisinde günlük dalgalanmaları önlemek, frekans regülasyonu ve gerilim kontrolünü sağlama, üretim ve iletim kısıtlamalarından dolayı oluşan enerji maliyetlerindeki oynamaları düzenlemektir. Tüketim talebinin olduğu elektrik dağıtım şebekesinde ve şebekeden bağımsız depolama uygulamalarının araştırılması ve incelenmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Üretim, iletim, elektrik dağıtım, tüketici grubu ve depolama uygulamaları arasındaki yapı ve etkileri Şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3 Akıllı şebekede depolama topolojisi

1.2.2 Batarya teknolojilerindeki gelişmeler

Enerji pompalanmış su, sıkıştırılmış hava, elektrokimyasal pil, akü, batarya, kapasitörler gibi çeşitli yöntemler ile depolanabilmektedir. Batarya teknolojileri sürekli olarak gelişmektedir. Günümüzde daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip, daha hızlı şarj olan ve daha uzun ömürlü bataryalar geliştirmek için çalışılmaktadır. Lityum sülfür, sodyum iyon ve katı hal bataryaları gibi yeni teknolojiler, geleceğin enerji depolama ihtiyaçlarını karşılamak için büyük potansiyele sahiptir. Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, hafifliği ve uzun ömrü sayesinde elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum iyon piller, günümüzde batarya teknolojilerinde en önemli gelişme olarak kabul edilir. Kimyasal reaksiyonlar yoluyla elektrik enerjisi depolarlar, şarj ve deşarj süreleri daha uzundur. Yüksek enerji yoğunluğu ve uzun süreli enerji depolama gerektiren uygulamalar için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Ultra kapasitör veya süperkapasitörler olarak adlandırılan büyük kapasite değerine sahip kondansatörler, daha yüksek güç yoğunluklarına sahip olmaları nedeniyle daha yeni bir batarya teknolojisi olarak kabul görmektedir. Süperkapasitörler, kabul gören en önemli özelliği elektrik yükünü elektrotların yüzeyinde biriktirirler ve bu nedenle çok hızlı şarj ve deşarj olabilirler. Süperkapasitörler ve lityum iyon piller, her ikisi de elektrik enerjisini depolayan cihazlardır ancak çalışma prensipleri ve kullanım alanları bakımından önemli farklılıklar gösterirler. Süperkapasitörler, kısa süreli yüksek güç gerektiren, hızlı şarj ve deşarj özelliklerine ihtiyaç duyulan ve uzun ömürlü bir çözüm arayan uygulamalar için idealdir. Her iki teknoloji de hızla gelişmektedir. İki teknolojiye ait kıyaslama Tablo 1.1’de yapılmıştır. Hibrit enerji depolama sistemleri gibi yeni çözümler, her iki teknolojinin avantajlarını bir araya getirerek daha verimli ve çok yönlü sistemlerin ortaya çıkmasını sağlayabilir.

Tablo 1.1 Süperkapasitör ve lityum iyon pillerinin kıyaslanması

Özellik	Süperkapasitör	Lityum İyon
Enerji Yoğunluğu	Düşük	Yüksek
Güç Yoğunluğu	Yüksek	Düşük
Ömür	Çok uzun (Milyonlarca Döngü)	Kısıtlı (Binlerce Döngü)
Şarj Süresi	Çok Kısa	Daha Uzun
İç Direnç	Yüksek	Düşük
Maliyet	Daha Yüksek	Daha Düşük

1.2.3 Süperkapasitör teknolojisi

Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunlukları ve hızlı tepki süreleri sayesinde elektrik şebekelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegre edilmesi, mikro şebekeler ve elektrikli araç şarj istasyonları gibi alanlarda büyük potansiyele sahiptirler. Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunlukları ve hızlı şarj/deşarj özellikleri sayesinde elektrik şebekelerinde aşağıdaki avantajları sağlar;

Tepe yükleri düzeltme

Anlık enerji taleplerindeki ani yükselişler (tepe yükleri), elektrik şebekesi üzerinde büyük bir baskı oluşturur. Süperkapasitörler, bu yükselişleri absorbe ederek şebekenin stabilitesini koruyabilmektedir.

Frekans kontrolü

Elektrik şebekesindeki frekansın sabit tutulması, sistemin güvenliği için kritiktir. Süperkapasitörler, frekans düşüşlerinde hızlı bir şekilde enerji vererek veya frekans yükseldiğinde enerji depolayarak frekans kontrolüne yardımcı olmaktadır.

Yenilenebilir enerji entegrasyonu

Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimi, hava koşullarına bağlı olarak sürekli değişir. Süperkapasitörler, bu değişkenliği dengeleyerek yenilenebilir enerjinin şebekeye daha kolay entegre olmasını sağlamaktadır.

Mikro şebekeler

Süperkapasitörler, uzak veya izole bölgelerde kurulan mikro şebekelerde yedek güç kaynağı olarak kullanılabilir.

Elektrikli araç şarj istasyonları

Elektrikli araçların şarj işlemleri sırasında meydana gelen ani yük değişimlerini dengelemek için süperkapasitörler kullanılabilir.

1.3 Motivasyon

Günümüzde enerji talebindeki artış, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve yük profilindeki değişkenlik, elektrik dağıtım sistemlerinin karşılaştığı temel zorluklar arasında yer almaktadır. Bu değişkenlik, sistemin hem süreklilik hem de güç kalitesi açısından daha esnek ve kararlı yapılara ihtiyaç duymasına neden olmaktadır. Özellikle ani yük değişimleri, gerilim dengesizlikleri ve geçici olaylar, dağıtım şebekesindeki sistem bileşenlerinin performansını ve kullanıcı tarafındaki enerji kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu noktada, enerji depolama sistemleri; enerji arzı ile talep arasındaki dengesizlikleri azaltma, geçici olaylara karşı koruma sağlama ve güç kalitesini iyileştirme açısından stratejik bir çözüm sunmaktadır. Farklı zaman ölçeklerinde çalışan enerji depolama teknolojilerinin hibrit yapılar altında bir araya getirilmesi, sistemin hem kısa süreli tepkisini hızlandırmakta hem de uzun süreli yük dengeleme kapasitesini artırmaktadır. Hibrit enerji depolama sistemlerini geleneksel batarya sistemlerine kıyasla daha işlevsel hâle getirmektedir.

Bu tez çalışmasının temel motivasyonu, hibrit enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekesine entegre edildiğinde güç kalitesi üzerindeki etkilerini deneysel olarak ortaya koymak, sistemin şebeke davranışına olan katkılarını ölçmek ve saha düzeyinde uygulanabilirliğini değerlendirmektir. Çalışmanın literatürde süperkapasitör destekli sistemlerin pratik performansı konusundaki sınırlı veriyi genişletmesi ve benzer uygulamalara teknik bir zemin oluşturması hedeflenmektedir.

1.4 Tezin Katkıları

Günümüzde, artan nüfus ve sanayileşmenin bir sonucu olarak enerji talebi hızla yükseltmektedir. Mevcut enerji kaynaklarımız bu ihtiyacı karşılamada yetersiz kalmakta ve enerji arzı ile talebi arasındaki fark giderek büyümektedir. Elektrik enerjisinin kesintisiz ve verimli bir şekilde üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması, modern dünyada yaşamsal bir gereklilik haline gelmiştir. Bu bağlamda, enerji sistemlerinin sürekliliğini ve verimliliğini artırmak için yenilikçi çözümler geliştirilmesi önem arz etmektedir.

Enerji ihtiyacının etkin bir şekilde karşılanabilmesi adına, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin verimli bir şekilde depolanması gerekmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğal olarak değişken üretim yapısı, enerji talebi ile üretimi arasında dengesizlik oluşturabilmektedir. Bu nedenle, enerji depolama teknolojileri, şebeke stabilitesini sağlamak ve enerji arz güvenliğini artırmak için hayati bir rol oynamaktadır. Özellikle şebeke bağımsız sistemlerin geliştirilmesi ve mevcut enerji altyapısına entegre edilecek yeni depolama çözümlerinin incelenmesi, geleceğin enerji sistemleri için kritik bir çalışma alanı oluşturmaktadır.

Bu tez, enerji depolama sistemleri içerisinde önemli bir yere sahip olan süperkapasitörlerin dağıtım şebekelerinde kullanımını incelemeyi amaçlamaktadır. Özellikle akıllı şebeke sistemleri kapsamında, enerji depolama ünitelerinin şebeke ile birlikte çalışabilirliğini, enerji kalitesi üzerindeki etkilerini ve mevcut batarya sistemleri ile uyumluluğunu analiz etmek temel hedefler arasındadır. Süperkapasitörlerin, diğer enerji depolama sistemlerine göre sahip olduğu öne çıkan avantajların belirlenmesi ve bunların şebeke sistemleri içerisinde nasıl optimize edilebileceğinin araştırılması, çalışmanın bilimsel katma değerini arttırmaktadır.

Ayrıca, bu çalışma, süperkapasitör entegreli enerji depolama sistemlerinin elektriksel güç kalitesi ve şebeke istikrarı üzerindeki etkilerini inceleyerek, şebeke entegrasyonu konusunda yeni yaklaşımlar önermektedir. Bu bağlamda, depolama teknolojilerinin etkin kullanımı ile ilgili veri toplama, bilgi optimizasyonu ve enerji sistemi durum tahmini konularında yeni yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Elde edilen bulguların hem akademik literatüre katkı sağlaması hem de enerji dağıtım sistemlerinin etkinliğini artıracak yenilikçi çözümler sunması öngörülmektedir.

Bu tez, akıllı şebekeler kapsamında enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekelerine entegrasyonu, acil durumlar ve afet senaryolarında şebeke stabilizasyonu gibi kritik konuları kapsamakta olup, hem teorik hem de uygulamalı çalışmalar ile enerji alanındaki gelecekteki gelişmelere rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

1.5 Tezin Yapısı

Bu tez çalışması, hibrit enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekesine entegrasyonu ile güç kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Tez, altı ana bölümden oluşmaktadır.

- Giriş kısmında, çalışmanın motivasyonu, amacı, kapsamı ve yöntemi açıklanmıştır. Dağıtım şebekelerinde karşılaşılan güç kalitesi problemleri, bu problemlere çözüm olarak önerilen hibrit enerji depolama sistemleri ve çalışmanın dayandığı temel mühendislik yaklaşımı genel hatlarıyla sunulmuştur.
- Önceki Çalışmalar, literatürde yer alan güncel araştırmaların sistematik bir şekilde incelendiği bölümdür. Enerji depolama sistemlerinin temel bileşenleri, süperkapasitör ve batarya teknolojileri, hibrit yapıların teknik avantajları ve dağıtım şebekeleriyle entegrasyonu ele alınmış; ayrıca güç kalitesi parametreleri ve ilgili standartlar değerlendirilmiştir.
- Materyal ve Yöntemler kısmında, geliştirilen hibrit enerji depolama sisteminin teknik detayları, kullanılan donanım ve cihazlar, saha uygulama koşulları, ölçüm ve test prosedürleri detaylandırılmıştır.
- Bulgular, yapılan ölçüm ve testler sonucunda elde edilen verileri kapsamaktadır. Frekans, gerilim, gerilim dengesizliği, harmonikler, süperharmonikler ve geçici olaylara dair ölçüm sonuçları sunulmuş; yalnızca şebeke ve hibrit sistemli senaryolar karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir.
- Tartışma, elde edilen bulguların teknik ve sistematik olarak yorumlandığı bölümdür. Ölçüm verileri sistemin dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri teknik açıdan değerlendirilmiştir.
- Sonuç, çalışmadan elde edilen temel çıkarımların ve genel değerlendirmelerin sunulduğu bölümdür. Ayrıca gelecekte yapılabilecek araştırmalar ve sistem iyileştirmelerine yönelik öneriler de bu bölümde yer almaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Enerji ihtiyacının artması ve çevresel sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmış; bu durum enerji depolama teknolojilerine olan ilgiyi beraberinde getirmiştir. Elektrik şebekelerinin kararlılığını sağlamak, enerji arz-talep dengesini korumak ve yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu kolaylaştırmak amacıyla enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada depolama teknolojileri, hibrit enerji sistemleri ve süperkapasitör teknolojileri detaylı biçimde literatür incelemesi kapsamında ele alınmıştır.

2.1 Enerji Depolama Sistemlerinin Şebeke Entegrasyonundaki Rolü ve Gelişen Teknolojik Eğilimler

Enerji depolama sistemleri, akıllı şebeke yapıları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile birlikte enerji sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir. Bu sistemler, hem dağıtım şebekelerinde hem de mikro şebekelerde esneklik, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, enerji depolama teknolojilerinin teknik, ekonomik ve işlevsel yönlerini ele alarak sistem performansına olan etkilerini kapsamlı şekilde değerlendirmektedir.

Solak [4], bataryalı enerji depolama sistemlerinin artan yenilenebilir enerji üretim kapasitesi ile birlikte şebekeye sağladığı esneklik avantajlarını detaylı bir şekilde ele almıştır. Ayrıca, Trakya Bölgesi'ne baz yük olarak nükleer enerji eklemenin, şebeke esnekliği ihtiyacını karşılamada bütünleşik bir katkı sunabileceğini belirtmiştir. Kocaman [5] ise akıllı şebekeler ve mikro şebekelerde enerji depolama teknolojilerinin uygulanabilirliğini inceleyerek, son kullanıcıların üretim ve depolama kapasitelerinin artırılmasının şebekeye olan bağımlılığı azalttığını vurgulamıştır.

Stecca ve ark. [6], yenilenebilir enerji santrallerinin dağıtım şebekelerine entegrasyonuna dair kapsamlı bir inceleme sunarak, enerji depolama sistemlerinin bu süreci kolaylaştırmadaki rolünü ele almıştır. İki seviyeli gerilim dönüştürücülerin yetersizlikleri ve üç seviyeli modüler dönüştürücülerin üstünlükleri tartışılarak, dönüştürücü tasarımının sistem verimliliği ve maliyet etkinliği açısından önemi ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, enerji depolama yatırımlarının önündeki en büyük

engellerin yüksek ilk yatırım maliyetleri ve gelir akışlarındaki belirsizlikler olduğu, bu durumun ise birden fazla hizmeti aynı anda sunan sistemlerin tercih edilmesini gerektirdiği belirtilmiştir.

Mazman ve ark. [7], enerji depolama sistemlerinin uygulama türüne göre seçilmesinin maliyet-etkinlik açısından önemini vurgularken, Jiang ve ark. [8], dağıtık üretim sistemlerinde EDS'nin güç kaybını en aza indirmede ve gerilim profilini düzenlemede etkili olduğunu göstermiştir. Kozak ve ark. [9] ise çeşitli depolama yöntemlerini yatırım maliyeti, verimlilik, ekonomik ömür gibi kriterler doğrultusunda karşılaştırarak sistem seçiminde dikkate alınması gereken parametreleri belirlemiştir. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki kamu ölçekli enerji depolama projelerine yönelik yapılan bir analizde [10], güneş enerjisi ile batarya sistemlerinin aynı lokasyonda konumlandırılmasının toplam sistem maliyetlerini %7-8 oranında düşürdüğü, DC bağlantılı yapıların ise AC bağlantılı sistemlere kıyasla %1 daha düşük maliyet sunduğu ortaya konmuştur.

Kebede ve ark. [11], elektro-kimyasal, elektriksel, termal ve mekanik depolama teknolojilerini teknik ve ekonomik açılardan incelemiş; lityum-iyon bataryaların yüksek enerji ve güç yoğunluğu için, süperkapasitörlerin kısa süreli ve yüksek güç gerektiren uygulamalar için, termal depolamanın ise büyük ölçekli uzun vadeli uygulamalar için daha uygun olduğunu ifade etmiştir. Hibrit enerji depolama sistemlerinin ise performansı artırmak adına en verimli çözüm olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Wang ve ark. [12], batarya sistemlerinin orta gerilimli şebekelere entegrasyonunda güç elektroniği topolojilerinin belirleyici rol oynadığını ortaya koyarken; çok seviyeli dönüştürücüler ve transformatörsüz sistemlerin verimlilik açısından daha başarılı ancak daha karmaşık sistemler sunduğu belirtilmiştir.

Khalid ve ark. [13], elektrikli araçların yaygınlaşması önündeki teknik ve ekonomik engelleri ele alarak, enerji depolama sistemlerinin şarj altyapıları ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Bu bağlamda, yeni şarj teknolojilerinin

(örneğin endüktif güç transferi) enerji verimliliğini ve menzil güvenliğini artırmada önemli rol oynayacağı vurgulanmaktadır.

Rahman ve ark. [14] ile Evans ve ark. [15] tarafından yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerji üretiminin doğasında bulunan düzensizliğin, EDS ile dengelenebileceğini; batarya, termal ve mekanik sistemlerin bu süreçte çeşitli ölçek ve sürelerde katkı sunduğunu göstermektedir. Özellikle büyük ölçekli uygulamalarda pompalı hidroelektrik ve sıkıştırılmış hava sistemlerinin, kısa vadede ise bataryaların daha uygun olduğu ifade edilmiştir.

Li ve ark. [16], merkezi yönetim modelini önererek BESS'lerin gerilim dalgalanmalarını azaltma, enerji kayıplarını düşürme ve toplam maliyetleri minimize etme konusundaki etkisini sayısal analizlerle göstermiştir. Singh ve ark. [17] ise PV tabanlı mikro şebekelerde frekans kararlılığının sağlanmasında enerji depolamanın kritik rol oynadığını ve önerilen kontrol sistemlerinin bu hedefe ulaştığını belirtmiştir. Celli ve ark. [18], EDS'lerin optimum entegrasyonunun şebeke verimliliği açısından stratejik bir planlama aracı olduğunu ileri sürerken, Luo ve ark. [19], belirsizlik altında işletilen mikro şebekelerde optimize edilmiş enerji yönetimi ile işletme maliyetlerinin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir.

Mohamad ve ark. [20], batarya sistemlerinin güneş enerjisi ile entegre edildiği şebekelerde geleneksel yerleşim yöntemlerinin verimsiz olduğunu, bu nedenle ağ topolojisi dikkate alınarak yapılan optimizasyonun enerji israfını azalttığını ifade etmektedir. Sayed ve ark. [21] ise fosil yakıtlardan uzaklaşmada enerji depolamanın ve yeşil hidrojen teknolojilerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır.

Zidar ve ark. [22], EDS'nin dağıtım şebekelerindeki optimum tahsisinin arz güvenliğini ve şebeke kararlılığını doğrudan etkilediğini vurgularken, Adewumi ve ark. [23], dağıtık enerji depolama sistemlerinin merkezi sistemlere kıyasla güç kalitesini daha etkin biçimde iyileştirdiğini NEPLAN yazılımı ile doğrulamıştır.

Nderitu ve ark. [24], kamu ölçekli EDS'nin çok yönlü katkılarını; arz-talep dengesini sağlama, iletim ve dağıtım sistemlerini destekleme ve kesintili üretimin etkilerini azaltma bağlamında ele almıştır. He ve ark. [25], ise taşınabilir enerji depolama

sistemlerinin esnek, ekonomik ve sürdürülebilir yapıları sayesinde şebeke entegrasyonunu iyileştirdiğini ve yaşam döngüsü gelirlerini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, literatürde yer alan çalışmalar, enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji entegrasyonunda, şebeke güvenliğinde, ekonomik verimlilikte ve sistem esnekliğinde vazgeçilmez bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Farklı teknolojilerin hibrit biçimde bir araya getirilmesi, gelişmiş güç elektroniği topolojileri ile entegre edilmesi ve belirsizlikleri minimize eden yönetim algoritmalarının uygulanması, gelecekte enerji depolama çözümlerinin başarısını artıracak temel stratejiler arasında yer almaktadır.

2.2 Hibrit Depolama Sistemleri ve Enerji Yönetim Stratejileri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyon sürecinde karşılaşılan temel zorluklardan biri, bu kaynakların üretimindeki dalgalanmalardır. Bu nedenle enerji depolama sistemleri (EDS), sistem esnekliği ve güç kalitesinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol üstlenmektedir. Literatürde, batarya ve süperkapasitörlerin hibrit olarak kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemleri (HESS), bu soruna çözüm sunmak üzere kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Díaz-González ve ark. [26], fotovoltaik santrallerin şebekeye entegrasyonunda kullanılmak üzere batarya ve süperkapasitörlere dayalı hibrit bir enerji depolama sistemi tasarlamış ve bu sistemi yöneten iki seviyeli bir denetleyici geliştirmiştir. Bu yapı, santraldeki fazla enerjinin etkin şekilde depolanmasını sağlarken, hizmet seviyesinin optimizasyonu ve pil bozulmasının minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen donanım ve yazılım çözümleri, yenilenebilir enerji entegrasyonu sürecinde çok amaçlı depolama sistemlerinin uygulanabilirliğine katkı sağlamıştır.

Jayasinghe ve ark.[27], hibrit enerji depolama sistemlerinde DC-DC dönüştürücülerin neden olduğu ek maliyet ve güç kayıplarına dikkat çekerek, bu sistemlerin diyot kelepçeli üç seviyeli bir invertörün DC bağlantısına doğrudan bağlanmasını önermiştir. Böylelikle ek dönüştürücülere olan ihtiyaç ortadan kaldırılarak sistem verimliliği artırılmıştır. Ayrıca, batarya ve süperkapasitör arasındaki güç paylaşımı

küçük vektör bileşimi değiştirilerek yönetilmiş, bu da sistem kontrolünde önemli bir esneklik sağlamıştır.

Kim ve ark. [28], hibrit sistemlerin düzenleme hizmetlerinde kullanımına odaklanmış; hem kapasite tahsisi hem de çalışma zamanı yönetimi içeren çift aşamalı bir sistem önermiştir. Bu sistem sayesinde, düzenleme hizmeti sağlayıcılarının kazancında aktif sistemler için %5,44, pasif sistemler için %1,16 oranında artış sağlandığı gösterilmiştir.

Deng ve arkadaşları [29], süperkapasitör destekli hibrit sistemlerin enerji verimliliğini optimize etmeye yönelik bir yaklaşım sunmuş, sistemin şebeke tarafındaki yükünü azaltarak şarj verimliliğini ve operasyonel ekonomikliğini artırmıştır. Özellikle bir tramvay hattı üzerinde yapılan uygulamada, daha düşük işletme maliyetleri ile verimlilikte anlamlı iyileşmeler elde edilmiştir.

Rocabert ve ark. [30], süperkapasitörler ve elektrokimyasal pillerin entegre edildiği sistemlerin çift yönlü güç akışı gerektiren uygulamalarda çekici ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermiştir. Bu entegrasyon, bataryaların yüksek enerji yoğunluğu ile süperkapasitörlerin dinamik tepkisini bir araya getirerek hibrit sistemlerin performansını önemli ölçüde artırmaktadır.

Zhao ve arkadaşları [31], hibrit enerji depolama sistemlerinde kapasite tahsisinin optimizasyonuna odaklanmış, sistemin net yük gücü ve dinamik fiyatlandırma bilgilerini dikkate alarak toplam güç gereksinimlerini belirleyen bir model geliştirmiştir.

Koyi Boukila [32], süperkapasitörlerin fotovoltaik sistemlerdeki katkılarını simülasyonlarla göstermiş, bu elemanların özellikle ani yük değişimlerine hızlı yanıt vererek sistem performansını artırabileceğini ortaya koymuştur.

Choi ve arkadaşları [33], HESS yapılarında enerji akışının DC-DC dönüştürücülerle dinamik olarak düzenlendiği bir model geliştirmiştir. Bu model ile batarya akımındaki

dalgalanmalar azaltılmış, süperkapasitörlerin iç direnç kaynaklı enerji kayıpları optimize edilmiştir.

Cabrane ve arkadaşları [34], güneş ışıınımı ve yük değişimleri gibi dışsal etkenlerin etkisiyle PV sistemlerin istikrarını sağlamak adına HESS yapılarının önemine dikkat çekmiştir. Batarya ömrünü uzatan ve enerji kayıplarını azaltan bu sistemlerin maliyet-etkin çözümler sunduğu belirtilmiştir.

Jing ve arkadaşları [35], bağımsız doğru akım mikro şebekelerinde HESS kullanarak sistem verimliliğinin artırılabilceğini ve batarya stresinin azaltılabilceğini ortaya koymuştur. Ancak, bu sistemlerin entegrasyonunda karşılaşılan ekonomik ve teknik zorluklar da vurgulanmıştır.

Zhang ve arkadaşları [36], üç farklı güç paylaşım stratejisini karşılaştırarak, doğru kontrol yöntemlerinin batarya ömrünü uzatabileceğini, enerji verimliliğini artırabileceğini ve sistemin genel performansını iyileştirebileceğini belirtmiştir.

Murty ve arkadaşları [37], MILP tabanlı çok amaçlı bir optimizasyon modeli ile mikro şebekelerde enerji yönetimini ele almış, bu modelin karbon emisyonlarını %51,6 oranında düşürdüğünü göstermiştir.

Chang ve ark. [38], dağıtık enerji depolama sistemlerinin şebekeye entegrasyonunu ele almış ve bu sistemlerin frekans regülasyonu, gerilim stabilizasyonu gibi şebeke destek işlevlerinde önemli roller üstlendiğini göstermiştir.

Son olarak, Song ve ark. [39], elektrikli araçlarda HESS kullanarak batarya ömrünü uzattığını ve işletme maliyetlerini %12 oranında düşürdüğünü göstermiştir. Bu bulgular, HESS yapılarının sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Tüm bu çalışmalar, batarya ve süperkapasitörlerin entegre şekilde kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemlerinin, enerji yönetiminde esneklik sağladığını, sistem verimliliğini artırdığını ve uzun vadeli sürdürülebilir çözümler sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

2.3 Süperkapasitörlerin Akıllı Enerji Sistemlerindeki Rolü: Uygulamalar, Modeller ve Entegrasyon Stratejileri

Günümüzde enerji ihtiyacının artması, çevresel kaygılar ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması hedefleri doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve bu enerjilerin verimli şekilde depolanması büyük önem kazanmıştır. Bu bağlamda süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj-deşarj kabiliyeti ve uzun ömürleri sayesinde enerji depolama sistemlerinde dikkate değer bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [40].

Süperkapasitörlerin elektrikli araçlara entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, özellikle güneş enerjisi destekli hibrit sistemlerin sürüş menzillerini artırdığı ve enerji yönetimini iyileştirdiği gösterilmiştir [41]. Bu kapsamda, enerji depolama sistemlerinin optimizasyonu açısından süperkapasitörlerin bataryalarla birlikte hibrit olarak kullanılması, sistemin performansını olumlu yönde etkilemektedir [28]. Bulanık mantık denetleyici gibi gelişmiş kontrol mekanizmalarıyla desteklenen süperkapasitör-batarya hibrit sistemleri, çıkış akımı dalgalanmalarını azaltarak elektrikli araçların güvenliğini ve verimliliğini artırmaktadır [42].

Süperkapasitörlerin yalnızca taşıtlarda değil, aynı zamanda şebeke uygulamalarında da önemli roller üstlendiği görülmektedir. Özellikle dağıtılmış yenilenebilir enerji üretiminde, voltaj denetleyicisiyle desteklenen süperkapasitör tabanlı güç düzeltme yapıları, yüksek frekanslı enerji bileşenlerinin azaltılmasında ve sistem kararlılığının sağlanmasında etkili olmaktadır [43]. Bununla birlikte, güç kalitesinin iyileştirilmesi, reaktif güç enjeksiyonu ve sistem stabilizasyonu gibi konularda da süperkapasitör destekli sistemlerin verimliliği çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur [44].

Süperkapasitörlerin mikroşebekelerdeki uygulamaları da dikkat çekicidir. Reigstad [45], tarafından yapılan çalışmada, doğru akım mikroşebekelerinde süperkapasitörlerin güç dengeleme elemanı olarak kullanımının, özellikle ani yük değişimlerine hızlı tepki verme ve şebeke kararlılığını artırma açısından avantaj sağladığı gösterilmiştir. Ross [46] ise geleneksel kurşun-asit bataryalarla kıyaslandığında süperkapasitör destekli hibrit enerji depolama sistemlerinin, batarya

üzerindeki gerilimi azaltarak döngü ömrünü uzattığını ve enerji kayıplarını minimize ettiğini ifade etmektedir.

Malzeme teknolojileri açısından bakıldığında, süperkapasitörlerin performansını belirleyen temel unsurların elektrot malzemeleri, elektrolit yapıları ve hücre tasarımı olduğu belirtilmektedir [47], [48], [49]. Bu kapsamda, hem laboratuvar düzeyinde gerçekleştirilen deneysel karakterizasyon çalışmaları hem de modelleme yöntemleri süperkapasitörlerin elektriksel özelliklerinin detaylı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır [47], [49].

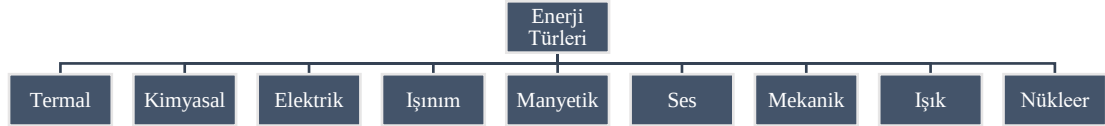
Şahin ve ark. [49], tarafından yapılan kapsamlı literatür çalışmasında, süperkapasitörlerin tarihsel gelişimi, uygulama alanları, ekonomik boyutları ve pazardaki yeri analiz edilmiştir. Bu analizler, süperkapasitörlerin enerji sistemlerindeki yaygınlığını artırmak için üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve yeni malzeme teknolojilerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, süperkapasitörler, hem taşıt teknolojilerinde hem de şebeke temelli enerji sistemlerinde güvenilirlik, verimlilik ve uzun ömür açısından önemli katkılar sunmaktadır. Hibrit sistemler içinde kullanımları, özellikle bataryaların yükünü hafifletme ve sistem kararlılığını sağlama açısından kritik rol oynamaktadır. Mevcut literatür, süperkapasitörlerin gelecekte enerji depolama çözümlerinde daha geniş bir kullanım alanı bulacağına işaret etmektedir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Enerji Depolama Sistemleri

Enerji tüketildiğinde, bir enerji türünden diğer enerji türüne dönüşmekte ve enerji depolama teknolojileri, enerjinin daha sonra kullanılması için depolanmaktadır[50]. Bazı enerji türleri Şekil 3.1’de yer almaktadır [51].



Şekil 3.1 Enerji türleri

Enerji depolama teknolojileri ve yöntemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir kullanımını sağlamak, enerji arz güvenliğini artırmak ve şebeke istikrarını korumak için kritik bir öneme sahiptir [52]. Bataryalar, süperkapasitörler, hidrojen depolama ve pompalı hidroelektrik sistemler gibi çeşitli teknolojiler, enerji dönüşüm süreçlerinde verimliliği artırmak amacıyla geliştirilmektedir [53]. Gelecekte, malzeme bilimi ve yapay zeka destekli yönetim sistemlerindeki ilerlemeler sayesinde, enerji depolama çözümlerinin maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirliği daha da iyileştirilecektir [54].

Günümüzde modern enerji sistemleri, arz güvenilirliği, sistem stabilitesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması ve iletim/elektrik dağıtım problemlerinin minimize edilmesi gibi nedenlerle enerji depolama teknolojilerini zorunlu kılmaktadır. Termik santrallerin ağırlıklı olduğu enerji üretim sistemlerinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve verimli kullanımı için hızlı devreye girip çıkabilen enerji depolama çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç, ya fosil yakıt santrallerinin sıcak yedek olarak tutulmasıyla ya da hidroelektrik ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu ile karşılanabilir.

Fosil yakıt santrallerine ağırlık verilmesi, zaten yüksek seviyelerde olan dışa bağımlılığı artırmakta ve karbon emisyonlarını yüksek seviyelere çıkarmaktadır. Bunun aksine, enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme

entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve elektrik şebekelerinin daha esnek ve verimli şalışmasını sağlamaktadır.

Enerji depolamanın avantajları

- Enerji üretim sistemlerinin işletme verimliliğini, dayanıklılığını ve esnekliğini artırarak sürekliliği sağlar.
- Enerji arz ve talebi arasındaki uyumsuzlukları azaltır.
- şebekedeki gerilim ve frekans regölasyonunu destekler.
- Güneş ve rüzgar gibi kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarından sürekli enerji elde edilememesi sorununu çözer, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji içindeki payını artırır.
- Fosil yakıt kullanımını azaltarak karbon salımını minimize eder.
- Santrallerin ilk yatırım ve işletme maliyetlerini optimize eder.
- Güç kalitesini iyileştirir.
- Atık enerjiyi sisteme geri kazandırarak enerji verimliliğini artırabilir.

Enerji depolamanın dezavantajları

- Enerji depolama teknolojilerinin avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır:
- Elektrik şebekesine entegrasyonu için yüksek ilk yatırım maliyetleri gerektirir.
- Elektrik enerjisini depolamak için dönüşümler gereklidir (AC'den DC'ye, kimyasal enerjiye vb.), bu da verim kaybına neden olur.
- Yüksek gücün gerekli olduğu durumlarda pompalanmış hidroelektrik veya sıkıştırılmış hava sistemleri kullanılmalıdır, ancak bu sistemlerin kurulum alanları sınırlıdır ve maliyetleri yüksektir.

Günümüzde enerji depolama, serbestleşen elektrik piyasalarında değer zincirinin stratejik bir unsuru olarak öne çıkmakta ve hızla büyüyen küresel bir endüstri haline gelmektedir. Özellikle liberal piyasa modellerinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunun sağlanabilmesi açısından enerji depolama sistemleri kritik bir rol üstlenmektedir. Yapılan teknik analizler ve fizibilite değerlendirmeleri, enerji

depolamanın yalnızca teknik bir ihtiyaç olmadığını, aynı zamanda ekonomik açıdan da maliyet-etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

3.1.1 Enerji depolamanın amacı ve faydaları

Günümüzde artan nüfus, teknolojik ilerlemeler ve sanayileşmenin hız kazanmasıyla birlikte, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengesizlik giderek büyümektedir. Bu doğrultuda, hızla artan enerji talebinin karşılanabilmesi için mevcut enerji kaynaklarının daha verimli ve etkin bir biçimde kullanılması her geçen gün daha da kritik hale gelmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin etkin biçimde depolanması ve bu enerjinin ihtiyaçlara uygun şekilde dönüştürülmesi, sürdürülebilir bir enerji yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Günümüzde dünya genelindeki enerji ihtiyacının büyük kısmı hâlâ kömür, doğal gaz ve petrol gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak bu kaynakların tükenebilir olması, gelecekte üretim ve tüketim dengesi üzerinde ciddi sorunların ortaya çıkmasına neden olabilecektir.

Üretilen, sürdürülebilir enerjinin devamı konusunda da fosil yakıtların dışında kullandığımız alternatif enerji kaynaklarında da mevsim ve hava koşullarına bağlılık söz konusudur. Üretilen enerjinin saatlik, günlük, haftalık üretimleri anlık olarak değişim göstermektedir. Bu durum, gerekli olan enerji talebinin karşılanamamasına sebep olmaktadır. Bu olumsuz koşulların önüne geçmek için, enerji talebinin yoğun olmadığı zamanda üretilen enerji depolanması ve gerektiğinde devreye alınması büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Enerji depolamanın amacı enerji temini ve talebi arasındaki orantıdan doğabilecek farkı en aza indirmek olarak tanımlanmaktadır. Enerji depolama ile kullanılan enerji sisteminin verimi artmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından depolanan enerji de yakıtların çevreye verdiği zararın önüne geçilmesinde önemli rol oynamakta ve enerji depolama daha az fosil yakıt tüketilmesine bağlı olarak çevreye yayılan sera gazı miktarının azalması buna bağlı olarak küresel ısınmaya karşı büyük bir destek vermektedir. Ülkemizin fosil yakıtlar bakımından dışa bağımlılığı düşünüldüğünde, enerji depolama ile sağlanacak enerji tasarrufunun ülke ekonomisine ciddi katkılar sağlayacağı bilinmektedir.

Enerji depolama ile enerji istendiği zaman ve istenilen yerde kullanılmaya hazır olması sebebiyle büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, yüksek depolama kapasitesi, uzun ömür, maliyet ve enerjiyi en az hacimde en yoğun şekilde depolamak oldukça önemlidir.

Enerji depolama sistemleri, hem enerji verimliliğini artırmak hem de yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasından kaynaklanan arz-talep dengesizliklerini gidermek amacıyla kritik bir rol oynamaktadır. Sanayi ve endüstride ortaya çıkan atık ısının depolanması gibi uygulamalar, enerji kayıplarını azaltarak sürdürülebilir enerji yönetimini desteklemektedir [54]. Bunun yanı sıra, yalnızca belirli zamanlarda enerji üretebilen güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması, enerji sürekliliğinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Böylece, enerji sistemlerinin verimi artırılmakta ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Örneğin, ısı depolama sistemlerinin kullanımıyla kış aylarında depolanan ısının yeniden kullanılması, ısıtma sistemlerinde %22'ye, yaz aylarında ise iklimlendirme sistemlerinde %40'a varan oranlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu yöntem, yardımcı enerji kaynağı ihtiyacını azaltarak fosil yakıt tüketimini düşürmekte ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sunmaktadır [55]. Daha az fosil yakıt kullanımı, sera gazı emisyonlarının azalmasına ve dolayısıyla küresel ısınmanın yavaşlatılmasına yardımcı olmaktadır.

Enerji depolama sistemleri, bireysel ve ulusal ekonomi üzerinde de olumlu etkiler yaratmaktadır. Elektrikle ısıtılan evlerde gece boyunca fazla tüketilen enerjinin depolanarak gündüz saatlerinde kullanılması, daha düşük maliyetli bir enerji yönetimi sağlamaktadır. Ayrıca, gündüz tüketilen enerjinin gece kullanılan enerjiden daha pahalı olması nedeniyle, bireysel enerji harcamalarının azalmasına da olanak tanımaktadır. Ülkemizin fosil yakıtlar açısından dışa bağımlı olduğu göz önüne alındığında, enerji depolama teknolojileriyle sağlanacak enerji tasarrufunun ulusal ekonomi için önemli katkılar sunacağı kesindir. Enerji depolama teknolojileri ve sık kullanım alanları Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Enerji depolama teknolojileri ve uygulamaları

Enerji Depolama Teknolojileri	Uygulamalar
Elektriksel (Süper kapasitör/Ultra kapasitör) Kimyasal (Yakıt hücreleri, kurşun-asit pilleri, Lityum-iyon pilleri, Metal hava pilleri, Nikel kadmiyum pilleri)	Elektrikli Araçlar
Elektriksel (Süper kapasitör/Ultra kapasitör, Mikro Süperiletken manyetik enerji depolama-SMES, Geniş SMES) Mekaniksel (Yüksek güç volanlar, pompalı hidroelektrik, Sıkıştırılmış hava enerji depolama (CAES)) Isıl enerji depolama	Akıllı Şebekeler
Kimyasal (Sodyum Sülfür-NaS pilleri, Kurşun-asit pilleri, Lityum-iyon pilleri, Metal hava pilleri, Nikel kadmiyum-NiCd pilleri, Yakıt hücreleri, Akış Çinko bromür-ZnBr)	
Kimyasal (Kurşun-asit pilleri, Lityum-iyon pilleri, Metal hava pilleri, Yakıt hücresi) Isıl enerji depolama	Bina ve Evler

3.1.2 Elektrik enerjisi depolama teknolojileri

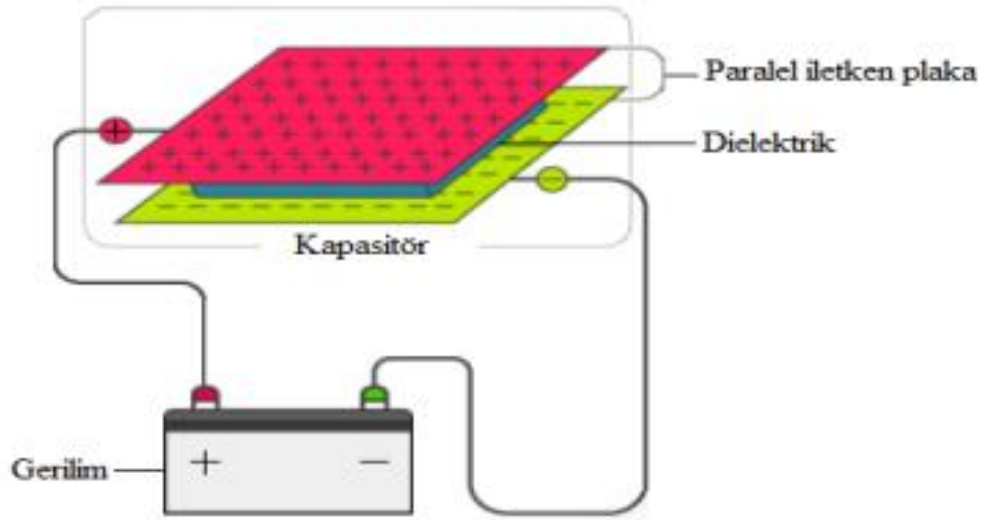
Enerji Depolama Teknolojileri, güç kalitesinin iyileştirilmesi, elektrikli araçlar ve akıllı şebekeler gibi çeşitli alanlarda önemli bir uygulama potansiyeline sahiptir. Bu teknolojiler, enerji depolama kapasitesini artırarak sistem verimliliğini yükseltmeye yardımcı olmaktadır. Kapasitörler, ultra kapasitörler ve süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri gibi enerji depolama teknolojileri türleri, farklı enerji depolama ihtiyaçlarına göre optimize edilmiştir ve günümüzde elektrikli araçlardan enerji şebekelerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu teknolojilerin gelişimi, enerji yönetimi ve depolama çözümlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale gelmesine olanak tanımaktadır.

3.1.2.1 Kapasitörler

Kapasitörler, elektrostatik formda depolanan enerjiyi elektrik enerjisi olarak açığa çıkaran enerji depolama cihazlarıdır. Bu cihazlar, yapılarında herhangi bir bozulma olmadan yüz binlerce şarj-deşarj döngüsüne dayanabilirler. İlk başta tüketicilerin küçük elektronik cihazlarında yaygın olarak kullanılan kapasitörler, zamanla silah sistemleri ve ticari elektrikli araçların güç temini gibi daha büyük uygulamalara yönelik olarak geliştirilmiştir. Günümüzde, kapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırmaya yönelik araştırmalar, bu teknolojinin potansiyelini daha da genişletmektedir. Kapasitörler, farklı yapısal ve performans özelliklerine sahip, çeşitli enerji depolama ve elektriksel dengeleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin, diyalektik

kapasitörler, yüksek gerilim dayanımı ve hızlı tepki süreleriyle öne çıkarken, film kapasitörleri düşük kayıp oranları ve uzun ömürleri sayesinde güvenilir bir seçenektir. Seramik kapasitörler, küçük boyutları ve yüksek frekans dayanımlarıyla elektronik devrelerde yaygın olarak kullanılmakta, elektrolitik kapasitörler büyük kapasitans değerleriyle güç sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Öte yandan, süperkapasitörler yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj özellikleri sayesinde elektrikli araçlardan yenilenebilir enerji sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çift tabakalı kapasitörler ve psödokapasitörler, enerji depolama kapasitesini artırarak, geleneksel bataryalara alternatif olarak öne çıkmaktadır.[56]

Kapasitörlerin elektrik enerjisi depolama kapasiteleri; enerji depolama, filtreleme ve darbe üretme gibi amaçlar için doğru ve alternatif akım devrelerinde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Kapasitörlerin enerji depolama prensip şeması Şekil 3.2’de verilmiştir

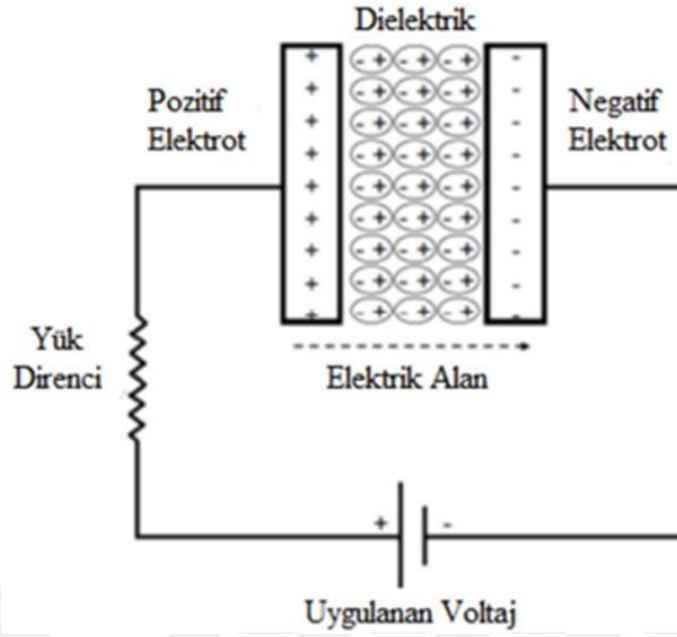


Şekil 3.2 Kapasitörde enerji depolama prensip şeması[57]

Kapasitörler, elektrik enerjisini Farad’ın kesirleri veya katları mertebesinde depolayabilen temel devre elemanlarıdır. Bir Farad (F), kapasitörde bir Volt (V) değişim meydana geldiğinde, kapasitörün Coulomb (C) cinsinden yük kazandığı değeri ifade etmektedir. Kapasitörlerin iki temel uygulama alanı bulunmaktadır. Birinci uygulama, kapasitörlerin elektrik enerjisini depolayarak şarj vedeşarj edebilme özelliğidir. Bu özellik, güç kaynaklarındaki gerilim dalgalanmalarının

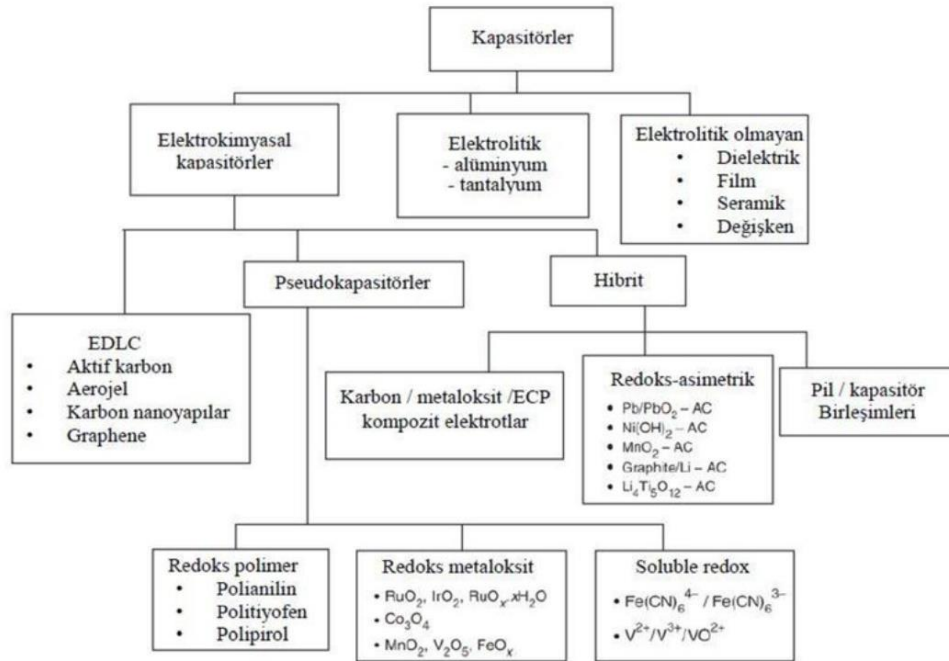
önlenmesi, mikrobilgisayarların yedekleme sistemlerinde enerji sağlanması ve zamanlayıcı devrelerin çalıştırılması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci temel uygulama ise, kapasitörlerin doğru akımı bloke ederek alternatif akımın iletimine izin vermesidir. Bu özellik, belirli frekansları süzmek veya belirli frekans aralıklarını engellemek amacıyla filtreleme devrelerinde kullanılmaktadır. Özellikle haberleşme sistemlerinde, ses devrelerinde ve güç elektroniği uygulamalarında, kapasitörlerin filtreleme işlevi büyük önem taşımaktadır.

Çift Elektrik yüklerinin çift katmanlı bir yapı aracılığıyla depolanmasına ilişkin ilk çalışma, 1957 yılında Becker tarafından gerçekleştirilmiştir. Kapasitans, bir sistemin elektriksel enerji tutma kapasitesini ifade eden temel bir parametredir. Bir kapasitör ne kadar fazla enerji depolayabiliyorsa, kapasite değeri de o oranda yüksektir. Kapasitans birimi farad (F) olarak tanımlanmaktadır. Kapasitörlerin tarihi, modern bataryaların geliştirilmesinden daha eskiye, 1700'li yıllara kadar uzanmaktadır [58]. Günümüzde farklı tiplerde birçok kapasitör bulunsada, en yaygın kullanılan tür düzlemsel kapasitörlerdir. Bu yapı genellikle iki iletken levha ile bu levhalar arasında yer alan yalıtkan (dielektrik) bir malzemeden oluşmaktadır. Kapasitörlerde, iletken levhalar mümkün olduğunca büyük yüzey alanına sahip olacak şekilde ve aralarındaki mesafe en aza indirgenecek biçimde konumlandırılır. Cihaza bir gerilim uygulandığında, zıt yüklü elektrik yükleri elektrotların yüzeylerinde birikir. Yüklerin dielektrik malzeme tarafından fiziksel olarak ayrılması sonucu oluşan elektrik alan, enerji depolanmasını mümkün kılar. Bu depolama sürecine ilişkin şematik gösterim Şekil 3.3'te sunulmaktadır.



Şekil 3.3 Kapasitörün enerji depolarken şematik görüntüsü

Günümüzde ihtiyaçlara ve kullanım yerlerine göre şekil, boyut, yalıtkan malzemesi ve kapasitans değerine göre sınıflandırılmış çeşitli kapasitörler üretilmektedir. Şekil 3.4'te kapasitörlerin yaygın türlerinin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 3.4 Kapasitörlerin yaygın türlerinin sınıflandırılması[59]

3.1.2.2 Ultrakapasitörler veya süperkapasitörler

Süperkapasitörler (ultra kapasitörler), yüksek kapasitans değerleri ve hızlı şarj-deşarj yetenekleri ile enerji depolama sistemlerinde önemli bir bileşen haline gelmiştir. Süperkapasitörler, enerji tamponu işlevi görmekle birlikte, elektrik şebekelerinin güç kalitesini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Süperkapasitörler, milisaniyelerden dakikalara kadar değişen sürelerde yüksek güç deşarjı gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm olmaktadır. Yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları sayesinde, çok kısa sürede güç sistemine yüzlerce hatta binlerce amperlik akım sağlayarak ani güç dalgalanmalarının dengelenmesine yardımcı olmaktadır.

Süperkapasitörlerin en önemli avantajlarından biri, kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmeden doğrudan elektrik enerjisini depolayabilmekte ve bu özellikleri sayesinde, geleneksel bataryalara kıyasla çok daha kısa sürede şarj ve deşarj işlemlerini tamamlayabilmektedirler. Örneğin, lityum iyon bataryalar normal şartlarda birkaç saat, hızlı şarj modunda ise birkaç on dakikada tam doluluğa ulaşabilirken, süperkapasitörler bu işlemi yalnızca birkaç saniye içinde gerçekleştirebilmektedir. Bataryalara kıyasla uzun ömürlü olmaları ve bakım gerektirmemeleri süperkapasitörlerin avantajları arasında yer almaktadır.

Süperkapasitörler, geniş sıcaklık aralıklarında çalışma yeteneğine sahiptir ve -40°C ile $+85^{\circ}\text{C}$ arasında performans göstermektedir. Esnek gerilim düzeyi, yüksek akım kapasitesi ve uzun işletim ömrü, bu teknolojinin enerji depolama sistemlerinde tercih edilmesini sağlayan temel faktörlerdir. Aktif filtre uygulamalarında süperkapasitörlerin kullanımı artmakta ve yüksek hızda enerji depolama kapasitesi ile güç kalitesinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen geçici gerilim çöküşleri ve kısa süreli kesintiler gibi sorunların giderilmesinde etkin bir çözüm sunmaktadır. Şebekede gerçekleşen elektrik kesintileri sırasında gerilim kararlılığının sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Süperkapasitörlerin gelişen teknolojisi ve özellikleri, yenilenebilir enerji sistemlerinden elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanımını her geçen gün artırmaktadır.

Süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj-deşarj özellikleriyle enerji depolama sistemlerinde önemli bir rol oynayan elektrokimyasal cihazlardır. Temel olarak, iki gözenekli karbon bazlı elektrot, bir ayırıcı ve bir elektrolit çözeltisinden oluşmaktadır. Elektrotlar, geniş yüzey alanları ve iyi elektriksel iletkenlikleri nedeniyle tercih edilen karbon bazlı malzemelerden üretilmektedir. Ayırıcı, elektrotların fiziksel temasını engelleyerek kısa devre riskini ortadan kaldırırken, elektrolit çözeltisi iyonların hareketini sağlamaktadır. Dışarıdan bir potansiyel uygulandığında, elektrotlar arasında oluşan elektrik alan, elektrolit içindeki iyonların zıt yüklü elektrotlara doğru hareket etmesine neden olmakta ve bu süreçte enerji depolanmaktadır [60]. Süperkapasitörlerin performansı, büyük ölçüde elektrot malzemelerinin özelliklerine bağlıdır. Karbon nanotüpler, grafen ve aktif karbon gibi karbon bazlı malzemeler, yüksek yüzey alanları ve iletkenlikleri sayesinde süperkapasitör elektrotları için ideal malzemelerdir. Özellikle, karbon nanotüplerin yüzey alanı ve iletkenliği, enerji depolama kapasitesini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu malzemelerin gözenekli yapıları, elektrolit iyonlarının elektrot yüzeyine erişimini kolaylaştırarak kapasitans değerlerini yükseltmektedir. Elektrot malzemelerinin modifikasyonu süperkapasitörlerin performansını iyileştirmek için yaygın bir yöntemdir. Örneğin, karbon nanotüplerin rutenyum gibi metal oksitlerle katılanması, elektrokimyasal özellikleri önemli ölçüde geliştirebilmektedir. Rutenyum katılı karbon nanotüp elektrotlar, yüksek spesifik kapasitans değerleri ve düşük iç dirençleri sayesinde enerji depolama uygulamalarında umut vaat etmektedir. Bu tür modifikasyonlar, süperkapasitörlerin enerji yoğunluğunu artırırken, uzun döngü ömrü ve kararlılık gibi avantajlar sağlamaktadır. [61]

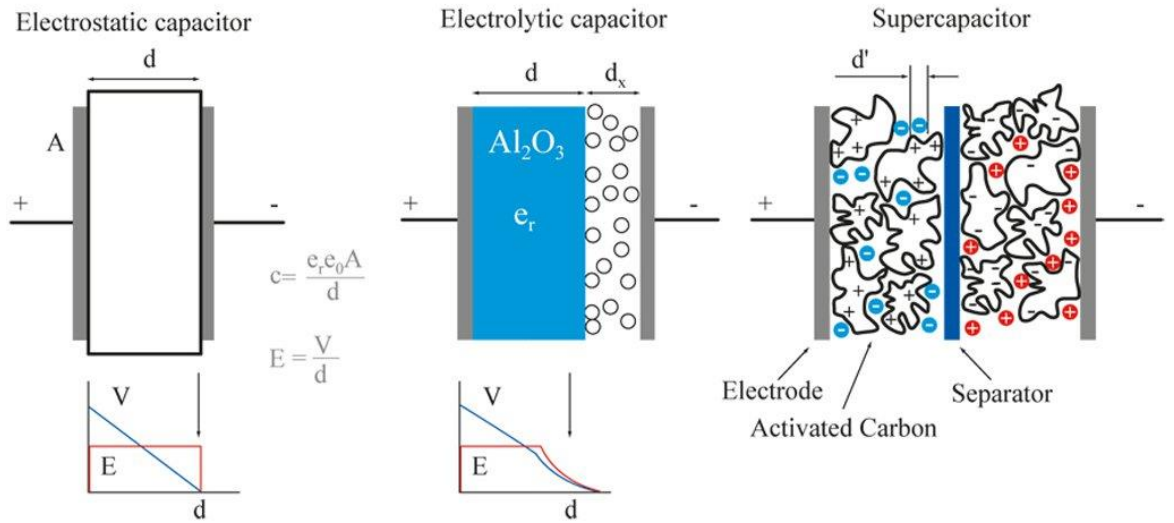
Süperkapasitörler, enerji depolama mekanizmalarına ve elektrot malzemelerine göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar, elektrik çift katmanlı kapasitörler (EDLCs), psödokapasitörler ve hibrit kapasitörlerdir.

Elektrik Çift Katmanlı Kapasitörler (EDLCs), enerjiyi elektrot ve elektrolit arayüzünde oluşan elektrostatik yük birikimiyle depolamaktadırlar. EDLC türü kapasitörlerde genellikle aktif karbon, karbon nanotüpler veya grafen gibi yüksek yüzey alanına sahip karbon bazlı malzemeler kullanılmaktadır. EDLC'ler, yüksek güç yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü sunmaları sebebiyle tercih edilmektedir.

Psödokapasitörler, enerjiyi elektrot yüzeyinde gerçekleşen hızlı ve tersinir redoks reaksiyonları aracılığıyla depolamaktadır. Bu kapasitörlerde metal oksitler (örneğin, rutenyum oksit) veya iletken polimerler (örneğin, polianilin) gibi malzemeler kullanılmaktadır. Psödokapasitörler, EDLC'lere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğunda, ancak daha sınırlı bir çevrim ömrüne sahiptirler.

Hibrit Kapasitörler, EDLC ve psödokapasitör özelliklerini bir araya getirerek her iki türün avantajlarını sunmaktadır. Bu kapasitörlerde, bir elektrot karbon bazlı malzemeden, diğer elektrot ise metal oksit veya iletken polimerden yapılmaktadır. Bu kombinasyon, yüksek enerji ve güç yoğunluğunun yanı sıra uzun çevrim ömrü sağlamaktadır.

Süperkapasitörlerin türleri ve özellikleri, kullanılan elektrot malzemeleri ve enerji depolama mekanizmalarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Spesifik uygulama gereksinimlerine göre her bir çeşit kapasitör farklı avantajlar sunmaktadır. Süperkapasitörü diğer kapasitörlerden ayıran yapı Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Kapasitör türleri[62]

Süperkapasitörlerin teknik yapısı ve performansı, elektrot malzemelerinin seçimi ve modifikasyonuna bağlıdır. Karbon bazlı malzemelerin kullanımı ve uygun katkılama yöntemleriyle, süperkapasitörlerin enerji depolama kapasitesi ve verimliliği artırılabilir. Enerji depolama sistemlerinin geliştirilmesinde süperkapasitörler önemli bir potansiyele sahiptir.

3.1.2.3 Süperkapasitörlerin elektrik dağıtım şebekesine katkıları

Süperkapasitörlerin elektrik dağıtım şebekesine entegrasyonu, enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak, güç kalitesini iyileştirmek ve anlık enerji taleplerini karşılamak için önemli bir yenilik olarak değerlendirilmektedir. Şebekeye bağlantı, genellikle DC/AC dönüştürücüler aracılığıyla gerçekleştirilerek ve bu sayede süperkapasitörler, elektrik şebekesine hızlı tepki verebilen, yüksek güç yoğunluğuna sahip bir enerji destek sistemi olarak entegre edilmektedir. Süperkapasitörlerin, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretimlerini dengeleme, kısa süreli gerilim düşüşlerini telafi etme ve şebekeye anlık güç desteği sağlama gibi kritik görevleri bulunmaktadır.

Elektrik dağıtım şebekesine bağlanan süperkapasitörlerin en büyük avantajlarından biri, çok kısa sürede şarj ve deşarj olabilme kabiliyetidir. Bu özellik, ani yük değişimlerine hızlı tepki verilmesini sağlayarak, şebekedeki frekans dalgalanmalarını ve voltaj düzensizliklerini minimize etmektedir. Geleneksel bataryalarla karşılaştırıldığında, süperkapasitörler çok daha uzun çevrim ömrüne sahiptir ve bakım gereksinimleri düşük olduğu için sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Yüksek verimlilikle enerji depolayıp gerektiğinde şebekeye geri verebilir yapıda olması yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve şebeke istikrarını korumaya yardımcı olmaktadır.

Süperkapasitörler ani güç taleplerine karşı hızlı yanıt verebilmekte ve kısa süreli elektrik kesintilerine karşı geçici güç sağlayabilmektedir. Özellikle endüstriyel tesisler, hassas elektronik sistemler ve kritik altyapı uygulamaları için süperkapasitörlerin kullanımı, üretim süreçlerinde meydana gelebilecek enerji kayıplarını en aza indirmektedir. Şebekeye bağlı süperkapasitörler, yüksek güçlü elektrik motorları, raylı sistemler ve büyük ölçekli veri merkezleri gibi uygulamalarda voltaj kararlılığını sağlayarak enerji sürekliliğini garanti altına almaktadır.

Süperkapasitörler, elektrik dağıtım şebekesine entegrasyonu, güç dalgalanmalarını azaltarak, şebeke kararlılığını artıran, enerji verimliliğini yükselten ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu destekleyen önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Uzun ömürlü yapıları, hızlı tepki süreleri ve yüksek güç yoğunlukları sayesinde, modern enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırarak gelecekte daha yaygın bir kullanım alanı

bulmaları beklenmektedir. Çalışmamızda, süperkapasitörlerin bu avantajları göz önüne alınarak hibrit sistem kurulması hedeflenmiştir.

3.1.3 Kimyasal enerjili depolama teknolojileri

Kimyasal enerjili depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı üretim özelliklerine uyum sağlamak ve enerji arz güvenliğini artırmak amacıyla önemli bir çözüm sunmaktadır. Bataryalar, elektrik enerjisinin kimyasal bağlar içinde depolanarak ihtiyaç duyulduğunda geri kazanılmasını sağlamaktadır. Lityum-iyon bataryalar, hidrojen depolama sistemleri ve akış pilleri gibi yöntemler, enerji yoğunluğu, geri dönüşüm potansiyeli ve uzun ömür gibi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır [63] Son zamanlarda üzerine çok fazla araştırma yapılan hidrojen bazlı sistemler, karbon nötr bir enerji taşıyıcısı olarak fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyele sahip olabilecektir. Maliyet, verimlilik ve güvenlik konularında devam eden araştırmalar, bu teknolojilerin geniş çapta uygulanabilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır.

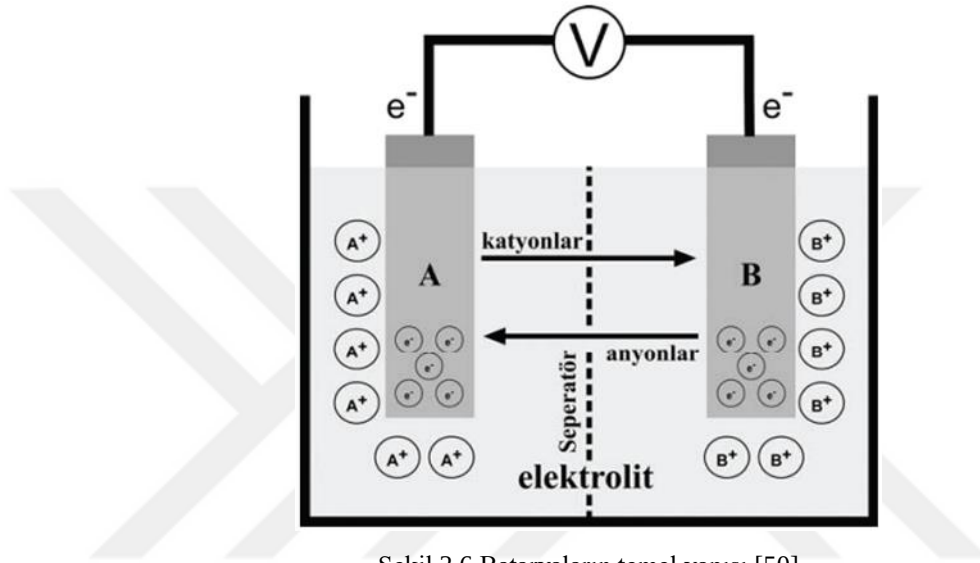
3.1.3.1 Bataryalar (Piller)

Günümüzde batarya teknolojileri, mobil cihazlardan elektrik şebekelerine kadar çeşitli uygulama alanlarında kritik bir rol oynamaktadır. Bataryalar, bu bağlamda en yaygın enerji depolama araçları olarak öne çıkmaktadır. Modern toplumun enerji ihtiyacını sürekli olarak karşılayabilmesi ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından etkin şekilde yararlanabilmesi için batarya teknolojilerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Alessandro Volta tarafından 1800 yılında ilk elektrokimyasal pilin icadından bu yana batarya teknolojilerinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir[64]. Günümüzde lityum-iyon bataryalar gibi ileri teknoloji batarya sistemleri, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür avantajları sayesinde çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen elektro-kimyasal enerji depolama sistemleri olarak adlandırılmaktadır. Genellikle bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluşan bataryalar, anot, katot ve elektrolit bileşenlerinden meydana gelmektedir. Anot, elektronları serbest bırakan bölüm olup negatif elektrot

olarak adlandırılırken, katot elektronları kabul eden pozitif elektrot olarak adlandırılır. Elektrolit ise iyon iletimini sağlayan kimyasal ortamı oluşturmaktadır.

Bataryalar, iki elektrot arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleştirilmesi sonucu iyonların elektrolit içerisinde hareket etmesiyle elektrik akımının oluşması prensibi ile çalışmaktadır. Batarya, elektrik akımını zıt yönde doldurmakta ve iyonları ters yöne zorlayarak gönderip enerjiyi depolamaktadır. Bataryaların temel yapısı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Bataryaların temel yapısı [50]

Bataryaların performansı, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, döngü ömrü ve şarj hızı gibi özellikler ile değerlendirilir. Batarya depolama teknolojileri, küçük veya büyük boyutlarda, kısa veya uzun süreli kullanılabilir. Batarya teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte uygulamada giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bataryaların fotovoltaik güneş panellerinde ve konutlarda kullanımları yaygınlaşmaktadır ve güç kaynağı olarak elektrikli araçlarda kullanılmaktadır. Bataryalar, kullanım amacı ve kimyasal yapılarına göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. En yaygın batarya türleri arasında lityum-iyon, kurşun-asit, nikel-metal hidrit ve lityum-polimer bataryalar yer almaktadır. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunluğu, düşük ağırlık ve uzun ömür avantajları sayesinde elektronik cihazlar ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [65]. Kurşun-asit bataryalar, nispeten daha düşük maliyetleri ve yüksek gücü destekleme kapasiteleri nedeniyle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir [66]. Nikel-metal hidrit bataryalar ise çevre dostu yapıları ve uzun döngü ömürleri nedeniyle hâlâ bazı hibrit araçlarda kullanılmaya devam etmektedir. Tablo 3.2'de yaygın batarya türleri ve temel özellikleri kıyaslanmıştır.

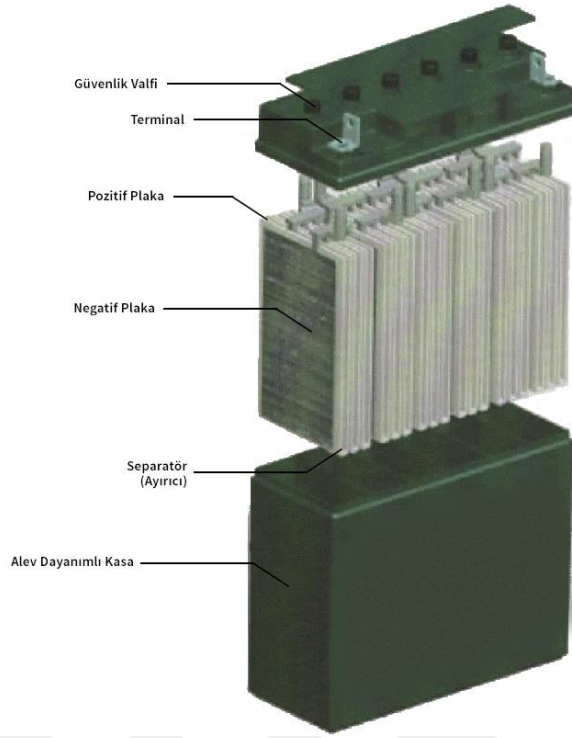
Tablo 3.2 Batarya türleri ve temel özellikleri

Batarya Türü	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Döngü Ömrü	Kullanım Alanları
Lityum-iyon	150-250	1000+	Elektronik, Elektrikli Araçlar
Kurşun-asit	30-50	300-500	Otomotiv, UPS Sistemleri
Nikel-metal hidrit	60-120	500-1000	Hibrid Araçlar, Elektrikli Araçlar
Lityum-polimer	100-200	500-1000	Hafif Elektronik Cihazlar

Batarya teknolojileri gelişmeye devam ederken, çevresel etkileri azaltan ve enerji depolama kapasitesini artıran yeni nesil batarya sistemleri üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Gelecekte, katı-hal bataryalarının ve lityum-sülfür bataryalarının daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir. Bataryaların enerji depolama kapasiteleri, alternatif enerji sistemlerinin doğru şekilde boyutlandırılmasında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bir bataryanın fiziksel boyutu ve kapasitesi, sistemin ihtiyaç duyduğu toplam enerji miktarına bağlı olarak seçilmektedir. Ayrıca, bataryaların performans ömrü de sistem tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Genel olarak, 20 °C’lik sabit ortam sıcaklığında çalıştırılan bataryaların ömrü 5 ila 10 yıl arasında değişebilmektedir.

3.1.3.2 Gelişmiş kurşun-asit pilleri

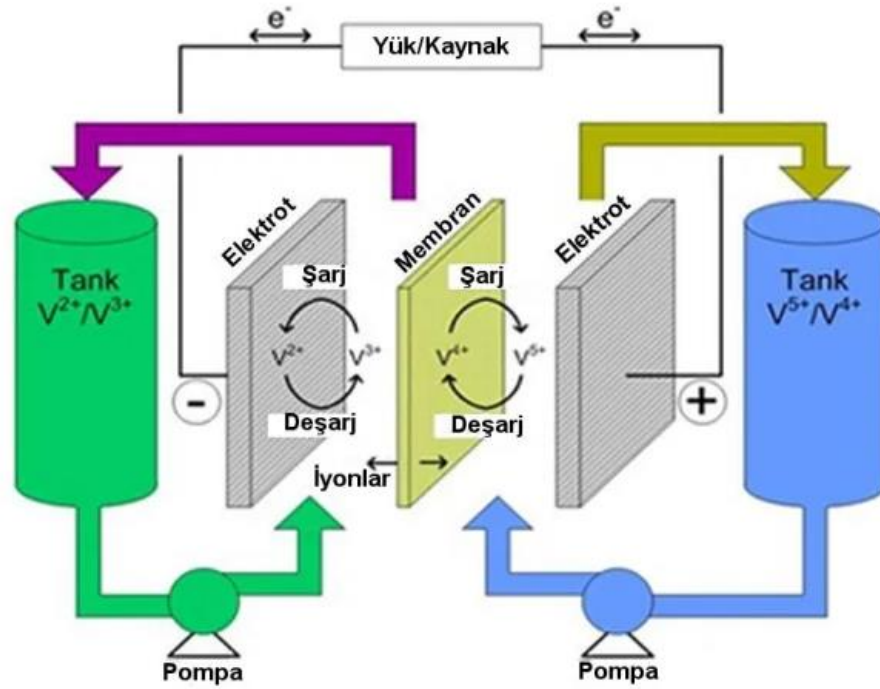
Kurşun-asit bataryalar, düşük maliyetleri, yüksek akım kapasitesi ve güvenilir performansları nedeniyle uzun yıllardır enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv, kesintisiz güç kaynakları ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Elektrokimyasal olarak sülfürik asit (H_2SO_4) elektroliti içerisinde kurşun dioksit (PbO_2) ve sünger kurşun (Pb) elektrotları ile çalışmaktadır. Kurşun-asit bataryaların temel avantajları arasında yüksek deşarj akımı sağlama yeteneği ve düşük üretim maliyetleri yer alırken, enerji yoğunluklarının nispeten düşük olması ve şarj döngülerine bağlı olarak kapasite kaybına uğramaları önemli dezavantajlarıdır. Çevresel açıdan kurşun içeriği nedeniyle geri dönüşüm süreçleri büyük önem taşımaktadır. Gelişmiş kurşun-asit bataryalar ile daha uzun ömür ve daha yüksek şarj verimliliği sağlanması yönünde çalışmalar devam etmektedir. Şekil 3.7’de kurşun asit bataryaların yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Kurşun-asit batarya yapısı[67]

3.1.3.3 Akış pilleri

Akış pilleri, büyük ölçekli enerji depolama uygulamaları için geliştirilmiş, elektrokimyasal enerji dönüşümüne dayalı sistemlerdir. Bu pillerde enerji, iki ayrı elektrolit çözeltisi arasında gerçekleşen redoks reaksiyonları ile depolanmakta ve iletilmektedir. Katı elektrotlar yerine sıvı elektrolitlerin kullanılması, batarya kapasitesinin elektrolit hacmi ile ölçeklenmesine olanak tanımakta, bu özellikleri özellikle yenilenebilir enerji sistemleri ile entegrasyon açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Vanadyum redoks akış pilleri gibi sistemler, uzun döngü ömrü, yüksek güvenlik seviyesi ve derin deşarj kabiliyeti ile öne çıkmaktadır [53]. Ancak, akış pillerinin ticari uygulanabilirliği, elektrolit maliyetleri, düşük enerji yoğunluğu ve karmaşık sistem yapıları nedeniyle bazı sınırlamalarla karşı karşıya kalmaktadır. Günümüzde, elektrolit malzemelerinin geliştirilmesi ve membran teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde akış pillerinin performansının artırılması yönünde önemli araştırmalar yürütülmektedir. Kesintisiz güç kaynaklarında, bağımsız güç sistemlerinde, elektrikli araçlarda ve güç dönüşüm sistemlerinde (AC/DC, AC/AC veya DC/AC) uygulama alanı bulmuştur. Bir akış pilinin şematik diyagramı Şekil 3.8’de verilmiştir.

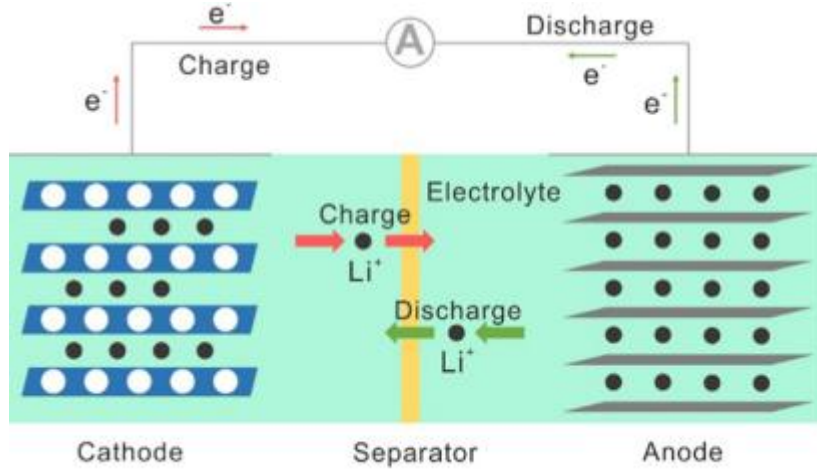


Şekil 3.8 Bir Akış Pili'nin Şematik Diyagramı [68]

3.1.3.4 Lityum-iyon piller

Lityum-iyon (Li-ion) piller, günümüz enerji depolama teknolojileri arasında yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve hafif yapılarıyla öne çıkan elektrokimyasal sistemlerdir. Elektrikli araçlardan taşınabilir elektronik cihazlara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan bu bataryalar, geleneksel enerji depolama çözümlerine kıyasla daha verimli ve sürdürülebilir bir seçenek sunmaktadır. Lityum-iyon piller, lityumun düşük atomik ağırlığı ve yüksek elektrokimyasal potansiyeli sayesinde benzersiz avantajlar sağlamakta olup, özellikle yenilenebilir enerji sistemleri ile entegrasyon açısından büyük bir öneme sahiptir.

Lityum-iyon piller, anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Anot genellikle grafitten, katot ise lityum metal oksitlerden (örneğin, LiCoO_2 , LiFePO_4) meydana gelmektedir. Elektrolit, lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareket etmesini sağlayan iyonik bir çözelti olup, çoğunlukla organik solvent bazlı sıvılar içermektedir. Şarj sırasında lityum iyonları anottan katoda doğru hareket ederken, deşarj sırasında ters yönde ilerleyerek elektrik akımı oluşturur [69]. Şekil 3.9'da lityum-iyon pillerin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Lityum-iyon piller çalışma şeması [70]

Lityum-iyon piller, farklı katot malzemelerine bağlı olarak çeşitli tiplere ayrılmaktadır. Her bir tür, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunarak farklı uygulama alanlarına yönelik çözümler üretmektedir:

Lityum kobalt oksit (LiCoO_2) pilleri: Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, taşınabilir elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak termal kararlılığı düşük olup, güvenlik açısından dikkat gerektirmektedir.

Lityum demir fosfat (LiFePO_4) pilleri: Uzun döngü ömrü ve yüksek termal kararlılığı ile bilinir. Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Lityum nikel mangan kobalt oksit (LiNiMnCoO_2 - NMC) pilleri: Dengeli enerji yoğunluğu, güvenlik ve performans özellikleri sunarak elektrikli araçlardan taşınabilir cihazlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Lityum nikel kobalt alüminyum oksit (LiNiCoAlO_2 - NCA) pilleri: Yüksek enerji yoğunluğu ve uzun döngü ömrü ile özellikle Tesla gibi elektrikli araç üreticileri tarafından kullanılmaktadır.

Lityum titanyum oksit (LTO) pilleri: Düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, yüksek güvenlik ve hızlı şarj özellikleriyle endüstriyel ve ağır hizmet uygulamalarında tercih edilmektedir.

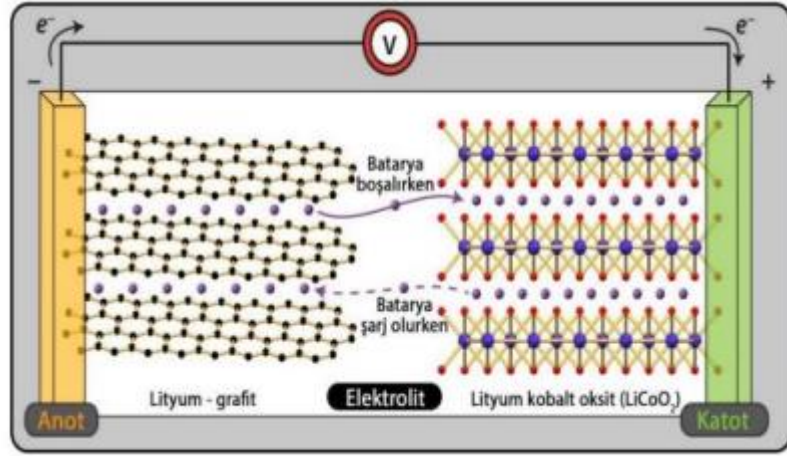
Lityum-iyon pil çeşitlerinin kıyaslaması Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Lityum-iyon pil türleri ve kıyaslaması

Pil Türü	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Güç Yoğunluğu (W/kg)	Döngü Ömrü (Çevrim Sayısı)	Şarj Hızı	Güvenlik	Kullanım Alanları
Lityum Kobalt Oksit (LiCoO₂)	150	600	1000	Orta	Düşük	Elektronik cihazlar
Lityum Demir Fosfat (LiFePO₄)	90	3000	5000	Hızlı	Yüksek	Elektrikli araçlar, enerji depolama
Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC)	150	2000	2000	Orta	Orta	Elektrikli araçlar, enerji depolama
Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA)	200	1500	1500	Orta	Orta	Elektrikli araçlar (Tesla vb.)
Lityum Titanyum Oksit (LTO)	50	10000	10000	Çok Hızlı	Çok Yüksek	Ağır sanayi, hızlı şarj gerektiren sistemler

Lityum-iyon pilleri kişisel elektronik cihazlarında, elektrik araçları ve sabit depolama sistemleri için en popüler şarj edilebilir pillerdir. Dağıtılmış enerji kaynaklarında kullanılıp, enerji kapasitesi ile güvenliğini artırmak ve maliyeti düşürmek için araştırmalar devam etmektedir. Bu pillerin verimlilikleri enerji yoğunluklarından dolayı yüksektir. Bu nedenle enerji kalitesinin önem arz ettiği yerlerde, enerji elektrik dağıtım şebekelerinde, cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi kişisel elektronik cihazlar, elektrik araçlarında ve sabit enerji depolama sistemleri için kullanılan en fazla tercih edilen şarj edilebilir pillerdir. Bu piller, diğer kimyasal yöntemlerle hazırlanan eşdeğerlerine oranla sıklıkla en üst seviyede doldurulabilme yoğunlukları sebebiyle çok daha hafif ağırlıktadırlar.

Sayılan avantajlarının yanında kullanım ömürlerinin üretim tarihlerinden itibaren başlaması bu pillerin en belirgin dezavantajı olarak görülmektedir. Ayrıca üretildikten sonra şarj edilip edilmemelerine bakılmaksızın ömürleri üretim tarihinden itibaren azalmaya başlamaktadır. Lityum iyonlarının değişimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Lityum İyonlarının Değişimi[71]

3.1.3.5 Lityum-İyon pillerinin dağıtım şebekesine katkıları

Günümüzde artan enerji talebi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, elektrik dağıtım şebekelerinde yeni teknolojilere olan ihtiyacı artırmıştır. Lityum-iyon (Li-ion) piller, yüksek enerji yoğunluğu, hızlı tepki süresi ve uzun döngü ömrü gibi avantajları sayesinde dağıtım şebekelerinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle şebeke dengelemesi, yük yönetimi ve yenilenebilir enerji entegrasyonu gibi alanlarda büyük katkılar sunmaktadır [63].

Lityum-iyon bataryalar, dağıtım şebekelerinde frekans ve voltaj dalgalanmalarını düzenleyerek sistem kararlılığını artırmaktadır. Şebeke ölçeğinde depolama çözümleri, elektrik talebinin en yoğun olduğu saatlerde bataryaların devreye girerek aşırı yüklenmeyi önlemesini sağlamaktadır. Ayrıca, şebekedeki ani güç dalgalanmalarına karşı yüksek tepki süresi sayesinde anlık güç dengelemesi sağlayarak kesintileri minimize etmektedir.

Güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu, üretim dalgalanmaları nedeniyle bazı zorluklar yaratmaktadır. Lityum-iyon piller, bu dalgalanmaları dengelemek için fazla üretilen enerjiyi depolayarak şebekeye kontrollü bir şekilde geri besleme yapabilmektedir. Bu sayede, yenilenebilir enerji kaynaklarının istikrarlı bir şekilde dağıtım şebekesine entegre edilmesi sağlanarak fosil yakıt bağımlılığı azaltılmaktadır.

Lityum-iyon bataryalar, dağıtım şebekelerinde enerji depolama teknolojisi olarak kritik bir rol oynamaktadır. Şebeke dengelemesi, yük yönetimi ve yenilenebilir enerji entegrasyonu konularında sağladıkları avantajlar sayesinde enerji sektörünün dönüşümüne önemli katkılar sunmaktadır. Gelecekte, gelişen batarya teknolojileri ile birlikte şebeke ölçekli enerji depolama sistemlerinin daha yaygın hale gelmesi beklenmektedir.

3.2 Elektrik Dağıtım Şebekesinde Enerji Depolama Sistemleri

3.2.1 Elektrik dağıtım şebekesinde depolamanın optimum kullanımı

Elektrik dağıtım şebekesine entegre edilen yenilenebilir enerji santrallerinin sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu artış, üretim ve tüketim arasındaki dengesizlikleri artırarak şebeke üzerinde çeşitli etkiler meydana getirmektedir. Özellikle, dağıtım şebekesinin enerji kalitesi doğrudan bu değişimden etkilenmektedir. Türkiye'de dağıtım şirketleri, yürürlükteki mevzuatlar çerçevesinde enerji kalitesini belirli standartlar doğrultusunda sağlamakla yükümlüdür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtım şebekesindeki payının giderek artması, enerji arz güvenliğinin sağlanması ve şebeke stabilitesinin korunması açısından enerji depolama sistemlerine yönelik yatırımları zorunlu hale getirmektedir.

Elektrik dağıtım şebekesi için tasarlanacak ve entegre edilecek enerji depolama sistemlerinin şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek ve sistemin güvenilirliğini artırmak için bir çok hususa dikkat edilmelidir.

Şebeke uyumluluğu ve entegrasyon planlaması

Depolama sistemlerinin, mevcut elektrik dağıtım şebekesinin altyapısıyla uyumlu olması sağlanmalıdır.

Entegrasyon öncesinde şebekenin yük akışı, gerilim profili ve kısa devre analizleri yapılmalıdır.

Şebekenin ihtiyacına uygun olarak merkezi veya dağıtılmış (dağıtık enerji sistemleriyle bütünleşik) depolama stratejileri belirlenmelidir.

Kapasite ve konum optimizasyonu

Depolama kapasitesi, yenilenebilir enerji üretim tahminleri ve şebeke talep eğilimleri göz önünde bulundurularak belirlenmelidir.

Depolama sistemlerinin konumlandırılacağı noktalar, şebekedeki aşırı yüklenmeleri önleyecek şekilde seçilmelidir.

Kritik yükleri besleyen bölgelerde yedekleme amacıyla stratejik yerleşim planı oluşturulmalıdır.

Gerilim ve frekans stabilitesi

Depolama sistemlerinin, şebeke frekansını ve gerilim seviyelerini destekleyici özellikte olması gerekmektedir.

Ani yük değişimlerine karşı hızlı tepki verebilen güç elektroniği bileşenleri (örneğin, invertörler) kullanılmalıdır.

Frekans regülasyonu için batarya yönetim sistemleri (BYS) ve uygun kontrol algoritmaları geliştirilmelidir.

Güç Kalitesi ve harmonik etkilerinin minimize edilmesi

Depolama sistemlerinin harmonik bozulmalara neden olmaması için uygun filtreleme teknolojileri (aktif veya pasif filtreler) entegre edilmelidir.

Reaktif güç desteği sağlayarak güç faktörünü iyileştirecek sistemler kullanılmalıdır.

Kesintisiz güç kaynağı gibi çözümlerle dalgalanmalara karşı koruma sağlanmalıdır.

İletişim ve kontrol sistemleri

Akıllı şebeke teknolojileri ile entegrasyon sağlanarak, gerçek zamanlı izleme ve kontrol mekanizmaları oluşturulmalıdır.

Depolama sistemlerinin merkezi veya dağıtılmış bir kontrol yapısıyla çalışmasını sağlayacak SCADA, IoT ve yapay zeka tabanlı izleme sistemleri kullanılmalıdır.

Talep tarafı yönetimi ile birlikte çalışarak depolama sistemlerinin şebeke üzerindeki etkisi optimize edilmelidir.

Yedeklilik ve güvenlik

Depolama sistemlerinde aşırı şarj, aşırı deşarj ve termal kaçak gibi durumlara karşı güvenlik önlemleri alınmalıdır.

Yangın, kısa devre ve izolasyon hatalarına karşı koruma sistemleri geliştirilmelidir. Siber güvenlik önlemleri alınarak, akıllı şebeke sistemleriyle bağlantılı depolama ünitelerinin güvenliği sağlanmalıdır.

Ekonomik ve regülatif uyum

Türkiye’deki enerji piyasası mevzuatına uygun olacak şekilde depolama sistemlerinin işletme modeli oluşturulmalıdır.

Depolama sistemlerinin şebekeye sağladığı katkılar (örneğin, pik saatlerde destek, frekans regülasyonu) göz önüne alınarak teşvik mekanizmaları değerlendirilmeli ve yatırım planları yapılmalıdır. Maliyet etkinliği ve geri dönüş süresi analiz edilerek en uygun teknoloji ve sistem seçimi gerçekleştirilmelidir. Bu hususlara dikkat edilmesi, elektrik dağıtım şebekesine entegre edilecek enerji depolama sistemlerinin şebeke güvenilirliğini artırmasını ve olası olumsuz etkileri en aza indirmesini sağlayacaktır.

3.2.2 Elektrik dağıtım şebekesine uygun hibrit depolama sistemi tasarımı

3.2.2.1 Hibrit batarya paketi tasarımı

Hibrit depolamalı batarya sistemleri, farklı enerji depolama teknolojilerini bir araya getirerek enerji yönetiminde önemli avantajlar sunmaktadır. Bataryalar ve süperkapasitörlerin birlikte kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemleri, yüksek enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğunu bir arada sağlayarak sistem performansını artırmaktadır. Hibrit sistem, enerji depolama biriminin hem uzun süreli enerji ihtiyacını karşılamasına hem de ani güç taleplerine hızlı yanıt vermesine olanak tanımaktadır. Bu tür hibrit sistemler, bataryaların ömrünü uzatarak bakım maliyetlerini düşürmekte ve enerji verimliliğini artırmaktadır [72]. Hibrit enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunda da kritik bir rol oynamaktadır. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi kesintili kaynakların ürettiği enerjinin depolanması ve gerektiğinde kullanılması, enerji arzının sürekliliğini sağlamaktadır. Enerji üretimindeki dalgalanmaları dengeleyerek şebeke stabilitesini korumakta ve enerji arz güvenliğini artırmaktadır. Hibrit enerji depolama sistemleri, enerji yönetiminde esneklik ve güvenilirlik sunarak hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlamaktadır [73].

Hibrit depolamalı batarya sistemlerinin akıllı şebekelere entegrasyonunda, öncelikle enerji depolama sisteminin (EDS) teknik özelliklerinin şebekenin ihtiyaçlarıyla uyumlu olması gerekmektedir. EDS'nin kapasitesi, güç yoğunluğu ve tepki süresi gibi parametreler, şebekenin talep profiline ve yenilenebilir enerji kaynaklarının üretim karakteristiklerine uygun şekilde seçilmektedir. Batarya ve süperkapasitör kombinasyonlarından oluşan hibrit sistemler, hem yüksek enerji yoğunluğu hem de hızlı tepki süresi sağlayarak, ani güç dalgalanmalarının dengelenmesinde ve enerji arzının sürekliliğinde önemli avantajlar sunmaktadır.

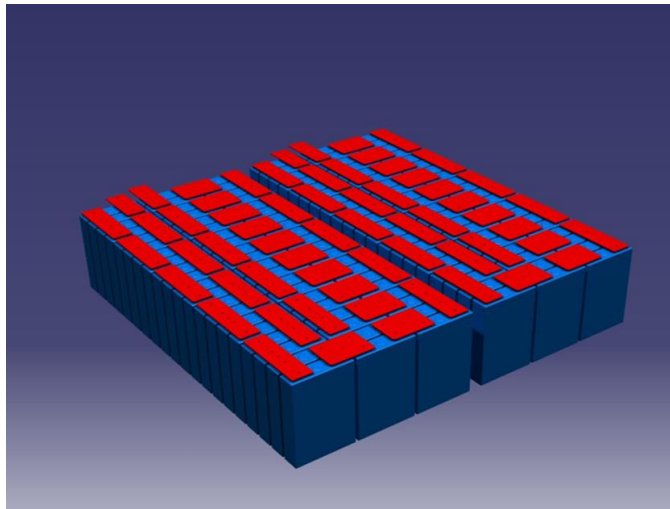
Entegrasyon sürecinde, hibrit depolama sistemlerinin şebeke ile olan iletişimi ve kontrolü de kritik bir öneme sahiptir. Akıllı şebekelerde, enerji akışının çift yönlü ve dinamik olması nedeniyle, EDS'nin şebeke yönetim sistemleriyle entegre çalışabilmesi için uygun haberleşme protokolleri ve standartları kullanılmalıdır. IEEE 2030 ve 1547 serisi standartlar, enerji depolama sistemlerinin şebekeye entegrasyonu ve birlikte çalışabilirliği konusunda kapsamlı kılavuzlar sunmaktadır. Bu standartlara uyum, sistemin güvenilirliği ve performansı açısından büyük önem taşımaktadır.

Hibrit depolama sistemlerinin akıllı şebekelere entegrasyonunda, enerji yönetimi stratejilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Enerji depolama sistemleri, talep tarafı yönetimi, yük dengeleme, frekans ve gerilim regülasyonu gibi işlevleri yerine getirirken, optimal şarj ve deşarj süreçlerinin planlanması önemlidir. Süreçlerin etkin bir şekilde yönetilmesi, enerji depolama sistemlerinin ömrünü uzatırken, şebeke operasyonlarının da verimliliğini artırmaktadır.

LFP bataryalar ve süperkapasitörlerden oluşan hibrit depolama sistemleri, akıllı şebekelerde enerji yönetimi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. LFP bataryalar, uzun döngü ömrü, termal kararlılık ve güvenlik açısından üstün özelliklere sahip olup, uzun süreli enerji depolama için ideal bir çözüm sunmaktadır. Süperkapasitörler ise yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj-deşarj kabiliyeti ile kısa süreli ani yük taleplerini karşılamada etkili olmakla birlikte, enerji depolama sistemleri hem uzun vadeli enerji ihtiyacını güvenilir bir şekilde karşılayabilir hem de ani güç dalgalanmalarına hızlı tepki vermektedir. Akıllı şebekelerde frekans düzenlemesi, voltaj stabilitesi ve güç kalitesi gibi kritik şebeke parametreleri daha etkin bir şekilde kontrol etmektedir.

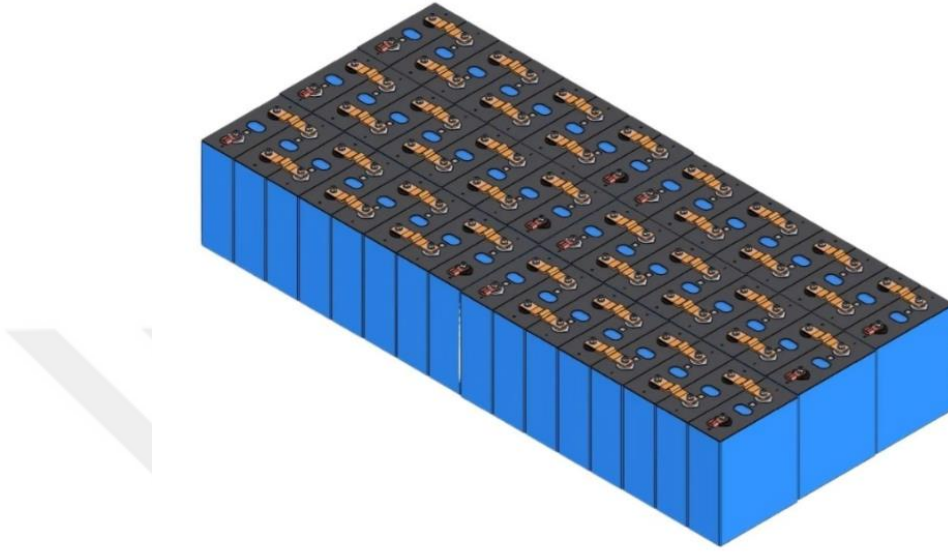
LFP batarya ve süperkapasitör kombinasyonu, sistemin genel verimliliğini artırarak enerji depolama birimlerinin ömrünü uzatmaktadır. Süperkapasitörlerin sık ve yüksek güçlü deşarj işlemlerini üstlenmesi, bataryanın aşırı yüklenmesini önleyerek hücre yaşlanmasını geciktirmekte ve bakım maliyetlerini azaltmaktadır. Hibrit sistemlerin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonu, güneş ve rüzgar enerjisi üretimindeki dalgalanmaların dengelenmesine yardımcı olmaktadır. Akıllı şebekelerde, benzer enerji yönetimi çözümleri, enerji arz güvenliğini artırırken, sistem kararlılığını ve sürdürülebilirliğini destekleyerek daha esnek ve dayanıklı bir enerji altyapısı oluşturulmasını sağlamaktadır.

Elektrik dağıtım şebekesine uygun bir batarya paketi tasarımı kapsamında, LFP bataryalar ile süperkapasitörler entegre edilerek yüksek verimli, uzun ömürlü ve güvenli bir enerji depolama sistemi geliştirilmiştir. Batarya paketlerinin üç boyutlu tasarımı ve bağlantı şekli Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Batarya paketlerinin tasarımı ve çiziminde CITAI programı kullanılmıştır. Pil paketleri arasındaki bağlantı, yüksek iletkenlik ve düşük direnç sağlayan bakır veya alüminyum baralar kullanılarak tasarlanmıştır. Bu bara sistemleri, akım taşıma kapasitesini artırmak, ısı dağılımını optimize etmek ve voltaj düşümünü minimize etmek amacıyla belirli bir kesit alanı, kaplama malzemesi (örneğin, nikel veya kalay kaplama) ve geometrik yapı dikkate alınarak seçilmiştir. Ayrıca, bağlantı noktalarında ısı yayılımını azaltmak ve temas direncini minimize etmek için özel presleme teknikleri, lazer kaynağı veya vidalı bağlantı yöntemleri kullanılmıştır. Böylece, yüksek akımlı enerji transferi sağlanarak sistemin güvenliği, verimliliği ve dayanıklılığı artırılmıştır.



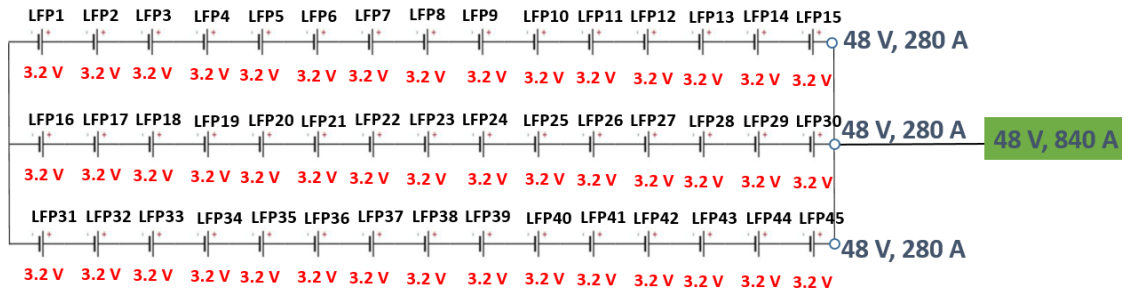
Şekil 3.11 Batarya paketi tasarımı

Şekil 3.12'de, prizmatik LFP hücrelerin örnek bağlantısı gösterilmekte olup, hücreler baralar ve vidalar aracılığıyla seri olarak bağlanmıştır, böylece 15s-3p bağlantı yapısına sahip 48V, 40.32 kWh kapasiteli batarya paketi oluşturulmuştur.



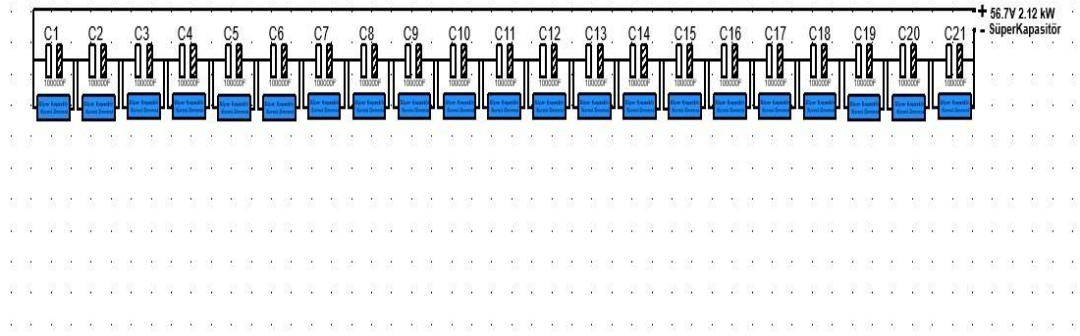
Şekil 3.12 Batarya paketi tasarımı

Şekil 3.13, batarya paketimizin devre şemasını göstermektedir. Tasarlanan batarya paketi, nominal kapasitesi 280Ah olan prizmatik LFP hücreler kullanılarak oluşturulmuş olup, 15 seri (15s) ve 3 paralel (3p) bağlantı yapısına sahiptir. Bu konfigürasyon doğrultusunda, her biri 3,2V nominal gerilime sahip 15 hücre seri bağlanarak toplamda 48V çıkış gerilimi elde edilmiştir. Her bir hücrenin kapasitesi 280Ah olarak kabul edildiğinde, paketin nominal enerji kapasitesi $48V \times 280Ah = 13.44 \text{ kWh}$ olarak hesaplanmaktadır. Paralel bağlantı ile bu yapı üç kez tekrarlandığında, toplam enerji kapasitesi $13.44 \text{ kWh} \times 3 = 40.32 \text{ kWh}$ olarak elde edilmiştir.



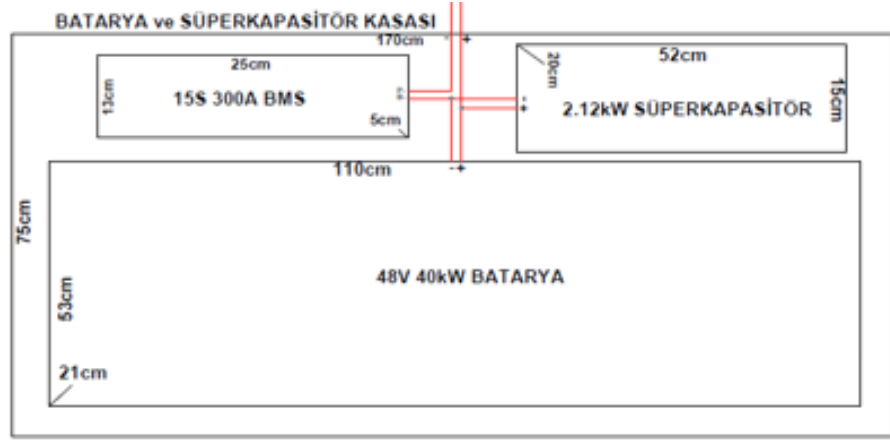
Şekil 3.13 LFP pil devre şeması

Şekil 3.14, süperkapasitör paketimizin ve süperkapasitörlere entegre edilen dengeleme gerilim regülatör kartlarının devre şemasını göstermektedir. Tasarlanan süperkapasitör paketi, her biri 2.7V nominal gerilim ve 100,000F kapasiteye sahip süperkapasitörlerden oluşmakta olup, toplamda 21 adet süperkapasitörün seri bağlantısı planlanmıştır. Seri bağlantı konfigürasyonu sayesinde, sistemin toplam gerilim seviyesi $2.7V \times 21 = 56.7V$ seviyesine ulaşacaktır. Bu yapı, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı şarj/deşarj özellikleri sayesinde, 2 kW'tan daha fazla güç sağlayabilen bir süperkapasitör paketi oluşturacaktır. Dengeleme gerilim regülatör kartları, seri bağlı süperkapasitörlerin gerilim eşitliğini sağlamak, aşırı gerilim durumlarını önlemek ve sistemin uzun ömürlü ve güvenli çalışmasını desteklemek amacıyla devreye entegre edilmiştir.



Şekil 3.14 Süperkapasitör devre şeması

Şekil 3.15, projemizde kullanılacak batarya paketi, süperkapasitör paketi, bağlantı yapısı ve sistemin güç değerlerini içeren teknik şemayı göstermektedir. Bu diyagram, sistem bileşenlerinin fiziksel boyutlarını, bağlantı konfigürasyonlarını ve enerji transferine ilişkin parametrelerini detaylandırarak, tasarımın uygulanabilirliğini ve entegrasyon sürecini desteklemektedir. Gerilim, akım ve güç değerleri, sistemin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak için belirlenen teknik kriterlere uygun olarak yapılandırılmıştır.

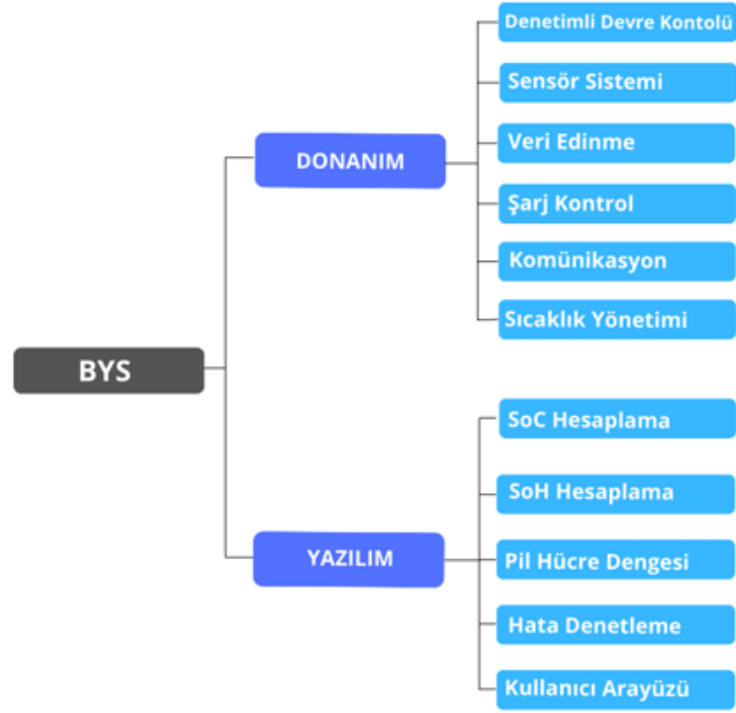


Şekil 3.15 Batarya paketi devre şeması

3.2.2.2 Batarya yönetim sistemi tasarımı

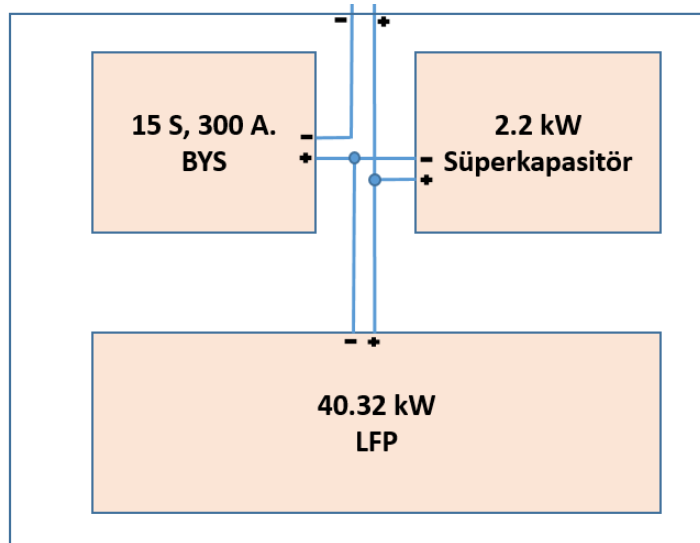
Batarya Yönetim Sistemi (BYS), batarya paketlerinin güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışabilmesi için kritik bir bileşen olarak sayılmaktadır. BYS, bataryaların şarj ve deşarj süreçlerini denetlemekte, hücreler arasındaki dengesizliği gidermekte, aşırı ısınma ve kısa devre gibi tehlikeleri önlemekte ve bataryanın genel sağlık durumunu izlemektedir. Enerji yönetimi, şarj denetimi ve voltaj dengeleme gibi işlemleri gerçekleştirerek bataryanın performansını optimize etmektedir. Yönetim sistemi, batarya ömrünün uzatılmasında ve sistemin güvenli çalışmasının sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır.

Batarya Yönetim Sistemi, yazılım ve donanım olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. (Şekil 3.16) Donanım bileşeni, batarya hücrelerinden gelen verileri toplamak için voltaj, akım ve sıcaklık sensörleri, kontrol devreleri ve güç elektroniği bileşenlerinden oluşmaktadır. Bataryanın güvenliğini sağlamak ve anlık durumunu izlemek için kritik öneme sahiptir. Yazılım bileşeni, bataryanın performansını optimize etmek amacıyla şarj ve deşarj yönetimi, hücre dengeleme algoritmaları, hata tespiti ve sıcaklık kontrol mekanizmalarını içermektedir. Yazılım, donanım tarafından toplanan verileri analiz ederek bataryanın sağlığını korumakta ve olası arızaları önceden tahmin ederek sistem güvenliğini artırmaktadır. İki bileşenin entegre çalışması, bataryanın ömrünü uzatmak ve güvenliğini sağlamak açısından hayati bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.16 Batarya yönetim sistemi bileşenleri [74]

Ürün tasarımı kapsamında, enerji depolama sisteminin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak amacıyla, sisteme entegre bir BYS tasarlanmıştır. Batarya hücrelerinin gerilim ve sıcaklık değerlerini sürekli izleyerek sistemin dengeli çalışmasını sağlamakta, olası aşırı şarj, aşırı deşarj veya ısınma durumlarında koruma mekanizmalarını devreye sokmaktadır. Tasarlanan BYS devresinin detayları ve bileşen yerleşimi, Şekil 3.17’de verilen devre şeması üzerinden gösterilmektedir.



Şekil 3.17 Batarya yönetim sistemi devre tasarımı

3.2.2.3 İnvörtör tasarımı

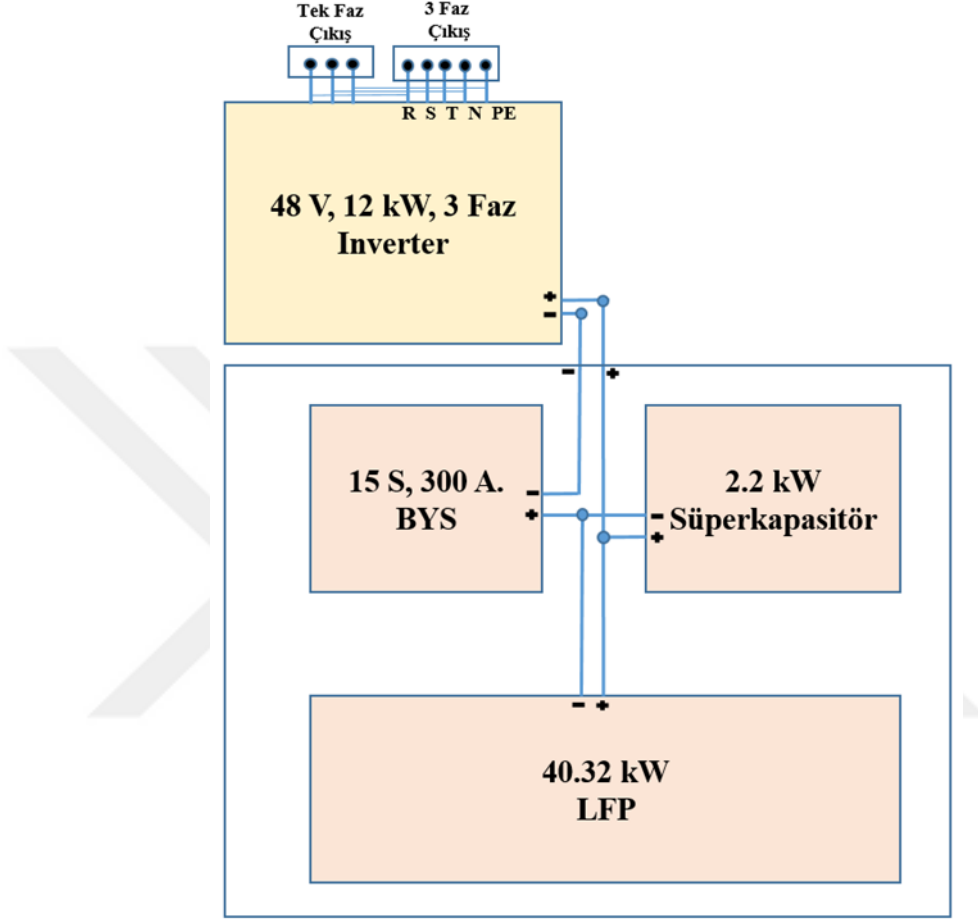
Enerji depolama sistemlerinde invertörler, doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürerek, depolanan enerjinin şebeke ya da yükler üzerine etkin bir şekilde aktarılmasını mümkün kılmaktadır. Cihazlar, çift yönlü enerji dönüşüm kapasiteleri sayesinde hem enerji depolama birimlerinin şarj edilmesinde hem de depolanan enerjinin boşaltılmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan invertör teknolojileri, yüksek dönüşüm verimliliği (%95–%98 arası) sunmakta olup, bu sayede sistem genelinde enerji kayıplarını minimize ederek verimliliği artırmaktadır[75].

İnvörtörlerin kontrol stratejileri, enerji depolama sistemlerinin güvenliği, kararlılığı ve performansı açısından belirleyici niteliktedir. Şebeke ile etkileşim halinde çalışan invertör sistemlerinde, gerilim ve frekans senkronizasyonu, güç kalitesi ve sistem kararlılığı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Geliştirilen "şebeke oluşturan" (grid-forming) ve "şebekeyi takip eden" (grid-following) invertör topolojileri, farklı senaryolarda sistem esnekliğini ve uyum yeteneğini artırmaktadır. Şebeke oluşturan invertörler, bağımsız olarak gerilim ve frekans referansları üretirken; şebekeyi takip eden invertörler, mevcut şebeke parametrelerine senkronize çalışmaktadır [76].

Modern enerji depolama sistemlerinde kullanılan invertör tasarımları, modüler çok seviyeli konvertör (Modular Multilevel Converter – MMC) topolojileri ile daha gelişmiş ve esnek hale getirilmektedir. Yüksek gerilimli çıkışlar oluşturmak amacıyla daha düşük gerilim seviyelerindeki alt modüllerin bir araya getirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede hem harmonik distorsiyon azaltılmakta hem de sistem verimliliği ve güvenilirliği artırılmaktadır. Büyük ölçekli şebeke entegrasyonlarında, MMC tabanlı invertör çözümleri, enerji kalitesinin korunmasında ve sistem stabilitesinin sağlanmasında önemli avantajlar sunmaktadır [77].

Tasarımda enerji depolama sisteminin şebeke ile etkileşimli bir biçimde çalışmasını sağlamak amacıyla 12 kW kapasiteli hibrit tip bir invertör kullanılmıştır. Seçilen invertör, hem şebeke bağlantılı hem de ada modunda (off-grid) çalışma yeteneğine sahip olup, çift yönlü enerji akışını desteklemektedir. Sistemin güvenli ve kararlı çalışması için gerekli olan gerilim ve frekans dengelemesini de otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. 12 kW'lık güç kapasitesi, orta ölçekli uygulamalar için

yeterli düzeyde olup, hem konut hem de küçük ölçekli ticari sistemlerde kullanılmaya uygun bir yapı sunmaktadır (Şekil 3.18). Hibrit invertörün kullanımı, enerji yönetiminin esnekliğini artırmakta ve sistemin genel verimliliğine olumlu katkı sağlamaktadır.



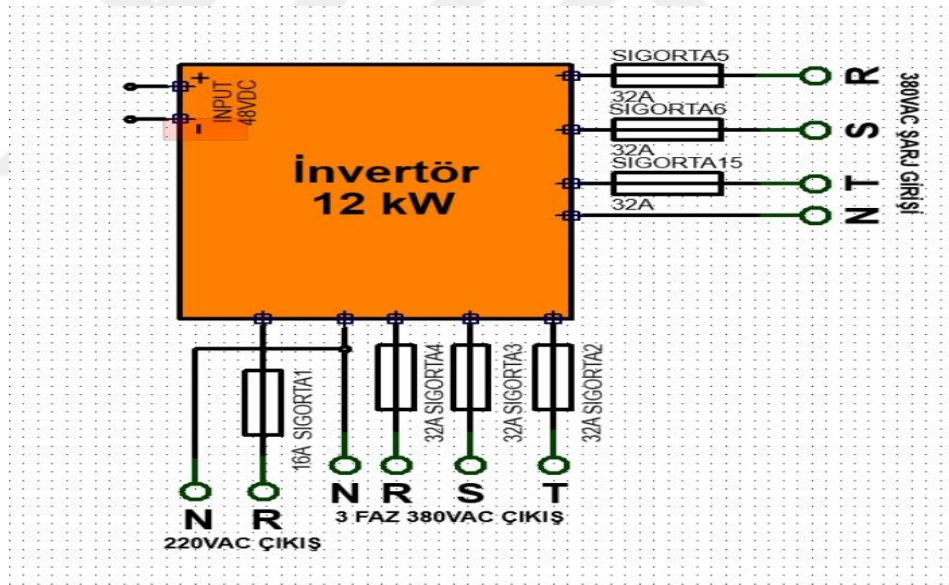
Şekil 3.18 İnvörtör sistemi devre tasarımı

3.2.2.4 Koruma devresi tasarımı

Hibrit enerji depolama sistemlerinde, özellikle lityum iyon bataryalar ile süperkapasitörlerin birlikte kullanıldığı yapılar, enerji yoğunluğu ile güç yoğunluğu arasında dengeli bir performans sunmaktadır. Tasarımı yapılan sistemlerde farklı elektriksel ve termal karakteristiklere sahip iki farklı enerji kaynağının entegrasyonu, güvenli ve kararlı bir çalışma için gelişmiş koruma devrelerinin tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Koruma devreleri, sistemin hem bileşen ömrünü uzatmak hem de kullanıcı güvenliğini sağlamak amacıyla aşırı şarj, aşırı deşarj, aşırı akım, kısa devre ve sıcaklık gibi olumsuz çalışma koşullarına karşı müdahale edecek şekilde tasarlanmaktadır.

Tasarlanan sistemde, tek faz bağlantılar için 3 x 6 mm² kesitinde, üç faz bağlantılar için ise 5 x 6 mm² kesitinde kablolar tercih edilmiştir. Yapılan yük analizi ve gerilim düşümü hesaplamaları doğrultusunda, sistemin 12 kW güç talebi esas alınarak uygun kesitte kablolar seçilmiş ve bu güç düzeyine karşılık gelen nominal akım değerleri göz önünde bulundurularak 25 A.'lik otomatik sigortalar kullanılmıştır. Toplamda iki adet üç kutuplu ve bir adet tek kutuplu sigorta tercih edilmiştir. Sigortalar, hem şarj işlemi sırasında kullanılacak faz hatlarının hem de yüke iletim sağlayan fazların korunmasında görev almaktadır.

Sistemde ilave olarak nötr ve toprak hatlarının bağlantıları için klemens kullanımı tercih edilmiştir. Kullanılan klemensler, 6 mm² kesitli kablolarla uyumlu olacak şekilde seçilmiş olup, elektriksel güvenliğin artırılması ve bakım kolaylığı sağlanması hedeflenmiştir. Tasarlanan yapı, sistemin elektriksel koruma altyapısının standartlara uygun şekilde tesis edilmesini sağlamaktadır (Şekil 3.19).

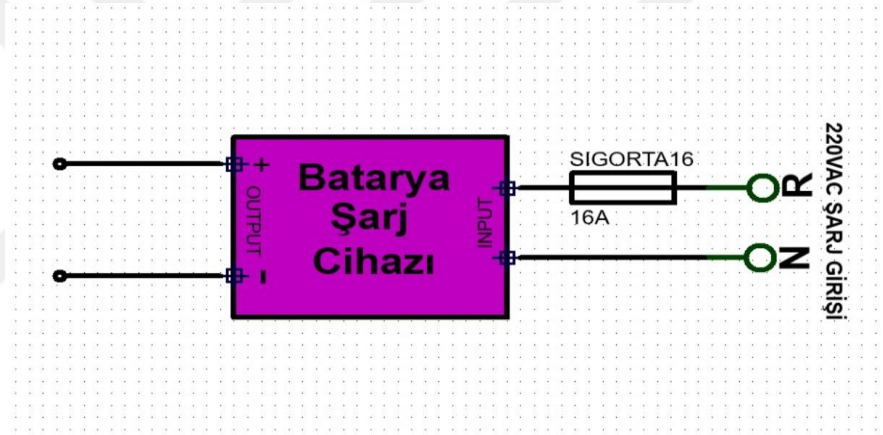


Şekil 3.19 İnvörtör, sigortaların bağlantı şeması ve hibrit invörtör şeması

3.2.2.5 Batarya şarj cihazı

Hibrit enerji depolama sistemi tasarımında, batarya sisteminin güvenli ve verimli bir şekilde şarj edilebilmesi amacıyla 48V nominal gerilim ve 5 kW güç çıkışına sahip bir batarya şarj cihazı tercih edilmiştir. Seçilen şarj cihazı, hem performans hem de güvenlik kriterleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Cihaz, gerektiğinde 220V AC tek faz giriş ile çalışabilmekte olup bu sayede sistemin şebekeye

entegrasyonunda esneklik sağlamaktadır. Özellikle düşük güçlü şebeke bağlantılarında veya saha testlerinde kullanım kolaylığı sunmaktadır. Cihaz, olası aşırı yüklenme durumlarına karşı uygun akım değerine sahip bir sigorta ile korunmaktadır. Sigorta koruması, hem şarj cihazını hem de bağlı batarya sistemini yüksek akım kaynaklı arızalara karşı güvence altına almaktadır. Şarj cihazı üzerinde gerçekleştirilen testlerde, 220V AC tek faz giriş üzerinden gerçekleştirilen şarj işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Test süresince cihaz, nominal çalışma koşullarında kararlı bir performans sergilemiş, aşırı ısınma, dalgalanma veya gerilim düşümü gibi olumsuz durumlara rastlanmamıştır. Bu sonuçlar, cihazın sistem gereksinimlerine uygun olduğunu ve uzun süreli kullanımda güvenilir bir performans sunacağını göstermektedir.



Şekil 3.20 Batarya şarj cihazı, sigortaların bağlantı şeması

3.2.2.6 Tasarlanan hibrit depolama sisteminin özellikleri

Süperkapasitörlerin, LFP pil hücreleriyle birlikte hibrit bir enerji depolama sisteminde kullanılması, sistem performansı açısından çeşitli avantajlar sunmuştur. Bu iki teknolojinin birbirini tamamlayıcı özellikleri sayesinde elde edilen faydalar aşağıda detaylı şekilde açıklanmıştır:

Uzun döngü ömrü

Süperkapasitörler, geleneksel batarya teknolojilerine kıyasla çok daha yüksek sayıda şarj-deşarj döngüsüne dayanıklıdır. LFP pillerle birlikte kullanıldığında, sistemin toplam hizmet ömrünü uzatmış ve daha uzun süreli, dayanıklı bir enerji depolama çözümü sunmuştur.

Hızlı Şarj ve deşarj kapasitesi

Süperkapasitörlerin yüksek akımlarda çok kısa sürede şarj olup deşarj olabilme yeteneği, ani enerji taleplerinde hızlı bir tepki mekanizması sağlamıştır. Yük dengeleme görevlerinde sistemin dinamik performansını artırmıştır.

Yüksek güç yoğunluğu

Süperkapasitörlerin sunduğu yüksek güç yoğunluğu, ani ve yüksek enerji taleplerinin karşılanmasında etkin rol oynamıştır. LFP pil hücreleri üzerindeki yük azaltılmış, termal stres düşürülmüş ve daha dengeli bir enerji yönetimi sağlanmıştır.

Geniş sıcaklık aralığında çalışma

Süperkapasitörlerin geniş sıcaklık aralıklarında güvenli çalışabilme özellikleri sayesinde, sistem zorlu çevresel koşullarda da kararlı bir şekilde faaliyet göstermiştir. Dış ortam koşullarına maruz kalan uygulamalarda sistemin güvenilirliğini artırmıştır.

Yüksek enerji verimliliği

Süperkapasitörlerin düşük iç dirençleri, enerji depolama ve geri kazanım süreçlerinde oluşan kayıpları minimize etmiş ve sistemin genel enerji verimliliği önemli ölçüde artırılmıştır.

Sistem güvenilirliğinin artırılması

Süperkapasitörler, ani voltaj değişimlerinde tampon görevi üstlenerek gerilim dalgalanmalarını azaltmış ve LFP bataryaların daha kararlı ve güvenli çalışmasını sağlamıştır.

Şarj sıklığının azaltılması

Hızlı enerji depolama kapasitesine sahip süperkapasitörler, sistemde sık sık batarya şarjı gereksinimini azaltmıştır. LFP pillerin kullanım döngüsünü uzatarak şarj-deşarj sıklığını optimize etmiştir.

Uzun sistem ömrü

Süperkapasitörlerin yüz binlerce döngüye kadar çalışabilme kapasitesi, LFP pillerin sınırlı döngü ömrüyle birleştiğinde hibrit sistemin toplam kullanım ömrünü önemli

ölçüde artırmıştır. Entegrasyon, uzun ömürlü ve dayanıklı bir enerji depolama mimarisi oluşturmuştur.

Ekonomik fayda

Uzun döngü ömrü, düşük bakım ihtiyacı ve artırılmış enerji verimliliği sayesinde süperkapasitörlerin sistemde kullanımı, toplam sahip olma maliyetinin düşürülmesine katkı sağlamıştır.

Süperkapasitörlerin LFP pil teknolojisiyle entegre şekilde kullanıldığı hibrit enerji depolama sistemlerinin; performans, güvenilirlik, verimlilik ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli kazanımlar sunduğunu ortaya koymaktadır.

Sistem tasarımının genel devre şeması Proteus yazılımı (Şekil 3.21) kullanılarak oluşturulmuştur. Enerji depolama ünitesinde, 15 adet seri ve 3 adet paralel bağlantılı LFP hücre kullanılmaktadır. Hücreler, uygun akım taşıma kapasitesine sahip baralar yardımıyla birbirine paralel olarak bağlanmıştır. Her bir seri LFP hücresine, BYS bağlantısı sağlamak amacıyla balans kabloları bağlanarak BYS ile entegrasyon gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.22).

Batarya paketinin pozitif (ana artı) ve negatif (ana eksi) uçlarından toplam 21 adet seri bağlantı yapılmıştır. Süperkapasitör ünitesinin pozitif ve negatif uçları ise birbirine paralel olarak bağlanmış, bu noktadan alınan ana artı ve ana eksi çıkışlar, sistemin DC enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde invertörün batarya DC girişine iletilmiştir.

Akıllı invertörün üç fazlı AC giriş kısmı, sistem topraklamasıyla birlikte üç faz giriş soketine bağlanmıştır. İnvertörün AC çıkış kısmından elde edilen üç fazlı ve tek fazlı çıkışlar ise yine topraklama dikkate alınarak çıkış soketine bağlanmıştır. Bu yapı sayesinde, enerji depolama sistemi ile akıllı invertör arasında güvenli ve işlevsel bir enerji aktarımı sağlanmıştır.

3.3 Hibrit Enerji Depolama Prototipi ve Kullanılabilirlik Testleri

Tasarımı gerçekleştirmiş olan hibrit enerji depolama sistemimiz, farklı enerji depolama teknolojilerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu depolama sistemi, dağıtım şebekelerinde enerji kalitesini artırmak, yük dengelemesi sağlamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmak amacıyla kullanılarak, sistem güvenliği için çeşitli test senaryoları gerçekleştirilmiştir. Hibrit depolama sistemlerinin dağıtım şebekelerine entegrasyonu, şebeke esnekliğini artırarak ani yük değişimlerine hızlı tepki verilmesini sağlamakta ve enerji arz güvenliğini desteklemektedir [78].

Tasarlanan hibrit enerji depolama sisteminin, dağıtım şebekesinde test edilmesi ve uygulanması, laboratuvar ortamlarında ve gerçek şebeke koşullarında gerçekleştirilen deneylerle desteklenmiştir. Laboratuvar koşullarında gerçekleşen olan testler, sistemin performansını değerlendirmek ve olası entegrasyon sorunlarını belirlemek için önemli olup, tasarım değerlendirilmiş ve sistemin etkinliği analiz edilmiştir. Sistemin şebekede kullanılması için yapılan ön testler aşağıda açıklanmıştır.

Hibrit batarya sistemi kullanım ön testleri

- Nominal Kapasite Testi: Bataryanın nominal kapasitesinin (280 Ah) doğruluğunu teyit etmek amacıyla tam şarj ve tam deşarj döngüleri gerçekleştirilmiştir. Test sırasında akım ve voltaj değerleri kaydedilerek kapasite hesaplaması yapılmıştır.
- Şarj/Deşarj Döngü Testi: Belirlenen şarj-deşarj döngü sayısında bataryanın performans değişimi izlenmiştir. Her döngü sonunda kapasite, enerji verimliliği ve iç direnç değerleri ölçülerek batarya yaşlanma eğrileri elde edilmiştir.
- Sıcaklık Döngü Testi: Batarya, farklı sıcaklık koşullarına maruz bırakılarak test edilmiştir. Testler sırasında her döngüde kapasite, voltaj ve iç direnç değişimleri kaydedilmiştir.
- SOC (State of Charge) Kalibrasyonu: %0, %25, %50, %75 ve %100 gibi farklı SOC seviyelerinde voltaj ve iç direnç değerleri ölçülerek sistemin SOC tahmin doğruluğu değerlendirilmiştir. Bu test ile enerji yönetim sisteminin doğru çalışıp çalışmadığı gözlemlenmiştir.

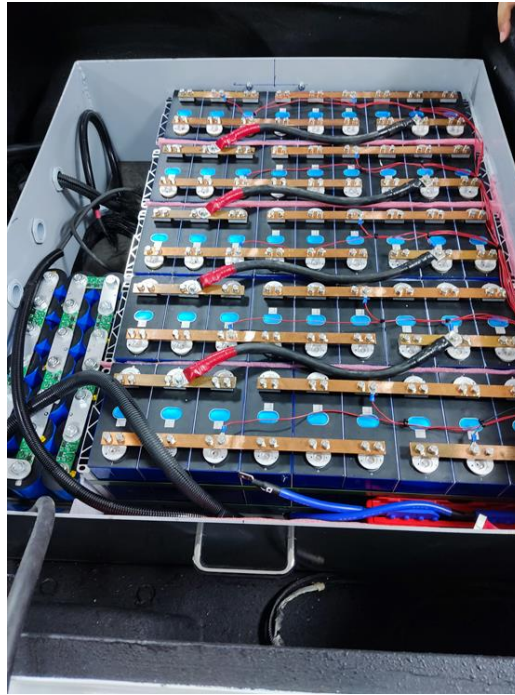
- SOH (State of Health) Değerlendirmesi: Bataryanın genel sağlık durumu, kapasite azalması ve iç direnç artışı parametrelerine göre periyodik olarak izlenmiş, bu sayede batarya ömrünün ne ölçüde korunduğu tespit edilmiştir.
- Kısa Devre Testi: Batarya kısa devre durumuna karşı test edilerek BMS'in koruma mekanizmaları gözlemlenmiştir. Test süresince akım artışı ve sıcaklık değişimleri izlenmiş, sistemin güvenlik limitlerine uyumu kontrol edilmiştir.
- Aşırı Şarj/Aşırı Deşarj Testi: Batarya, sınır değerlerin üzerinde şarj ve deşarj edilerek sistemin güvenlik önlemleri test edilmiştir. Bu esnada BMS'in kontrol ve koruma işlevlerinin yeterliliği değerlendirilmiştir.
- Dengeleme (Balans) Testi: Hücreler arası voltaj dengesizliği simüle edilerek, BMS'in hücre dengeleme mekanizması test edilmiştir. Hücreler arası voltaj farkları ve dengeleme süresi izlenerek sistemin etkinliği değerlendirilmiştir.
- Vibrasyon ve Darbe Testi: Batarya fiziksel olarak vibrasyon ve darbe koşullarına maruz bırakılarak mekanik sağlamlığı ve elektriksel sürekliliği test edilmiştir. Test sonrası kapasite ve voltaj kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

Süperkapasitör kullanım ön testleri

- Nominal Kapasite Testi: Süperkapasitörün üretici tarafından belirtilen nominal kapasite değeri, tam şarj ve deşarj testleri ile doğrulanmıştır. Akım ve voltaj değişimleri takip edilerek enerji depolama performansı belirlenmiştir.
- Şarj/Deşarj Döngü Testi: Süperkapasitör belirli döngü sayılarında test edilerek, kapasite kaybı ve verimlilik değişimleri analiz edilmiştir.
- Sıcaklık Döngü Testi: Ortam sıcaklığında gerçekleştirilen tekrarlı şarj-deşarj testleri ile süperkapasitörün kapasite stabilitesi gözlemlenmiş, sıcaklık değişiminin performansa etkisi analiz edilmiştir.
- Hızlı Şarj/Deşarj Testi: Süperkapasitörün anlık güç taleplerine yanıt kabiliyeti hızlı şarj ve deşarj senaryoları altında test edilmiştir. Bu testte, performans değerleri ile birlikte sıcaklık artışı ve gerilim dalgalanmaları izlenmiştir.
- Güç Yoğunluğu Testi: Süperkapasitörün maksimum güç çıkışı belirlenmiş, enerji ve güç yoğunluğu hesaplanarak batarya ile olan tamamlayıcılığı değerlendirilmiştir.

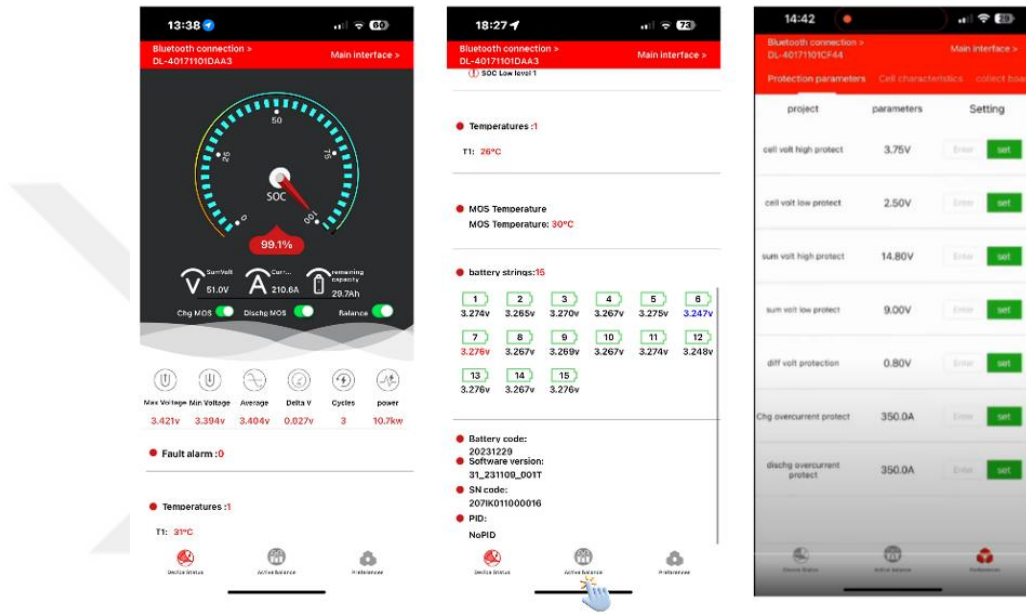
- Güvenlik Testi: Süperkapasitör, aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa devre koşullarında test edilmiştir. Bu test sırasında sıcaklık artışı, voltaj tepkisi ve fiziksel deformasyonlar izlenmiş ve sistemin güvenlik sınırları değerlendirilmiştir.

Uygulanan kapsamlı test prosedürleri sonucunda, hibrit enerji depolama sisteminin (Şekil 3.23) hem performans hem de güvenlik açısından dağıtım şebekesine entegrasyon için uygun olduğu belirlenmiştir. Batarya testleri, sistemin nominal kapasitesini başarıyla karşıladığını, SOC ve SOH değerlerinin doğru şekilde izlenebildiğini ve BMS'nin aşırı şarj, kısa devre ve dengeleme gibi güvenlik senaryolarına etkin biçimde müdahale edebildiğini göstermiştir. Süperkapasitör testleri ise yüksek güç yoğunluğu ve hızlı yanıt süreleriyle ani yük değişimlerine karşı etkin bir tampon görevi gördüğünü kanıtlamıştır. Her iki bileşenin sıcaklık, döngüsel stres ve çevresel faktörlere karşı dayanıklılık göstermesi, sistemin uzun ömürlü ve kararlı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Yapılan tüm testlerin sonuçları, hibrit sistemin enerji yönetimi, şebeke dengelemesi ve güvenlik açısından yüksek performanslı ve güvenilir bir çözüm sunduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 3.23 Hibrit enerji depolama sistemi prototipi

Tüm test süreçleri boyunca batarya yönetim sistemi, sistemin temel izleme ve kontrol arayüzü olarak kullanılmıştır. Akım, gerilim, sıcaklık ve hücre voltajları gibi kritik parametreler, BMS üzerinden anlık olarak takip edilmiş ve test senaryoları süresince veriler sürekli olarak kaydedilmiştir. Bu sayede, sistemin hem performans hem de güvenlik açısından anlık tepkileri değerlendirilmiş ve BMS'in izleme doğruluğu ile müdahale kapasitesi de doğrulanmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 BMS anlık izleme ekranları

3.4 Ölçüm ve Analizler

Tasarlanan hibrit enerji depolama sisteminin dağıtım şebekesiyle olan etkileşimini değerlendirmek amacıyla çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında sistemin şebekeye bağlı olduğu ve olmadığı durumlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Test sürecinde, özellikle sistemin şebekeye entegrasyonu esnasındaki güç kalitesi parametrelerinin gözlemlenmesi için gelişmiş bir güç kalitesi analiz cihazı kullanılmıştır. Yapılan ölçümler, gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulmalar ve yük değişimlerine sistemin tepkisi gibi kritik parametrelerin analizine imkân sağlamıştır. Böylece, hibrit sistemin yalnızca enerji depolama işlevi değil, aynı zamanda şebeke kararlılığı üzerindeki etkileri de kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

3.4.1 Test süreçlerinde kullanılan yüksek hassasiyetli ölçüm cihazı

Ölçümlerde kullanılan güç kalitesi analizörü, Alman menşeli Eberle PQ-Box 150 modelidir (Şekil 3.25). Cihaz, özellikle alçak ve orta gerilimli elektrik şebekelerinde güç kalitesi parametrelerinin izlenmesi ve kayıt altına alınması amacıyla geliştirilmiş, IEC 61000-4-30 Ed.3 Class A standardına uygun bir mobil analiz cihazıdır. Yüksek doğrulukta ölçüm kapasitesi ve enerji analizlerinde güvenilir veri sağlamaktadır.

4 adet gerilim ve 4 adet akım girişi ile 20,48 kHz örnekleme frekansında çalışmakta olup, bu sayede hızlı ve yüksek çözünürlüklü sinyal analizi gerçekleştirebilmektedir. Cihaz, harmonik ve ara harmonik analizlerini IEC 61000-4-7 standardına uygun biçimde 9 kHz'e kadar gerçekleştirebilmekte; ayrıca FFT (Fast Fourier Transform) analizi ile 10 kHz'e kadar frekans bileşenlerinin ayrıntılı spektral dağılımını sunmaktadır.



Şekil 3.25 Güç kalite ölçüm cihazı

Bu cihazın özellikleri:

Enerji ölçümleri

- Üç faz üzerinden toplam olarak aktif enerji (kWh), reaktif enerji (kVARh) ve görünür enerji (kVAh) ölçümleri
- Enerji akış yönüne göre teslim edilen ve alınan enerji ayrı ayrı kaydı
- Cihaz ayrıca volt-saat (VAs) ve amper-saat (Ahs) cinsinden enerji ölçümleri
- Tüm enerji parametreleri hem anlık hem de zamana bağlı olarak kayıt

Anlık elektriksel ölçümler

- Gerilim (RMS) ve akım (RMS) değerleri her bir faz için ayrı ayrı ve toplam olarak ölçüm
- Aktif güç (kW), reaktif güç (kVAR) ve görünür güç (kVA) sürekli olarak izleme
- Güç faktörü ($\cos \phi$) hem faz başına hem de toplam sistem düzeyinde hesaplama
- Şebeke frekansı (Hz) anlık olarak yüksek doğrulukla ölçüm
- Faz sırası (faz tersliği) kontrolü ile sistem dengesizliği, hatalı bağlantılar veya faz kaymaları tespit etme
- Fazlar arası ve faz-nötr gerilim dengesizlikleri sürekli izlenerek raporlama

Harmonik ve ara harmonik analizi

- 63. harmoniğe kadar toplam harmonik bozulma (THD) analizi
- Her bir faz için tekil harmoniklerin genliği (büyüklüğü), faz açısı ve ara harmonikler ayrıntılı şekilde analizi
- Toplam gerilim harmonik bozulması (THD-V) ve toplam akım harmonik bozulması (THD-I) hesaplaması
- K-faktörü (transformatör tasarımı açısından önemli) ve tepe faktörü (crest factor) gibi harmonik kaynaklı gerilim bozulmalarını yansıtan özel parametrelerin analizi
- Ölçümler IEC 61000-4-7 standardına uygun olarak yapılması

Geçici olay kayıtları

- Gerilim düşmeleri (sag), yükselmeleri (swell) ve kesintiler (interruption) gibi geçici olaylar tespit edilip yüksek çözünürlükle kayıt
- Her bir olay için zaman damgası, olayın süresi ve büyüklüğü ayrı ayrı kayıt
- Olay kayıtları cihazın dahili belleğine yazılır ve analiz yazılımı ile grafiksel incelenmesi

Flicker ölçümleri

- Kısa süreli flicker (Pst) ve uzun süreli flicker (Plt) değerleri IEC 61000-4-15 standardına uygun şekilde hesaplama

- Cihaz parametreleri sürekli izleyerek gerilim değişimlerinin aydınlatma ekipmanlarına olası etkilerini değerlendirilmesi

Gerilim ve akım asimetrisi

- Sistem üzerindeki asimetrik yüklenme, fazlar arası dengesizlik ve harmonik kaynaklı bozulmaların tespiti için asimetrik gerilim ve asimetrik akım ölçümleri
- Pozitif ve negatif sıra bileşenleri kullanılarak analiz edilmekte ve dengesiz yüklerin sistem üzerindeki etkilerin belirlenmesi

3.4.2 Saha testi uygulama koşulları ve ölçüm lokasyonu

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen testler, hibrit enerji depolama sisteminin alçak gerilim dağıtım şebekesi üzerindeki performansını değerlendirmek amacıyla, gerçek saha koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, LFP batarya ve süperkapasitör bileşenlerinden oluşan hibrit enerji depolama sisteminin aktif olarak bağlı bulunduğu dağıtım şebekesi üzerinde yapılmıştır. Test alanında, enerji depolama ünitesinin inverter bağlantıları dikkatle yapılandırılmış; sistemin şebeke ile entegrasyonu belirlenen teknik kriterler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Saha uygulamaları, düşük sıcaklık ve yağış gibi olumsuz çevresel koşullar altında yürütölmüş; test süresince sistemsel değişkenler anlık olarak izlenmiş ve ölçüm verilerinin güvenilirliği zorlu çevresel şartlar altında da doğrulanmıştır. Hibrit sistemin dinamik yük tepkisi, güç kalitesi üzerindeki etkileri ve şebeke stabilitesine olan katkısı kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.

Enerji depolama sisteminin dağıtım şebekesine entegrasyon süreci; sistemin tasarımı, sahada montajı ve devreye alma işlemleri tamamlanarak başarıyla gerçekleştirilmiştir. Elektrik enerjisinin verimli kullanımı ve arz güvenliğinin artırılması hedefiyle geliştirilen hibrit sistem, belirlenmiş mühendislik kriterleri doğrultusunda yapılandırılmıştır. Sistem tasarımının ardından saha montajı gerçekleştirilmiş, akabinde dağıtım şebekesine bağlantısı sağlanarak performans değerlendirmelerine yönelik kapsamlı test süreci başlatılmıştır.

Söz konusu saha uygulaması, Diyarbakır 4 Trafo Merkezi (TM) üzerinden beslenen, Şehir Kablo 2 fiderinde yer alan Su Deposu Kök binasına bağlı 400 kVA gücündeki bir dağıtım trafosu üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.26). Geliştirilen hibrit enerji depolama sistemi, bu trafoya entegre edilen özel bir pano aracılığıyla şebekeye bağlanmış ve uygulama senaryoları altında detaylı testlere tabi tutulmuştur. Gerçek zamanlı ölçümler, doğal yük profilleri ve saha koşulları altında gerçekleştirilmiş; sistemin şebekeyle etkileşimi, güç kalitesi parametrelerine etkisi ve geçici durumlara karşı dinamik yanıt davranışı ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Test süresince çevresel faktörler, bağlantı güvenliği ve ölçüm cihazlarının konumlandırılması sürekli gözetim altında tutulmuş, bu sayede sistemin kararlı çalışması başarıyla gözlemlenmiştir.

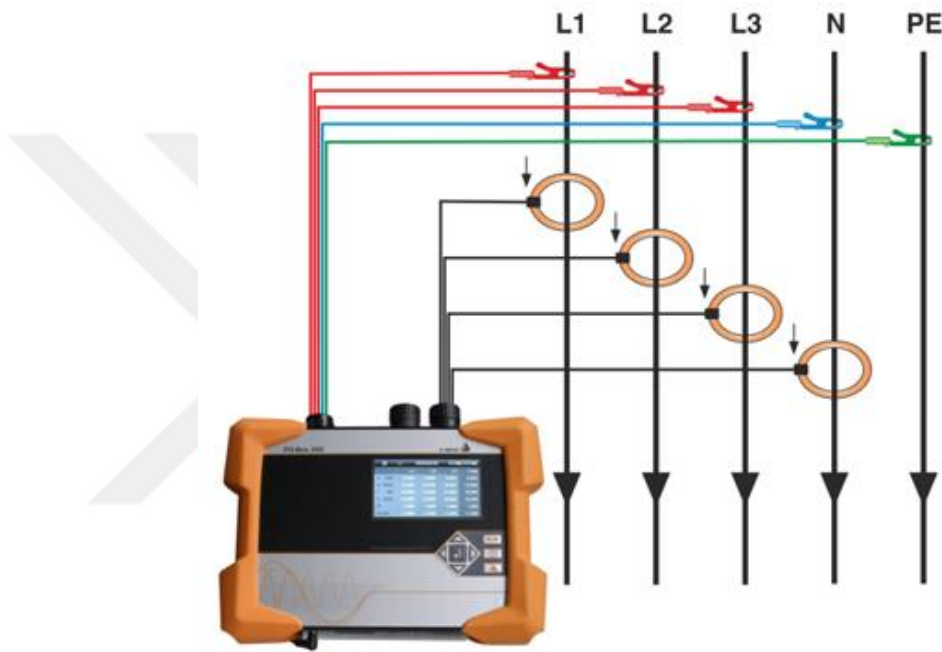


Şekil 3.26 Test lokasyonu

3.4.3 Ölçüm aşamaları ve veri toplama yöntemi

Ölçümler, iki farklı senaryo kapsamında gerçekleştirilmiştir: Veriler, pano çıkışında hem yalnızca şebekeden enerji sağlandığı durumda hem de hibrit enerji depolama sisteminin şebekeye entegre olduğu ve birlikte enerji sağladığı durumda ayrı ayrı toplanmıştır. Bu yöntemle, hibrit sistemin güç kalitesi parametrelerine etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sistem entegrasyonunun şebeke davranışına katkısı ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

Hibrit enerji depolama sisteminin dağıtım şebekesi üzerindeki performansını değerlendirmek amacıyla, sistemin şebeke bağlantı noktası olan panoya Eberle PQ-Box 150 güç kalite analizörü entegre edilmiştir (Şekil 3.27). Bu cihaz, sistemin gerilim, akım, frekans, güç kalitesi ve harmonik bileşenlerini yüksek örnekleme hassasiyetiyle ölçerek, test süreci boyunca anlık ve sürekli veri toplamıştır. Ölçümler, hibrit enerji depolama sisteminin inverter çıkışı ile şebeke bağlantısı arasına doğrudan yapılan bağlantı üzerinden gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27 Güç kalite cihazı pano bağlantı şeması

Eberle PQ-Box 150, IEC 61000-4-30 Ed.3 standardına uygun olarak Class A düzeyinde güç kalitesi ölçümü gerçekleştirmektedir. Test süresince cihaz, aşağıdaki parametreleri yüksek çözünürlükte ve zamana bağlı olarak kaydetmiştir:

- Üç fazlı gerilim ve akım RMS değerleri
- Aktif (kW), reaktif (kVAR) ve görünür güç (kVA)
- Güç faktörü ve şebeke frekansı
- Toplam harmonik bozulma (THD) ile birlikte 63. harmoniğe kadar tekil harmonikler
- Flicker değerleri (Pst, Plt)

- Gerilim düşmesi (sag), yükselmesi (swell) ve kesinti olayları
- Veri zaman damgası ile her ölçümün kesin gerçekleşme zamanı

Veriler cihazın dahili hafızasında PQD (Power Quality Data) formatında saklanmış, daha sonra WinPQ Mobile yazılımı aracılığıyla dışa aktarılmış ve analiz edilmek üzere MATLAB ortamına veri dönüşümü gerçekleştirilmiştir.

3.5 Ölçüm Sonuçlarının Analizi ve Sistem Davranışları

Hibrit enerji depolama sisteminin dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen saha testlerine ait ölçüm sonuçları analiz edilmiştir. Test sürecinde, hem yalnızca şebekeden enerji sağlanan senaryo hem de hibrit enerji depolama sisteminin aktif olarak şebekeye entegre edildiği durum olmak üzere iki farklı çalışma koşulu ele alınmıştır. Her iki senaryoda Eberle PQ-Box 150 güç kalite analizörü kullanılarak toplanan veriler, sistemin gerilim kararlılığı, güç kalitesi, harmonik davranışı ve geçici olaylara verdiği tepkiler açısından değerlendirilmiştir.

İlk senaryoda yalnızca dağıtım şebekesinden beslenen sistemin davranışı analiz edilirken, ikinci senaryoda hibrit enerji depolama sisteminin şebeke yerine kullanılması durumundaki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Bu sayede, hibrit sistemin güç kalitesine olan katkısı, gerilim ve akım dalga formlarındaki bozulmalar üzerindeki etkisi ve yük değişimlerine karşı verdiği tepkiler karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

3.5.1 Şebekeden enerjilendirme durumunda ölçüm sonuçları

Hibrit enerji depolama sisteminin devre dışı bırakıldığı bu test senaryosunda, enerji yalnızca dağıtım şebekesinden sağlanmış ve sistemin temel güç kalitesi parametreleri, Eberle PQ-Box 150 cihazı ile kaydedilmiştir. Ölçümler, EN50160 / IEC61000-2-2 standardına göre değerlendirilmiş olup; temel olarak frekans, gerilim kararlılığı, gerilim dengesizliği, flicker (kırpışma), harmonik bozulmalar ve geçici olay parametreleri analiz edilmiştir.

3.5.1.1 Frekans ve gerilim analizi

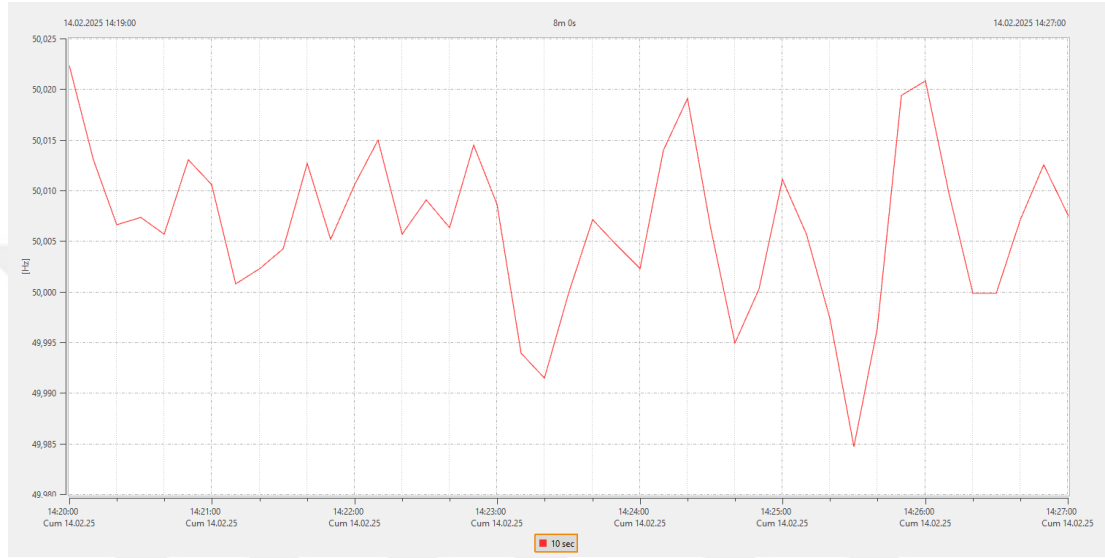
Elektrik şebekelerinde frekans ve gerilim stabilitesi, sistemin güvenilir, sürekli ve kaliteli bir şekilde çalışabilmesi için temel parametreler arasında yer almaktadır. Frekans, jeneratörlerin senkronizasyonunu koruyan ve üretim-tüketim dengesini yansıtan kritik bir göstergedir. Şebekede üretim ve tüketim arasında dengesizlik oluştuğunda, bu durum frekans dalgalanmalarına neden olur ve sistemin koruma elemanlarını tetikleyerek olası yaygın arızalara yol açabilir. Benzer şekilde, gerilim stabilitesi ise enerji iletiminin sağlıklı yürütülebilmesi için hayati öneme sahiptir. Gerilimde meydana gelen ani düşmeler (sag), yükselmeler (swell) veya sürekli dengesizlikler, hassas elektronik ekipmanların arızalanmasına, endüstriyel süreçlerin kesintiye uğramasına ve enerji kalitesinin bozulmasına neden olur. Bu nedenle, dağıtım şebekesinde yapılan güç kalitesi analizlerinde frekans ve gerilim davranışlarının izlenmesi, sistemin hem teknik performansını hem de kullanıcı güvenliğini değerlendirmek açısından son derece kritiktir.

Frekans parametresi, sistemin kararlılığı açısından kritik bir gösterge olup, bu çalışma kapsamında 8 dakikalık süre boyunca 48 ölçüm aralığında izlenmiştir. Elde edilen verilere göre, frekans değerleri 49.98 Hz ile 50.02 Hz aralığında değişmiş; bu değerler, EN50160 standardında belirtilen 49.5 Hz – 50.5 Hz sınırları içerisinde kalmıştır (Tablo 3.4). Ölçüm sonuçları, şebekedeki frekans kontrolünün son derece stabil olduğunu ve sistemin senkronizasyon açısından herhangi bir sapma yaşamadığını göstermektedir.

Tablo 3.4 Şebeke Frekansı Ölçümleri

	Maksimum değer (Hz)	Minimum değer (Hz)	Maksimum limit değerleri (Hz)	Minimum limit değerleri (Hz)	Aralık Sayısı
Frekans	50.02 Hz	49.98 Hz	50.50 Hz	49.50 Hz	48

Frekansın zamanla değişimini gösteren grafikte, ölçüm süresi boyunca frekansta küçük dalgalanmalar gözlemlenmiştir (Şekil 3.28) . Ancak bu dalgalanmaların tamamı ± 0.02 Hz seviyesinde olup, sistemin çalışma güvenliği ve senkronizasyonuna olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. Bu durum, test sırasında yük değişimlerinin sınırlı olduğunu ve şebekeye ani enerji giriş-çıkışlarının yaşanmadığını da desteklemektedir.



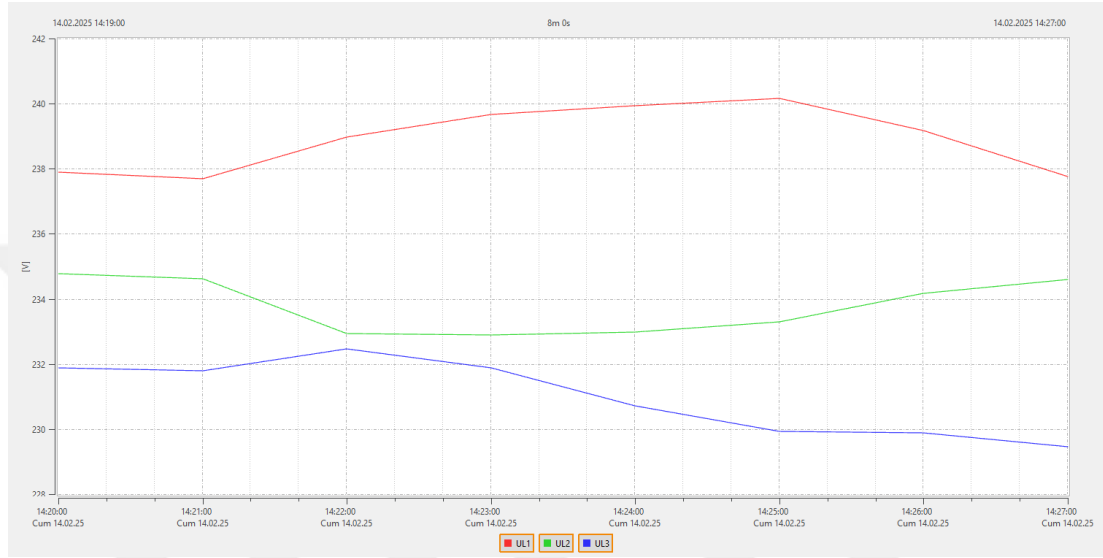
Şekil 3.28 Frekans ölçümü

Gerilim değerleri incelendiğinde, üç fazda da gerilim değerleri EN50160 standardının 230 V nominal değer $\pm 10\%$ tolerans (207 V – 253 V) sınırları içerisinde kalmıştır (Tablo 3.5). Ancak dikkat çekici bir bulgu olarak, L3 fazının diğer fazlara kıyasla sürekli olarak daha düşük gerilimde seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, fazlar arası yük dağılımında dengesizlik veya faz başı yük asimetrisi olabileceğine işaret etmektedir.

Tablo 3.5 Gerilim değişiklikleri tablosu

	Maksimum Değer (V)	Minimum Değer (V)
Gerilim Değişiklikleri L1	240.17	237.69
Gerilim Değişiklikleri L2	234.79	232.89
Gerilim Değişiklikleri L3	232.47	229.45

Grafik üzerinde UL1 (kırmızı çizgi), UL2 (yeşil çizgi) ve UL3 (mavi çizgi) olarak gösterilen fazların gerilim eğrileri, zaman içerisinde paralel seyretmekle birlikte, UL3 çizgisinin sürekli daha düşük bir seviyede kaldığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, özellikle hassas elektronik cihazlar için risk teşkil edebilecek faz dengesizliği problemini gündeme getirmektedir (Şekil 3.29).



Şekil 3.29 Gerilim ölçümü

3.5.1.2 Gerilim dengesizliği ve flicker (kırpışma)

Gerilim dengesizliği ve flicker (kırpışma), dağıtım şebekelerinde güç kalitesini doğrudan etkileyen iki önemli parametredir. Gerilim dengesizliği, üç fazlı sistemlerde fazlar arasındaki gerilim farklarının belirli sınırların üzerine çıkmasıyla ortaya çıkar ve bu durum özellikle asimetrik yüklemeler, dengesiz trafo bağlantıları veya tek fazlı yüklerin yoğun kullanımı sonucunda oluşmaktadır. Uzun süreli gerilim dengesizlikleri, motorlarda aşırı ısınma, verim kaybı, ekipman ömründe azalma ve güç faktörünün bozulması gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu da hem teknik hem ekonomik anlamda sistemin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir.

Flicker ise gerilimdeki hızlı ve küçük değişimlerin neden olduğu, özellikle aydınlatma sistemlerinde gözle fark edilen titreşim ve parlaklık değişimleri şeklinde kendini gösteren bir güç kalitesi sorunudur. Bu fenomen genellikle büyük endüktif yüklerin devreye girip çıkması, ark fırınları veya asansör motorları gibi yüklerin ani

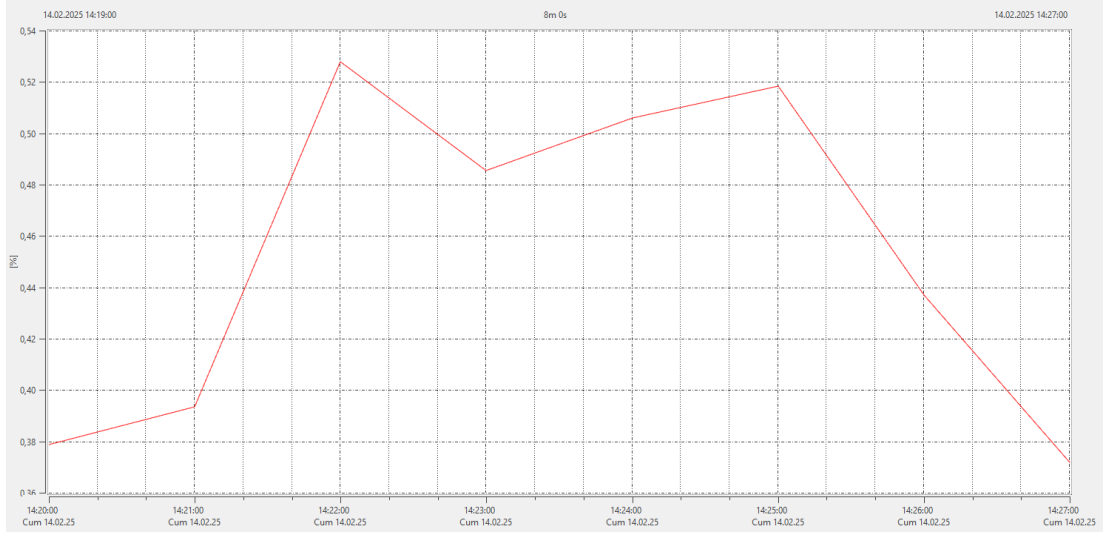
değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Flicker problemi yalnızca kullanıcı konforunu olumsuz etkilemekle kalmaz, aynı zamanda hassas üretim hatlarında kalite problemlerine ve kullanıcı şikayetlerinin artmasına neden olabilmektedir. Şebeke analizlerinde gerilim dengesizliği ve flicker parametrelerinin izlenmesi ve sınır değerlerin altında tutulması, hem teknik hem de kullanıcı memnuniyeti açısından kritik bir gerekliliktir.

Üç fazlı sistemlerde gerilimlerin simetrik olmaması durumunu ifade eden gerilim dengesizliği, hem sistem kararlılığı hem de bağlı yüklerin sağlıklı çalışması açısından kritik bir parametredir. ölçüm süresi boyunca tespit edilen maksimum gerilim dengesizliği %0,53 olarak kaydedilmiştir (Tablo 3.6). Bu değer, IEC 61000-2-2 ve EN50160 standartlarında önerilen sınır olan %2'nin oldukça altında kalmakta ve sistemin üç fazda da yeterli düzeyde simetriyle çalıştığını göstermektedir.

Tablo 3.6 Gerilim dengesizliği ve flicker değerleri

	Maksimum Değer
Gerilim Dengesizliği	0.53
Flicker 1	0
Flicker 2	0
Flicker 3	0

Gerilim dengesizliğinin zamana göre değişimi incelendiğinde, bazı zaman aralıklarında kısa süreli yükselişler gözlemlenmekle birlikte, genel eğilim %0,30 – %0,50 aralığında kalmıştır (Şekil 3.30). Bu grafiksel veriler, dağıtım şebekesinde faz başına yüklerin nispeten dengeli dağıtıldığını ve şebekeye bağlanan yüklerin sistem üzerindeki asimetric etkilerinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Dengesizlik seviyesinin düşük olması, özellikle üç fazlı motorların çalışma verimini koruyarak sistem ömrünü olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 3.30 Gerilim dengesizliği grafiği

Test süresi boyunca flicker değerleri tüm fazlar için 0,00 olarak ölçülmüştür (Tablo 3.6). Bu bulgu, ani gerilim değişimlerinin veya yüksek güçlü yüklerin ani devreye girip çıkmasının test sırasında gözlenmediğini ve sistemin gözle görünür ışık titreşimi yaratacak düzeyde bir dalgalanma üretmediğini göstermektedir.

Flicker seviyesinin sıfır olması, şebekedeki yük karakteristiklerinin dengeli olduğunu ve reaktif güç kompanzasyonu gibi düzeltici sistemlerin etkili biçimde çalıştığını göstermektedir. Bu durum hem kullanıcı konforu hem de aydınlatma sistemlerinin stabilitesi açısından olumlu bir göstergedir.

3.5.1.3 Harmonik analizi

Harmonik bileşenler, alternatif akım sistemlerinde temel frekansın (50 Hz) katları şeklinde ortaya çıkan sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalga biçimlerini ifade etmektedir. Özellikle güç elektroniği temelli yüklerin, doğrusal olmayan cihazların ve frekans dönüştürücülerin yaygın olarak kullanıldığı modern dağıtım şebekelerinde, harmonik bozulmalar önemli bir güç kalitesi sorunu haline gelmiştir. Harmoniklerin sistemde varlığı, yalnızca enerji iletimini olumsuz yönde etkilemekle kalmaz; aynı zamanda trafolar, motorlar, kondansatör grupları gibi bileşenlerde termal stres artışı, verim düşüşü, gürültü ve ömrün kısalması gibi teknik problemlere de neden olabilmektedir.

Yüksek harmonik içeriği; röle sistemlerinde hatalı tetiklemelere, kompanzasyon sistemlerinde rezonans koşullarına ve hassas elektronik ekipmanlarda bozulmalara yol açarak hem kullanıcı konforunu hem de sistem güvenliğini riske atmaktadır. Bu bağlamda, dağıtım şebekelerinde harmonik seviyelerinin izlenmesi ve IEC 61000-4-7 ile IEEE 519 gibi uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde tutulması büyük önem arz etmektedir. Harmonik analiz, özellikle sistemdeki doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu gerilim bozulmalarını ve toplam harmonik distorsiyonun (THD) sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önem arz etmektedir. Toplam harmonik bozulma (THD) değerleri incelendiğinde, L1 fazı için %1,25, L2 fazı için %1,19 ve L3 fazı için %1,22 olarak ölçülmüştür (Tablo 3.7). Değerler, düşük gerilimli sistemler için IEEE 519 standardında öngörülen %8 sınırının oldukça altında kalmaktadır. Ölçüm sonuçları, gerilim dalga formunun sinüzoidalliğini büyük ölçüde koruduğunu ve sistemde yüksek harmonik bozulma yaratacak ciddi bir yük etkisi olmadığını göstermektedir. Bu durum, transformatör, motor gibi elektromekanik sistemlerin aşırı ısınma, titreşim ve verim kaybı gibi harmonik kaynaklı sorunlara maruz kalmadan çalıştığını göstermesi açısından oldukça olumlu bir göstergedir. Tekil harmonik bileşenler incelendiğinde, en yüksek harmonik içeriğinin 5. ve 7. harmoniklerde yoğunlaştığı görülmektedir. L1 fazında 5. harmonik %0,96 ve 7. harmonik %0,74 seviyesinde, L2 fazında sırasıyla %0,94 ve %0,61, L3 fazında ise %0,86 ve %0,68 olarak ölçülmüştür. Bu harmonikler, sistemde doğrusal olmayan yüklerin (örneğin invertörler, motor sürücüleri veya anahtarlamalı güç kaynakları) bulunduğu işaret etmekle birlikte, tüm değerler ilgili sınırların oldukça altında kalmıştır. Diğer tüm harmonik bileşenler %0,2'nin altında seyretmekte olup, sistemin genel harmonik profilinin oldukça düşük seviyede olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuç, hem güç kalitesi açısından olumlu bir durum oluşturmakta hem de harmonik filtreleme ihtiyacının olmadığına işaret etmektedir.

Tablo 3.7 Harmonik ölçümleri

	Limit	L1	- L1	- L2	- L2	- L3	- L3
	değerleri	95.00%	Max[%]	95.00%	Max	95.00%	Max
	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]	[%]
THD	8.00	1.25	1.26	1.19	1.19	1.20	1.22
02	2.00	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
03	5.00	0.18	0.18	0.20	0.21	0.49	0.50

Tablo 3.7 Harmonik ölçümleri (devamı)

04	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
05	6.00	0.95	0.96	0.94	0.94	0.83	0.86
06	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
07	5.00	0.72	0.74	0.60	0.61	0.68	0.68
08	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
09	1.50	0.05	0.05	0.13	0.14	0.12	0.13
10	0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
11	3.50	0.10	0.13	0.09	0.09	0.14	0.16
12	0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
13	3.00	0.25	0.25	0.28	0.28	0.19	0.20
14	0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
15	1.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08
16	0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
17	2.00	0.08	0.09	0.15	0.15	0.07	0.08
18	0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
19	1.50	0.12	0.13	0.09	0.10	0.06	0.07
20	0.50	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
21	0.75	0.04	0.04	0.08	0.08	0.07	0.08
22	0.50	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
23	1.50	0.05	0.06	0.03	0.03	0.06	0.07
24	0.50	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
25	1.50	0.04	0.05	0.04	0.04	0.10	0.10
26	0.35	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
27	0.20	0.04	0.06	0.06	0.07	0.04	0.06
28	0.34	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
29	1.06	0.05	0.05	0.08	0.08	0.05	0.05
30	0.33	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
31	0.97	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06	0.06
32	0.33	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
33	0.20	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05
34	0.32	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
35	0.83	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
36	0.32	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
37	0.77	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03

Tablo 3.7 Harmonik ölçümleri (devamı)

38	0.32	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
39	0.20	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02
40	0.31	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
41	0.67	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
42	0.31	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
43	0.63	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
44	0.31	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
45	0.20	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
46	0.30	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
47	0.55	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
48	0.30	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
49	0.52	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
50	0.30	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01

Şekil 3.31’de üç fazın harmonik dağılımları görsel olarak sunulmuş ve fazlar arası dengenin korunmuş olduğu gözlemlenmiştir. L1, L2 ve L3 fazları arasında harmonik yüzdeleri açısından kayda değer bir fark bulunmamakta; bu da şebekenin yüklenme karakteristikleri açısından simetrik çalıştığını ve nötr hattında harmonik kaynaklı dengesizlik riskinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca 3. harmonik bileşenlerin oldukça düşük seviyede seyretmesi, sistemde özellikle nötr akımı üzerindeki olası bozulmaların da sınırlı kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.31 a) L1 fazı harmonik değer yüzdesi b) L2 fazı harmonik değer yüzdesi c) L3 fazı harmonik değer yüzdesi

Genel olarak değerlendirildiğinde, harmonik analiz sonuçları dağıtım şebekesinin kararlı, temiz ve standartlara uygun bir enerji kalitesi sunduğunu ortaya koymaktadır. Toplam harmonik distorsiyonun düşük olması, hem sistem bileşenlerinin uzun ömürlü çalışması hem de enerji verimliliğinin korunması açısından olumlu bir etkidir. 5. ve 7. harmoniklerde gözlemlenen kısmi artış, sistemde harmonik üretme potansiyeline sahip bazı yüklerin varlığına işaret etmekte ve ilerleyen aşamalarda hibrit enerji depolama sisteminin entegrasyonu ile birlikte harmonik seviyelerinin nasıl değiştiği yönünde karşılaştırmalı analiz yapılmasını gerekli kılmaktadır.

3.5.1.4 2–9 kHz arası yüksek frekans harmonikler (süperharmonikler)

Geleneksel harmonik analizleri genellikle 50. harmonik bileşene (2500 Hz) kadar olan frekans aralığını kapsasa da, modern güç sistemlerinde özellikle güç elektroniği ekipmanlarının yaygınlaşmasıyla birlikte 2–9 kHz aralığındaki yüksek frekans harmonikleri, diğer bir ifadeyle süperharmonikler, güç kalitesi açısından giderek artan bir öneme sahip olmuştur. Anahtarlama güç kaynakları, frekans konvertörleri, inverterler, LED aydınlatmalar ve özellikle hibrit enerji depolama sistemlerinde kullanılan DC-AC dönüştürücüler, bu frekans aralığında bozucu etkiler yaratabilmektedir. Bu süperharmonik bileşenler; klasik harmonik bileşenlerden farklı olarak şebekede elektromanyetik girişim (EMI), haberleşme sistemlerinde parazit, koruma rölelerinde hatalı çalışmalara ve ölçüm sistemlerinde sapmalara yol açabilmektedir.

2–9 kHz aralığında oluşan bu bozulmalar, kısa süreli ve düşük genlikli olmalarına rağmen, yüksek frekansta yayılmaları nedeniyle özellikle hassas elektronik cihazlar, sayaçlar ve iletişim altyapıları üzerinde doğrudan etki oluşturabilmektedir. Ayrıca bu frekans aralığı, klasik harmonik filtreleme tekniklerinin kapsamı dışında kaldığından, süperharmonikler şebekede fark edilmeden birikebilir ve uzun vadede şebeke stabilitesini tehdit eden birikimli etkiler oluşturabilir. Bu nedenle, modern dağıtım şebekelerinde süperharmoniklerin izlenmesi, analiz edilmesi ve kontrol altına alınması, yalnızca enerji kalitesi açısından değil, aynı zamanda sistem güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından da kritik bir gerekliliktir.

Yapılan spektral analizde, 2–9 kHz aralığındaki yüksek frekans harmonik bileşenlerin de şebekede mevcut olduğu görülmektedir. Bu değerler genellikle %0,01–%0,05 aralığında ölçülmüş olsa da, 3,3 kHz ve 4,9 kHz gibi frekanslarda kümülatif etkiler dikkat çekmektedir. Bu frekans aralığında var olan düşük genlikli bileşenler, uzun vadede elektronik ekipmanlar üzerinde elektromanyetik girişim risklerini artırabilmektedir. (Tablo 3.8).

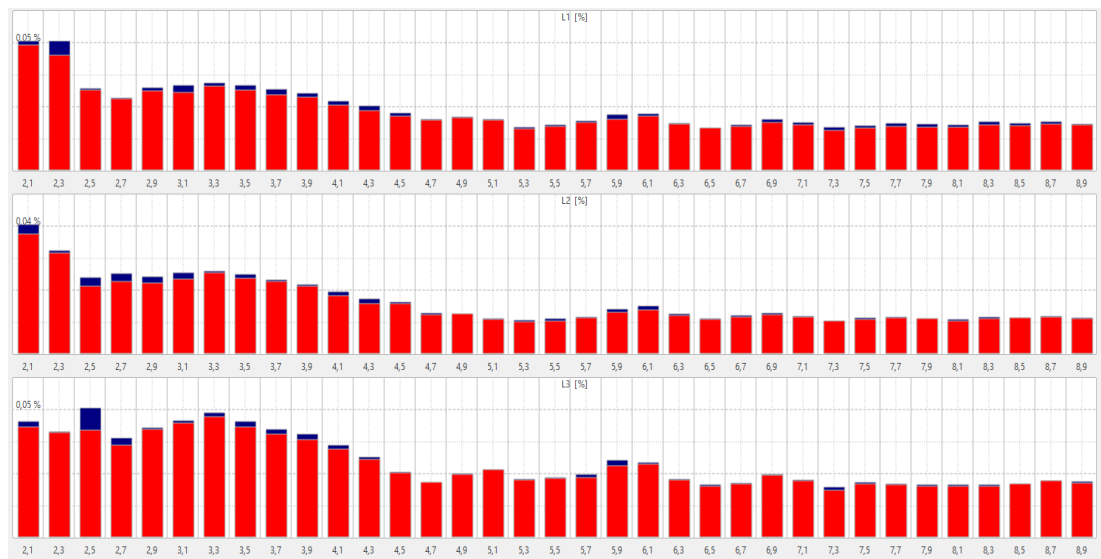
Tablo 3.8 Yüksek frekanslı harmonik ölçümleri

	Limit	L1	- L1 - Max [%]	L2	- L2 - Max [%]	L3	- L3 -
	değerleri	95.00%		95.00%		95.00%	Max
	[%]	[%]		[%]		[%]	[%]
2.1	1.40	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04
2.3	1.40	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04
2.5	1.40	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05
2.7	1.40	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04
2.9	1.40	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04
3.1	1.37	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04
3.3	1.31	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05
3.5	1.26	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04
3.7	1.21	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04
3.9	1.16	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04
4.1	1.13	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03
4.3	1.09	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03
4.5	1.05	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
4.7	1.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
4.9	1.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
5.1	0.97	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03
5.3	0.94	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
5.5	0.92	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
5.7	0.89	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
5.9	0.87	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03
6.1	0.85	0.02	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03
6.3	0.83	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
6.5	0.82	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
6.7	0.80	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
6.9	0.79	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
7.1	0.77	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02

Tablo 3.8 Yüksek frekanslı harmonik ölçümleri (devamı)

7.3	0.75	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
7.5	0.74	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
7.7	0.72	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
7.9	0.71	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
8.1	0.70	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
8.3	0.69	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
8.5	0.68	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
8.7	0.67	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
8.9	0.66	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02

Şekil 3.32'de yer alan verilere göre, L1 fazında süperharmonik genlikleri özellikle 2.1 kHz ile 4.5 kHz aralığında yoğunlaşmakta ve yaklaşık %0.15 ile %0.08 arasında seyretmektedir. En yüksek değer 2.1 kHz civarında gözlemlenmiştir. Sistemde anahtarlama yüklerin veya inverter tabanlı cihazların bu frekanslarda bozucu etki yarattığını göstermektedir. Benzer şekilde L2 fazında da ilk 3–4 kHz'lik bantta yükseltilmiş genlik değerleri dikkat çekmekte olup, 5.9 kHz civarında kısa süreli bir pik oluşumu görülmektedir. L3 fazında ise 3.1–4.7 kHz arasında belirgin bir genlik düşüşü yaşansa da, 6.7 kHz ve sonrasında tekrar yükselme eğilimi gözlemlenmiştir. Bu eğilim, her fazın kendine özgü yük dinamiği nedeniyle farklı frekanslarda rezonans veya süperharmonik yayılım potansiyeline sahip olabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.32 a) L1 fazı süperharmonik salınım yüzdesi b) L2 fazı süperharmonik salınım yüzdesi c) L3 fazı süperharmonik salınım yüzdesi

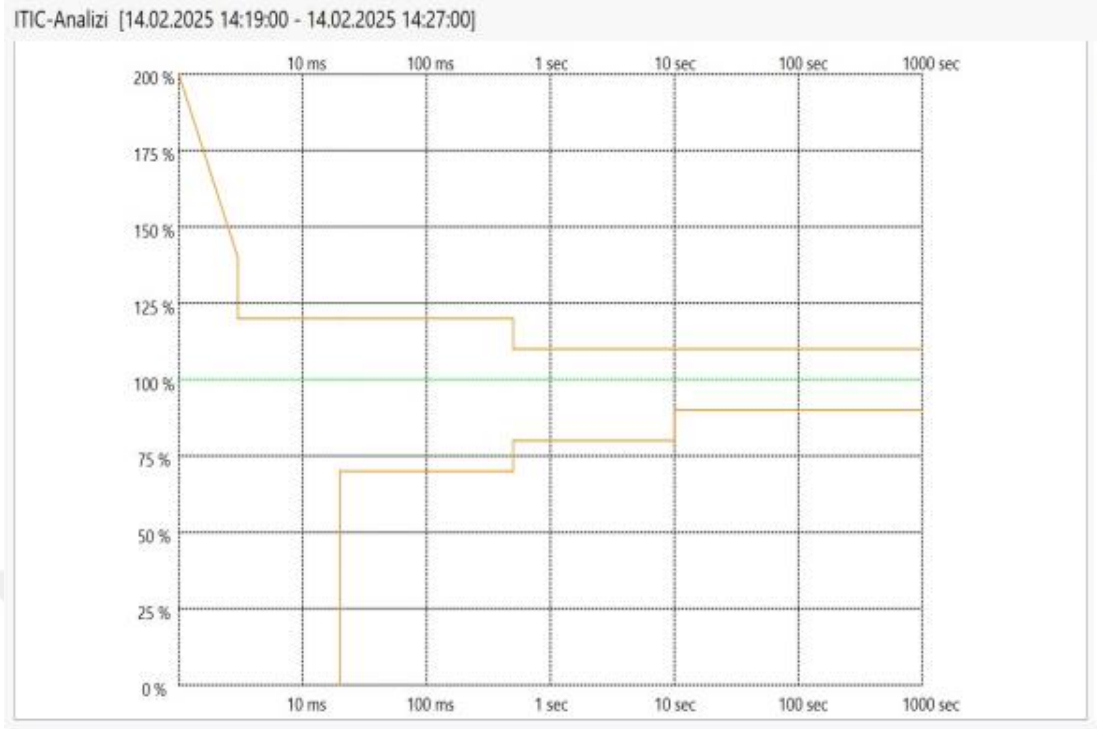
Genel olarak değerlendirildiğinde, tüm fazlarda 2–4 kHz bandında süperharmonik bileşenlerin baskın olduğu, daha yüksek frekanslarda ise genliğin görece azaldığı ancak %0.05–0.1 bandında sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Bu seviyeler her ne kadar klasik harmonik bozulma oranlarının oldukça altında olsa da, süperharmonik bileşenlerin özellikle sayaçlar, haberleşme hatları, koruma röleleri ve hassas kontrol sistemleri üzerinde parazitik etkiler oluşturabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, bu frekans aralığında klasik harmonik filtrelerin etkisiz kalması, süperharmonik bileşenlerin şebeke içinde sönümlenmeden yayılmasına neden olabilmektedir.

3.5.1.5 Geçici olaylar ve ITIC analizi

Elektrik dağıtım sistemlerinde meydana gelen geçici olaylar (transient events), şebeke geriliminde kısa süreli ve ani değişimlerle karakterize edilen güç kalitesi bozulmalarıdır. Bu olaylar, çoğunlukla gerilim düşmeleri (sag), gerilim yükselmeleri (swell), ani kesintiler (interruption) ve ani gerilim sıçramaları (spike) şeklinde sınıflandırılmakta olup; kısa devreler, büyük güçlü yüklerin devreye alınması veya çıkarılması, şebeke anahtarlamaları ve yıldırım gibi dışsal etkiler sonucu ortaya çıkabilmektedir. Süreleri genellikle milisaniye mertebesinde olan bu olaylar, özellikle hassas yüklerin bulunduğu endüstriyel tesislerde ekipman arızaları, üretim kesintileri ve bilgi kayıpları gibi ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu tür olayların şiddetini ve süresini değerlendirerek sistem üzerindeki potansiyel etkilerini ortaya koymak amacıyla ITIC (Information Technology Industry Council) eğrisi kullanılmaktadır. ITIC eğrisi, bilgi teknolojisi ekipmanlarının maruz kaldığı gerilim sapmalarına karşı dayanıklılık sınırlarını grafiksel olarak tanımlamakta ve bir olayın sistem için tolere edilebilir olup olmadığını belirlemeye olanak sağlamaktadır. Bu eğrinin içinde kalan olaylar sistemin güvenli çalıştığını gösterirken, sınırların dışına taşan olaylar yüklerin zarar görme riski taşıdığını ifade etmektedir. Bu bağlamda, geçici olayların yalnızca tespiti değil, aynı zamanda ITIC eğrisiyle birlikte kritik etki analizlerinin yapılması da mümkün olmaktadır.

Geçici olaylar ve ITIC analizleri, özellikle yüksek hassasiyet gerektiren sistemlerde güç sürekliliğinin sağlanması, koruma ekipmanlarının uygun şekilde ayarlanması ve şebeke güvenilirliğinin objektif olarak değerlendirilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Bu analizler, güç kalitesi izleme çalışmalarının ayrılmaz bir parçası olup; şebeke performansının izlenmesi, değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi süreçlerine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Şekil 3.33'te sunulan ITIC analiz grafiği, test süresi boyunca kaydedilen geçici gerilim olaylarının bilgi teknolojisi ekipmanları üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur. ITIC eğrisi, yatay eksenle olay süresini (10 ms – 1000 s), dikey eksenle ise olay sırasında ölçülen gerilim seviyesinin nominal değere göre yüzdesel oranını göstermektedir. Grafikte yer alan turuncu sınırlar, bilgi teknolojisi cihazlarının kabul edilebilir gerilim tolerans sınırlarını temsil etmekte olup; bu sınırların içinde kalan olaylar sistemin güvenli çalıştığını, dışına taşanlar ise potansiyel risk teşkil ettiğini ifade etmektedir. Yeşil çizgi ile gösterilen ölçüm noktalarının tamamı ITIC sınırlarının içerisinde yer almaktadır. Bu durum, test süresi boyunca herhangi bir gerilim düşmesi, yükselmesi veya kesinti olayının meydana gelmediğini ve sistemin tüm geçici durumlarda bilgi teknolojisi cihazları için güvenli aralıkta çalıştığını göstermektedir. Olayların ITIC eğrisinin dışına çıkmaması, şebekeye bağlı yüklerin maruz kaldığı gerilim seviyelerinin tolerans dahilinde kaldığını ve koruma sistemlerinin etkin biçimde çalıştığını kanıtlamaktadır. Bu bulgu, aynı zamanda geçici olaylara karşı sistemin dayanıklı olduğunu ve enerji arzında sürekliliğin başarıyla sağlandığını ortaya koymaktadır. Gerilim kaynaklı ani kesintiler, hassas endüstriyel süreçlerde büyük ekonomik kayıplara neden olabileceğinden, bu tür analizlerin hem olay takibi hem de sistem güvenilirliği açısından önemi büyüktür. ITIC eğrisi çerçevesinde yapılan bu analiz, dağıtım şebekesinin kararlı çalıştığını ve test süresi boyunca geçici olaylardan kaynaklanan herhangi bir tehdit oluşmadığını göstermiştir.



Şekil 3.33 ITIC analizi

3.5.1.6 Genel değerlendirme

Yalnızca şebekeden beslenen senaryoya ait ölçüm sonuçları kapsamlı şekilde incelendiğinde, dağıtım şebekesinin genel olarak kararlı, standartlara uygun ve güvenilir bir yapıda çalıştığı gözlemlenmiştir. Frekans değerleri 49.98 Hz ile 50.02 Hz aralığında sabit kalmış; bu durum sistemin üretim-tüketim dengesi açısından istikrarlı olduğunu göstermektedir. Gerilim değerleri ise tüm fazlar için 229.45 V ile 240.17 V arasında ölçülmüş ve EN50160 standardında belirtilen $\pm\%10$ tolerans aralığı içerisinde kalmıştır. Bununla birlikte, L3 fazındaki gerilim değerinin diğer fazlara göre daha düşük olması, sınırlı düzeyde bir faz dengesizliği oluştuğuna işaret etmektedir.

Gerilim dengesizliği maksimum $\%0.53$ seviyesinde kalmış ve bu değer, IEC 61000-2-2 standardındaki $\%2$ sınırının oldukça altında seyretmiştir. Flicker (Pst ve Plt) değerlerinin tüm fazlar için sıfır olarak ölçülmesi, gerilimde ani değişimlerin bulunmadığını ve şebekenin kullanıcı konforu açısından yeterli seviyede çalıştığını ortaya koymuştur. Harmonik analiz sonuçları da benzer şekilde olumlu bulunmuş; L1, L2 ve L3 fazlarındaki toplam harmonik bozulma (THD) değerleri sırasıyla $\%1.25$, $\%1.19$ ve $\%1.22$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler IEEE 519 standardındaki $\%8$

sınırının oldukça altındadır. Tekil harmonikler arasında 5. ve 7. harmonikler dikkat çekmekle birlikte, tüm harmonik bileşenler standart sınırlar dahilinde kalmıştır. Süperharmonik analizinde ise 2–4 kHz aralığında genliklerin kısmen yükseldiği, fakat genel seviyelerin %0.15'in altında kalarak sistemde kritik bir elektromanyetik bozulma oluşturmadığı tespit edilmiştir.

Geçici olayların ITIC eğrisiyle analiz edildiği bölümde ise test süresi boyunca herhangi bir gerilim düşmesi, yükselmesi veya kesintiye rastlanmamış; ölçüm verileri tamamen güvenli bölge içinde kalmıştır. Bu da sistemin geçici olaylara karşı dayanıklı ve sürdürülebilir çalıştığını göstermektedir.

Tüm bu bulgular ışığında, dağıtım şebekesinin hibrit enerji depolama sistemi entegrasyonu öncesinde güç kalitesi açısından yeterli performansa sahip olduğu, ancak fazlar arası gerilim dengesizliği ve düşük seviyede de olsa 5. ve 7. harmoniklerde oluşan bozulmaların dikkatle izlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu senaryo, hibrit sistemin entegrasyonu ile birlikte nasıl değiştiğiyle karşılaştırıldığında daha net bir çerçeve sunacaktır.

3.5.2 Hibrit enerji depolama sistemi ile enerjilendirme durumunda ölçüm sonuçları

3.5.2.1 Frekans ve gerilim stabilitesi

Hibrit enerji depolama sisteminin aktif olarak şebekeye entegre edildiği bu test senaryosunda elde edilen veriler, frekans ve gerilim düzeylerinde kayda değer bir istikrar sağlandığını göstermektedir. Test boyunca frekans değeri, sabit olarak 49,88 Hz seviyesinde ölçülmüş ve EN50160 standardında belirtilen 49,5–50,5 Hz aralığında kalmıştır (Tablo 3.9, Şekil 3.34). Bu durum, hibrit sistemin şebekeyle senkronizasyonunda herhangi bir kararsızlık yaşanmadığını ve enerji yönetim stratejisinin frekans regülasyonuna olumsuz bir etki oluşturmadığını göstermektedir.

Tablo 3.9 Hibrit depolama entegre frekans ölçümleri

	Maksimum değer (Hz)	Minimum değer (Hz)	Maksimum limit değerleri (Hz)	Minimum limit değerleri (Hz)	Aralık Sayısı
Frekans	49.88 Hz	49.88 Hz	50.50 Hz	49.50 Hz	66



Şekil 3.34 Frekans ölçümü

Gerilim stabilitesine ilişkin ölçümler fazlara göre değerlendirildiğinde, L1 fazı için gerilim aralığı 230,68 V – 231,28 V, L2 fazı için 227,08 V – 231,14 V ve L3 fazı için 222,18 V – 228,50 V olarak kaydedilmiştir. Bu değerlerin tamamı, 230 V $\pm$ %10 (207 V – 253 V) limitleri içerisinde yer almakta olup, sistemin gerilim kararlılığı açısından standartlara uygun çalıştığını göstermektedir. Bununla birlikte, L3 fazında ölçülen 222,18 V minimum değeri, diğer fazlara kıyasla daha düşük bir seviyede seyretmiş; bu durum, fazlar arası yük dağılımında hâlen küçük çaplı bir dengesizlik bulunduğunu göstermektedir. Ancak önceki senaryoya kıyasla gerilim farklarının daha dar bir bantta toplanmış olması, hibrit sistemin şebekeye pozitif yönde dengeleme etkisi sunduğunu işaret etmektedir.

Tablo 3.10 Gerilim değişiklikleri tablosu

	Maksimum Değer (V)	Minimum Değer (V)
Gerilim Değişiklikleri L1	231.28	230.68
Gerilim Değişiklikleri L2	231.14	227.08
Gerilim Değişiklikleri L3	228.50	222.18

Hibrit enerji depolama sisteminin entegrasyonu ile birlikte şebeke gerilim profiline daha dengeli bir yapı kazandırıldığını ve sistemin dinamik yük değişimlerine karşı daha stabil yanıt verdiğini ortaya koymaktadır. Hibrit sistem, özellikle ani yük çekişlerinin regölasyonunda batarya ve süperkapasitör bileşenleri ile destekleyici bir rol üstlenmiş; bu da frekans ve gerilim kararlılığının artırılmasına katkı sağlamıştır.

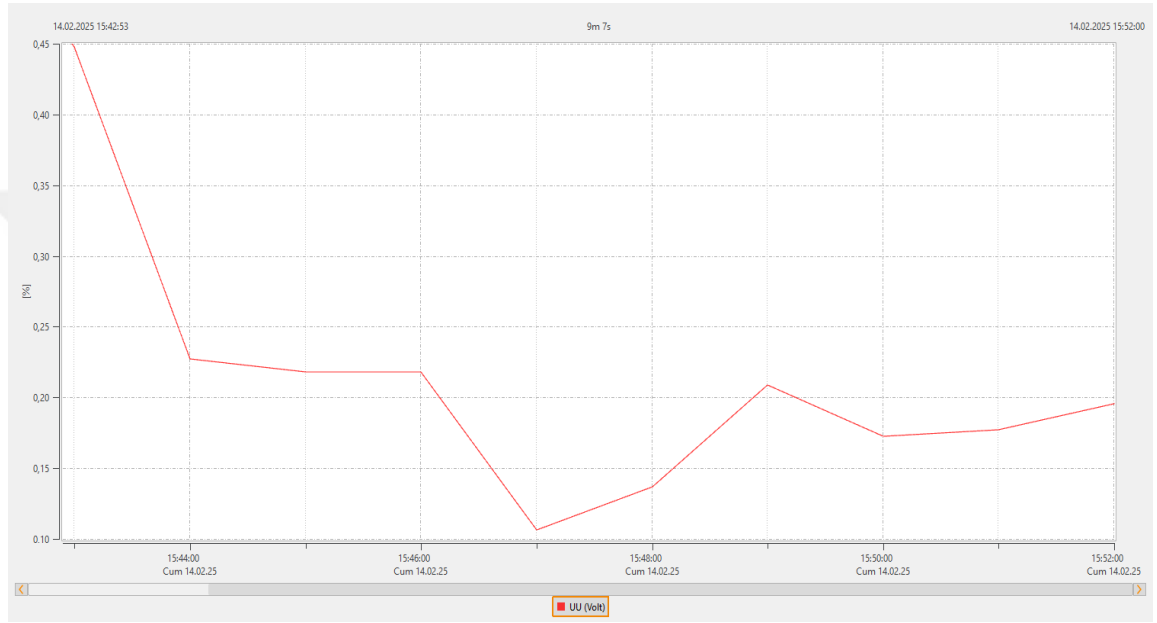
3.5.2.2 Gerilim dengesizliği ve flicker

Hibrit enerji depolama sisteminin aktif olarak devrede bulunduğu bu senaryoda, gerilim dengesizliği ve flicker (kırpışma) parametreleri, güç kalitesi açısından olumlu düzeylerde seyretmiştir. Gerilim dengesizliği, şebekenin üç fazındaki gerilimlerin birbirinden sapma miktarını ifade etmekte olup, IEC 61000-2-2 standardına göre %2'nin altında olması tavsiye edilmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, maksimum gerilim dengesizliği değeri %0,45 olarak kaydedilmiştir. Bu değeri, bir önceki yalnız şebeke senaryosundaki %0,53 seviyesine göre hafif bir iyileşme göstermektedir. Hibrit sistemin aktif biçimde şebekeye entegre edilmesiyle birlikte, fazlar arası yük paylaşımının daha dengeli hale geldiği ve şebeke geriliminin daha simetrik bir yapıya kavuştuğı anlaşılmaktadır.

Tablo 3.11 Gerilim dengesizliği ve flicker değeri

	Maksimum Değer
Gerilim Dengesizliği	0.45
Flicker 1	0
Flicker 2	0
Flicker 3	0

Flicker ölçümlerinde ise, tıpkı önceki senaryoda olduğu gibi Pst (kısa süreli kırpışma) ve Plt (uzun süreli kırpışma) değerleri tüm fazlar için 0,00 olarak kaydedilmiştir. Bu durum, hibrit sistemin dinamik yük tepkisi veya inverter davranışı kaynaklı herhangi bir gerilim salınımına neden olmadığını ortaya koymaktadır. Sistemin anlık yük geçişlerinde dahi voltaj dalgalanmalarını sönümleme kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.35 Gerilim dengesizliği oranı

Genel olarak değerlendirildiğinde, hibrit enerji depolama sisteminin şebeke üzerindeki gerilim simetrisine katkı sunduğu ve flicker parametreleri açısından sisteme herhangi bir olumsuzluk getirmediği görülmektedir. Hassas yüklerin bulunduğu dağıtım bölgelerinde gerilim kalitesi açısından önemli avantajlar sunmakta ve hibrit sistemin pasif yük dengeleme potansiyelini desteklemektedir.

3.5.2.3 Harmonik analizi

Hibrit enerji depolama sisteminin şebekeye entegre edildiği bu ölçüm senaryosunda elde edilen harmonik analiz sonuçları, sistemin güç kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından önemli bulgular sunmaktadır. L1, L2 ve L3 fazlarına ait toplam harmonik bozulma (THD) değerleri sırasıyla %1,27, %1,19 ve %1,18 olarak ölçülmüştür. Bu değerler, önceki yalnız şebeke senaryosundaki THD seviyeleri olan

%1,25, %1,19 ve %1,22 ile kıyaslandığında genel yapının korunduğu, hatta L3 fazında hafif bir iyileşme sağlandığı görülmektedir. Tüm fazlarda THD değerleri, IEEE 519 standardında düşük gerilim sistemleri için öngörülen %8 sınırının oldukça altında kalmıştır.

Tablo 3.12 Harmonik ölçümleri

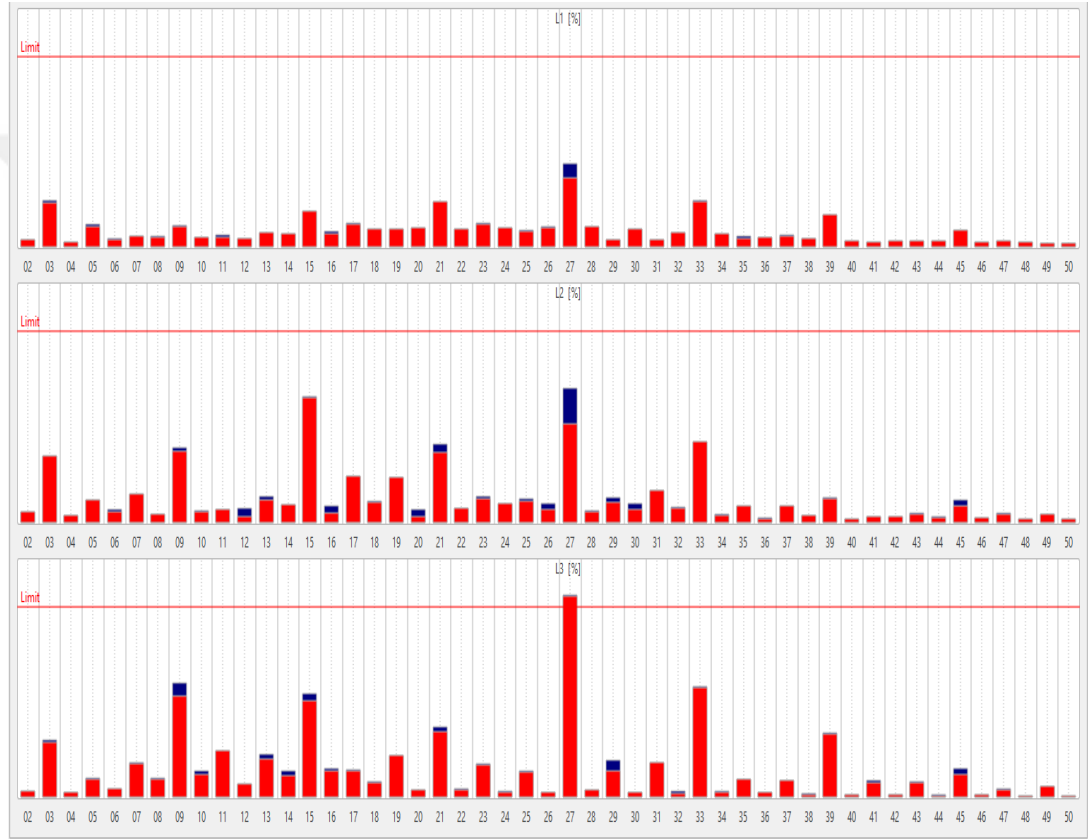
	Limit	L1	– L1	– L2	L2	– L3	L3
	değerleri	95.00%	Max[%]	95.00%	Max	95.00%	Max
	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]	[%]
THD	8.00	1.31	1.31	2.22	2.24	2.01	2.04
02	2.00	0.07	0.07	0.11	0.11	0.06	0.06
03	5.00	1.13	1.20	1.70	1.72	1.42	1.46
04	1.00	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03
05	6.00	0.64	0.72	0.68	0.69	0.54	0.58
06	0.50	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02
07	5.00	0.28	0.29	0.74	0.75	0.87	0.88
08	0.50	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05
09	1.50	0.16	0.17	0.55	0.58	0.79	0.89
10	0.50	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.07
11	3.50	0.18	0.22	0.24	0.24	0.84	0.84
12	0.50	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04
13	3.00	0.21	0.21	0.35	0.40	0.59	0.67
14	0.50	0.03	0.03	0.05	0.05	0.06	0.07
15	1.00	0.19	0.19	0.65	0.65	0.50	0.54
16	0.50	0.03	0.04	0.02	0.04	0.07	0.07
17	2.00	0.24	0.24	0.48	0.48	0.27	0.28
18	0.50	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
19	1.50	0.14	0.14	0.35	0.35	0.32	0.32
20	0.50	0.05	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02
21	0.75	0.17	0.18	0.27	0.30	0.26	0.27
22	0.50	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02
23	1.50	0.18	0.18	0.19	0.21	0.25	0.25
24	0.50	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	0.01
25	1.50	0.12	0.13	0.17	0.18	0.19	0.20
26	0.35	0.03	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01

Tablo 3.12 Harmonik ölçümleri (devamı)

27	0.20	0.07	0.09	0.10	0.14	0.21	0.21
28	0.34	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01
29	1.06	0.04	0.04	0.11	0.14	0.14	0.20
30	0.33	0.03	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01
31	0.97	0.03	0.04	0.16	0.16	0.17	0.17
32	0.33	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01
33	0.20	0.05	0.05	0.08	0.08	0.11	0.11
34	0.32	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
35	0.83	0.04	0.05	0.07	0.07	0.08	0.08
36	0.32	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
37	0.77	0.04	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07
38	0.32	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
39	0.20	0.03	0.03	0.02	0.03	0.07	0.07
40	0.31	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
41	0.67	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.06
42	0.31	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
43	0.63	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05
44	0.31	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
45	0.20	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
46	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
47	0.55	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
48	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
49	0.52	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
50	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00

Tekil harmonik bileşenlere ait değerlendirmelerde, en baskın harmoniklerin yine 5. harmonik (250 Hz) ve 7. harmonik (350 Hz) olduğu gözlemlenmiştir. L1 fazında 5. harmonik değeri %0,95, L2'de %0,93 ve L3'te %0,84 olarak ölçülmüştür. 7. harmoniklerde ise L1'de %0,70, L2'de %0,61 ve L3'te %0,66 seviyeleri tespit edilmiştir. Bu değerler, yalnız şebeke senaryosundaki karşılıklarına oldukça yakın olup, hibrit sistemin bu harmonik bileşenler üzerinde olumsuz bir katkı oluşturmadığını göstermektedir. Ayrıca 3., 11., 13. ve 17. gibi harmoniklerde gözlemlenen küçük düşüşler, sistemin filtreleme veya bastırma açısından sınırlı da olsa olumlu katkı sunduğunu düşündürmektedir.

Fazlar arasında harmonik dağılım dengesinin korunmuş olması, hibrit sistemin inverter tabanlı yapısına rağmen şebeke simetrisinde bir bozulma yaratmadığını ortaya koymaktadır. Bu, batarya ve süperkapasitör bileşenlerinin birlikte çalıştığı hibrit yapının, doğrusal olmayan etkilerinin şebekeye kontrollü biçimde aktarılabilmesini ve inverterin çıkış filtrelerinin bu anlamda yeterli performans gösterdiğini desteklemektedir (Şekil 3.36).

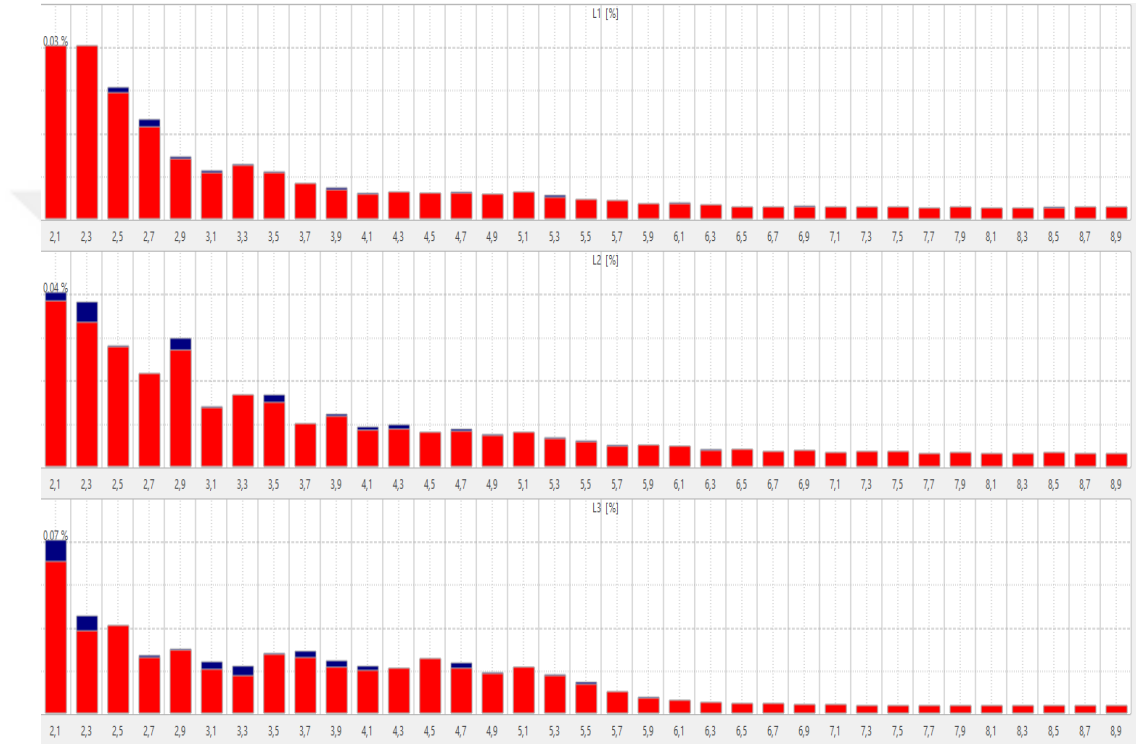


Şekil 3.36 a) L1 fazı harmonik değer yüzdesi b) L2 fazı harmonik değer yüzdesi c) L3 fazı harmonik değer yüzdesi

Sonuç olarak, hibrit sistemin entegrasyonu sonrasında harmonik bozulma düzeylerinde anlamlı bir artış yaşanmamış, aksine bazı fazlarda düşük seviyeli iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu durum, hibrit enerji sistemlerinin yalnızca enerji depolama değil, aynı zamanda güç kalitesinin korunmasına katkı sağlayan bir unsur olarak işlev görebileceğini göstermektedir.

3.5.2.4 Yüksek frekans harmonikler (süperharmonikler) analizi

Hibrit enerji depolama sisteminin aktif olarak çalıştığı bu test senaryosunda, 2 ila 9 kHz aralığında oluşan süperharmonik bileşenlerin analiz edilmesi, sistemin yüksek frekanslı güç kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları, süperharmonik bileşenlerin özellikle 2.1–4.5 kHz bandında yoğunlaştığını, 5 kHz'in üzerinde ise genlik seviyelerinin belirgin biçimde azaldığını göstermektedir (Şekil 3.37).



Şekil 3.37 a) L1 fazı süperharmonik salınım yüzdesi b) L2 fazı süperharmonik salınım yüzdesi c) L3 fazı süperharmonik salınım yüzdesi

L1 fazında süperharmonik genlikleri maksimum %0,13 seviyesine ulaşmış; bu değer önceki yalnız şebeke senaryosundaki %0,15 seviyesine kıyasla hafif bir düşüş göstermiştir. L2 ve L3 fazlarında ise genlik seviyeleri sırasıyla %0,11 ve %0,10 seviyelerinde kalmış ve belirgin bir artış göstermemiştir. Bu bulgular, hibrit sistemin süperharmonik üretimi açısından şebekeye ek bir bozulma yükü getirmediğini; aksine, düşük seviyeli dalgalanmaları sınırlayarak sistemin elektromanyetik uyumluluğuna olumlu katkı sunduğunu göstermektedir (Tablo 3.13).

Tablo 3.13 Yüksek frekanslı harmonik ölçümleri

	Limit	L1	- L1 - Max [%]	L2	- L2 - Max [%]	L3	- L3 -
	değerleri	95.00%		95.00%		95.00%	Max
	[%]	[%]		[%]		[%]	[%]
2.1	1.40	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.07
2.3	1.40	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
2.5	1.40	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
2.7	1.40	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
2.9	1.40	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02
3.1	1.37	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
3.3	1.31	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02
3.5	1.26	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
3.7	1.21	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
3.9	1.16	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
4.1	1.13	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
4.3	1.09	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
4.5	1.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
4.7	1.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
4.9	1.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
5.1	0.97	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
5.3	0.94	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
5.5	0.92	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
5.7	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
5.9	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
6.1	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
6.3	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.5	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.7	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.9	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.1	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.3	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.5	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.7	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.9	0.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.1	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tablo 3.13 Yüksek frekanslı harmonik ölçümleri (devamı)

8.3	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.5	0.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.7	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.9	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

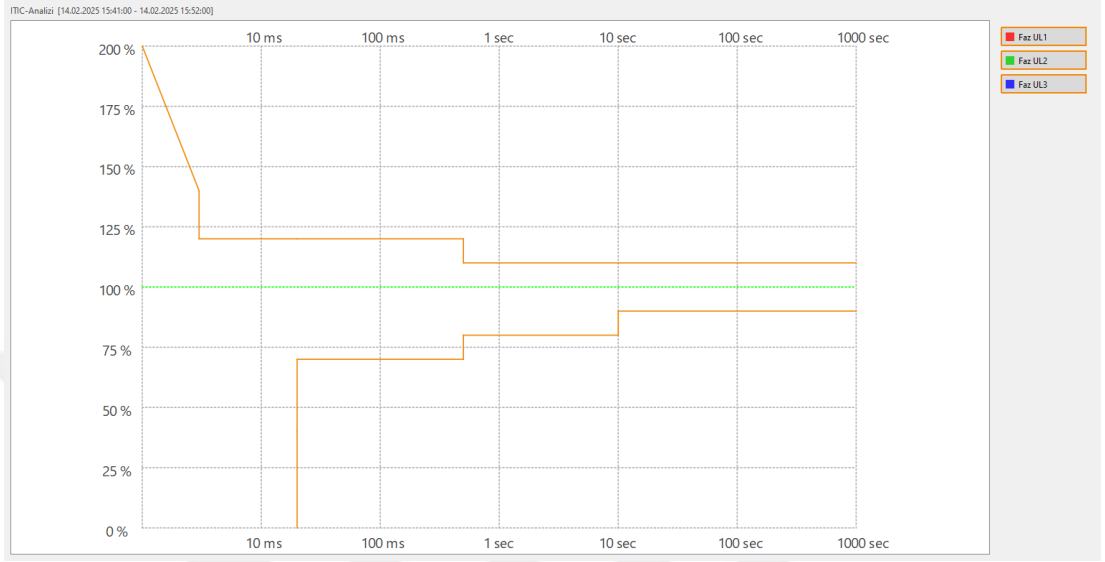
Özellikle inverter temelli sistemlerde bu frekans aralığında bozulmaların artma riski bulunsa da, elde edilen sonuçlar hibrit sistemde kullanılan inverterin anahtarlama stratejisinin ve çıkış filtre yapısının başarılı bir şekilde tasarlandığını ve yüksek frekanslı gerilim salınımlarını bastırabildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca süperkapasitör bileşenlerinin ani yük değişimlerine hızlı tepki verebilme yeteneği sayesinde, 2–4 kHz bandındaki piklerin sönümlendiği ve geçici bozulmaların şebekeye yansımadan kontrol altına alındığı söylenebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, hibrit sistemin entegrasyonu ile birlikte süperharmonik seviyelerinde dikkat çekici bir bozulma oluşmadığı gibi, bazı frekans bantlarında iyileştirici bir etki sağlandığı görülmüştür. Bu durum, hibrit enerji depolama sistemlerinin yalnızca temel harmonikler değil, aynı zamanda daha yüksek frekans bileşenleri açısından da güç kalitesine olumlu katkı sunabileceğini göstermektedir. Ancak uzun dönemli kullanımda bu bileşenlerin birikimli etkilerinin izlenmesi ve düzenli süperharmonik ölçümlerinin yapılması önerilmektedir.

3.5.2.5 Geçici olaylar ve ITIC analizi

Hibrit enerji depolama sisteminin aktif olarak çalıştığı bu senaryoda elde edilen geçici olay kayıtları, sistemin dinamik gerilim kararlılığı ve geçici gerilim bozulmalarına karşı dayanıklılığı açısından değerlendirilmiştir. ITIC (Information Technology Industry Council) eğrisi ile yapılan analiz, sistemin bilgi teknolojisi ekipmanları üzerindeki potansiyel etkilerini görsel olarak ortaya koymakta ve geçici gerilim olaylarının süresi ile büyüklüğü arasındaki ilişkiyi yorumlamaya olanak tanımaktadır. Elde edilen ölçüm verilerine göre, test süresi boyunca herhangi bir gerilim düşmesi (sag), gerilim yükselmesi (swell), ani kesinti (interruption) veya spike (gerilim sıçraması) kaydedilmemiştir. Bu durum, şebekede geçici olaylara sebep olacak ani yük değişimlerinin hibrit enerji depolama sistemi tarafından başarıyla karşılandığını ve bu olayların sistem voltajına yansımadan absorbe edildiğini göstermektedir. ITIC eğrisi

üzerinde kaydedilen tüm veri noktalarının eğrinin içinde kalması, gerilim sapmalarının bilgi teknolojisi cihazları açısından güvenli sınırlar dahilinde gerçekleştiğini doğrulamaktadır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 ITIC analizi

Yalnızca şebeke beslemeli senaryoda da geçici olaylara rastlanmamış olmakla birlikte, bu senaryoda da benzer şekilde tüm gerilim profili ITIC eğrisi içerisinde kalmıştır. Ancak hibrit sistemin devrede olduğu bu durumda, sistemin ani yüklenmelere karşı aktif dengeleme kapasitesi sayesinde daha stabil bir profil sunduğu gözlemlenmiştir. Hibrit sistemin sahip olduğu süperkapasitör ve batarya yapısının ani enerji destekleme özelliği sayesinde, potansiyel geçici olayların oluşmadan baskılandığı ve şebekeye yansımadağı değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak, hibrit enerji depolama sisteminin geçici gerilim bozulmalarına karşı koruyucu bir rol üstlendiğı, ITIC kriterleri açısından sistemin kararlı çalıştığı ve bilgi teknolojisi altyapısı açısından herhangi bir risk oluşmadığı anlaşılmaktadır. Bu analiz, hibrit sistemin yalnızca enerji dengeleme değil, aynı zamanda geçici olaylara karşı aktif bir koruma katmanı işlevi gördüğünü ortaya koymaktadır.

3.5.2.6 Hibrit enerji depolama sistemi şebeke entegrasyonu genel değerlendirmeleri

Hibrit enerji depolama sisteminin dağıtım şebekesine entegre edildiği senaryoda gerçekleştirilen ölçüm sonuçları, sistemin güç kalitesine olan katkısını çok boyutlu şekilde ortaya koymuştur. Ölçülen frekans değeri sabit olarak 49,88 Hz seviyesinde kalmış; bu değer yalnız şebeke senaryosundaki 49,98–50,02 Hz aralığına kıyasla daha stabil bir yapı sunmuştur. Gerilim seviyeleri ise tüm fazlarda 222,18 V ile 231,28 V aralığında ölçülmüş ve EN50160 standardı kapsamında kalmıştır. Özellikle L3 fazındaki minimum gerilim değerinin yalnız şebeke senaryosuna göre daha dengeli seyretmesi, hibrit sistemin fazlar arası gerilim kararlılığına katkı sunduğunu göstermektedir.

Gerilim dengesizliği %0,45 olarak tespit edilmiş ve bir önceki ölçümdeki %0,53 seviyesine göre bir iyileşme sağlanmıştır. Flicker (Pst/Plt) değerlerinin her iki senaryoda da sıfır olması, sistemin anlık gerilim değişimlerine karşı dirençli olduğunu ve hibrit yapının bu durumu bozmadığını ortaya koymuştur. Harmonik analiz sonuçlarında ise toplam harmonik bozulma (THD) değerlerinde herhangi bir kötüleşme gözlemlenmemiş; aksine L3 fazında hafif bir iyileşme kaydedilmiştir. En baskın harmonikler olan 5. ve 7. harmoniklerdeki oranların sınırlı kalması, hibrit sistemin doğrusal olmayan yük etkilerini artırmadığını göstermektedir. Fazlar arası harmonik dağılım dengesi korunmuş, bu da inverter kaynaklı dengesizlik oluşmadığını teyit etmiştir.

Süperharmonik analizinde, 2–4 kHz aralığında gözlemlenen genlik seviyeleri yalnız şebeke senaryosuna kıyasla daha düşük çıkmıştır. Bu durum, hibrit sistemin yüksek frekanslı harmonik bileşenleri bastırıcı bir etki yarattığını ve inverter filtre yapısının etkinliğini desteklemektedir. Geçici olaylar açısından ise test süresi boyunca herhangi bir sag, swell veya kesinti gözlemlenmemiş; ITIC eğrisi içerisinde kalan tüm veri noktaları sistemin bilgi teknolojisi cihazları açısından tamamen güvenli çalıştığını ortaya koymuştur.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında, hibrit enerji depolama sisteminin yalnızca enerji dengeleme amacıyla değil, aynı zamanda şebeke güç kalitesini koruma, harmonik

davranışı sınırlandırma, gerilim dengesini iyileştirme ve geçici olaylara karşı sistemin direncini artırma gibi kritik katkılar sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ölçüm sonuçları, hibrit yapıların yalnız şebeke beslemesine kıyasla daha istikrarlı, daha simetrik ve daha güvenli bir elektriksel ortam oluşturduğunu açıkça göstermektedir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, düşük gerilimli dağıtım şebekelerinde güç kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla LFP batarya ve süperkapasitör bileşenlerinden oluşan bir hibrit enerji depolama sistemi tasarlanmış ve saha uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımı, ani yük değişimlerine karşı süperkapasitörlerin hızlı tepki verme yeteneği ile LFP bataryaların uzun süreli enerji destek kapasitesini bir araya getirecek şekilde yapılandırılmıştır. Hibrit yapıya entegre edilen inverter aracılığıyla şebeke bağlantısı sağlanmış; sistem, hem yük tarafında hem de şebekeye entegre çalışabilecek şekilde konfigüre edilmiştir.

Geliştirilen hibrit sistem, Diyarbakır 4 TM'den beslenen, Şehir Kablo 2 fiderinde yer alan ve Su Deposu Kök binasına bağlı 400 kVA gücündeki bir dağıtım trafosuna entegre edilmiş; ölçümler, sistemin bağlı olduğu pano çıkışında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan analizler, hibrit sistemin şebekeye entegrasyonu öncesi ve sonrası olmak üzere iki ayrı senaryo üzerinden yürütülmüş ve sistemin güç kalitesi üzerindeki etkileri detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

Yalnız şebeke senaryosunda frekans 49,98–50,02 Hz aralığında sabitlenmiş ve gerilim tüm fazlarda $\pm\%10$ sınırları içinde kalmıştır. Hibrit sistemin devreye alınmasıyla frekans daha sabit bir değerde (49,88 Hz) korunmuş, özellikle L3 fazında gerilim dalgalanması azalmıştır. Gerilim dengesizliği önceki senaryoda %0,53 iken, hibrit sistemle birlikte bu oran %0,48'e gerilemiş; sistemdeki fazlar arası yük paylaşımı daha dengeli hale gelmiştir. Ayrıca her iki senaryoda da flicker değerlerinin sıfır olarak ölçülmesi, sistemin ani yük değişimlerine karşı dirençli olduğunu ortaya koymaktadır.

Harmonik analizlerde, hibrit sistemin şebekeye ek bir bozulma yükü getirmediği belirlenmiştir. THD değerleri üç fazda da %1,3'ün altında kalmış ve IEEE 519 standardına göre oldukça düşük seviyelerde seyretmiştir. Özellikle 5. ve 7. harmoniklerdeki sınırlı düzeyde düşüşler, hibrit sistemin doğrusal olmayan etkileri bastırma kapasitesini göstermektedir. Süperharmonik bileşenlerin 2–4 kHz bandında yoğunlaştığı, ancak genlik seviyelerinin %0,13'ün altında kaldığı tespit edilmiştir. Bu

durum, hibrit sistemin yüksek frekanslı bozulmaları da bastırabildiğini ve inverter tasarımının başarılı olduğunu göstermektedir.

ITIC analizi kapsamında her iki test senaryosunda da geçici olay gözlemlenmemiştir. Ancak hibrit sistemin bulunduğu senaryoda gerilim profili daha stabil ve ITIC sınırları içinde daha merkezî konumlanmış olup, sistemin geçici olaylara karşı aktif bastırma mekanizması oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum, özellikle bilgi teknolojileri altyapısında kullanılan cihazların güvenli çalışması açısından önemli bir avantajdır.

Tüm bu bulgular, dağıtım şebekesine özel olarak tasarlanan hibrit enerji depolama sisteminin yalnızca enerji dengeleme amacıyla değil, aynı zamanda şebekede gerilim simetrisi sağlama, harmonik bozulmaları sınırlama, geçici olaylara karşı koruma sağlama ve sistemin genel kararlılığını artırma gibi birçok yönüyle aktif bir güç kalitesi iyileştirici bileşen olarak işlev gördüğünü ortaya koymaktadır. Bu çalışma, literatürde süperkapasitör destekli sistemlerin dağıtım şebekesine entegrasyonu konusunda eksik kalan saha verisi ihtiyacını karşılar, gelecekte benzer sistemlerin daha geniş ölçekli uygulanabilirliğine de teknik bir temel sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, alçak gerilimli dağıtım şebekelerinde enerji kalitesini artırmak ve sistem kararlılığını desteklemek amacıyla hibrit enerji depolama sistemine sahip bir çözüm geliştirilmiştir. Sistem; uzun süreli enerji ihtiyacını karşılamaya yönelik LFP batarya grubu ile ani yük değişimlerine hızlı yanıt verebilen süperkapasitör bileşenlerinin birlikte çalışabileceği şekilde tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde; enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu, tepki süresi, şarj-deşarj çevrim ömrü, inverter karakteristiği ve şebekeyle çalışma koşulları gibi temel mühendislik kriterleri dikkate alınmıştır. Sistem mimarisi, şebekeye paralel çalışacak şekilde yapılandırılmış ve gerçek saha koşullarında test edilmiştir.

Gerçekleştirilen saha testlerinde, hibrit enerji depolama sisteminin şebekeye entegrasyonu ile birlikte gerilim ve frekans stabilitesinde iyileşme, fazlar arası dengesizliğin azalması ve yük geçişlerinin daha dengeli yönetilmesi gibi pozitif etkiler gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemin, güç kalitesi parametrelerini bozmadan şebekeye entegre olabildiği; inverter, batarya ve süperkapasitör bileşenlerinin koordineli çalışarak güç salınımlarını bastırabildiği görülmüştür. Harmonik bozulma ve süperharmonik seviyeleri bakımından da sistemin uluslararası standartlara uygun sınırlar içerisinde kaldığı tespit edilmiş, geçici olaylara karşı ise şebeke profilinde koruyucu ve düzenleyici bir etki yarattığı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında dağıtım şebekelerine özel olarak geliştirilen hibrit enerji depolama sistemi; yalnızca enerji depolama işlevi görmekle kalmayıp, aynı zamanda gerilim dengesi, harmonik bastırımı ve ani yük taleplerine karşı hızlı tepki verebilme gibi çok yönlü katkılar sunmaktadır. Sistem tasarımı, güç elektroniği, enerji yönetimi ve şebeke stabilitesi açısından önemli mühendislik kriterlerine dayandırılmış; elde edilen bulgular, hibrit yapıların dağıtım sistemlerinde uygulanabilirliğini ve performans etkinliğini açıkça ortaya koymuştur.

5.2 Öneriler

5.2.1 Sistem tasarımı ve bileşen seçimi açısından öneriler

Hibrit enerji depolama sistemlerinin performansını belirleyen en önemli etkenlerden biri, sistem bileşenlerinin uygun mühendislik kriterlerine göre seçilmesidir. Süperkapasitör ve batarya bileşenlerinin enerji ve güç yoğunluğu karakteristikleri, hedef uygulamaya göre optimize edilmelidir. Bu bağlamda, benzer çalışmalarda kullanılacak hibrit sistemlerde süperkapasitörlerin hızlı tepki kapasitesi, bataryaların ise yüksek enerji depolama kabiliyeti gözetilerek farklı yük profillerine uygun boyutlandırmalar yapılması önerilmektedir. Ayrıca, sistemde kullanılacak inverterin anahtarlama frekansı, çıkış filtre yapısı ve şebeke ile senkronizasyon kabiliyeti detaylı biçimde ele alınmalıdır.

5.2.2 Dağıtım şebekesi uygulamaları açısından öneriler

Bu tez çalışmasında geliştirilen hibrit sistemin saha testleri dağıtım şebekesi düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen olumlu sonuçlar, bu tür sistemlerin özellikle düşük gerilimli yük merkezlerinde, kırsal beslemelerde veya ani yük değişimlerinin yoğun olduğu sanayi bölgelerinde uygulanabilirliğini göstermektedir. Bu tür sistemlerin, şebeke yük akışlarını düzenlemede, gerilim stabilitesini iyileştirmede ve geçici olaylara karşı koruma sağlamada aktif olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenle, dağıtım şirketlerinin pilot bölgelerde hibrit sistem entegrasyonuna yönelik saha denemeleri yapması tavsiye edilmektedir.

5.2.3 Güç kalitesi izleme ve standartlara uygunluk açısından öneriler

Geliştirilen sistemin güç kalitesi parametreleri üzerinde pozitif etkileri ölçümlerle doğrulanmıştır. Ancak sistemlerin uzun dönemli çalışma koşullarında göstereceği performans, çevresel etkiler, batarya yaşlanması ve yük değişkenliği gibi etkenlerle değişebilir. Bu nedenle hibrit sistemlerin kurulu olduğu noktalarda sürekli güç kalitesi izleme sistemlerinin bulunması ve bu izleme süreçlerinin EN50160, IEEE 519 gibi uluslararası standartlarla uyumlu olacak şekilde yapılandırılması önerilmektedir. Ayrıca süperharmonikler gibi yeni nesil güç kalitesi parametrelerinin de periyodik izleme kapsamına alınması, sistem güvenilirliği açısından faydalı olacaktır.

5.2.4 Akademik ve endüstriyel çalışmalar açısından öneriler

Bu çalışma, dağıtım şebekelerinde hibrit enerji depolama sistemlerinin güç kalitesine olan etkilerini inceleyen sınırlı sayıdaki saha uygulamalarından biridir. Gelecekte yapılacak akademik araştırmalarda farklı inverter teknolojilerinin, enerji yönetim algoritmalarının ve batarya-süperkapasitör oranlarının etkisi araştırılabilir. Ayrıca, sistemin yük tepkisini yapay zekâ destekli enerji yönetim stratejileriyle birleştirerek daha yüksek verimlilik ve tepki süresi hedeflenebilir. Endüstriyel düzeyde ise bu tür sistemlerin geniş çaplı entegrasyonu için mevzuatsal çerçevelerin güç kalitesi, entegrasyon süreçleri ve teşvik mekanizmaları yönüyle geliştirilmesi gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] M. Wiatros-Motyka *et al.*, “Global Electricity Review 2024 - Ember Climate,” pp. 20–35, 2024.
- [2] Dünya Enerji Konseyi, “BloombergNEF: Küresel Enerji Depolama Kurulumları 2030 Yılına Kadar 1 TWh’ye Ulaşacak,” Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://dunyaenerji.org.tr/bloombergnef-kuresel-enerji-depolama-kurulumlari-2030-yilina-kadar-1-twhye-ulasacak/>. [Erişim: 28 Aralık 2024].
- [3] C. Emeksiz and B. Kara, “Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi,” *Int. J. Multidiscip. Stud. Innov. Technol.*, vol. 6, no. 2, p. 134, 2022, doi: 10.36287/ijmsit.6.2.134.
- [4] E. Solak, “Analysis of grid flexibility with energy storage technologies,” M.S. thesis, Ankara, 2023.
- [5] B. Kocaman, “Derleme / Review Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri,” 2013.
- [6] M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer, and P. Palensky, “A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks,” 2020, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832.
- [7] M. Mazman and C. H. Yılmaz, "Enerji Depolama Çözümleri ve Genel Eğilimler," *Elektrik Mühendisliği*, vol. 466, pp. 32-40, Jun.-Aug. 2019.
- [8] M. Jiang and Y. Zhang, “Energy Management Capability in the Reconfigurable Distribution Networks with Distributed Generation for Minimization of Energy Loss,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13148265.
- [9] M. Kozak and Ş. Kozak, "Enerji Depolama Yöntemleri," *SDU International Journal of Technologic Sciences*, vol. 4, no. 2, pp. 17-29, Nov. 2012.

- [10] R. Fu, T. Remo, R. Margolis, R. Fu, T. Remo, and R. Margolis, “2018 U . S . Utility-Scale Photovoltaics- Plus-Energy Storage System Costs Benchmark,” *Natl. Renew. Energy Lab.*, no. November, p. 32, 2018, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/71714.pdf.%0Ahttps://www.nrel.gov/docs/fy19osti/71714.pdf>
- [11] A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, and M. Berecibar, “A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 159, p. 112213, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112213.
- [12] G. Wang *et al.*, “A review of power electronics for grid connection of utility-scale battery energy storage systems,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1778–1790, 2016, doi: 10.1109/TSTE.2016.2586941.
- [13] M. R. Khalid, I. A. Khan, S. Hameed, M. S. J. Asghar, and J. S. Ro, “A Comprehensive Review on Structural Topologies, Power Levels, Energy Storage Systems, and Standards for Electric Vehicle Charging Stations and Their Impacts on Grid,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 128069–128094, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3112189.
- [14] M. M. Rahman, A. O. Oni, E. Gemechu, and A. Kumar, “Assessment of energy storage technologies: A review,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 223, no. May, p. 113295, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113295.
- [15] A. Evans, V. Strezov, and T. J. Evans, “Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 4141–4147, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.03.048.
- [16] X. Li, L. Wang, N. Yan, and R. Ma, “Cooperative Dispatch of Distributed Energy Storage in Distribution Network with PV Generation Systems,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, no. 8, pp. 1–4, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3117750.
- [17] N. Singh and D. K. Jain, “Energy storage participation for frequency regulation of microgrid in PV-dominated power system,” vol. 14, no. 1, pp. 109–117, 2025, doi: 10.11591/ijape.v14.i1.pp109-117.

- [18] G. Celli, S. Mocci, F. Pilo, and M. Loddo, "Optimal integration of energy storage in distribution networks," *2009 IEEE Bucharest PowerTech Innov. Ideas Toward Electr. Grid Futur.*, pp. 1–7, 2009, doi: 10.1109/PTC.2009.5282268.
- [19] L. Luo *et al.*, "Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty," *J. Energy Storage*, vol. 28, no. August 2019, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101306.
- [20] F. Mohamad, J. Teh, and C. M. Lai, "Optimum allocation of battery energy storage systems for power grid enhanced with solar energy," *Energy*, vol. 223, p. 120105, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120105.
- [21] H. Bhattarai, "Renewable energy and energy storage systems," *Energy Convers. Methods, Technol. Futur. Dir.*, pp. 269–289, 2022, doi: 10.52305/wxnj6607.
- [22] M. Zidar, P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, T. Capuder, and D. Škrlec, "Review of energy storage allocation in power distribution networks: Applications, methods and future research," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 645–652, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0447.
- [23] O. B. Adewumi, G. Fotis, V. Vita, D. Nankoo, and L. Ekonomou, "The Impact of Distributed Energy Storage on Distribution and Transmission Networks' Power Quality," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 13, 2022, doi: 10.3390/app12136466.
- [24] D. Nderitu and P. V Preckel, "Utility Scale Energy Storage Systems Benefits, Applications, and Technologies," *PPI This Week*, vol. 16, no. 44, p. 3, 2001.
- [25] G. He, J. Michalek, S. Kar, Q. Chen, D. Zhang, and J. F. Whitacre, "Utility-Scale Portable Energy Storage Systems," *Joule*, vol. 5, no. 2, pp. 379–392, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2020.12.005.
- [26] F. Díaz-González *et al.*, "A hybrid energy storage solution based on supercapacitors and batteries for the grid integration of utility scale photovoltaic plants," *J. Energy Storage*, vol. 51, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104446.
- [27] U. K. M. S. D. G. Jayasinghe, D. M. Vilathgamuwa, "A New Method of Interfacing Battery/Supercapacitor Energy Storage Systems for Distributed

Energy Sources,” I E E E, 2010.

- [28] Y. Kim, V. Raghunathan, and A. Raghunathan, “Design and Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Electrical Energy Storage Systems for Regulation Services,” in *IEEE Transactions on Multi-Scale Computing Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2017, pp. 12–24. doi: 10.1109/TMSCS.2016.2627543.
- [29] Y. Deng *et al.*, “Energy Efficiency Optimization of Collaborative Power Supply System with Supercapacitor Storages,” *Energies*, vol. 16, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031227.
- [30] J. Rocabert, R. Capo-Misut, R. S. Munoz-Aguilar, J. I. Candela, and P. Rodriguez, “Control of Energy Storage System Integrating Electrochemical Batteries and Supercapacitors for Grid-Connected Applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 2, pp. 1853–1862, Mar. 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2873534.
- [31] Z. Zhao, K. Zheng, Y. Xing, and J. Yu, “Capacity optimal allocation of hybrid energy storage in DC distribution network based on Ensemble Empirical Mode Decomposition,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 535–539, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.09.104.
- [32] Y. Gotran and K. Boukğla, “FEN BĞLGMLERĞ ENSTĞTÜSÜ FOTOVOLTAĞK SĞSTEMLERDE BATARYA VE SÜPER KAPASĞTÖRÜN HĞBRĞT KULLANIMININ ĞNCELENMESĞ Elektrik-Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı Ağustos-2020 KONYA Her Hakkı Saklıdır.”
- [33] M. E. Choi, S. W. Kim, and S. W. Seo, “Energy management optimization in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 463–472, 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2164816.
- [34] Z. Cabrane, M. Ouassaid, and M. Maaroufi, “Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 45, pp. 20897–20907, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.141.

- [35] W. Jing, C. H. Lai, S. H. W. Wong, and M. L. D. Wong, "Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Standalone DC Microgrids: A Review Response to Associate Editor's Comments IET Review Copy Only IET Renewable Power Generation," pp. 1–26, 2016.
- [36] Y. Zhang, Z. Jiang, and X. Yu, "Control strategies for battery/supercapacitor hybrid energy storage systems," *2008 IEEE Energy 2030 Conf. ENERGY 2008*, pp. 5–10, 2008, doi: 10.1109/ENERGY.2008.4781031.
- [37] V. V. S. N. Murty* and Ashwani Kumar, "Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems," *Rev. Afr. Polit. Econ.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–6, 2018, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/03056244.2018.1546429>
- [38] L. Chang, "Review on Distributed Energy Storage Systems for Utility Applications," *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 2, no. 4, pp. 267–276, 2017, doi: 10.24295/cpsstpea.2017.00025.
- [39] Z. Song, J. Li, J. Hou, H. Hofmann, M. Ouyang, and J. Du, "The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: A case study," *Energy*, vol. 154, pp. 433–441, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.148.
- [40] G. Gautham Prasad, N. Shetty, S. Thakur, Rakshitha, and K. B. Bommegowda, "Supercapacitor technology and its applications: A review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 561, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/561/1/012105.
- [41] H. Bourenane, A. Berkani, K. Negadi, F. Marignetti, and K. Hebri, "Artificial Neural Networks Based Power Management for a Battery/Supercapacitor and Integrated Photovoltaic Hybrid Storage System for Electric Vehicles," *J. Eur. des Syst. Autom.*, vol. 56, no. 1, pp. 139–151, Feb. 2023, doi: 10.18280/jesa.560118.
- [42] H. Srahna, "Controlling energy storage system by using a fuzzy logic controller and analysis the effects of adding a supercapacitor for an electrical vehicle," Master's thesis, Dept. Electrical & Electronic Eng., Istanbul Aydin Univ., Istanbul, Turkey, Jul. 2022.

- [43] J. Pegueroles-Queralt, F. D. Bianchi, and O. Gomis-Bellmunt, "A power smoothing system based on supercapacitors for renewable distributed generation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 343–350, Jan. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2327554.
- [44] K. Sahay, A. P. J. Abdul, and B. Dwivedi, "Supercapacitors Energy Storage System for Power Quality Improvement: An Overview," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/289714785>
- [45] M. Reigstad and V. Steinsland, "Bidirectional DC-DC Converter for Supercapacitor as DC-bus Stabilization Element," p. 151, 2021, [Online]. Available: <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/11250/2760974>
- [46] Michael J. Ross Jr., "Modeling and Control of a Microgrid Using a Hybrid Energy Storage System With Supercapacitors," *Security*, no. June, p. 79, 2017.
- [47] S. Satpathy, N. K. Misra, D. kumar Shukla, V. Goyal, B. K. Bhattacharyya, and C. S. Yadav, "An in-depth study of the electrical characterization of supercapacitors for recent trends in energy storage system," Jan. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2022.106198.
- [48] J. Zhang, M. Gu, and X. Chen, "Supercapacitors for renewable energy applications: A review," *Micro Nano Eng.*, vol. 21, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mne.2023.100229.
- [49] M. E. Şahin, F. Blaabjerg, and A. Sangwongwanich, "A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments," *Energies*, vol. 15, no. 3, pp. 1–26, 2022, doi: 10.3390/en15030674.
- [50] E. Bilimi *et al.*, "Future Energy Storage Technologies , Sustainability And Energy Conversion," pp. 1–26, 2024.
- [51] Wikipedi, "Enerji biçimleri," Wikipedi, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Enerji_bi%C3%A7imleri. [Erişim: 2 Ocak 2025]
- [52] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, "Overview of current and

- future energy storage technologies for electric power applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1513–1522, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2008.09.028.
- [53] B. Dunn, H. Kamath, and J. M. Tarascon, “Electrical energy storage for the grid: A battery of choices,” *Science (80-.)*, vol. 334, no. 6058, pp. 928–935, 2011, doi: 10.1126/science.1212741.
- [54] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, “Progress in electrical energy storage system: A critical review,” *Prog. Nat. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- [55] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [56] W. Liu *et al.*, *Review of Energy Storage Capacitor Technology*, vol. 10, no. 8. 2024. doi: 10.3390/batteries10080271.
- [57] BYJU'S, “Kapasitörde Depolanan Enerji: Türetim, Formül ve Uygulamalar,” BYJU’S, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://byjus.com/jee/energy-stored-in-capacitor/#:~:text=What%20type%20of%20energy%20is,the%20plates%20of%20the%20capacitor>. [Erişim: 3 Ocak 2025].
- [58] Vikipedi, “Supercapacitor,” Wikipedia, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>. [Erişim: 3 Ocak 2025].
- [59] A. Gül, “Süper kapasitörler,” Anıl Gül Blog, 8 Haz. 2019. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://anillgull.blogspot.com/2019/06/super-kapasitorler.html>. [Erişim: 3 Ocak 2025].
- [60] Ç. Özada, M. Ünal, and M. Yazıcı, “Supercapacitor: Fundamentals and materials,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 39, no. 2, pp. 1315–1331, 2024, doi: 10.17341/gazimmfd.1141220.
- [61] M. AKDEMİR, “Rutenyum Katkılı Nanotüp Kullanılarak Süperkapasitör Elektrot Üretimi,” *Eur. J. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 31, pp. 326–330, 2021, doi:

10.31590/ejosat.1009731.

- [62] U. Atalay, “Süper kapasitörler,” *Malzeme Bilimi ve Mühendisliğinde Özel Konular*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2019. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://slideplayer.biz.tr/slide/13630634/>. [Erişim: 13 Ocak 2025].
- [63] B. Zakeri and S. Syri, “Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 569–596, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.011.
- [64] B. Scrosati and J. Garche, “Lithium batteries: Status, prospects and future,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2419–2430, 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
- [65] J. B. Goodenough and K.-S. Park, "The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 135, no. 4, pp. 1167–1176, Jan. 2013.
- [66] H. Wenzl, “Batteries and Fuel Cells | Efficiency,” *Encycl. Electrochem. Power Sources*, pp. 544–551, 2009, doi: 10.1016/B978-044452745-5.00047-2.
- [67] Birikim Pilleri, “Kurşun Asit Akü Nasıl Çalışır?”, Birikim Pilleri Blog, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.birikimpilleri.com/tr/blog/kursun-asit-aku-nasil-calisir/159#:~:text=%C4%B0%C3%A7inde%20s%C4%B1v%C4%B1%20bulunan%20bataryalar%C4%B1n%20aksine,olarak%20da%20kurumaya%20sebebiyet%20verir.> [Erişim: 13 Ocak 2025].
- [68] N. Şenocak, “Akış Pili (Flow Battery) Nasıl Çalışır?”, Amatör Teknik, 29 Mayıs 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.amatorteknik.com/piller-210b-akis-pili-flow-battery-nasil-calisir/>. [Erişim: 30 Ocak 2025].
- [69] J.-M. T. & M. Armand† and *Université, “Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries J.-M.,” vol. 26, no. 2, pp. 7–10, 1997.
- [70] S. Ma *et al.*, “Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review,” *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.*, vol. 28, no. 6, pp. 653–666, 2018, doi: 10.1016/j.pnsc.2018.11.002.

- [71] T. Sarıgöl, “Günümüzün elektrikli araçlarının en önemli sorunları: Menzil ve şarj süresi,” *Bilim Genç*, 24 Ağu. 2018. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/gunumuzun-elektrikli-araclarinin-en-onemli-sorunlari-menzil-ve-sarj-suresi>. [Erişim: 30 Ocak 2025]
- [72] E. Özdemir, Ş. Özdemir, K. Erhan, and A. Aktaş, “Akıllı şebekelerde enerji depolama uygulamalarının önündeki fırsatlar ve karşılaşılan zorluklar,” *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 32, no. 2, pp. 499–506, 2017, doi: 10.17341/gazimmfd.322175.
- [73] Ş. Kuşdoğan, "Yenilenebilir Enerji Uygulamalarında Hibrit Enerji Depolama Teknolojileri ve Uygulamaları," *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 32, ss. 1103–1112, 2022. doi: 10.31590/ejosat.1045564.
- [74] IMB Electric, “Batarya Yönetim Sistemi Nedir?,” IMB Electric Market, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://imbelectric.com/batarya-yonetim-sistemi-nedir/>. [Erişim: 30 Ocak 2025].
- [75] T. Karadağ ve İ. C. Dikmen, "Yeni Nesil, Modüler ve Akıllı Batarya Yönetim Sistemi," *European Journal of Science and Technology*, no. 32, ss. 1103–1112, 2022, doi: 10.31590/ejosat.1045564.
- [76] Y. Lin *et al.*, “Research Roadmap on Grid-Forming Inverters With editing and support from Hariharan Krishnaswami,” *Nrel*, 2020, [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [77] Vikipedi, “Multi-level converter,” Wikipedia, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-level_converter. [Erişim: 30 Ocak 2025].
- [78] M. U. Aslam, N. S. B. Shakhawat, R. Shah, N. Amjady, M. S. Miah, and B. M. R. Amin, “Hybrid Energy Storage Modeling and Control for Power System Operation Studies: A Survey,” *Energies*, vol. 17, no. 23, 2024, doi: 10.3390/en17235976.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

KAVUŞ DEMİR, Elif

Web sayfası

(Research Gate, Academia, vs.)

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	-
Lisans	Gaziantep Üniversitesi	2017
Lise	Batman Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
07.2022-Halen	Dicle Elektrik	Ar-Ge Uzmanı
10.2020-10-2021	Güriş Holding	Elektrik & Elektronik Mühendisi (Yenilenebilir Enerji)
11.2017-10.2020	Fernas Şirketler Grubu	Elektrik & Elektronik Mühendisi (Yenilenebilir Enerji)

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. E. Kavuş Demir, C. Haydaroğlu, H. KILIÇ, M. Çelikpence, and M. M. Şahin, "IoT-Driven Monitoring and Optimization of Hybrid Energy Storage Systems with Supercapacitors in Distribution Networks," TEPEs, vol. 2025, no. 0017.R1, 2025. [Online]. Available: tepes. [Accessed: 23-Apr-2025].

Özel İlgiler

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Elif KAVUŞ DEMİR		
Öğrenci No	22805024		
Ana Bilim Dalı	Elektrik Elektronik Mühendisliği		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Doç. Dr. Heybet KILIÇ		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	-		
Tez Başlığı	Süperkapasitör İçerikli Depolama Sistemlerinin Dağıtım Şebekesine Etkisinin İncelenmesi		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	119		
Raporlama Tarihi	27.06.2025		
Benzerlik Oranı (%)	% 8		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 119 sayfalık kısmına ilişkin, 27/06/2025 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒Kaynaklar hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Tez benzerlik oranı üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Elif KAVUŞ DEMİR

Tarih: .../.../2025

İmza:

Danışman: Doç. Dr. Heybet KILIÇ

İmza:

Tarih:

Ana Bilim Dalı Başkanı: Prof. Dr. M. Bahaddin KURT

İmza:

Tarih: