



**ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN RÜZGAR TÜRBİNLERİYLE
KULLANIMININ GÜÇ SİSTEM ANALİZİ**

Murat Can SİNİM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat Can SİNİM

02/06/2022

ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN RÜZGAR TÜRBİNLERİYLE KULLANIMININ GÜÇ SİSTEM ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat Can SİNİM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Sıfır karbon hedeflerine ulaşılma amacı ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımları arttırmalarını neden olmaktadır. Rüzgâr türbinleri ve enerji depolama sistemleri yatırımı dünyada en çok alan teknolojiler arasında ön sırada yer almaktadır. Enerji depolama sistemlerinin yüksek kapasiteli ve dağıtık olarak kullanılabilmesi sayesinde, şebeke desteği amaçlı birçok farklı amaca uygun olarak hizmet verebilmesi ve tekrar kullanılabilir olması dolayı tercih edilmektedir. Aynı zamanda elektrik kesintisi anlarından enerji depolama sistemleri sayesinde enerji sürekliliği sağlayabilmelerinden dolayı da tercih edilmelerini sağlamaktadır. Enerji depolama sistemlerinin elektrik şebekesinde kullanımına yönelik tüm faydalar, enerji depolama ekipmanlarının kullanımının günden güne artmasını sağlamaktadır. Ülkemizde 10 GW kurula güce ulaşan rüzgâr enerjisi günden güne kurulu gücünü arttırmaktadır. Karasal rüzgâr türbinlerine ek olarak, deniz üstü rüzgâr türbinlerinde dünyada geniş yatırım bulması rüzgâr türbinlerinin daha da yaygınlaşacağını göstermektedir. Tamamıyla rüzgâr enerjisine bağlı olarak çalışan bu sistemler, literatürde halen kesintili enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Kesintili kaynak olmaları dolayısıyla elektrik şebekesinde ve elektrik piyasasında birçok öngörülemez durumu beraberinde getirmektedir. Bu çalışma kapsamında, rüzgâr türbinlerine bağlı olarak enerji depolama sistemlerinin kullanımlarına yönelik güç sistem analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Enerji depolama sistemi kullanılması ve kullanılmaması durumuna uygun olarak elektrik şebekesine olan etkileri detaylı analiz edilmiş ve farklı depolama durumlarına göre çıkış gücünde sınırlı değişimli ve sürekli etkili bir çıkış için çözümler ortaya koyulmuştur.

Bilim Kodu : 90513

Anahtar Kelimeler : Enerji depolama, enerji yönetim sistemi, rüzgar türbinleri

Sayfa Adedi : 98

Danışman : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

POWER SYSTEM ANALYSIS OF ENERGY STORAGE SYSTEMS INTEGRATION
WITH WIND TURBINES

(M. Sc. Thesis)

Murat Can SİNİM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

The aim of achieving zero carbon targets causes countries to increase investments in renewable energy sources. Wind turbines and energy storage systems are among the technologies that receive the most investment in the world. Energy storage systems are preferred because they can be used in a high capacity and as distributed resources. They can serve for many different purposes for grid support and are reusable. At the same time, they are preferred because they can provide energy continuity during power cuts thanks to energy storage systems. All the benefits for the use of energy storage systems in the electricity grid ensure the increase in the use of energy storage equipment day by day. Wind energy, which reaches 10 GW of installed power in our country, increases its installed power day by day. In addition to onshore wind turbines, the wide investment in offshore wind turbines in the world indicates that wind turbines will become more widespread. These systems, which are completely dependent on wind energy, are still defined as intermittent energy sources in the literature. As they are intermittent resources, they bring many unpredictable situations in the electricity grid and electricity market. Within the scope of this study, power system analysis studies were carried out for the use of energy storage systems connected to wind turbines. In accordance with the use and non-use of the energy storage system, its effects on the electricity grid have been analyzed in detail and solutions have been presented for a continuous effective output with limited variation in output power according to different storage situations.

Science Code : 90513

Key Words : Renewables, energy storage system, wind turbine, power system

Page Number :98

Supervisor : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOGLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde sürekli yanımda olan başta değerli eşim Tuğçe TURAN SİNİM olmak üzere, değerli babam Mithat SİNİM'e, değerli annem Safiye SİNİM'e en derinden teşekkür ederim.

Tez çalışmam sürecinde benden emeklerini esirgemeyen ve her zorluğumda yanımda olan danışmanın Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ	7
2.1. Enerji Depolama Sistem Özellikleri.....	9
2.2. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri	11
2.3. Lityum-ion Bataryalar	11
2.3.1. Redox akışlı bataryalar	18
2.3.2. Kurşun asit bataryalar	19
2.3.3. Batarya karşılaştırmaları.....	20
3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN AMAÇ FONKSİYONLARI VE ŞEBEKE BAĞLANTI NOKTALARI.....	23
3.1. Doğrudan Şarj / Deşarj Yönetimi İşlevi.....	23
3.2. Mikro Şebeke Yönetimi	24
3.3. Reaktif Güç Desteği	26
3.4. Sıkışıklık Yönetimi	30
3.5. Gerilim Regülasyonu	32
3.6. Yük Öteleme	33
3.7. Yatırım Öteleme.....	37

	Sayfa
3.8. Uygulama Alanı Seçimi	38
4. TEZ ARAŞTIRMA ÇALIŞMASI	41
4.1. Rüzgâr Türbinleri	46
4.2. Enerji Depolama.....	53
4.3. Mast Verisi	54
4.4. CYME Programı	58
4.5. Şebeke Modeli.....	60
5. SONUÇLAR	69
6. DEĞERLENDİRMELER VE GELECEK ÇALIŞMALAR	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Enerji depolama teknolojilerinin teknik karşılaştırma tablosu	21
Çizelge 2.2. Enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırmaları	21
Çizelge 3.1. Uygulamaların bağlantı seviyeleri	39
Çizelge 4.1. V117/4200 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi.....	52
Çizelge 4.2. Rüzgâr hızı verisi istatistikleri	55
Çizelge 4.3. Sembol Tablosu	61
Çizelge 4.4. Ana ekipmanlara ait istatistikler	63
Çizelge 5.1. WECS- 380 analiz sonuçları.....	71
Çizelge 5.2. BESS - 458 simülasyon sonuçları.....	72
Çizelge 5.3. Node- 303 simülasyon sonuçları	73
Çizelge 5.4. Node- 303 simülasyon sonuçları (devamı)	74
Çizelge 5.5. Rüzgâr türbini gücünün %10'undan fazla olan değişimler	75
Çizelge 5.6. Rüzgâr türbini gücünün %10'undan fazla olan değişimler (devam).....	76
Çizelge 5.7. EDS %100 doluluk durumu için ekipman parametreleri.....	79
Çizelge 5.8. EDS %100 doluluk durumu için ekipman parametreleri (devam)	80
Çizelge 5.9. EDS %10 doluluk durumu için ekipman parametreleri.....	82
Çizelge 5.10. EDS %10 doluluk durumu için ekipman parametreleri (devam)	83

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Mevcut elektrik şebeke yapısı	1
Şekil 1.2. Yıllara Sair Türkiye'de Kurulu toplam rüzgar gücü	4
Şekil 1.3. Yıllık kurulu enerji depolama kapasiteleri	5
Şekil 2.1. Kimyasal yapılarına göre enerji depolama teknoloji sınıfları.....	7
Şekil 2.2. EDS'lerin güç ve deşarj zaman gereksinimleri	8
Şekil 2.3. Lityum-Ion batarya mimarisini gösteren şematik diyagram.....	12
Şekil 2.4. Enerji depolama sistem şeması	13
Şekil 2.5. Ortalama paket ve hücre fiyatları	14
Şekil 2.6. Önümüzdeki 10 yıl için lityum iyon batarya fiyat öngörülleri	15
Şekil 2.7. Lityum kobalt oksit yapısı	16
Şekil 2.8. Lityum mangan oksit yapısı	16
Şekil 2.9. Redox akışlı batarya yapısı	18
Şekil 2.10. Kurşun asit batarya yapısı.....	19
Şekil 3.1. Mikro şebeke mimarisi	24
Şekil 3.2. Güç üçgeni	27
Şekil 3.3. Yük öteleme konsepti	35
Şekil 3.4. Enerji depolama sistemlerinin bağlantı noktaları	39
Şekil 4.1. Üretim tesislerinin arıza sonrası sisteme katkısı.....	44
Şekil 4.2. Tip 1 rüzgâr türbini yapısı	46
Şekil 4.3. Tip 2 rüzgâr türbini yapısı	47
Şekil 4.4. Tip 3 rüzgâr türbini yapısı	48
Şekil 4.5. Tip 4 rüzgâr türbini yapısı	49
Şekil 4.6. V117/4200 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi ve Cp Grafiği.....	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Enerji depolama sistemi teknik özellikleri	53
Şekil 4.8. Mast noktasındaki rüzgâr hızı verisi.....	55
Şekil 4.9. Mast noktasındaki ortalama sıcaklık	56
Şekil 4.10. Mast noktasındaki ortalama basınç.....	56
Şekil 4.11. 25.09.2018 tarihindeki rüzgâr hızı verisi	57
Şekil 4.12. 25.09.2018 tarihindeki rüzgâr türbini aktif çıkış gücü (kW)	58
Şekil 4.13. CYME programı enerji depolama kontrol tipleri	59
Şekil 4.14. Model elektrik şebekesi	60
Şekil 4.15. Enerji depolama sistemi ve rüzgâr türbini bağlantı yapısı.....	62
Şekil 4.16. Rüzgâr türbini teknik özellikleri	62
Şekil 4.17. 0.69 kV / 34.5 kV 4800 kVA transformatör özellikleri.....	63
Şekil 4.18. 0.4 kV / 34.5 kV 1600 kVA transformatör özellikleri.....	64
Şekil 4.19. 0.4 kV / 34.5 kV 1250 kVA transformatör özellikleri.....	64
Şekil 4.20. 34.5 kV / 154 kV 80 MVA transformatör özellikleri	65
Şekil 4.21. 34.5 kV 3x1x240 XLPE bakır kablo teknik özellikleri	66
Şekil 4.22. Mevcut çalışmada kullanılan ayırıcı tipleri ve özellikleri	67
Şekil 4.23. 1250 A – 16 kA kesici teknik özellikleri	68
Şekil 4.24. 1 250 A – 25 kA kesici teknik özellikleri	68
Şekil 5.1. CYME enerji depolama sistem kontrolcüsü	69
Şekil 5.2.Rüzgâr türbini & Sistem aktif güç çıkış karşılaştırması	77
Şekil 5.3. EDS doluluk oranı (%) (başlangıç doluluk oranı %50).....	78
Şekil 5.4. Rüzgar türbini & node aktif güç çıkış karşılaştırması	81
Şekil 5.5. EDS doluluk oranı (%) (başlangıç doluluk oranı %100).....	81
Şekil 5.6. RT & node aktif güç çıkış karşılaştırması (EDS başlangıç doluluk %10)	84
Şekil 5.7. EDS doluluk oranı (%) (başlangıç doluluk oranı %10).....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

kW

Kilowatt

kWh

Kilo-watthour

GW

Giga-Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

BESS

Batarya enerji yönetim sistemi

BMS

Batarya yönetim sistemi

DG

Dağıtık üretimler

DOD

Depth of Discharge

EMRA

Energy Market Regulatory Authority

EMS

Enerji yönetim sistemi

EDS

Enerji depolama sistemi

EPDK

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu

MWe

Mega Watt elektrik

PV

Fotovoltaik

SOC

Batarya doluluk oranı

SOH

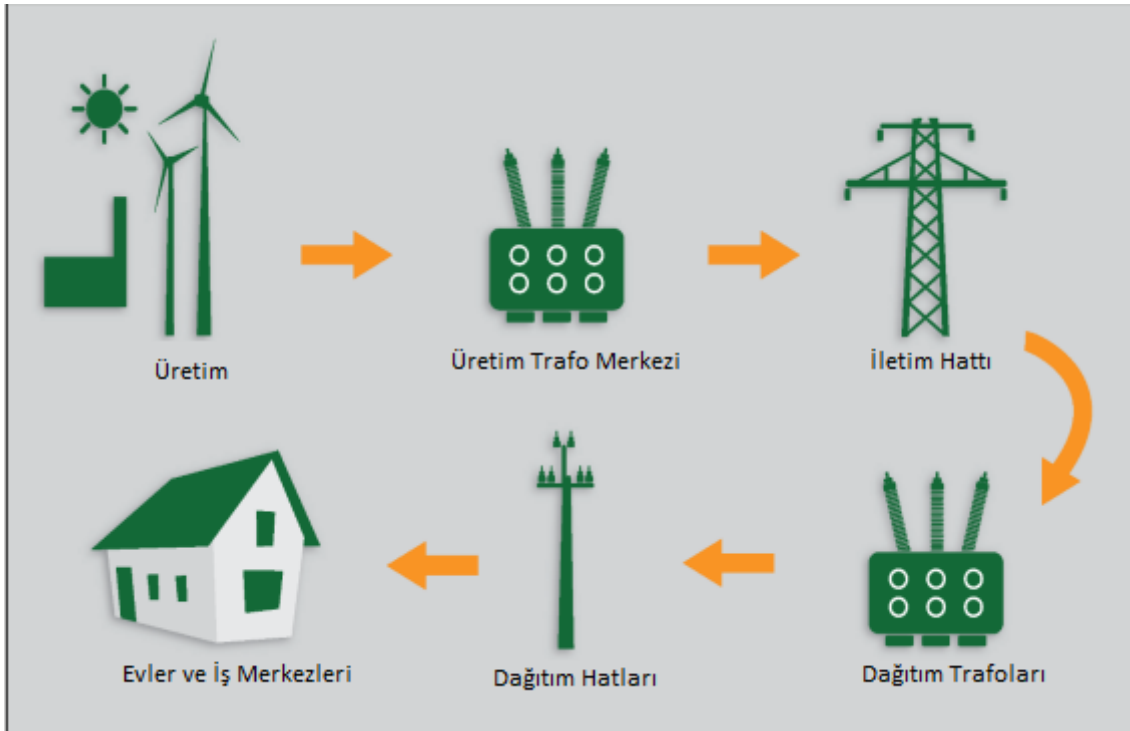
Batarya sağlık durumu

WT

Rüzgar Türbini

1. GİRİŞ

Artan nüfus ve teknolojiadaki gelişmeler her zamankinden daha fazla enerji ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Artan enerji talebi, enerji üretiminin de paralelde artırılmasını gerektirmektedir. Son yıllarda enerji talebini karşılamak için öncelikle 400-500 MWe'den büyük yüksek kapasiteli fosil enerji santralleri veya hidroelektrik santraller kurulmuştur. Santrallerin ülkelerin çeşitli lokasyonlarında kurulması sağlanmaya çalışılmıştır. Bu sayede üretimin olabildiğince tüketiciye yakınlaştırılması amaçlanmıştır. Kurulu gücü itibariyle bu kadar yüksek kapasiteye sahip santraller elektrik şebekesinde iletim seviyesinden bağlanabilmektedir. Elektrik şebekesinin (iletim ve dağıtım sistemleri) radyalitesi göz önüne alındığında, üreticiler bir tarafta, tüketiciler diğer tarafta toplanmaktadır ve enerji akışı tek yönlü olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 1.1. Mevcut elektrik şebeke yapısı

Elektrik iletim şebekesinde gerilim seviyesinin elektrik dağıtım şebekesi gerilim seviyesinden yüksek olması sebebiyle daha düşük teknik kayıplar oluşmaktadır. Ayrıca elektrik iletim hatlarının kapalı ring olarak işletilebiliyor olması nedeniyle şebeke geriliminin her noktada benzer olması sağlanmaktadır. Fosil yakıtlı santrallerin yüksek kapasiteleri nedeniyle, santralin kurulu gücü ile aynı bölgede yükleri toplamak mümkün olmadığından, yerinde üretim yerinde tüketim şu ana kadar bir seçenek olamamıştır. Yerinde

Üretim ile yerinde tüketim daha çok elektrik dağıtım seviyesinde gerçekleştirilmektedir. Ancak bu durum enerji akışını tek yönlü bir yapıdan çift yönlü bir yapıya evirmektedir. Bu durum da daha akıllı, yönetilebilir bir elektrik şebekesi kurulması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Fakat bu durum alışkın olunan şebekeye yapısından farklı olması sebebiyle, şebeke işletimini zorlaştırmaktadır.

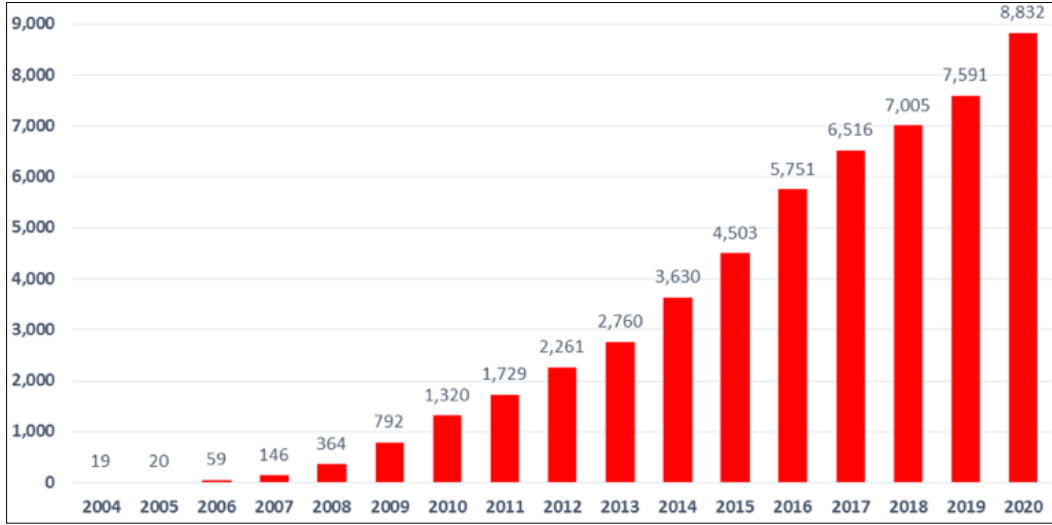
Son 10 yılda özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile “dağıtık üretim” kavramı literatürde yer almıştır. Yeni enerji politikaları ve sıfır karbon hedefleri sayesinde ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle rüzgâr ve güneş enerji santrali yatırımlarına yönelmiş, bu alanda yatırım yapan şirketlere ciddi teşvikler verilmeye başlanmıştır. Rüzgâr ve güneş enerji santrali yatırımları, göreceli olarak hidroelektrik santrali gibi yenilenebilir yatırımlardan daha düşük maliyetli olması, işletilebilirliğin daha kolay olması sebebiyle öncelik kazanmıştır. Aynı zamanda rüzgâr ve güneş potansiyeli yüksek olan bu santrallerin kurulması verimli olduğundan ve elektrik dağıtım şebekesinin her noktasına bağlanabilir olması bu teknolojileri daha da elverişli kılmaktadır. Son yıllarda, çatı tipi güneş enerji santralleri, lisanssız güneş enerji santralleri ile i tüketim amaçlı yenilenebilir enerji kullanılmaya sıklıkla başlamıştır. Hatta i tüketim amaçlı rüzgâr türbini kuran şirketler, fabrikalar dahi bulunmaktadır. Bu teknolojilere gereken yatırımların düşük olması, şahısları ve şirketleri bu alana yatırım yapmaya teşvik etmektedir.

Her ne kadar ciddi olarak yenilenebilir enerji santrallerinin sayısı artıyor olsa da, bu santrallerin kesintili kaynaklar olması nedeniyle, yeni sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu sorunlar, hem bu santrallerin devreye girip, çıkması anlarında elektrik şebekesinde yarattıkları etkiler olabilmekte hem de anlık olarak üretimin %100 doğrulukta tahmin edilememesi kaynaklı olmaktadır. Bu santralleri i tüketim amaçlı kuran yatırımcılar dahi ada şebeke yapısını kurgulayamamakta, beraberinde mevcut elektrik şebekesine bağlantı ihtiyaı duymaktadır. Sadece rüzgar ve güneş enerji santralleri ile bir bölgeyi tam anlamıyla beslemek söz konusu olamamaktadır. Diğer taraftan, rüzgar ve güneş kaynaklarında oluşan dalgalanmalar, bu kaynakların elektrik şebekesi üzerinde gerilim, frekans değişimi gibi etkilerini ortaya çıkarmaktadır. Bu durumda diğer elektrik kullanıcılarını, elektrik şebekesi güç kalitesini ve elektrik şebeke operatörlerini etkilemekte, şebeke işletimini zorlaştırmaktadır.

Yenilenebilir enerji santrallerinden kaynaklı sorunların giderilmesine yönelik olarak sadece Türkiye'de değil diğer ülkelerde de hibrit enerji santral yönetmelikleri yayınlanmıştır. Hibrit enerji santralleri, en az iki farklı enerji kaynağının birlikte kullanıldığı, tek bir noktadan enerji güç çıkışına sahip sistemler/santraller olarak tanımlanmaktadır. Güneş ve rüzgâr gibi kaynakları kullanan yenilenebilir santraller aynı yerde kurulabilir ve bu da bir kaynaktan oluşan kesintiyi başka bir kaynak kullanarak azaltılmasına imkân tanımaktadır. Bunun en iyi örneklerinden birisi fotovoltaik sistemlerin gece boyunca enerji üretememesi buna karşın rüzgâr türbinlerinin gece gündüz fark etmeksizin üretim gerçekleştirebiliyor olmasıdır. Bu duruma ek olarak, elektrik kesintisi durumunda PV ve rüzgâr santralleri şebekeden gerilim referans değeri algılamadığı için çalışamazlar. Bu sistemler için referans gerilim değeri sağlanmış olması durumunda dahi tüketim ve üretimi dengeleyecek bir kontrolör ve ayrıca esneklik ve anlık değişimler için enerji depolama sistemleri (EDS) vb. ihtiyacı bulunmaktadır. Bu sayede ada moduna getirilen şebekede güç ve enerji dengelenebilecektir. Esneklik sağlayacak ekipmanların bulunması sayesinde üretim ve tüketimin anlık olarak değişmesine karşın, sistem arz güvenliği sağlanmış olacaktır. EDS gibi tüketim ve üretim için kullanılan ve esneklik sağlayan kaynaklar, bu gibi sistemlerde önem kazanmaktadır. Yenilenebilir kaynaklardaki enerji üretiminin belirsizliği giderilmesi, güvenilirliğin ve istikrarın artması şebeke işletmecisi için en önemli faktörlerdir.

Elektrik şebekesinde hem üretim hem tüketim noktaları elektrik şebekesinin alçak gerilim, orta gerilim ve yüksek gerilim seviyesinde bulunmaktadır. Bu durum mevcut işletme koşullarını değiştirmekte, mevcut kontrol ekipmanları ile yönetimi zorlaştırmaktadır. Bu noktada, çift yönlü enerji akışına izin veren kontrol edilebilen akıllı şebeke ekipmanlarının kullanımı artmaya başlamıştır. Bu sayede elektrik şebekesinin her noktasına ulaşmak mümkün olmaktadır.

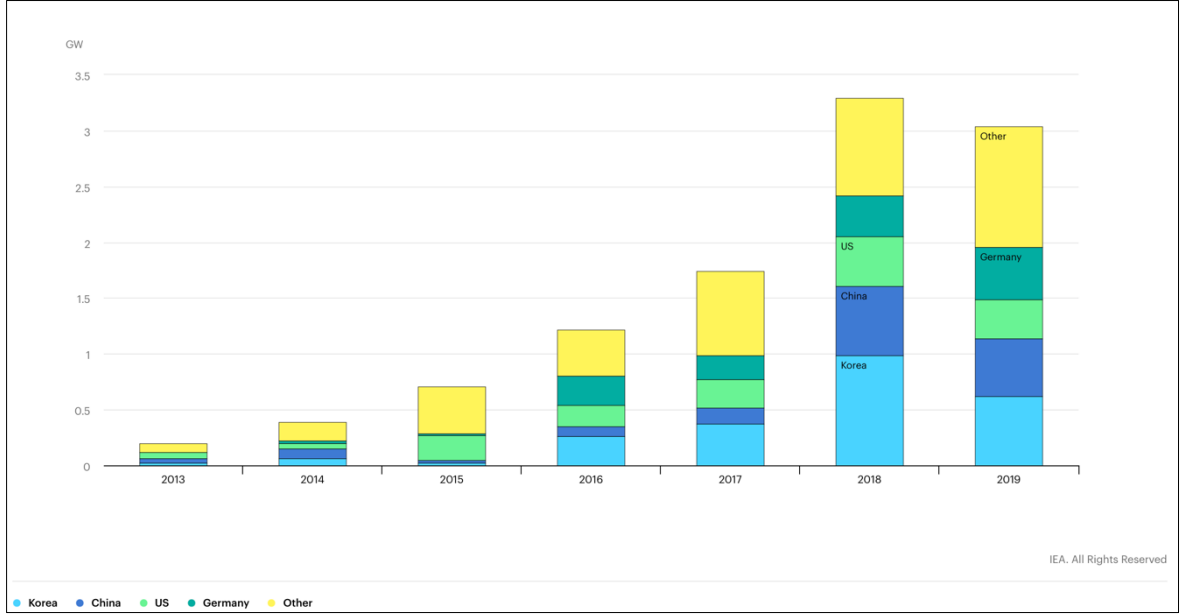
Türkiye'de toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü 10 GW'a ulaşmıştır [1]. Her ne kadar 2021 verileri dahil edilmemiş olsa dahi, Şekil 1.2'de yıllara göre Türkiye'de kurulu toplam rüzgâr enerji gücü görülmektedir.



Şekil 1.2. Yıllara Sair Türkiye'de Kurulu toplam rüzgar gücü [2]

Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli Enerji Bakanlığı tarafından 48 GW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyel sadece karadaki rüzgar türbinlerini (onshore) kapsamaktadır. Türkiye'nin 3 tarafının denizlerle çevrili olması nedeniyle, Türkiye açık deniz rüzgar enerji açısından geniş bir potansiyele sahiptir. Bu sebeple Türkiye'nin açık deniz (offshore) rüzgar enerjisi potansiyelinin araştırılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Açık deniz rüzgar enerji santrallerinin önümüzdeki yıllarda kurulmasıyla birlikte Türkiye'nin kurulu rüzgar gücü daha da artacaktır. Bu durum ülkemizi karbon sıfıra ulaşma hedefini daha da hızlandıracaktır.

Rüzgâr santralleri için çeşitli regülasyonlar olmasına rağmen 2021 yılına kadar enerji depolama sistemlerine özel bir regülasyon yayınlanmamıştır. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 2021 yılında enerji depolama sistemi (EDS) yönetmeliğini yayınlamıştır. Bu sayede enerji depolama sistemlerinin elektrik şebekesinde kurulabilmesinin önü açılmıştır. Bu regülasyonun yayınlanmasıyla birlikte bazı elektrik dağıtım şirketleri bu yenilikçi teknolojiyi kendi elektrik şebekelerinde çeşitli araştırma geliştirme projeleri kapsamında kurmuşlardır [3]. Elektrik dağıtım şirketlerinin gerçekleştirdiği uygulamalara bakıldığında farklı amaçlar için çalışacak li-ion depolama sistemlerinin çeşitli kapasite ve güçlerde kurulduğu görülmektedir [3]. Bu durum elektrik dağıtım şirketlerinin enerji depolama konusunda ne kadar istekli olduğunu ve ileride enerji depolama sistemlerinin yaygınlaşması durumunda bu sistemlere aşına olacaklarını göstermektedir. Türkiye için kurulu toplam enerji depolama kapasitesiyle ilgili bir veri bulunmamasına karşın, Dünyada kurulu toplam enerji depolama kapasitesi Şekil 1.3'de görülmektedir.



Şekil 1.3. Yıllık kurulu enerji depolama kapasiteleri [4]

Enerji depolama denildiğinde ilk akla gelen yıllardır otomobil sektöründe de kullanılan kurşun asit bataryalardır. Kurşun asit bataryalar gibi halihazırda kullanılmakta olan birkaç enerji depolama teknolojisi olmasına rağmen, güç ve depolama kapasitesi, gelişmiş şarj ve deşarj verimliliği, şarj ve deşarj hızı, daha uzun ömür, yüksek enerji yoğunluğu, düşük bakım gerekliliği, kapasitesinin artırılabilmesi sayesinde li-ion bataryalar şebeke ölçeği enerji depolama sistemleri arasında daha çok tercih edilmektedir. Bunun bir diğer sebebi ise yatırım maliyetleri göz önüne alındığında daha verimli teknolojilerin tercih edilmesidir. EDS'nin kullanım amacına uygun olarak, enerji depolama sisteminin boyutlandırılması, yerleşimi, AC/DC – DC/AC dönüşüm verimliliği çok önemlidir. EDS'yi etkileyen bir diğer önemli etkenlerden biri de enerji depolama sistemlerinde kullanılan enerji yönetim sistemi (EYS) ve batarya yönetim sistemi (BYS) algoritmalarıdır. BYS algoritmaları batarya hücrelerinin şarj, deşarj, sıcaklık vb. parametrelerini kontrol eden ve bu parametrelere göre batarya hücrelerini yöneten algoritmalarlardır. Diğer taraftan EYS algoritması ise, EDS'nin kullanım amacına yönelik nasıl çalışacağına karar veren algoritmayı içermektedir. Aynı zamanda, enerji depolama sisteminin en uygun şekilde çalışabilmesi için depolama sistemi dışı sistemlerle iletişimin kurulduğu yapı da bu uygulamada yer almaktadır. Bu durum olası iletişim kopukluklarında sistemin güvenli bir şekilde çalışmasını ya da durmasını sağlayacak bilgileri de barındırmaktadır. EDS'nin boyutlandırılması ve yerleşimi ile ilgili olarak, optimizasyon amacıyla çeşitli çalışmalar mevcuttur [5, 6].

Mevcut tez çalışması kapsamında, rüzgâr türbinlerinin özellikle aktif güç açısından elektrik şebekesi üzerinde oluşturduğu olumsuz etkilerini azaltmak için enerji depolama sistemi kullanılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda elektrik şebeke modeli oluşturulmuş, 4,2 MW anma gücünde, 117 m rotor çapında tip 4 rüzgâr türbini topolojisi oluşturulan modelde kullanılmıştır. Rüzgâr türbini ile aynı alçak gerilim barasına bağlı bir enerji depolama sistemi modellenmiştir. Enerji depolama sistemi olan ve olmayan buna ek olarak farklı başlangıç doluluk oranına sahip enerji depolama sistemleri için analizler yapılmış olup karşılaştırmalı sonuçlar sunulmuştur. Batarya sisteminin boyutlandırılması ve konumlandırılması devamındaki çalışmaların konusu olacaktır.

2. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

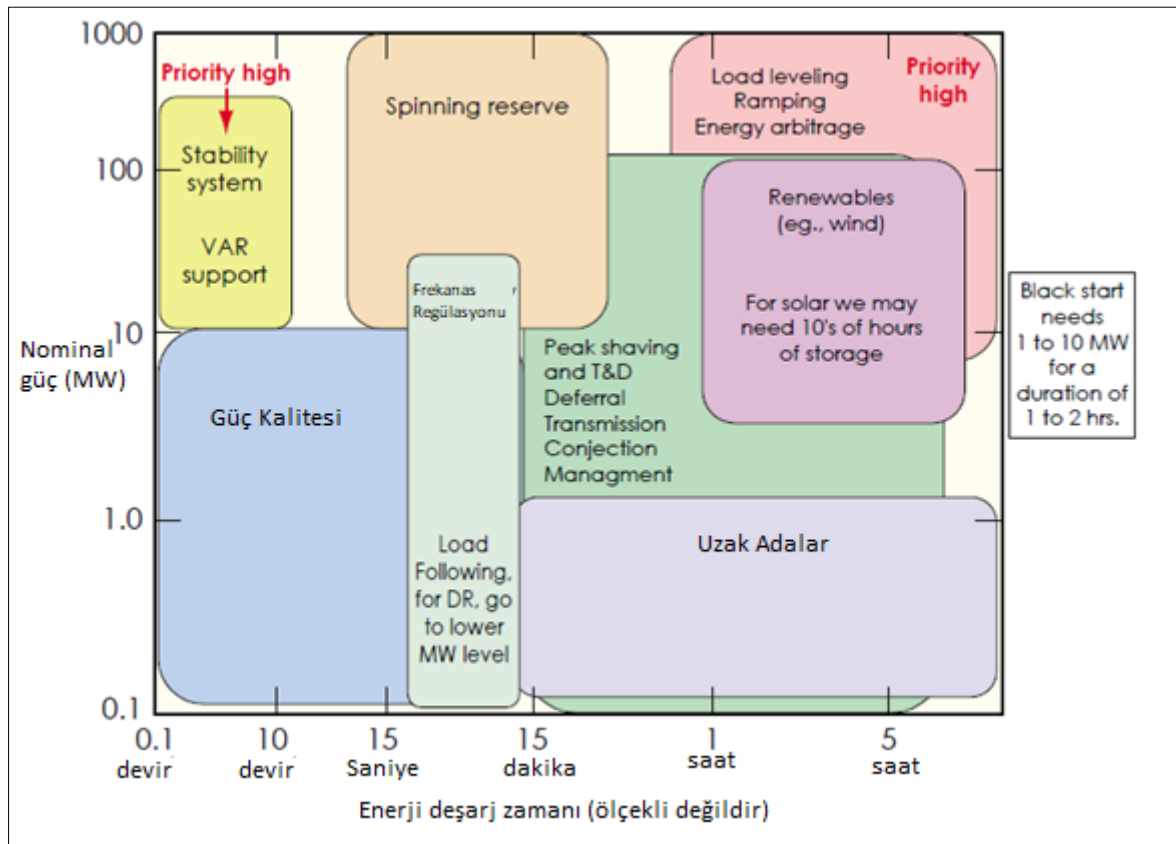
Enerji depolama sistemleri (EDS), kullanılan enerji depolama teknolojisine bağlı olarak elektrik, mekanik, kimyasal, elektromekanik veya termal cihazlar olarak sınıflandırılabilir. Pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri kapsayan mekanik enerji depolama sistemi en eski teknolojidir ve çok fazla su kaynağına ve farklı coğrafi yükseltilere ihtiyacı bulunmaktadır. Buna ek olarak geniş bir kurulum alanı gerektirmesi ve yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle pompaj depolamalı hidroelektrik santraller her zaman tercih edilmemektedir. Buna nazaran çok daha az alan kaplayan ve daha düşük maliyetlerle uygulanabilen elektrokimyasal piller tercih edilmektedir [7].



Şekil 2.1. Kimyasal yapılarına göre enerji depolama teknoloji sınıfları [7]

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere 4 farklı EDS sınıfı bulunmaktadır. Bu enerji depolama grubu teknolojilerden birincil (primary) ve ikincil (secondary) enerji depolama teknolojilerini de kapsamaktadır. Birincil enerji depolama sistemleri bir defaya mahsus kullanım imkânı sunmakta olup, buna karşın ikincil enerji depolama sistemleri birden fazla kullanıma uygundur. İkincil (secondary) enerji depolama sistemlerinin birden çok defa şarj edilebilir olması sayesinde daha çok tercih edilmektedir. İkincil bataryalar, deşarj esnasında kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine, şarj esnasında elektrik enerjisini kimyasal enerjiye çevirerek depolamaktadır. İkincil bataryalar arasında en çok tercih edilen batarya li-ion bataryalardır. Li-ion bataryaların daha çok tercih edilmesi nedeniyle mevcut bu tez kapsamında modellenen enerji depolama sistemi, li-ion batarya, olarak belirlenmiştir.

Enerji depolama sistemleri, seçilen teknolojiye, depolama ve güç kapasitesine bağlı olarak iletim sistemi desteği ve dağıtım sistemi desteği amacıyla kullanılabilir. Bu destekler kendi içlerinde farklı amaçlara göre çeşitlenebilir. Bunların başlıcaları, frekans regülasyonu, mikro şebekeler, güç kalitesi, reaktif güç desteği, yük öteleme vb. şeklindedir. Bunlara ek olarak, enerji depolama sistemleri üretim santralleri yanında kesintisiz güç kaynağı olarak da kullanılabilir, büyük ölçekli üretim ve kesintisiz güç kaynağı olarak da kullanılabilir. Farklı amaç fonksiyonlarına göre güç ve deşarj gereksinimleri Şekil 2.2’de görülmektedir [8].



Şekil 2.2. EDS'lerin güç ve deşarj zaman gereksinimleri [8]

Enerji depolama sistemleri belirtilen amaç fonksiyonlarından bir tanesi için çalışabilecekleri gibi, aynı anda birden fazla amaç fonksiyonu için de çalışabilecektir. Enerji depolama sistemlerinde kullanılan EYS içerisinde gömülü olarak bulunan bu algoritmaların aktifleştirilmesi sayesinde ve teknik özelliklerinin izin verdiği ölçüde gerekli amaç fonksiyonlarına uygun olarak hizmet edebilirler. Kullanım amacına uygun bataryayı seçebilmek için güç ve deşarj süresinin yanı sıra diğer özellikler de dikkate alınmalıdır. Bu özellikler kısım 0 detaylandırılmış olup bataryaların amaç fonksiyonları kısım 0’de

verilmiştir.

2.1. Enerji Depolama Sistem Özellikleri

Enerji depolama sistemlerinin temel özellikleriyle ilgili bilgiler enerji depolama sistemlerinin kataloglarında yer almaktadır. Satın alınabilir enerji depolama sistemleri bu özelliklerine göre seçilmektedir. Bu teknik özelliklere ek olarak, çevresel şartlar, gürültü, şebeke gereksinimleri, koruma gereksinimleri gibi özellikler de bataryanın kullanım yerine göre önem arz etmektedir.

Enerji depolama sistemleri için kullanılan temel özelliklerden başlıcaları;

Enerji kapasitesi (Energy capacity): Bir bataryanın enerji kapasitesi, amper-saat (Ah) veya watt-saat (Wh) cinsinden ifade edilen tam deşarjla elde edilen toplam enerjidir. Bir bataryadan elde edilebilen enerji, deşarj hızı ve sıcaklığının bir fonksiyonudur. Bu nedenle, bataryanın etiketi üzerinde genellikle kapasitesi bu koşulların yanında belirtilir. Birçok batarya teknolojisi için enerji kapasitesi zamanla ve kullanıldıkça azalır. Enerji kapasitesinin zamanla azalma durumu kendi kendine boşalma hızı ile doğru orantılıdır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklar kapasite düşümünü hızlandırırken, ortalama şarj durumu da bazı teknolojiler için kapasite azalmasında etkilidir.

Kullanılacak uygulamaya bağlı olarak enerji kapasitesi doğru şekilde belirlenmelidir [9]. Gereğinden fazla kapasite belirlemek yüksek maliyetlere ve boyutlara, düşük kapasite belirlenmesi ise elde edilecek faydanın daha düşük olmasına sebebiyet verecektir.

Enerji Yoğunluğu (Energy density): Enerji yoğunluğu (veya spesifik enerji), bir bataryanın kütle veya hacim birimi başına ne kadar enerji depoladığını (belirli sıcaklık ve deşarj hızında) tanımlar.

Güç Kapasitesi (Power capacity): Güç, enerjinin aktarılma hızıdır. Bir bataryanın şarj veya deşarj gücü kabiliyeti genellikle şarj durumuna (SOC) ve sıcaklığa göre değişir. Bataryaların şarj ve deşarj gücü kabiliyetlerinin karşılaştırılabilmesi için şarj oranı (C-Rate) değerleri kullanılır. C-Rate, güç çıkışının ve girişinin bataryanın enerji kapasitesine göre normalleştirilmiş halidir. Örneğin, 5 kW ile şarj/deşarj olan bir 10kWh bataryanın C2 veya 0.5C hızında şarj/deşarj olduğu belirtilir. 20kW ile şarj/deşarj olan bir 10kWh bataryanın

C0,5 veya 2C hızında şarj/deşarj olduğu söylenir. Yüksek C-Rate'e sahip bataryalar, kapasitelerini hızlı bir şekilde şarj edebilir veya boşaltabilirler.

Özellikle frekans desteği sağlama gibi uygulamalarda, mili saniye mertebesinde yüksek güç gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Bu durum mevcut uygulamalarda kullanılacak bataryalar için yüksek C rate değeri gereksinimini ortaya çıkartmaktadır.

Güç yoğunluğu (Power density): Güç yoğunluğu (veya spesifik güç), bir bataryanın kütle veya hacim birimi başına ne kadar güç verebileceğini veya çekebileceğini (belirli sıcaklık ve SOC seviyesi için) tanımlar.

Tepki süresi (Response time): Bir batarya sisteminin komutlara (şarj vedeşarj) cevap vermesi için gereken süredir.

Rampa oranı (Ramp rate): Batarya sisteminin çıkış gücünü artırma veya azaltma hızıdır.

Çevrim Ömrü (Cycle life): Çevrim ömrü bir bataryanın tekrarlanan şarj vedeşarja dayanma kabiliyetini tanımlar. Çevrim ömrü tanımı genellikle kurşun asit batarya üreticileri tarafından belirli bir sıcaklık vedeşarj derinliğine (DoD) göre sağlanır. Örneğin, %40 DoD'de 3500 çevrim ömrüne sahip bir 10 kWh'lık bataryanın %100 DoD'de 1400 çevrim ömrüne sahip olması beklenir.

Raf Ömrü (Shelf life): Enerji depolama sisteminin raf ömrü, ideal koşullar altında saklanırsa bataryanın ömrünün sonuna ulaşma süresini gösterir. Bu değer sahada ulaşılabilecek kullanım ömrünün üst sınırını temsil eder. Bataryaların şarjı için ideal koşullarındaki özellikler ile uygulamalar arasında önemli ölçüde farklı olduğunu bilinmelidir.

Şarj-Deşarj Verimi (Round-trip efficiency): Tam bir şarj-deşarj çevrimi boyunca bataryaya giren ve çıkan enerjilerin oranıdır. Enerji transferi sırasında oluşan kaybı öğrenmek için önemli bir parametredir.

Kendi kendine boşalma hızı (Self-discharge rate): Kendi kendine boşalma hızı, bataryanın yüksüz durumda boşalma hızını tanımlar. Genellikle %/ay olarak ifade edilir. Örneğin, %5'lik bir kendi kendinedeşarj oranına sahip bir 10kWh bataryanın bekleme modundayken

bir ay boyunca %5 SOC veya 0,5 kWh kaybetmesi beklenir. Kendiliğinden boşalma tipik olarak ortam sıcaklığının artmasıyla artar.

Sıcaklık aralığı (Temperature range): Belirli sıcaklıklara ulaşıldığında bataryalar zarar görebilir veya güvensiz hale gelebilir. Bu nedenle, bataryanın çalıştırılması gereken bir sıcaklık aralığı genellikle üretici tarafından belirlenir.

Gerilim aralığı: Bazı batarya teknolojileri aşırı şarj veya aşırı deşarja karşı duyarlıdır. Bu durumun sonucu olarak, üreticiler sıklıkla bataryanın çalışma durumu için bir gerilim aralığı belirlemektedir.

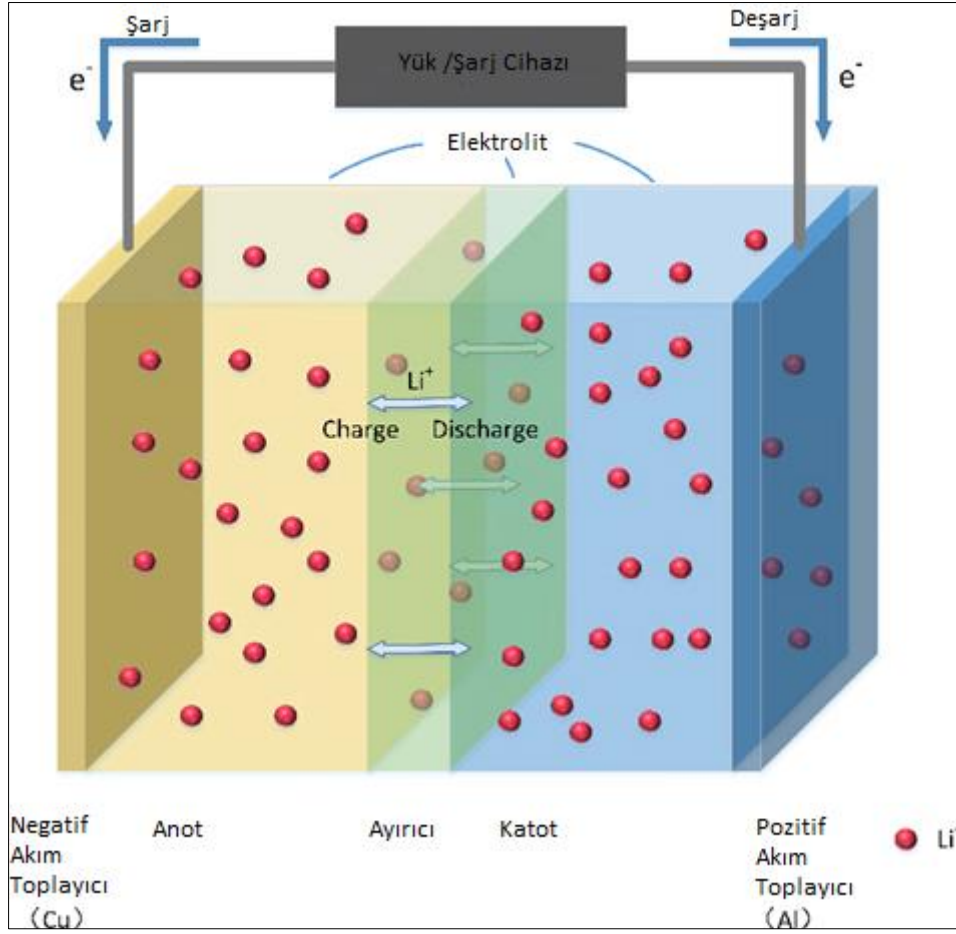
Yukarıda belirtilen başlıca teknik parametreler her ürünün datasheet'in de bulunması gereken ve enerji depolama sisteminin kullanılacak olduğu uygulamaya, kullanım alanına bağlı olarak dikkatli şekilde karar verilmesi gereken özellikleri içermektedir. Bu parametreler, bataryanın ömrünü belirlediği gibi, kullanılan uygulamada gerekleri sağlaması noktasında doğru ürün seçilmesine imkân tanımaktadır. Diğer taraftan, uygulamalarla ilgili analizlerin gerçekleştirilmesi aşamasında tanımlanan parametreler ile gerçekleştirilebilmektedir.

2.2. Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri

Bu kısımda kimyasal enerji depolama sistemlerinden başlıcaları olan lityum-ion bataryalar, redox flow bataryalar, kurşun asit bataryalar ele alınmıştır. Bu bataryalar, uygulamada en çok kullanılan bataryalardır.

2.3. Lityum-ion Bataryalar

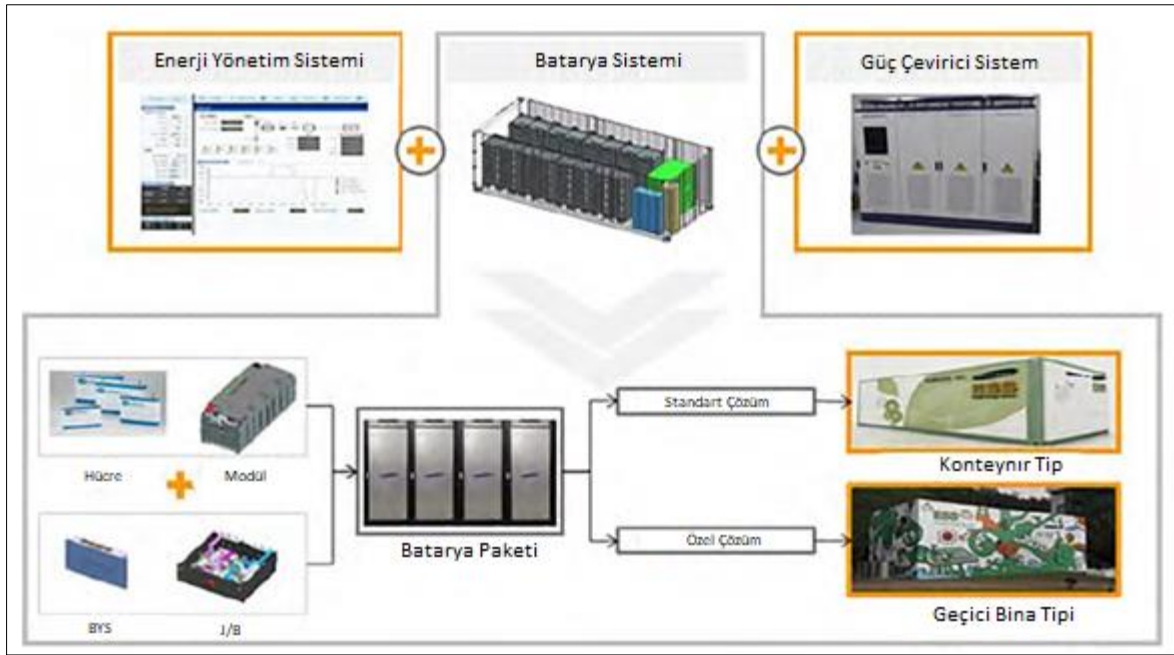
Lityum-iyon veya li-ion bataryalar, bir tür şarj edilebilir kimyasal bataryalardır. Yüksek enerji yoğunlukları, yüksek verime sahip olmaları, ölçeklenebilir olmaları, lityum iyon bataryaların taşınabilir elektronik cihazlardan şebeke ölçeğindeki uygulamalara kadar geniş bir ölçekte kullanılabilir ve tercih edilebilir olmalarını sağlamaktadır. Kullanılan katot ve anot kimyasalına göre lityum ion bataryalar çeşitlenmekle birlikte, Şekil 2.3 de lityum ion batarya mimarisini gösteren şematik diyagram görülmektedir.



Şekil 2.3. Lityum-Ion batarya mimarisini gösteren şematik diyagram

Lityum iyon bataryalar ilk defa 1992'de ticarileşmiştir. Gerçekleştirilen teknolojik gelişmeler olgunlaşmış bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, lityum iyon bataryaların elektronik cihazlardan büyük ölçekli uygulamalara kadar geniş ölçekte kullanım bulmasına imkân tanımaktadır. Her ne kadar tek hücreli lityum iyon bataryalarda (elektronik cihazlarda kullanılan) şarj deşarj yönetimi bulunmasa da bu bataryaları şarj ve deşarj yönetiminin uygulanma işlemi esnek ve tam şarj zorunluluğu yoktur. Pilin ömrü, çevrimi ve kapasitesi, düşen fiyatın aksine yıllar içinde teknolojik gelişmeler ile uzamıştır. Ancak sıcaklık limitleri ve aşırı yükleme durumları gibi dikkate alınması gereken önemli güvenlik sorunları vardır. Lityum iyon bataryaların optimum çalışma sıcaklığı 25 °C'dir ve sıcaklık değişiminin bataryanın yaşlanması üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu nedenle soğutma, lityum iyon batarya kabin tasarımında dikkate alınması gereken bir diğer önemli konudur. Bu durum kullanılacak uygulamanın çevresel koşullarına göre farklı tasarımları beraberinde getirmektedir. Sıcaklık iç enerji tüketimini de arttırabileceği gibi sistem verimi üzerinde direk etkisi olacaktır. Hücre sıcaklık aralığının piller üzerinde önemli bir etkisi vardır ve bu gereksinim, batarya yönetim sistemi (BYS) tarafından yönetilmektedir. BYS, hücreler

arasındaki akımı, voltajı yönetmek ve akım, voltaj ve sıcaklık açısından zararlı bir çalışma durumunda hücreleri korumakla yükümlüdür. BYS, güvenilir ve güvenli çalışma elde etmek ve değişen hücre SOC değerini dengelemektedir. Başka bir deyişle BYS, enerji depolama sisteminin iç yönetimini sağlayan ana kontrolcüdür. Enerji yönetim sistemi (EYS) sistemi tarafından gelen komutlara uygun olarak bataryanın gerekli aksiyonları almasını sağlamakla yükümlü iç kontrolcüdür.



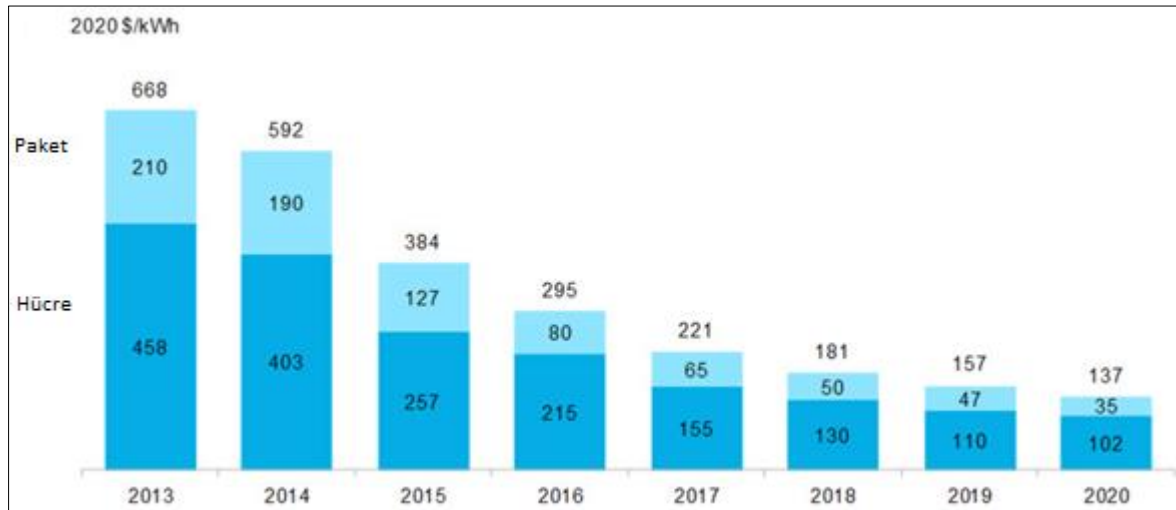
Şekil 2.4. Enerji depolama sistem şeması [8]

Şekil 2.4’de görüldüğü üzere, lityum iyon bataryalar başlıca, enerji yönetim sistemi, batarya sistemi, güç dönüştürücü sistemlerinden oluşmaktadır. Batarya sistemi ise kendi içinde hücreler, modüller, batarya yönetim sistemi, konteynır yapılarından meydana gelmektedir. Her bir ekipmanın sistem içindeki rolü birbirinden farklıdır [8].

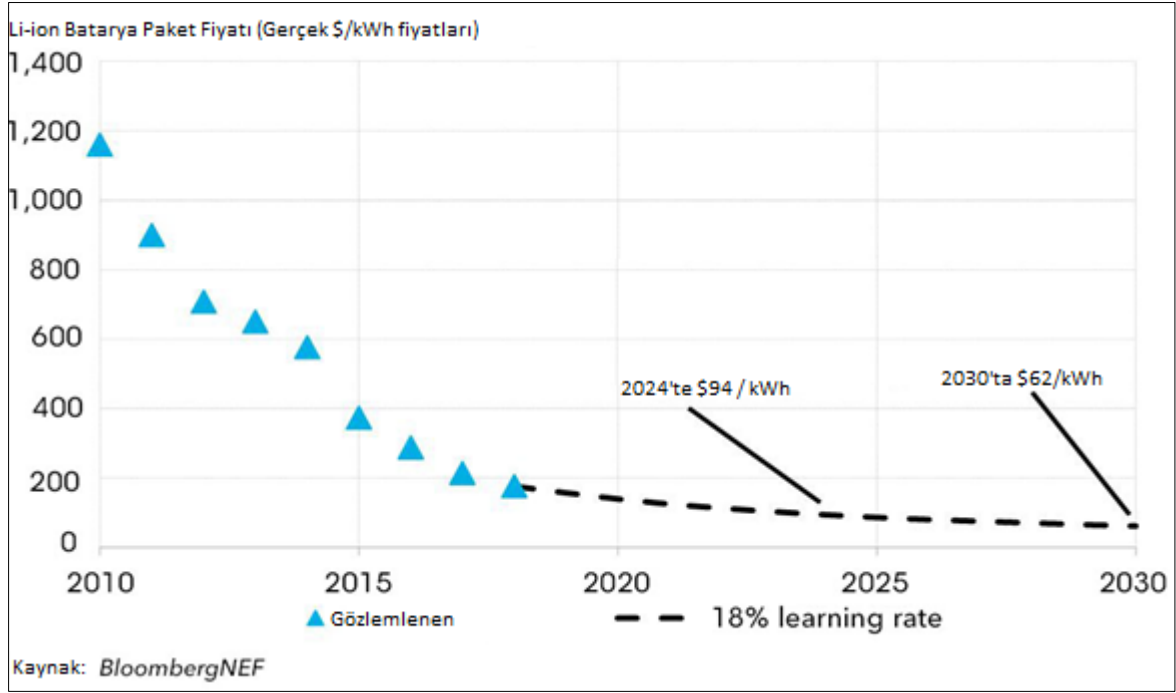
Enerji yönetim sistemini, enerji depolama sisteminin dış dünya ve batarya yönetim sistemi arasında iletişimi ve kontrolü sağlayan kontrolcüsü olarak adlandırmak mümkündür. Enerji yönetim sistemi sayesinde, enerji depolama sisteminin çalışma algoritmaları aktif hale getirilebilmektedir. Bunun yanında, olası bir dış dünya ile iletişim kopukluğu oluşması, acil durum vb. durumlarda enerji depolama sisteminin nasıl çalışacağı gibi komutlar bu sistem içerisinde mevcuttur.

Batarya yönetim sistemi ise, enerji depolama sisteminin iç kontrol yapısından sorumlu olup, enerji yönetim sistemi ve güç dönüştürücü ile sürekli olarak iletişimi sağlayan enerji yönetim sisteminden gelen komutlara göre batarya hücrelerinin şarj deşarj durumunu ayarlayan yapıdadır. Aynı zamanda, farklı sıcaklık koşullarına göre, batarya hücrelerinin bulunduğu konteynırın ısıtılması soğutulması gibi kontroller de batarya yönetim sisteminin sorumluluğundadır. Buna ek olarak, hücreler arası gerilim dengelenmesi, her bir hücrenin sıcaklık durumuna göre şarj ya da deşarj edilmesi de yapının kontrolündedir.

Lityum iyon bataryaların son yıllarda en çok tercih edilen depolama aracı olması ve gelişen teknoloji sayesinde lityum iyon bataryaların maliyetleri Şekil 2.5’de görüldüğü üzere hızla düşmektedir. Batarya fiyatları için yayınlanan hedef fiyatlar ortalama fiyatlar olup, hacim ve paket boyutlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [4]. Düşen fiyatların lityum iyon bataryaların yaygınlaşmasına olumlu etkisi bulunmaktadır.



Şekil 2.5. Ortalama paket ve hücre fiyatları [10]

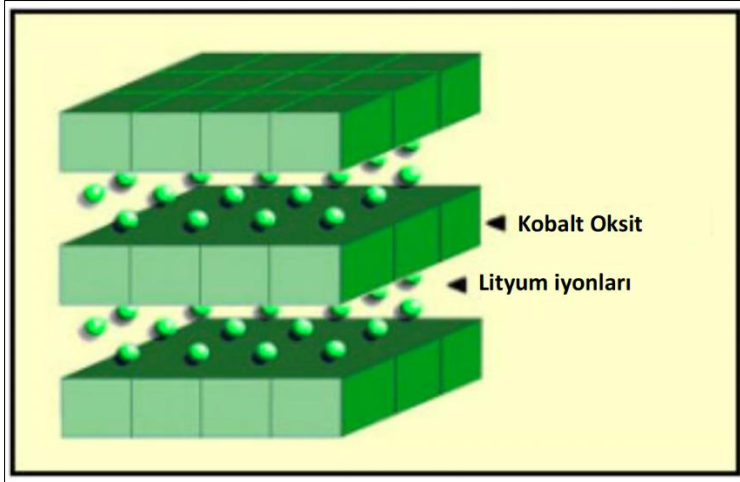


Şekil 2.6. Önümüzdeki 10 yıl için lityum iyon batarya fiyat öngörülleri [11]

Lityum kobalt oksit, lityum-demir fosfat, lityum manganer oksit, lityum nikel-kobalt-alüminyum oksit, lityum nikel-manganer-kobalt oksit gibi li-ion pil çeşitleri mevcuttur. İlgili li-ion piller, kullanılan kimyasalların kısaltmalarına göre isimlendirilmiştir.

Lityum kobalt oksit (LiCoO_2) bataryalar

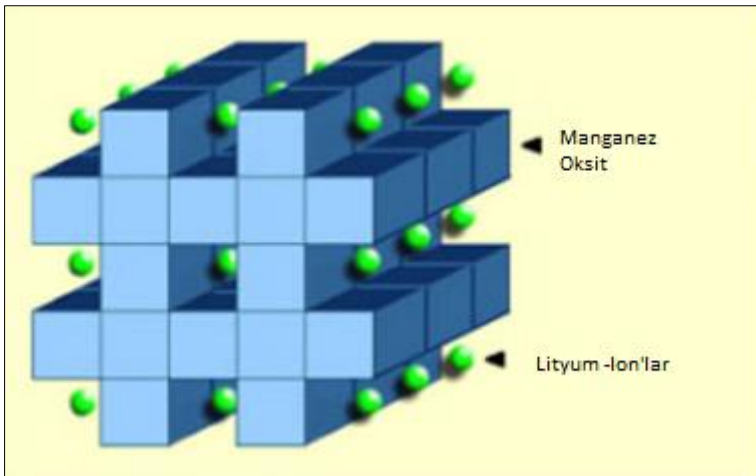
Lityum kobalt oksit, yüksek özgül enerjisi nedeniyle li-ion pil türleri arasında popüler tercihlerden birisidir. Lityum kobalt oksit pillerde kobalt oksit katot ve grafit karbon anot bulunmaktadır. Deşarj sırasında elektronlar anottan katoda hareket eder; şarj sırasında elektronlar ters yönde akmaktadır. Nispeten kısa ömür, düşük termal kararlılık ve yük kapasitesi bu pilin dezavantajlarıdır [12].



Şekil 2.7. Lityum kobalt oksit yapısı

Lityum manganez oksit (LiMn_2O_4) bataryalar

Li-ion Manganez Oksit ilk olarak 1983'te bulunmasına rağmen, 1996'da lityum manganez oksitin katot olarak kullanılmasıyla ticarileştirilmiştir. Yapı, elektrot üzerindeki iyon akışını iyileştiren, daha düşük iç direnç ve daha iyi akım yönetimi sağlayan üç boyutlu bir spinelden oluşmaktadır. Bir spinel yapısı, yüksek termal stabilite ve artırılmış güvenlik sağlamakla birlikte, döngü ve takvim ömrünü sınırlamaktadır [7].



Şekil 2.8. Lityum manganez oksit yapısı

Düşük direnç ve daha spesifik enerji nedeniyle bu piller hızlı şarj ve deşarj için uyumludurlar. Avantajları termal stabiliteleri ve güvenli olmalarıdır, bununla birlikte çevrim ömrü ve raf ömrü diğerlerine göre nispeten sınırlıdır. Enerji kapasitesini artırmak ve

kullanım ömrünü uzatmak için li-ion nikel manganez kobalt oksit ile manganez karışımıyla kullanılabilir.

Lityum nikel manganez kobalt oksit (LiNiMnCoO_2) bataryalar

Bu tür batarya, birlikte kullanılan manganez ve nikelden oluşmaktadır. Nikel, yüksek enerjisi, ancak zayıf stabilitesi ile, manganez, düşük iç direnci ve yüksek özgül enerjisi ile bilinmektedir. Üreticiler, kobalt yerine katot malzemesi olarak nikel kullanmışlardır.

En başarılı li-iyon sistemlerinden biri, nikel manganez-kobaltın katot kombinasyonudur. Spesifik enerji açısından üstündür. Bu nedenle elektrikli araç ve enerji depolama sistemlerinde tercih edilmektedir. Bu pil umut verici uygulamaları dolayısıyla performans göstergelerini artırmaya yönelik geliştirme faaliyetleri halen devam etmektedir.

Lityum demir fosfat (LiFePO_4) bataryalar

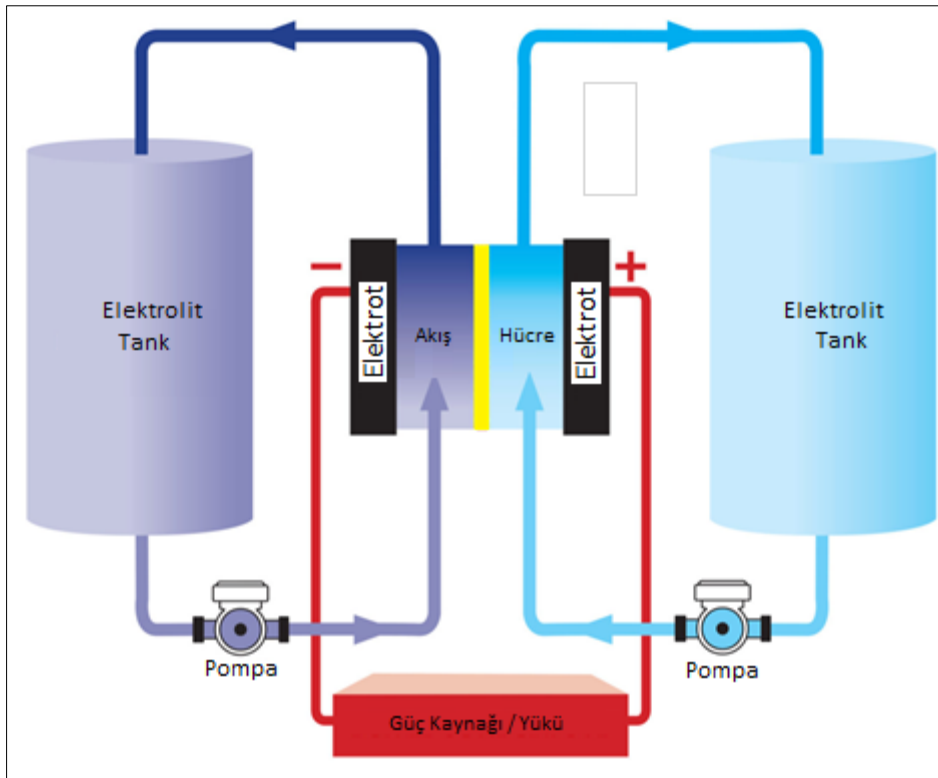
Texas Üniversitesi, 1996 yılında şarj edilebilir li-ion piller için bir katot malzemesi olarak fosfatı keşfetmiştir. Lityum fosfat, düşük iç direnç nedeniyle iyi bir elektrokimyasal performansa sahiptir ve bu nano ölçekli fosfat malzemesi olarak kullanılabilir. Lityum fosfat bataryalar, bu iyi termal kararlılığa ek olarak uzun çevrim ömrüne ve yüksek akım derecesine sahiptir.

Lithium titanate ($\text{Li}_2\text{Ti}_5\text{O}_3$) bataryalar

Lityum titanat enerji depolama sistemi 1980'lerden beri bilinmektedir. Lityum titanat, bir li-iyon pilin anodundaki grafitin yerini alır. Lityum titanat malzeme bir spinel yapı oluşturur. Katot, lityum manganez oksit olabilir. Lityum titanat nominal hücre gerilimi 2,40 V'tur. Bu pil, 10C'ye kadar hızlı şarj ve deşarj oranına sahiptir (nominal kapasitenin 10 katı). Mükemmel düşük sıcaklık deşarj özelliğine sahiptir. Başlıca avantajları, uzun çevrim ömrü, iyi termal kararlılık, artırılmış güvenlik, yüksek akım oranı ve toleranstır. Titanat fiyatları nedeniyle, bu teknoloji pahalıdır.

2.3.1. Redoks akışlı bataryalar

Redoks akışlı bataryalar (RFB), elektrolitin bir veya daha fazla elektrokimyasal hücreden oluştuğu bir tanktan diğerine aktığı yeniden şarj edilebilir bir bataryadır. Redoks akışlı bataryalar, oksidasyon yoluyla şarj edilebilir ve boşaltılabilir. Basit bir şekilde, redoks akışlı bataryanın enerji kapasitesi, tanklarda depolanan elektrolit miktarına bağlıdır. Elektrokimyasal hücre, elektriksel olarak seri veya paralel bağlı olabilir.



Şekil 2.9. Redoks akışlı batarya yapısı [13]

Li-ion ile karşılaştırıldığında, çevrim sayısı, neredeyse hiç bozulma olmadan uzun hizmet ömrü, yüksek çevrim sayısı bu teknolojinin avantajları arasında yer almaktadır. Bununla birlikte, verimlilik oranı daha düşüktür, gerekli pompalar, sensörler, akış ve güç yönetimi ve ikincil muhafaza tankı nedeniyle nispeten daha karmaşıktır. Düşük enerji yoğunluğu nedeniyle (5-6 kWh/m²), geniş alan mevcut ise bu teknoloji tercih edilecektir.

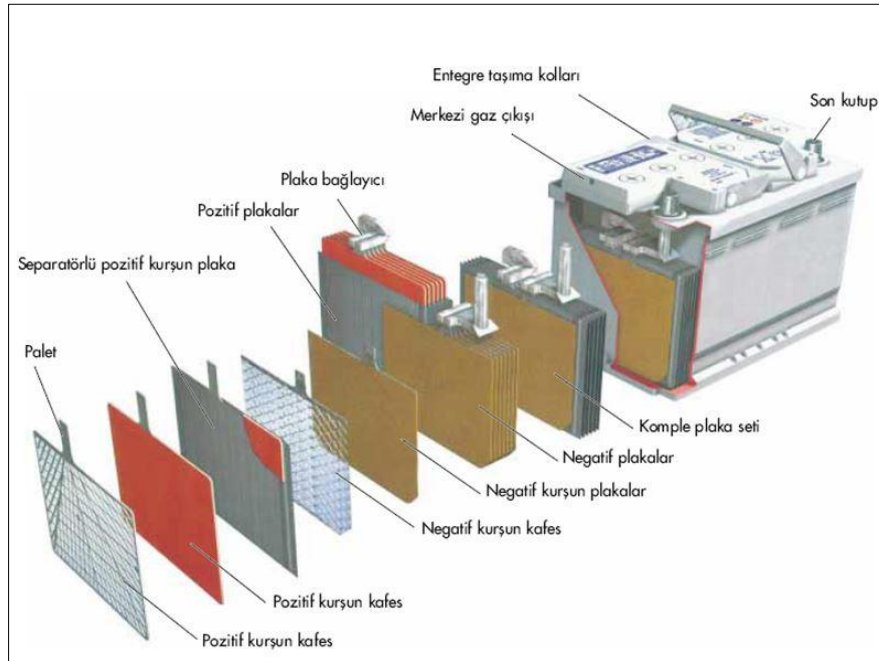
Redoks çiftlerine bağlı olarak, genellikle redoks batarya tipinin bir açıklaması olarak kullanılır. İyi bilinen redoks çiftlerinden bazıları, Vanadyum redoks pil, Çinko-brom pil, polisülfid brom pildir.

Vanadium akışlı bataryalar

Vanadyum redoks akış pili, kimyasal potansiyel enerjiyi depolamak için farklı oksidasyon durumlarında vanadyum iyonları kullanan şarj edilebilir bir akış bataryadır. Hücre gerilimi 1,4 V – 1,6 V olup, verim oranı %80 civarındadır.

2.3.2. Kurşun asit bataryalar

Kurşun asitli bataryalar, günlük hayatta bilinen ve yaygın olarak kullanılan batarya/akü türlerinden biridir. 1859'da Fransız fizikçi tarafından icat edilmiştir. En düşük enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen bu bataryalar üretim kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir [14]. Esas olarak kurşun asit bataryalar araç motorunu harekete geçirmek/çalıştırmak için kullanıldığından, araçlarda ve yüksek yük akımı gerektiren diğer uygulamalarda kullanılmaktadır. Otomobil endüstrisinde düşük kapasite gereksinimi nedeniyle kurşun asit aküler daha çok tercih edilmektedir. Kurşun asitli piller, diğer türlere göre en eski, şarj edilebilir ve en olgun batarya türüdür.



Şekil 2.10. Kurşun asit batarya yapısı [15]

Üretim kolaylığı ve en gelişmiş teknolojilerden biri olması nedeniyle bu batarya hücresi fiyatı, düşük enerji yoğunluğunun (25-40 Wh/kg; 70-100 Wh/l) aksine diğerlerine göre daha düşüktür [14]. Daha düşük enerji yoğunluğu nedeniyle, kullanımda eğer ağırlık ve hacim

kısıtlamaları var ise, bu teknolojinin kullanılması uygun olmayabilir. Öte yandan, teknolojinin olgunluğu, düşük yatırım maliyetleri ve göreceli yüksek verimlilik, bu türün ana avantajıdır.

Kısmi deşarj durumunda bu pillerin kullanılması mümkün değildir. Batarya tam şarjdan yoksun bırakıldığında kalıcı sülfatlaşma meydana gelir. Sülfatlaşma meydana geldiğinde, pil şarj süresi uzar, pil ömrü önemli ölçüde kısalır [14]. Tam pil arızası olabilir ve pil enerji yoğunluğu azalır. Bu nedenle bu piller tam şarjlı olarak kullanılmalı veya kullanıldıktan sonra kısa sürede tamamen şarj edilmelidir. Bu nedenle her türlü şebeke ölçekli batarya uygulamalarında kullanıma pek uygun değildirler. Bu pillerin bir diğer negatif yanı da batarya yönetim sistemi eksikliği olup, bu bataryalarda batarya yönetim sistemi bulunmamaktadır. Bu nedenle, pilin izlenmesi ya da yönetilmesi gerekiyorsa, BYS'nin yerini alacak başka bir sistem olmalıdır.

Ultra bataryalar

Ultra batarya olarak adlandırılan başka bir teknoloji daha bulunmaktadır. Ultra bataryalar kurşun asit akülerin gelişmiş versiyonudur ve ultra bataryalarda BYS sistemi kullanılmaktadır. Böylece batarya hücreleri kontrol edilebilmektedir. Ancak bu teknoloji henüz olgunlaşmamış olup, gelişme aşamasındadır. Ultra batarya sistemi, kısmi deşarj uygulamasına da izin vermektedir.

2.3.3. Batarya karşılaştırmaları

Enerji depolama teknolojilerinin, şarj/deşarj süresi ve verimliliği, yaşam döngüsü, çevresel etkiler dışında avantajlı ve dezavantajlı yönleri de bulunmaktadır. Şebeke ölçeğinde kullanılan enerji depolama türlerine ilişkin karşılaştırma tablosu Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de görülmektedir [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23].

Çizelge 2.1. Enerji depolama teknolojilerinin teknik karşılaştırma tablosu

Teknoloji	Kapasite (MW)	Olgunluk Seviyesi	Verimlilik(%)	Tepki Süresi	Kullanım Yılı (Yaşam Döngüsü)	Yatırım Maliyeti (\$/kW)	Yatırım Maliyeti (\$/kWh)	Şarj Süresi	Boşalma Süresi
Kurşun - Asit	0-40	Olgun	70-90	5-10 ms	3-15 (2000)	300-600	200-400	dk - gün	saniye - saat
Ultrabattarya	0-36	Geliştirme Devam Ediyor	-	5 ms	3-15 (2000)	-	200	dk - gün	saniye - saat
Sodyum sülfat (NaS)	0.05-34	Ticarileşti	80-90	~1 ms	10-15 (2500 - 4500)	1000-3000	300-500	saniye - saat	saniye - saat
Li-ion	0-100	Kullanımda	85-90	20 ms - s	5-15 (1000 - 20000)	900-4000	600-3800	dk - gün	dk - saat
Nikel-Kadmiyum	0-40	Ticarileşti	60-65	ms	10-20 (2000-3500)	500-1500	400-2400	dk - gün	saniye - saat
Metal - Hava	0-0.01	Geliştirme Devam Ediyor	~50	ms	200	100-250	10-60	Saat- ay	saniye - 24+ saat
Vanadyum Redoks (VRB)	0.03-3	Ticarileşti	~85	< 1 ms	5-10 (12000 +)	600-1500	150-1500	Saat- ay	saniye - 10 saat

Çizelge 2.2.'de enerji depolama teknolojileri avantaj, dezavantaj ve uygulama alanları açısından değerlendirmeler verilmiştir.

Çizelge 2.2. Enerji depolama teknolojilerinin karşılaştırmaları

Teknoloji	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulamalar							
			Güç Kalitesi	DÜ Entegrasyon	Acil Destek	Talep Yönetimi	Yük Yönetimi	Şebeke Genişletme	Şebeke Desteği	Voltaj Regülasyonu
Kurşun - Asit	Düşük maliyeti	Düşük enerji yoğunluğu	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ultrabattarya	Düşük maliyet yüksek performans	Düşük enerji yoğunluğu	✓	✓	✓	✓	✓	♦	✓	✓
Sodyum sülfat (NaS)	Yüksek enerji yoğunluğu ve verimlilik	Yüksek maliyet	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Li-ion	Yüksek enerji ve güç yoğunluğu ve verimlilik	Yüksek maliyet	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Nikel-Kadmiyum	İyi enerji ve güç yoğunluğu	Tehlikeli kimyasal içermesi	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Metal - Hava	Düşük maliyet yüksek enerji yoğunluğu	Düşük tekrar şarj edilebilme yetkinliği	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vanadyum Redoks (VRB)	Yüksek Kapasite	Düşük güç ve enerji yoğunluğu	♦	✓	✓	♦	♦	♦	♦	✓

Kurşun asitli bataryalar, araçlarda kullanılması nedeniyle en çok kullanılan akülerden biridir. Ancak, yüksek güç yoğunluğu sayesinde, genel olarak şebeke ölçekli uygulamalar için li-ion piller tercih edilmektedir. Bunun diğer nedenlerinden biri de gelecekte enerji depolama sisteminden frekans ve gerilim düzenleme desteği beklenecek olmasıdır. Dolayısıyla li-ion bazlı bataryalar yüksek güç yoğunluğuna, yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyan bu uygulamalar ayrıca yüksek kapasite, hızlı şarj/deşarj, dayanıklı teknolojilere daha uygundurlar.

3. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN AMAÇ FONKSİYONLARI VE ŞEBEKE BAĞLANTI NOKTALARI

Bu bölümde, enerji depolama sistemleri için kullanılabilecek amaç fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonları, enerji yönetim sistemi (EYS) içerisinde işletilen bir yazılım olarak kullanılmaktadır. Uygulama içerisinde ilgili fonksiyon etkinleştirilebileceği gibi farklı bir fonksiyon seçilerek çalışma durumu da değiştirilebilir. Ancak, maksimum ve minimum güç ve enerji kısıtlamaları, şarj ve deşarj hızı sınırlaması sebebiyle, enerji depolama sistemi amaçlanan her uygulama için uygun olmayabilir. Maksimum ve minimum kısıtlamalar aşılmadığı müddetçe yeni kısıtlar yazılım üzerinden getirilebilmektedir

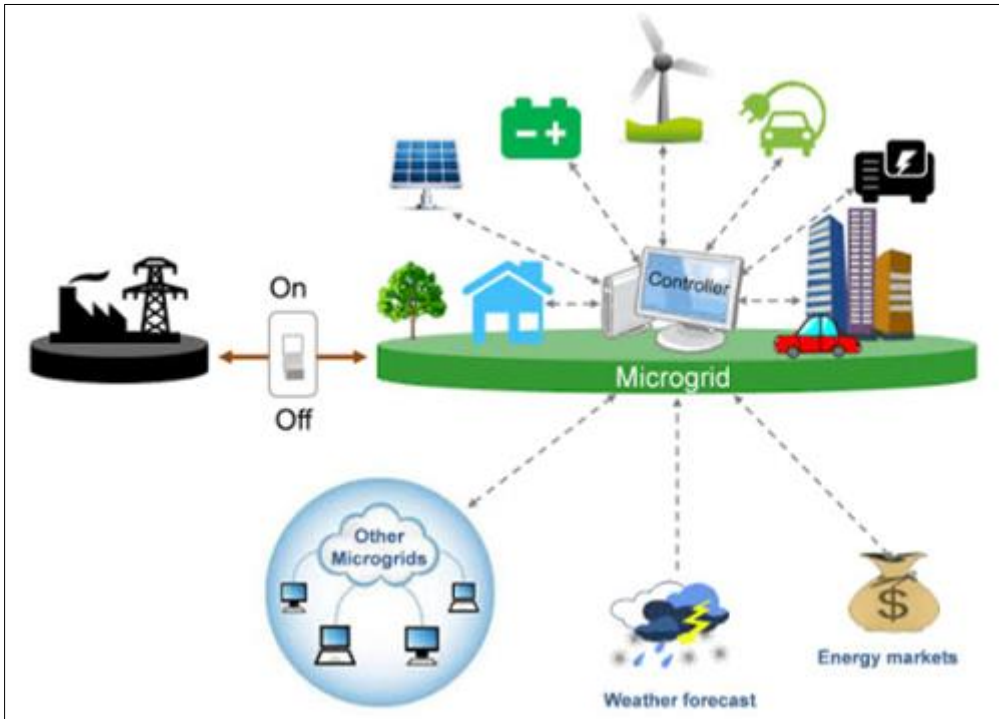
3.1. Doğrudan Şarj / Deşarj Yönetimi İşlevi

Bu fonksiyon, doğrudan şarj ve deşarj yönetimini en basit şekilde tanımlamaktadır. Enerji depolama sistemine bağlı şebeke işletmecisi ya da enerji depolama sahibi tarafından gelen şarj/deşarj talebine göre sistem çalışmakta olup, bu fonksiyon fiyat bazlı şarj/deşarj yönetimi, güç bazlı şarj/deşarj yönetimi ile birleştirilebileceği gibi ayrı olarak da ele alınabilir. Çünkü güç ve fiyat bazlı şarj deşarj yönetimi fonksiyonları başka bir ekipman veya sistemin referans noktası olarak tanımlanmıştır. Bu bölüm altında koordineli şarj/deşarj yönetimi fonksiyonu işlenmektedir. Bu fonksiyonda doğrudan talepte bulunmanın yanı sıra çizelgeleme sistemi de uygulanabilmektedir[24].

Doğrudan şarj/deşarj yönetimi işlevi ile ilgili olarak, özellikle üretim dalgalanması açısından PV ve rüzgar türbinlerinin olumsuz etkilerini azaltmak için enerji depolama sistemleri içeren hibrit santraller bir çözüm olabilir. Dağıtık üretimlerin izlenerek çalışması da doğrudan şarj deşarj yönetimi içerisinde ele alınabilmektedir. Pil kullanımı içerisinde, belirtilen SOC maksimum ve minimum limitleri dahilinde kalmak kaydıyla, yenilenebilir enerjinin dalgalanması, üretim eğrisinin yumuşatılması için EDS kullanılabilir. Temel olarak, yenilenebilir kaynaklar için referans güç seviyesi, kurulu kapasitelerine ve anlık üretim gücüne bağlı olarak tanımlanmıştır. Anlık üretim eğrisindeki keskin hareketi yumuşatmak için enerji depolama sistemi bir alternatiftir. X.li ve arkadaşlarının yaptığı yayında, yenilenebilir kaynakların dalgalanmasının çözümü için iki farklı enerji depolama sistemi yönetim çözümü önerilmiştir [25].

3.2. Mikro Şebeke Yönetimi

Mevcut elektrik şebekesi radyal yapıdan oluşmaktadır. Dağıtık üretim kaynaklarının kurulmasıyla birlikte çift yönlü enerji akışı sağlayacak sistemler kurulmasına rağmen, bu sistemlerin eksikliklerden birisi elektrik kesintisi anında hiçbir üretim kaynağının kullanılamamasıdır. Mikro şebekeler, geniş alan uygulamalarının yanı sıra yerel enerji yönetimi için de optimum çözüm olabilmektedir. Mikro şebekeler, normalde şebekeye bağlı olarak çalışan ve şebekeden ayrılabilen bir grup kaynak ve yükten oluşan merkezi veya merkezi olmayan sistemler olarak tanımlanabilir. Mikro şebeke sistemi, tanımlanan teknik veya ticari koşullara göre otonom kararlar alabilmektedir. Mikro şebekeler; mikro şebeke kontrolörleri, yükler, mikro türbinler, rüzgâr türbinleri, PV paneller, kojenerasyonlar, trijenerasyonlar, yakıt hücreleri vb. gibi enerji kaynakları ve Şekil 3.1'de görüldüğü gibi enerji depolama sistemlerinden oluşmaktadır. Farklı amaçlar için AC, DC ve hibrit mikro şebekelerin yanı sıra askeri, endüstriyel, uzak konum, kamu hizmeti gibi çeşitli mikro şebeke uygulamaları da mevcuttur.



Şekil 3.1. Mikro şebeke mimarisi [26]

Mikro şebeke sistemi çevrim içi ve çevrim dışı çalışabilmelidir. Sistemin kurulumu esnasında güç kablolarının uygulanmasına ek olarak, genel olarak iletişim hattı (gsm, data hattı vb.) bulunmaktadır. Bu nedenle, mikro şebeke sistemi, yerel ve uzak veri sunucusu,

enerji analizörü, hava durumu bilgisi ve tahmin vb. dahil olmak üzere gerekli ekipmanlara bağlanabilmektedir. Bu şekilde, mikro şebeke kontrolcüsü yaklaşan olaylar için gerekli işlemleri tahmin edebilir. Ve bu, tahminlerine göre gerekli aksiyonları almasını sağlayabilir. Eğer sistem uygunsa, iletişim kaybı durumunda da sistem çalışmaya devam edebilmelidir.

Mikro şebeke, mikro şebeke denetleyicisi, yükler, enerji kaynakları gibi ekipmanlardan oluşsa da, mikro şebeke denetleyicisi dışında ekipmanlara entegre yerel denetleyiciler de bulunmaktadır. Bu şekilde, her kaynak kendi içinde yönetilebilir olacaktır. Ana kontrolör dağıtılmış kontrolör ile bağlantılı olmalı ve iletişim kaybı durumunda dağıtılmış kontrolör de bağımsız olarak güvenli bir şekilde çalışmalıdır. Bu durum sistemde kullanılan tüm kontrolcülerin akıllı bir yapıya sahip olmasını gerektirmektedir.

[27]'de mikro şebekeler konusunda detaylı bir inceleme yapılmıştır. Mikro şebeke konsepti, tek kontrol edilebilir sistem ile mikro kaynaklı çalışma şeklinde tanımlanabileceği gibi, bölgeye güç ve ısı sağlamak için yüklerin kümelenmesi şeklinde de tanımlanır. Ancak mikro kaynaklar, güç elektroniğine sahip <100 kW birimler olarak belirtilmektedir. Bu makale de, mikro kontrolcülerin, sistemin beyni olması nedeniyle mikro şebeke sistem ekipmanları arasında en önemli ekipman olarak tanımlanmaktadır. Bu sistem hem veri bağlantısı sayesinde hem de veri bağlantısı olmadan çalışabilmekte ve yerel bilgileri kullanarak milisaniyeler içinde aksiyon alabilmektedir. Dağıtık sistemler radyalden daha karmaşık olsa da bu çalışmada, mikro şebekenin nasıl çalıştığını tanımlamak için radyal elektrik şebekesini kullanmaktadır. Mikro şebeke, ada şebekede çalışabiliyorsa, sistem depolanan kapasiteden gerekli gücü sağlayarak ada şebekede çalışmaya sorunsuz ve kesintisiz bir şekilde geçiş sağlayabilmektedir. Mikro şebeke denetleyicisi, bireysel güç ve voltaj ayar noktaları sağlamak, mikro şebeke sisteminin iletim sistemi ile operasyonel sözleşmeleri yerine getirmesini sağlamak, adalanma için mantık ve kontrol sağlamak için bazı temel işlemlere sahiptir. Aynı çalışma, mikro şebeke sistemine genel bir bakış sunmaktan ziyade yeni yaklaşımlar ve sistemlerin oluşturulmasına vesile olmuştur.

Mikro şebekelerin, dağıtık üretim ve enerji depolama sistemlerine entegrasyonu çok önemlidir [28]. Bu çalışmada, düşüş kontrolü AC ve DC mikro şebekeleri önermekte ve üç seviyeli kontrol sistemini tanımlanmaktadır: 1- Çıkış empedansı sanal döngüsünü içeren düşüş yöntemine dayalı birincil kontrol; 2) ikincil kontrol, birincil kontrol tarafından üretilen sapmaların geri yüklenmesine izin vermesi ve 3) üçüncül kontrol, mikro şebeke ile harici

elektrik dağıtım sistemi arasındaki güç akışını yönetmesi şeklindedir. Bu çalışma ayrıca, elektrik düğümleri (kaynaklar, yükler ve şebeke) ile mikro şebeke denetleyicisi arasındaki akıllı güç ara yüzlerinin zorunlu olduğunu tanımlamıştır. Mikro şebekenin iç kontrol döngüleri açısından, mikro şebekeyi daha kararlı yürütmek için akım kaynaklı eviriciler ve gerilim kaynaklı eviriciler birlikte kullanılabilir. Gerilim kaynaklı invertörler (VSI'ler), elektrik şebekesi ile senkronize kalmak için herhangi bir harici referans veriye ihtiyaç duymadıklarından ve gerilimi sabit tutmak için gerekli olmasından dolayı, enerji depolama sistemlerinde sıklıkla kullanılır. Akım kaynaklı inverterler (CSI'ler), şebeke ile sürekli senkronize kalmak için iç akım döngüsü ve faz kilitli döngüsünden oluşması nedeniyle maksimum güç izleme algoritmaları gerektiren PV ve küçük rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadır [28]. CSI'ler ayrıca adada veya otonom operasyonda olsun şebekeye akım enjekte etmek için kullanılırlar.

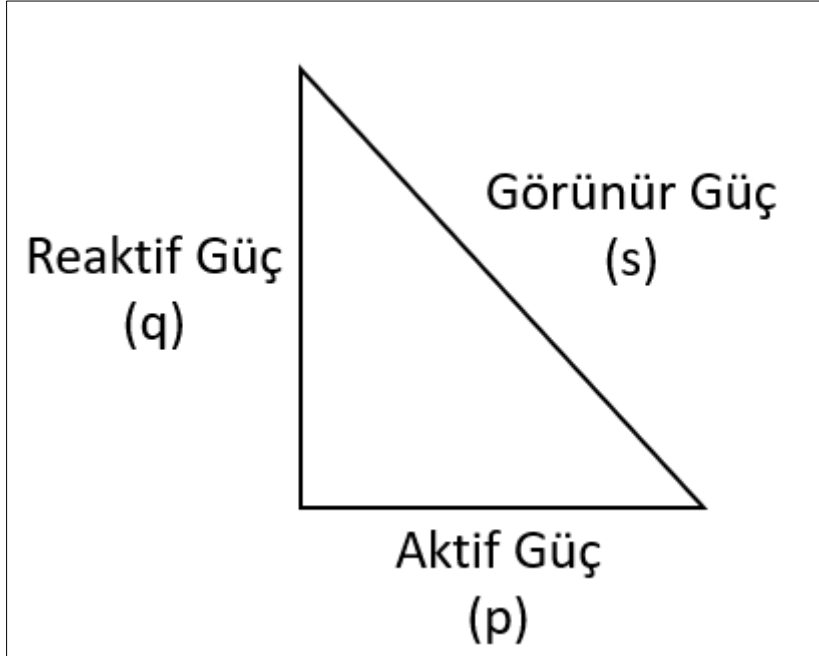
J.A.P. Lopes ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma da, ada modunda mikro şebeke sisteminin kontrol stratejilerini açıklamakta ve yük atma ve enerji depolama sistemlerini ele almaktadır. Bu çalışmada, mikro şebeke sistemi alçak gerilim için tanımlanmıştır ve iki kontrol seviyesi vardır. Birinci seviye OG/AG trafo merkezine yerleştirilmiş ana kontrol ünitesi olup, buna ek olarak yükler veya yükler grubunda yük kontrolörü ve kaynaklarda veya kaynak gruplarında mikro kontrolör bulunmaktadır. Mikro kontrolör, aktif ve reaktif güç üretimini kontrol etmektedir [29].

3.3. Reaktif Güç Desteği

Elektrik şebekelerinde kullanılan jeneratörler, motorlar, yenilenebilir enerji kaynakları, transformatörler, kablolar, elektronik cihazlar vb. reaktif güç gerektiren birçok ekipman bulunmaktadır. Her ekipmanın gerekli reaktif gücü tanımlamak için güç faktörü oranı vardır. Reaktif güç, mesken müşterisi için ölçüme tabi tutulmazken, ticari, sanayi kullanıcıları için faturaya tabidir bir diğer deyişle ölçümü gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, endüstri kullanıcıları para cezalarını önlemek için güç faktörü kompanzasyonu uygulamaktadır. Faturaya tabi olsun veya olmasın, elektrik şebekesinde kullanılan ekipmanların etkilerinden dolayı şebeke üzerinde reaktif gücün etkisi vardır. Buna ek olarak, şebeke operatörlerinin elektrik şebekesinin voltaj seviyesini kontrol etmek için reaktif gücü yönetmeleri gerekmektedir.

Temel anlamda;

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



Şekil 3.2. Güç üçgeni

S görünür güç olup birimi Volt-Amper (VA), P aktif güç olup birimi Watt (W), Q ise reaktif güç olup birimi Volt Amper Reaktif (VAR) şeklindedir. Görünü güç ile aktif güç ne kadar birbirine yakın ise sistem reaktif güç açısından o kadar iyi olarak tanımlanmaktadır. Sistemin reaktif güç durumunu tanımlamak için güç faktörü tanımı da kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi $\cos \phi$ değerleri görünür güç ile aktif güç arasındaki açıyı tanımlamakta olup, görünür güç değerinin kosinüsü aktif güç değerini vermektedir.

$$P = S \times \cos \Phi$$

Geleneksel elektrik şebekesi, kullanılan ekipmanlar nedeniyle endüktiftir ve bu nedenle genellikle kapasitif yük bankaları çeşitli yerlere kurulmaktadır. Elektrik şebekesi canlı ve günden güne büyüyen ve gelişen bir yapı olmasından dolayı bu tür çözümler sınırlı bir süre için işe yaramaktadır. Bir süre geçtikten sonra, kurulu kapasitif yük bankası kapasitesi yetersiz kalabilmektedir. Bu noktada kalıcı çözüm için elektrikli depolama sistemi gibi esnek reaktif güç sağlayan ekipmanların ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ekipmanların reaktif olumsuz etkilerini azaltmak ve elektrik şebekesi voltajını korumak için enerji depolama sistemleriyle

ilgili olarak, merkezi ve dağıtık enerji depolama uygulamalarının etki açısından detaylı analizlerinin gerçekleştirilmesi elde edilecek faydanın anlaşılması açısından faydalı olacaktır.

Bu çalışmada [30], enerji depolama sistemlerinin orta gerilim dağıtım sistemlerindeki gerilim destekleri incelenmiştir. Kopenhag'ın bir bölümünün 10 kV dağıtım şebekesindeki voltaj düşüşünü azaltmak için reaktif güç destek algoritması kullanılmıştır. Enerji depolama sistemi sayesinde yatırım ötelemesinin mümkün olabileceği belirtilmektedir. Aktif gücü kontrol etmek için bu çalışma, enerji depolama sisteminin SOC değerinin sınırdan olup olmadığını kontrol etmeye dayalı bir algoritma önerilmekte olup, önerilen kontrol algoritması tepe yüklerin tıraşlanmasını da sağladığı belirtilmiştir. Reaktif gücü kontrol etmek için, Q-U düşüş kontrolüne dayalı olarak üst ve alt voltaj sınırları arasındaki şebeke voltajını düzenlemek için bir algoritma önerilmekte, voltaja göre reaktif güç enjeksiyonu veya absorpsiyon gerçekleştirilmektedir.

Diğer bir çalışmada [31], enerji depolama sistemlerinin, reaktif güç gibi yan hizmet destekleri kapsamında kullanılması önerilmektedir. Bu makale, dağıtım şebekesi operatörü (DŞO) adına, kontrol edilemeyen üretim kaynaklarını ve onların etkilerini düzenlemek amacıyla enerji depolama sistemleri önerilmektedir. Böylece elektrik şebekesinin stabilitesinin sağlanabileceği belirtilmekte olup, bu kapsamda dağıtık depolama çözümleri önerilmektedir. Dağıtık üretimlerin DŞO tarafından kontrol edilememesinden dolayı, enerji depolama sistemleri ile istenmeyen etkileri en aza indirilerek, şebeke üzerinde sistem regülatörü tarafından tanımlanan limitler dahilinde sürdürülebilir gerilim seviyeleri elde edilebilmektedir. Tartışılan diğer bir konu da, enerji depolama sisteminin optimum konumu ile ilgilidir. Bu da yan hizmetleri desteklemek için bir diğer önemli konu olup, sistem verimliliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yan hizmetler sağlamak için, uygulamaya bağlı olarak enerji depolama veya diğer kaynaklar için farklı voltaj seviyesi bağlantı gereksinimleri olabilmektedir.

Bu çalışmada [32], elektrik dağıtım sistemlerine fotovoltaiik (PV) sistem entegrasyonunun zorlukları ve PV sistemlerinin olumsuz etkilerini azaltmak için enerji depolama sistemleri entegrasyonunun voltaj, aktif güç gibi sorunlarını çözme kapsamındaki etkileri tartışılmaktadır. Fotovoltaiik sistemlerin olumsuz etkilerinin azaltılması, hem merkezi hem de dağıtık olan enerji depolama sistemleri için analiz edilmiş, ancak esas olarak dağıtım trafo

merkezindeki MW ölçekli PV enerji santrallerine bağlı, yine MW ölçekli enerji depolama sistemlerine odaklanılmıştır. Dağıtım şebekesinin gerilimini korumak için, fotovoltaiğin bağlı olduğu dağıtım şebekesi içinde enerji depolama sistemleri kullanılmıştır.

Dağıtım sisteminde rüzgâr türbinleri ve PV sistemlerinin sayıları artmıştır; Ancak sistem kısıtlamaları ve artan enerji penetrasyonu bir çok sorunu beraberinde getirmekte ve bu sorunların çözümü noktasında yenilenebilir enerji üretiminin kısılması bir alternatif oluşturabilmektedir. Bu durum ise yenilenebilir kaynaklardan elde edilecek faydanın azaltılmasına sebebiyet vermektedir. Mevcut çalışmada [33], optimum çözüm rüzgar ve enerji depolama sistemlerinin birlikte kullanımı şeklinde önerilmektedir. Önerilen çözümde, yatırım karları göz önünde bulundurulmaktadır. Önerilen algoritma aktif reaktif optimum güç akışı olarak adlandırılır. Bu araştırmanın ana odağı, enerji depolama sistemlerinin elektrik dağıtım şebekesinde rüzgar enerjisinin yoğun olduğu bölgelere uygulanması şeklindedir. Sistemden kar elde edebilmek ve müşterinin gerekli aktif gücünün sağlanabilmesi şartıyla, enerji depolama sistemleri arbitraj fonksiyonu önerilmektedir. Bu kapsamda, rüzgâr türbinlerinden elde edilen fazla enerji eğer enerji fiyatı düşükse, enerji depolama sisteminde depolanabilirken, rüzgar enerjisinden elde edilen enerji talep edilen enerjiden düşük seviyede ve enerji piyasa fiyatı yüksek ise gerekli enerji depolama sisteminden karşılanmaktadır. Enerji depolama sistem ömrü, ile sabit bir şarj / deşarj döngü sayısı arasında ilişki tanımlanmış olup, günde bir döngü şarj / deşarjını göz önünde bulundurarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, reaktif güç desteğinden ilgili tarifeler kapsamında gelir elde edilebileceği belirtilmiş olsa da, reaktif güç desteği kapsamında, ilgili enerji depolama sisteminin görünür gücü ile direk bir ilişkisi vardır. Aktif ve reaktif güç akışının birleştirilmesi, bu incelemede optimum çözüm olarak önerilmiştir.

Yüksek yenilenebilir penetrasyonuna sahip elektrik şebekelerinde, yenilenebilir kaynağının nerden bağlandığından bağımsız olarak, yenilenebilir kaynakların kesintili kaynak olmalarından dolayı, elektrik şebekesi üzerinde gerilim ve frekans açısından etkileri mevcuttur. Her ne kadar fotovoltaiğin ve rüzgar türbinleri IGBT temelli inverterlere sahip olsalar da, gerilim dalgalanmalarının önüne geçebilmek amacıyla enerji depolama çözümleri tercih edilmektedir. Bu durum yenilenebilir kaynaklardan elde edilecek faydayı da arttırmaktadır. Elektrik şebekesindeki her bir düğüm için gerekli aktif ve reaktif güç ihtiyacı ilgili düğümdeki analizlere göre belirlenebilir [34]. Rüzgar türbinleri aynı zamanda ortak bağlantı noktası olarak tanımlanmaktadır [35]. Rüzgar türbinleri, elektrik şebekesine reaktif

güç bastıklarında bağlantı noktasındaki gerilim değeri yükselecek, reaktif güç çektiğinde bağlantı noktasındaki gerilim değeri düşecektir.

3.4. Sıkışıklık Yönetimi

Klasik sistemlerde enerji, üreticilerden son kullanıcılara doğru akmaktadır. Yetersiz elektrik dağıtım şebekesi ya da kullanılan ekipmanların talep edilen gücü karşılayamaması sebebiyle elektrik dağıtım şebekesi üzerinde kısıtlılıklar oluşabilmektedir. Kısıtlılık yönetimi, mevcut sistemin kısıtlarının ihlal edilmeden talep edilen güç ve enerjinin sağlanmasını imkan tanıyan bir fonksiyondur. Elektrik şebekesinde sıkışıklık, aşırı talep kaynaklı olabileceği gibi aşırı üretim kaynaklı da olabilir. Enerji depolama sistemleri, yeterli SOC değeri var ise her iki durum içinde çözüm olabilmektedir. Bu yönetim biçimi için kontrolcü ve geliştirilen yazılım büyük öneme sahiptir. Üretim santrallerinin, yüklerin ve enerji depolama sistemlerinin aynı baraya bağlı olduğu yapılarda, sistemden talep edilen ya da sisteme basılacak güç transformatör ile sınırlı olabilmekte ve transformatör gücünü aşamamaktadır. Bu noktada, aşırı enerji üretimi olması durumunda, transformatörden şebekeye aktarılamayacak gücün gerek aynı baraya bağlı yükler üzerinde gerek enerji depolama depolanması suretiyle bu enerjinin kısıtlılıklara uyarak yönetilmesi mümkündür. Buna rağmen sistem hala üretim tüketim dengesini sağlayamıyorsa, bir noktadan sonra üretimin kısılması durumu söz konusu olacaktır. Diğer taraftan elektrik şebekesinden çekilen güç, anlık olarak dahi olsa transformatör kurulu gücünü aşması durumunda, aynı baraya bağlı enerji depolama ve/veya üretim kaynaklarından bu talep gücün karşılanması mümkündür. Bu kapsamda, sistem yönetimi için literatürde trafik ışık konsepti geliştirilmiştir [36]. Bu konseptte yükler ve üretim santralleri kendi içlerinde gruplandırılmış ve aynı trafik ışıklarında olduğu gibi kırmızı, sarı ve yeşil olacak şekilde önceliklendirilmiştir. Kritik yükler yani şebekeden en son atılması gereken yükler, ya da şebekeye girme süresi çok uzun olan üretim santralleri kırmızı renkle ifade edilmekte olup bu yüklerin ve santrallerin şebekeden koparılması son aşamayı ifade etmektedir. İkincil öncelikli yükler ile şebekeye girme süresi açısından anlıktan daha uzun süre olan doğalgaz santralleri gibi yapılar sarı renk ile, anlık şebeke girebilecek üretim santralleri (rüzgar santralleri gibi) ve şebekeden koparılması sorun teşkil etmeyecek yükler yeşil renk ile ifade edilmektedir. Bu yapının kontrol edilmesinde kontrolcünün yapısı ve kullanılacak algoritmanın hayati önemi vardır.

Farklı bir çalışmada [37], çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının dahil olduğu elektrik güç sistemlerinde sıkışıklık yönetimi amacıyla enerji depolama sistemleri için optimum planlama ve zamanlamayı sunmaktadır. Depolama üniteleri, rüzgar-güneş enerji sistemleri ile ilgili belirsizliklerin yanı sıra iletim hatlarındaki sıkışıklıkların üstesinden gelmek için optimal olarak şarj edilir ve boşaltılır. Çalışma için gerekli formülasyonlar particle swarm sezgisel optimization metodu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. [38] numaralı çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizliklerinin önemli rol oynadığı bir şebekede, sıkışıklık vs. gibi sorunların üstesinden gelebilmek için depolama sistemleri için optimal güç akışı yaklaşımı önerilmiş, ayrıca sistemin fizibilite ve ekonomik etki analizleri tartışılmıştır. Bu çalışmada [39], şebekenin sıkışıklık yönetimi ile gerilim değişimi vb. gibi sorunları ve ekonomik hedefleri arasında en uygun dengeyi bulmayı amaçlayan mixed integer second-order cone programming yöntemi ile aktif dağıtım şebekelerinde dağıtılmış depolama sistemlerinin optimal tahsisine odaklanılmıştır. Diğer bir çalışmada [40] enerji depolama sistemlerinin optimum lokasyonu ve kapasitesi için çok amaçlı bir prosedür önerilmiştir. Önerilen prosedür, sıkışıklık yönetimi ile şebekeden alınan enerjinin maliyetini ve şebeke kayıplarını minimum seviyeye indirmektedir. [41] numaralı araştırmada, özellikle sıkışıklığı ve gerilim seviyelerini yönetirken, yenilenebilir enerji kaynaklarından kaynaklanan kesintileri azaltmak için minimum dağıtılmış depolama kapasitelerini gerektirecek lokasyonlar için bir planlama sunmaktadır. [42] numaralı tez çalışmasında iletim hatlarında yaşanabilecek sıkışıklığı çözmek için enerji depolama sisteminin şebekeye en ideal şekilde yerleştirilmesini sağlayan optimize edilmiş bir çözüm sunulmuştur. Enerji depolama sisteminin yardımcı bir hizmet olarak sıkışıklığın azaltılmasına olan katkısını en üst seviyeye çıkarmak için optimal olarak hazırlarken, gün öncesi elektrik piyasasında elektrik fiyatı arbitraj fırsatlarından yararlanarak gelir elde etmeyi amaçlayan yeni gerçek zamanlı bir optimum dağıtım algoritması önerilmiştir. EPRI tarafından yapılan son araştırmalar, güç sistemlerinin karbon ayak izini azaltmak için mevcut teknolojilerin uygulanmasına odaklanmıştır. Aynı bir araştırmada, Amerika Birleşik Devletleri'nin büyük yenilenebilir enerji üretim varlıklarına sahip bölgelerine hizmet veren, sıkışık iletim ağlarının iletim kapasitesini artırmak için enerji depolama sistemlerinin teknik fizibilite ve potansiyel faydalarını incelemiştir [43]. [44] numaralı makale de yapılan araştırmaların sonuçlarına ilişkin veriler paylaşılmıştır. Bu makale [45] rüzgar enerjisi kaynakları ile bir enerji depolama sistemi arasındaki güç santrallerinin rampaları göz önüne alındığında dinamik etkileşimlerini içeren kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Çalışma, toplam enerjinin,

toplam tıkanıklık maliyetlerinin, hat yük faktörü ve ağdaki hatların tıkanıklığının olumsuz etkilerini azaltmak için farklı yöntemlerin analitik bir çerçevenin etkileri analiz edilmiştir.

3.5. Gerilim Regülasyonu

Gerilim regülasyonu, elektrik iletim veya dağıtım sistemlerinde voltaj büyüklüğündeki bir değişiklik ölçüsüdür. Gerilim regülasyonu, çok çeşitli yüklerin bulunduğu bir sistemde sabit değere yakın gerilim değerini sağlama yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Enerji depolama sistemleri, ilgili sistemlerde voltaj düzenlemesini sağlamak için tercih edilen seçeneklerden birisidir[46].

[47] numaralı çalışmada, multiple line drop compensation (MLDC) gerilim regülasyon metodunu dağıtım depolama ve jeneratör sistemleri üzerinde kullanarak dağıtım şebekelerin gerilim regülasyonu ile ilgili bir yaklaşım sunulmuştur. Şebekeye ait detaylı istatistiksel bilgilerden faydalanılarak ortaya çıkarılan optimizasyon yöntemi dağıtılmış batarya ve dağıtılmış generatörlere uygulanarak şebekenin gerilim regülasyonu konusunda önemli sonuçlar elde edilmiştir [48]. Yük seviyesinin en yüksek olduğu andaki gerilim düşümünü ve fotovoltaik üretimin en yüksek olduğu zamandaki gerilim yükselmesini dengede tutabilmek için geliştirdikleri local droop-based kontrol metodu ile batarya sistemlerinden faydalanarak bir gerilim regülasyon sistemi geliştirmişlerdir [49]. Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve batarya sisteminden oluşan bir hibrit güç sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem içerisinde güneş enerjisi santralının inverter'leri batarya sisteminin şarj ve deşarj durumlarını kontrol ederek şebeke gerilimini başarılı bir şekilde regüle edilmiştir [50]. [51] numaralı çalışmada, koordineli kontrol sistemi kullanılarak yüksek miktarda güneş enerjisine sahip bir alçak gerilim şebekesinin gerilim regülasyonları dağıtılmış batarya sistemi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. İteratif optimizasyon metoduyla güneş enerjisinin lokasyon ve kapasite bilgisine dayanarak batarya sisteminin gerilim regülasyonunu başarılı bir şekilde kontrol edebilmesi için gerekli olan minimum kapasiteyi belirlemişlerdir [52]. Heuristic tabanlı particle swarm optimization (PSO) tekniğini kullanarak gerilim regülasyonları için gerekli olan batarya kapasitesini belirlemişlerdir [53]. Diğer bir çalışmada [54], bir dağıtım besleyicisinin gün içinde ulaşılan en yüksek talep miktarının tıraşlanabilmesi amacıyla bir batarya enerji depolama sisteminin optimum boyutunu belirlemek için geçerli olan bir prosedür sunulmuştur. Bu süreçte dağıtılmış fotovoltaik güç üretiminin (konut müşterileri tarafından kurulacak) besleyici yük eğrisi ve batarya sisteminin kapasitesinin belirlenmesi

üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan sistemin gerekli gerilim desteği, batarya aracılığıyla hızlı bir şekilde sağlanabiliyorken, fotovoltaiik kaynakların batarya sisteminin boyutu üzerinde bir etkisi olmamasına rağmen, enerji depolama kapasitesini fotovoltaiik entegre düzeyi ile orantılı olarak düşürdükleri gözlenmiştir. [55] numaralı araştırmada şebekenin verimini arttırmanın yanı sıra yaşanan gerilim dengesizliklerinin azaltılması için bir enerji depolama sistemi önerilmiştir. Çalışmada, çeşitli BIPV entegrasyon seviyelerine sahip olan şebekelerin performansını simüle etmek için iki alçak gerilim şebeke sistemi, BIPV sistemlerini ve batarya sistemini modellemek için ise PSCAD kullanılmıştır. Oluşturulan enerji depolama modelinde, batarya sisteminin şebeke gerilim seviyelerinde yaşanan dengesizliği azaltma ve kayıpları azaltma yeteneğini incelemek için bir kontrol algoritması geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar, depolama sisteminin gerilim dengesizliği azaltmada ve iki alçak gerilim şebekesinin verimliliğini arttırmada son derece etkin bir performans gösterdiği açıkça göstermiştir. [56] numaralı çalışmada ise yüksek fotovoltaiik (PV) entegrasyon seviyesine sahip olan dağıtım şebekelerinde bulunan dağıtılmış batarya enerji depolama sistemi için etkili bir kapasite belirleme stratejisi önerilmiştir. Önerilen yöntemin temel amacı, dağıtılmış batarya sisteminin kapasitesini şebekenin sahip olduğu karakteristiklere göre optimize etmek ve batarya sistemi gerilim regülasyonu, tepe yükü tıraşlama vs. gibi yardımcı hizmetlerde görev aldığı zaman sistem için maliyet- fayda analizini elde etmektir. Batarya enerji depolama sistemleri şebekenin yükü düşük seviyelerdeyken üretilen fazla enerjinin bir kısmını depolayarak, gerektiği zaman şebekeye geri aktarma konusunda ya da rüzgâr ve PV üretimindeki kesiklikleri desteklemeye yardımcı olmaktadır. Farklı bir çalışmada, şebekenin gerilim seviyesinin düzenlenmesinde, özellikle de depolama biriminin kontrol ve kumanda edilmesinde kullanılabilecek farklı stratejileri araştırmıştır. Simülasyonlar, tek fazlı bir şebekeden beslenen kırsal bir bölgeden alınan gerçek verilerle birleştirildiğinde, batarya sisteminin şebeke voltajını artırabildiği gösterilmiştir [57].

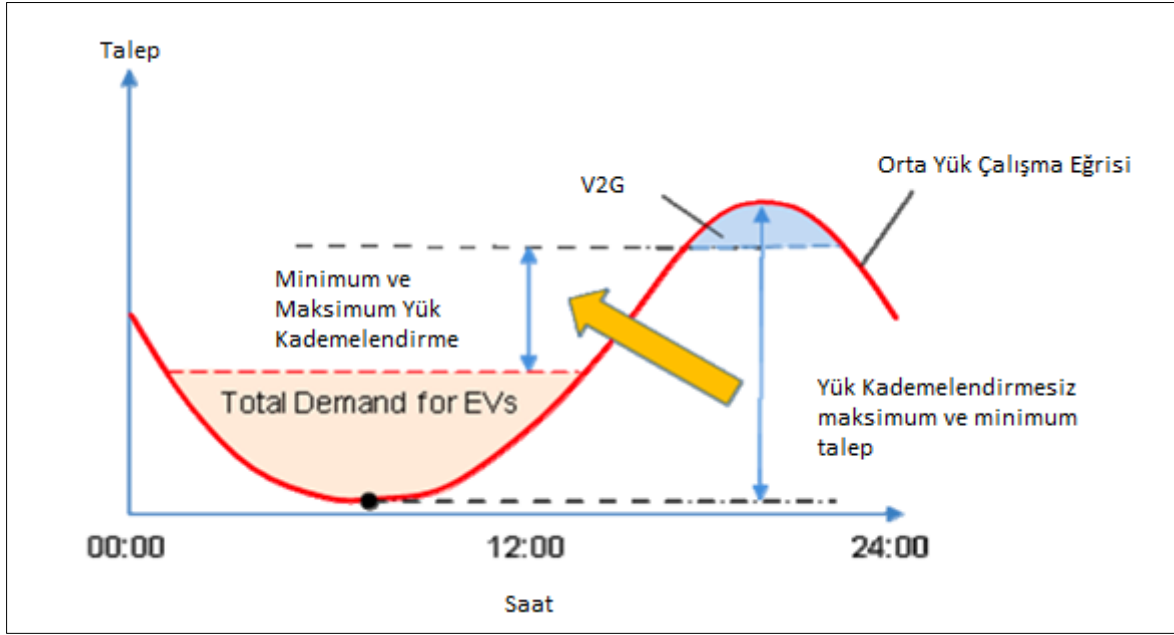
3.6. Yük Öteleme

Yük tahmini, sistem planlamasının başlangıcından bu yana elektrik dağıtım veya iletim operatörü şirketleri tarafından çözülmesi gereken kritik faktörlerden birisidir. Yük tahmini hesaplamaları, kolay hesaplamalar değildir, ancak hesaplanabilmeli veya tahmin edilebilmelidir. Bunu kolaylaştırmak için, hesaplamalarda çarpan faktörleri kullanılmaktadır [58]. Yapılan tahminlere göre, kabloların kesitleri, ve transformatör kapasiteler, seçilmelidir.

Bu ekipman kurulumu kolay ve ucuz bir süreç olmasa da değiştirilmesi pahalı ve zor bir süreçtir. Buna ek olarak, regülasyon şirketleri tarafından tanımlanan düzenlemelere dayanarak, değişim için süre gibi bazı kurallar vardır. Örneğin, EPDK'nın ve TEDAŞ'ın yayınlamış olduğu yönetmeliklere ilişkin olarak dağıtım şirketlerinin kurmuş oldukları bir transformatör değiştirmesi için gereken süre 30 yıldır. Transformatör değişimi 30 yıldan önce yapılacaksa, dağıtım şirketi tarafından karşılanacaktır.

Öte yandan ekipmanların seçiminde büyük kapasiteli ekipmanların kullanımı ile ilerlemek bir çözüm oluşturmamaktadır. Gelişen elektrik şebekesi yapısı içerisinde dağıtık sistemler daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. Genişleyen elektrik şebekesi nedeniyle, birkaç büyük merkez kurmak yerine, birden fazla küçük merkez kurmak daha uygun çözüm olmaktadır. Bu tür bir yapı daha uygulanabilir ve yapılabilir. Ve ağın genişletilmesi gerekmesi durumunda, küçük sistemler kurulabilir. Bu nedenle daha düşük kayıplar, daha kolay işletilebilirlikten bahsedilebilir. Bu durum bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, daha çok transformatör kurulumu gerekebileceği gibi kablo maliyetleri de artacaktır. Diğer taraftan normalden daha düşük kapasiteli ekipmanların kurulumu durumunda, kısa vadeli değişimi engellemek için 10-20 yıllık doğru tahminlemelerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Yanlış tahminlemelerden kaynaklı olarak, her zaman ekipman değişimi yapmak mümkün olamamakta ve bu nedenle yük öteleme konusu gündeme gelmektedir. Yük öteleme, belirli bir zaman aralığında gerçekleşen elektrik tüketimin başka bir zaman aralığına kaydırılması şeklinde tanımlanmaktadır. Şekil 3.3'de yük öteleme durumu görselleştirilmiştir. Saat 00:00-18:00 arasında şebekeden talep edilen güç belirli bir seviyede kalmasına rağmen, saat 18:00-24:00 arasında talep edilen güç, limitlerin üzerine çıkmaktadır. Bu durumda, aynı noktaya bağlı bir enerji depolama sistemi ile aşırı talep edilen güç karşılanarak, 00:00-18:00 saatleri arasında enerji depolama sisteminden karşılanan enerji tekrar şarj edilerek doldurulabilir [59].



Şekil 3.3. Yük öteleme konsepti [59]

Yük öteleme anlık bir aktivite olmasına karşın, tahmin yöntemleri ile bu durumu ön görebilmek olasıdır ve böylece kritik olayların önüne geçebilmek mümkündür. Yük öteleme için kurulu ekipmanlardan kaynaklı minimum ve maksimum sınırlar bulunmaktadır. Ancak bu sınırları aşacak şekilde yük ötelemek mümkün değildir. Bu sınırların aşılma durumunda kayıpların artması, ekipman ömürlerinin kısılması söz konusu olabileceği dikkat edilmelidir.

[54] numaralı çalışmada, elektrik tüketimi pik yaptığı zaman dilimlerinde dağıtım şebekesinin yükünü azaltmak için sistemin ihtiyaç duyduğu batarya kapasitesi belirlenmiştir. İlgili metot bu araştırma ile gerçekleştirilen prosedürleri içermektedir. Ayrıca çalışmada kullanılan veriler gerçek zamanlı veriler kullanılmıştır. [60] numaralı çalışmada ise, yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya sisteminden oluşan bir küçük/orta boyutlu bir şebekede ihtiyaç duyulan pik saatlerde yük yönlendirme işlemini başarıyla gerçekleştirebilmek için optimal bir çalışma stratejisi önerilmiştir. Mixed integer programming temelli bir optimizasyon yöntemini kullanılarak, enerji kullanımının pik yaptığı zaman dilimlerinde dağıtım şebekesinin sorumlulukları ile günlük yük değişim farklılıklarının yarattığı olumsuz etkiler minimize etmişlerdir [61]. Şebekenin yük yönlendirme, sıkışıklık yönetimi, gerilim değişimi vb. gibi sorunları ve ekonomik hedefleri arasında en uygun dengeyi bulmayı amaçlayan mixed integer second-order cone programming yöntemi ile aktif dağıtım şebekelerinde dağıtılmış depolama sistemlerinin optimal tahsisine odaklanılmıştır [62].

Enerji depolama sistemlerinin rolünü, boyutunu ve yerleşimini belirlemek için mixed integer nonlinear programming'i kullanarak dağıtım şebekelerinde yaşanan yük kullanımının pik yaptığı zaman dilimlerinde kullanıcılar ve enerji sağlayıcılar için optimum fayda sağlama konusunda önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir [39]. Diğer bir çalışmada [63], yazarlar kullanıcının akıllı sayaçlarından alınan veriler doğrultusunda her kullanıcı için optimum stratejinin belirlenmesi için noncooperative game theory metotunu kullanmışlardır. Bu açıdan mevcut optimizasyon çalışmalarından daha farklı bir çalışma olduğu açıktır. Ayrıca hazırlanan algoritma ve optimizasyon çalışması sonucunda elde edilen veriler gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Talep yükün azaltılması ve yük artış oranını sınırlandırarak rüzgâr enerjisini etkin bir şekilde dağıtmak için batarya enerji depolama sistemini şebekeye bağlı hibrit rüzgâr-güneş enerjilerinden oluşan güç sistemine entegre etmek için bir fizibilite çalışması yapılmıştır. Bataryanın kapasite optimizasyonu için gerekli olan metodoloji yarasa algoritması yardımıyla yatırım maliyetini ve sistemde oluşan kayıpları minimize etme hedefi üzerinden geliştirilmiştir [64]. [65] numaralı çalışmada, akıllı cihazlarla donatılmış bir evdeki yük yönlendirme problemi ve enerji dönüşüm kayıpları olan bir enerji depolama birimi üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmada incelenen problem, bir hanenin günlük yaşam dinamiklerini karşılamayı ve enerji kontrol sisteminin toplam elektrik enerjisi tüketimi üzerindeki etkisini düşük tutmayı amaçlayan bir Model Predictive Control metodolojisi oluşturmaktır. Önerilen yaklaşım, tüketicilerin, ihtiyaç duyulan cihazların çalıştırılması için en uygun zamanı ve batarya şarj seviyesini dinamik olarak değerlendirerek, kullanım süresi tarifeleri ve gelişmiş talep yönetim sistemi ile karakterize edilen senaryolarda günlük kullanılan enerjinin maliyetinin en aza indirilmesini sağlar. [66] numaralı çalışmada, günlük yük kullanımının en yüksek düzeye ulaştığı zamanlarda tepe yükünün azaltılması ve yönlendirilmesini sağlamak için gerekli olan bir batarya depolama sisteminin optimum boyutlandırma metodolojisi ve çalışma stratejisi üzerinde durmuşlardır. Kapasite belirleme metodolojisi, müşterinin ekonomik faydasını en üst düzeye çıkarmak üzerine kurulmuştur. Batarya depolama sisteminin optimum çalışma stratejisi dinamik programlama tekniklerine dayanmakta ve bataryanın fiziksel kısıtlamalarını dikkate alırken enerji maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

3.7. Yatırım Öteleme

Enerji talebi zaman içerisinde artmaktadır. Elektrik dağıtım şirketleri, bu kapsamdaki tahminlemeleri yapmakla sorumlu şirketlerden birisidir. Gerçekte bu durum sadece elektrik dağıtım şirketlerini değil, elektrik iletim şirketlerini de kapsayan bir durumdur. Bu tahminleme ve planlamalarda ise şehir planlarının önemi büyüktür. Şehrin büyüyen yapısı, yıllara ait büyüme öngörülleri dikkate alınarak, özellikle iletim seviyesinde yeni bir transformatör kurmak yerine artan talep gücünü enerji depolama gibi sistemlerle giderilerek burada yapılacak yatırımın ötelenmesi büyük ekonomik fayda sağlamaktadır. Bu çerçevede yapılacak analizler büyük öneme sahiptir. İlave olarak artan talep gücünün günün tüm saatleri için mi karşılanamadığı yoksa belirli zamanlarda mı karşılanamadığı, hususunun detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

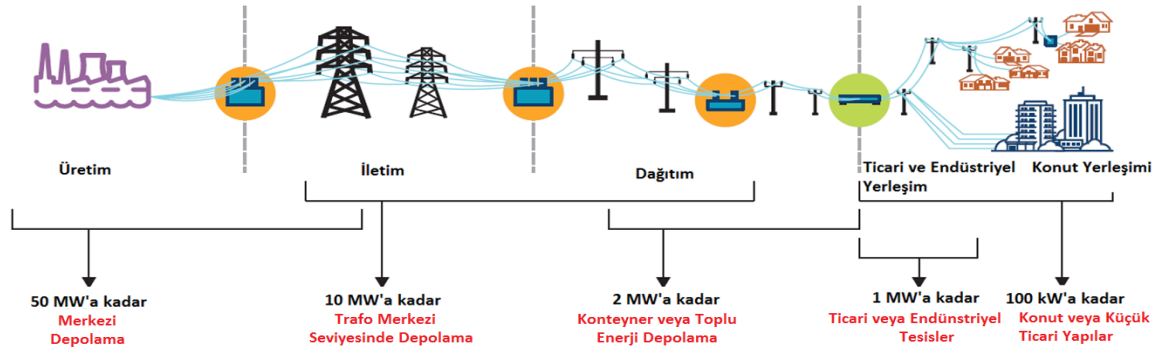
[67] numaralı çalışmada, orta gerilim seviyeli dağıtım şebekelerinde maliyet analizi yöntemiyle batarya sistemlerinin yoğun enerji taleplerini dengeleme için fayda analizi yapılmıştır. Çalışma, batarya depolama sistemlerinin dağıtım şebekelerinde kârlı bir yatırım haline gelebilmeleri için hedef maliyetini belirlemektedir. Diğer bir çalışmada Güney Tayvan'daki talep tarafı uygulamaları için hibrit bir fotovoltaik ve batarya enerji depolama sisteminin maliyet analizi incelenmiştir. Çalışmada üç farklı yatırım planı için çeşitli giriş verileri ve çıkış verileri önerilmiş ve tartışılmıştır [68]. Yeni ortaya çıkan iki elektrik enerjisi depolama teknolojisi olan sodyum sülfür bataryaları ve volan enerji depolama sistemlerinin New York elektrik piyasasındaki ekonomik etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, New York bölgesi için planlanan batarya depolama sistemlerinin enerji arbitrajı, yatırım maliyetlerinin ötelenmesi ve azaltılması gibi uygulamalar için önemli fırsatlar yarattığını göstermektedir. Gerekli ekonomik analizler “net present value” metodu üzerinden yapılmıştır [69]. New Meksiko için hazırlanan bu raporda iletim ve dağıtım şebekelerinin kapasite yükseltmelerini ertelemek için gerekli olan dağıtılmış enerji depolama miktarını değerlendirirken kullanımları için ayrı bir metodoloji geliştirilmiştir [70]. Transformatör merkezlerinde yatırımın ertelenmesi için mixed integer programming ve genetic algorithm metotlarını kullanarak rüzgâr generatörlerinin ve enerji depolama sistemlerinin optimum kapasitesini belirleyecek yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntemde, güvenilirlik ve ekonomik yönler zamanla değişen yük verileri ile birlikte değerlendirilmiştir [71]. Lineer programlama yöntemleriyle kısıtlı iletim imkanlarının olduğu şebekelerde depolama portföyü optimizasyonu için bir DC optimum güç akışı metodu önermektedir [72]. Güç

sistemlerinin zaman içerisinde oluşabilecek zayıflıkları azaltmak için, genetik algoritma metodu yardımıyla batarya depolama sistemleri için uygun lokasyonlar ve kapasiteyi bulmayı amaçlamaktadır [73]. Nonlinear multi-period optimal power flow ve shifting algoritması kaynaklı bir metodoloji yardımıyla enerji depolama sistemleri için optimum lokasyon ve kapasiteyi belirleyerek mevcut şebekenin yenilenme ihtiyaçlarını batarya sistemlerinin verebileceği potansiyel katkılarla ötelenebileceğini 11kV'luk bir dağıtım şebekesinde gerekli simülasyonları gerçekleştirerek göstermişlerdir [74]. Diğer bir makalede, amaçlar ikiye ayrılmıştır. İlk olarak enerji talebinin büyüme oranını ve yenilenebilir enerji entegrasyonu içeren şebeke yatırım ötelemesi fonksiyonu oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu model enerji sisteminin lokasyonu, kapasitesini ve şarj-deşarj profillerini optimum olarak planlayabilecek bir optimizasyon problemi formulize etmek için kullanılmıştır. Bu model genel cebirsel bir yöntem kullanılarak Avustralya'daki orta seviye gerilimli bir dağıtım şebekesine kazandırılmıştır [75]. Hat kayıplarını ve enerji depolama sistemlerinin yayılmasını göz önünde bulunduran deterministik tek aşamalı iletim genişletme planlama modeli önerilmiştir. Sekant segmentleri kullanan parçalı bir lineerleştirme yaklaşımı, lineer olmayan hat kayıplarını tahmin etmek için benimsenmiştir ve optimal bölümlene yöntemi incelenmiştir. Şebekenin mevcut toplam maliyetini düşürmek için enerji depolama sistemleri tanıtılmış ve bunların konumlandırılması ve boyutlandırılması dögümsel güç dengesi ve yük eğrisi ile belirlenmiştir. Önerilen modelin aracılığıyla batarya sistemlerinin yatırım maliyetlerini düşürme potansiyeli, iki test sisteminde simüle edilmiş çalışmalarla gösterilmiştir [76].

3.8. Uygulama Alanı Seçimi

Enerji depolama sisteminin boyutunu, yerini ve teknolojisini belirlemek için cevaplanması gereken sorulardan biri, uygulamaya göre hangi voltaj seviyesinden enerji depolama sisteminin bağlanacağıdır. Bu cevap 3 faktöre bağlıdır;

- Kurulum maliyetleri,
- Faydalanılabilecek enerji depolama uygulamaları,
- Faydalanılabilecek enerji depolama teknolojileri



Şekil 3.4. Enerji depolama sistemlerinin bağlantı noktaları

Çizelge 3.1. Uygulamaların bağlantı seviyeleri

Şebeke Uygulamaları	Merkezi Depolama	Trafo Merkezi Seviyesinde Depolama	Konteyner veya Toplu Enerji Depolama	Ticari veya Endüstriyel Tesisler	Konut veya Küçük Ticari Yapılar
Enerji Zaman Kaydırması (Arbitraj-Ara Kazanç)	✓	✓	✓	✓	✓
İlave Güç Kapasitesi	✓	✓	✓		
Yük Takibi	✓	✓	✓	✓	✓
Yan Hizmetler	✓	✓	✓	✓	✓
Sıcak Yedek Rezerv	✓	✓	✓		
Gerilim Desteği		✓	✓		
Dağıtım Yatırım Öteleme		✓	✓		
Güç Kalitesi (İşletmeci)			✓		
Güç Kalitesi (Müşteri)				✓	✓
Rüzgâr Enerjisi Santralleri İçin Enerjisi Zaman Kaydırması (Arbitraj)	✓	✓	✓	✓	✓
Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Güç Çıkışının Düzeltilmesi	✓	✓	✓	✓	✓
Rüzgâr Enerjisi Çıkış Gücünün Düzgünleştirilmesi	✓	✓	✓	✓	✓

Enerji depolama sistemleri yüksek gerilim seviyesinden bağlanırsa enerji depolama çıkışına, transformatöre ihtiyaç olmaktadır. Öte yandan, mesken düzeyinde kullanım için enerji depolama için transformatör gerekli olmayacaktır.

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi enerji depolama sistemleri, rüzgar türbini çıkış gücü yumuşatma ve enerji kaydırma uygulamaları için kullanılabilir. Rüzgâr türbini çiftliği kurulu gücüne ve ayrıca amaçlanan uygulamaya bağlı olarak, farklı bağlantı seviyeleri kullanılabilir. Kurulu EDS depolama kapasitesi ve çıkış gücü yeterliyse, birden fazla uygulamayı birleştirmek de mümkündür. Bu nedenle, muhtemel bir enerji depolama sistemi uygulamasından daha fazla fayda elde etmek mümkündür.

4. TEZ ARAŞTIRMA ÇALIŞMASI

Ülkemizde ve dünyada toplam rüzgâr enerjisi kurulu gücü zamanla artmakla birlikte, iç tüketim amaçlı tek başına kurulu rüzgâr türbini gücü de artmaktadır. Güncel bilgilere göre, karasal (onshore) rüzgâr türbinleri için en yüksek anma gücü 6 MW iken, açık deniz (offshore) rüzgâr türbinleri için en yüksek anma gücü 13 MW'a ulaşmıştır [77]. Artan rüzgâr türbini anma gücü, belirli bir alana daha yüksek kapasitede rüzgâr santrali kurulumuna imkân tanımakta, bu durumda rüzgâr enerjisi kurulu gücünün daha hızlı artmasını sağlamaktadır. Devletler, uluslararası anlaşmalar gereği karbon kaynaklı santraller kurmak yerine yenilenebilir enerji santrallerine geçişi hızlandırmaya çalışmaktadırlar. Rüzgâr türbinleri, hidrojen santralleri, PV santralleri, hidroelektrik santraller yenilenebilir enerji kaynaklarından olup, bu kaynaklara olan yatırım artmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin kW/m² olarak daha yüksek değere sahip olması, ülkelerin ağırlıklı olarak rüzgar türbini yatırımı yapmasına neden olmaktadır. Buna nazaran, rüzgâr türbinlerinin enerji üretimi rüzgâr enerjisine bağlı olup, kesintili enerji kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin enerji üretimi ve sürdürülebilirliği rüzgâr enerjisine bağlıdır ve rüzgâr çiftliği ve/veya rüzgâr türbininin tam konumunda rüzgâr hızının tahmin edilemezliği yenilenebilir enerji kaynaklarının önemli bir sorunudur. Rüzgâr hızının öngörülememesi ve ne kadar üretim yapılacağına %100 doğrulukta önceden belirlenememesi sebebiyle, rüzgâr türbinleri henüz birincil kaynak olarak kullanılamamaktadır.

Yatırımcılar ve enerji piyasası oyuncularının kazancı, rüzgâr enerji santralinin aktif güç çıkışına bağlı olup bir diğer deyişle, elektrik şebekesine aktarılan aktif enerjiyle orantılıdır. Bu nedenle artan kullanılabilirlik, doğrudan aktif çıkış gücünü etkileyerek, yatırımcıların gelirini arttıracak en önemli etkenlerden birisidir. Ayrıca enerji piyasası kapsamında, her santral sahibi dengeleme piyasasına, gün öncesi piyasasına ve gün içi piyasasına ne kadar enerji üreteceğini bildirmekle yükümlüdür. Bu kapsamda rüzgâr türbini arızalarını da sisteme girmektedirler. Yine bu kapsamda, rüzgâr santrali işletmeci firmaları, ilgili pazarda güç ve enerji tahminleri sağlamak için çeşitli hava durumu veri kaynaklarını kullanmaktadırlar. Her ülkenin dengeleme güç piyasası gerekleri farklı olmakla birlikte yapılan tahminlere göre $\pm\%5$, $\pm\%10$ gibi farklı aralıklarda şaşmalar piyasalar tarafından kabul edilebilmektedir. Bu, santral tahmini değerinin, üretilen aktif güçten $\pm\%5$, $\pm\%10$ 'a kadar sapabileceği anlamına gelmektedir. Yüzde yüz doğru bir tahminde bulunmak çok zor olmakla birlikte, dengesizlik sınırları aşılmayacak şekilde tahminler sisteme girilmesi

önemlidir. Dengesizlik sınırlarının aşılması durumunda santral sahipleri ceza ödemek durumunda kalmakta, bu durum da gelirlerini düşürmektedir. Toplanan tahmini rüzgâr verilerinin doğruluğunun yüksek olmasına rağmen, anlık hava olayları ve ayrıca santralin konumu nedeniyle gerçek rüzgâr hızı verileri değişkenlik gösterebilmekte, bu da çalışan deneyimini daha önemli hale getirmektedir. Santralde deneyim kazanmış bir teknik personel elde edilen rüzgâr verilerini baz alarak daha doğru tahmin gerçekleştirebilmektedir.

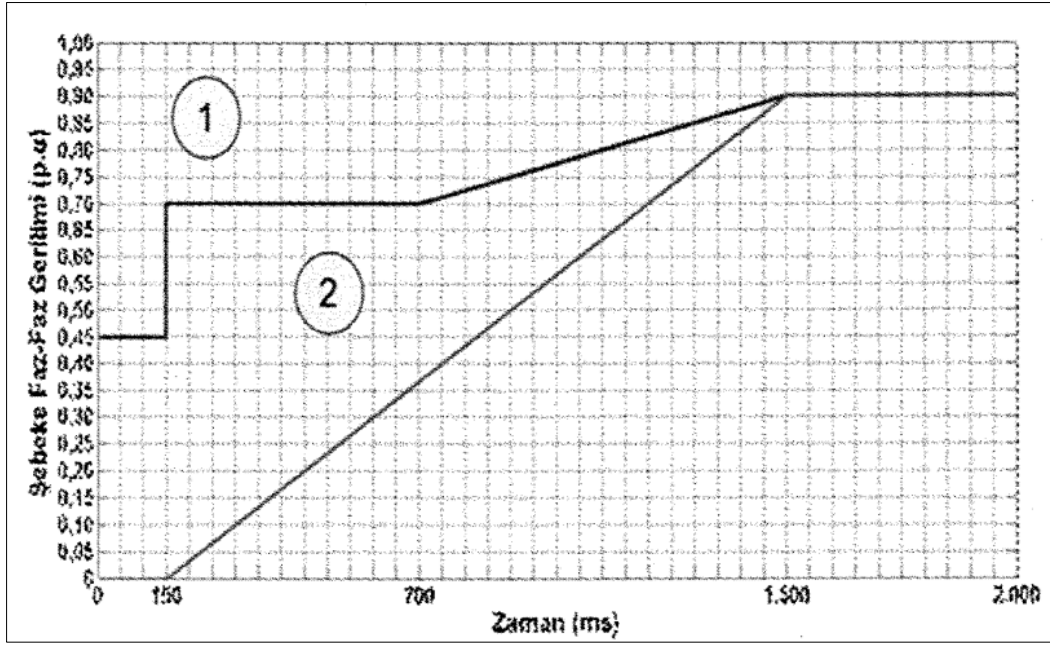
Rüzgâr santrali aktif güç çıkışı tahminindeki zorluklar, rüzgâr santrali operatörlerini enerji piyasası seçenekleriyle sınırlı olmayan alternatif çözümler bulmaya ve aynı zamanda tahmin edilen üretilecek aktif güç değerine ulaşmak için PV ve enerji depolama sistemi gibi diğer yenilenebilir üretim kaynakları kurmaya yönlendirmekte, bu durum da yatırımcıları hibrit enerji santrali kurmaya yöneltmektedir. Hibrit enerji santralleri, en az 2 üretim kaynağının kullanıldığı santraller olarak tanımlanmaktadır. Hibrit enerji santralleri sayesinde santralin güç çıkışı (sözleşme gücü) arttırılabileceği gibi, ilgili santral için yapılacak tahminler de daha doğru değerlere ulaşılması da mümkün olabilmektedir. Bu durum da sisteme esneklik de kazandırmaktadır. Bu noktada enerji depolama sistemleri tamamıyla kontrol edilebilen ve hem şarj hem de deşarj edilebilen bir yapıya sahip olması sebebiyle tercih edilen çözümlerden bir tanesi olarak ön plana çıkmaktadır. Bölüm 2.3’de bahsedilen çalışma fonksiyonlarına uygun olarak enerji depolamaların çalıştırılabilir olması, hem ilgili santraller için hem de elektrik şebekesi için bir çok avantaj sağlamaktadır. Herhangi bir yenilenebilir enerji santraline, enerji depolama sisteminin kurulması ile santralin hibrit santral olarak adlandırılmasını sağlamaktadır. İlgili santral, enerji piyasasında belirttiği tahmini üretim değerini aşması durumunda üretilen fazla enerjiyi, enerji depolamada depolayabileceği gibi, belirtilen tahmini değerden az üretmesi durumunda, eksik kısım enerji depolamadan karşılanabilecektir. Aynı zamanda, enerji depolama arbitraj uygulamalarına da izin vermekte, enerji fiyatlarının yüksek olduğu saatlerde enerji depolamada depolanan enerji, elektrik şebekesine satılması sağlanabileceği gibi, fiyatlar ucuzken enerji depolama şarj edilebilecektir.

Enerji depolama sistemlerinin rüzgâr türbinleriyle birlikte kullanımına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır [78]. Ülkelerin yenilenebilir kaynaklara yaptıkları yatırımlar birçok şebeke sorununu da beraberinde getirmekte, bu sorunların çözümü noktasında enerji depolama sistemlerinin aktif olarak kullanımı gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu

sebepten dolayı önümüzdeki yıllarda rüzgâr türbinlerinin yanında enerji depolama uygulamalarının daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

Aktif güç çıkışı, rüzgâr enerjisi sahipleri için gelir kalemi olarak değerlendirilmesinin yanında, şebeke frekansına, üretim ve tüketimin dengelenmesine etkisi açısından da çok önemlidir. Şebeke frekansı ve üretim tüketim dengelenmesi şebeke işletmecilerinin sorumluluğunda olsa da bu parametreler güçlü bir şebeke yapısı oluşturulması açısından daha önem kazanmaktadır. Güçlü olmayan bir şebekenin varlığı, rüzgâr türbinlerinin çalışmasını da olumsuz etkileyecektir. Her ne kadar tek bir türbin için bu değerler önemsiz gibi görünse de, sayıları günden güne artan rüzgâr türbinlerinde artan sayı ile birlikte bu etki artmakta, türbin sayılarıyla orantılı kümülatif etki ortaya çıkmaktadır. Bu durum, hem yatırımcılar açısından hem de şebeke işletmecileri açısından aktif güç kontrolünün önemini daha da ön plana çıkarmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin aktif güç çıkışının rüzgâr hızının küpüyle orantılı olması, 10 dakikalık ortalama rüzgâr hızlarında oluşan normalden fazla değişimlerden dolayı aktif güç çıkışında görülen anlık değişimler elektrik şebekesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır.

Rüzgâr enerji santralleri için yayınlanmış olan şebeke bağlantı yönetmeliklerine bakıldığında, üretim tesislerinin arıza sonrası sisteme katkı başlığı ile tanımlanmış bir kısım bulunmaktadır [79]. Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, iletim veya dağıtım sistemi bağlantı noktasındaki şebeke faz-faz geriliminin belirli süre (1500 ms’ye kadar) farklı faz-faz gerilim seviyelerinde kalması durumunda, rüzgâr türbinin arıza sonrası aktif gücünü nominal aktif gücünün %20’i (1. Bölgede ise) ve %5’i (2. Bölgede ise) oranlarında artırarak üretilebilecek maksimum aktif güç değerine ulaşması beklenmektedir. Buna ek olarak, dünyadaki uygulamalara bakıldığında, rüzgâr hızlarındaki değişimden kaynaklı, rüzgâr türbini aktif güç çıkışındaki salınımlara belirli sınırlamaların getirilmesi gündeme gelmektedir. Bu sınırlamalar ile rüzgâr enerji santrallerinin aktif güç çıkışının belirli kabul edilebilir aralıklarda artıp azalmasını sağlayacak daha düzgün bir profil çıkarılması hedeflenmektedir.



Şekil 4.1. Üretim tesislerinin arıza sonrası sisteme katkısı [79]

Mevcut tez çalışması kapsamında, rüzgâr türbinlerinin aktif güç çıkışındaki değişimin yumuşatılması ve değişim hızının azaltılması hedeflenmiştir. Böylece, kontrolsüz elektrik üretiminin belirli limitler dahilinde ($\pm 10\%$) kontrol edilebilir olması ile üretim ve tüketim dengelenmesi için şebeke işletmecilerinin hesaplamaları kolaylaşacaktır. Aynı zamanda, üretilen fazla gücün depolanması ve üretilen gücün düşmesi durumunda belirli miktarda, gücün enerji depolama sisteminden karşılanması sayesinde üretici kazanmış olacaktır. İleride devreye girebilecek yeni regülasyonlarda daha kısa sürede daha yüksek güçte elektrik şebekesine güç basabilecek ya da elektrik şebekesinden güç alabilecek bir yapı oluşmuş olacaktır. Bunları sağlayabilmek için mevcut çalışmada rüzgâr türbini aktif güç çıkışlarındaki değişim, dengeleme güç piyasasındaki değer baz alınarak kurulu gücün $\pm 10\%$ 'u ile sınırlandırılmış, 30 dakikalık bazda rüzgâr türbinin dengesizliği kontrol altına alınmıştır. Üreticilerin sisteme girecekleri üretim tahminlerinin belirli bir aralık kalması sağlanarak, cezaya girmelerinin önüne geçilmiş olacaktır. Sistem bazında (rüzgar türbini ve enerji depolama) üretilen güçteki değişimin sınırlandırılması, şebekeye aktarılamayan yedek bir rezerv bulunmasına imkân tanımış olacaktır. Bu sayede, önümüzdeki yıllarda şebeke bağlantı yönetmeliklerinde rüzgâr türbinlerinden beklenen katkının arttırılması durumunda, bu katkı sağlanabilir olacaktır. Şebekede oluşan herhangi bir arıza sonrası, daha yüksek oranlarda (rüzgar türbininin kurulu gücünün $\%20$ 'sinden fazlası) şebekeye katkı sağlanabilecektir. Buna ek olarak, frekansın yükselmesi durumunda, enerji depolama

sisteminde yeterli kapasite var ise, EDS'nin şarj edilmesi yöntemiyle, rüzgâr türbininde güç kısımdan gerekli şebeke desteği sağlanabilecektir.

Çalışma kapsamında, CYME güç analiz yazılım programı üzerinde oluşturulan şebeke modeli üzerinde hibrit enerji santrali modellenmiştir. Hibrit enerji santrali bir enerji depolama sistemi ve bir rüzgâr türbininden oluşmaktadır. Enerji depolama sistemi rüzgâr türbinine entegre edilmiştir. Enerji depolamanın çalışma durumu için rüzgâr türbininin çıkış noktası, referans nokta olarak belirlenmiş olup, çalıştırılacak kontrol fonksiyonu tamamıyla rüzgâr türbinine bağlı olarak uygulanacaktır. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere, EDS, rüzgar türbini çıkışındaki $\pm 10\%$ değişime bağlı olarak çalışacak şekilde belirtilmiştir. Rüzgâr türbini modeliyle ilgili bilgiler Bölüm 3.1'de detaylandırılmış olup, çalışmanın doğruluğunu arttırmak için hali hazırda kullanılmakta olan bir rüzgâr türbinine ait veriler ile rüzgâr türbini modellenmiştir. Rüzgâr türbini verileri Windpro uygulamasından elde edilmiştir [80]. İlgili tüm bilgiler, CYME programındaki rüzgâr türbini modeline işlenmiştir [81]. Enerji depolama sistemine ilişkin veriler, rüzgâr türbininde olduğu gibi hali hazırda kullanılan bir enerji depolama sistemine ilişkin datasheet'den (veri seti) sağlanmıştır. Enerji depolama sistemi ile rüzgâr türbininin aynı baraya bağlanması durumuna ilişkin analizler CYME programında gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde hem elektrik şebeke operatörünün yararına, hem de rüzgâr türbini işletmecisinin yararına olması açısından enerji depolama sisteminin rüzgâr türbini üzerinde aktif güç açısından etkileri analiz edilmiştir. Eüzgâr türbinleri rüzgâr hızının küpüyle orantılı olarak aktif güç üretmesi sebebiyle, Bu durumda çok küçük rüzgâr hızındaki değişim aktif güç açısından rüzgâr türbinleri çıkışında önemli farklar yaratmaktadır. Tez çalışmasında gerçekleştirilen analizler sonucunda, enerji depolama sisteminin rüzgar türbini aktif güç çıkışına etkisi net bir şekilde gösterilmiştir.

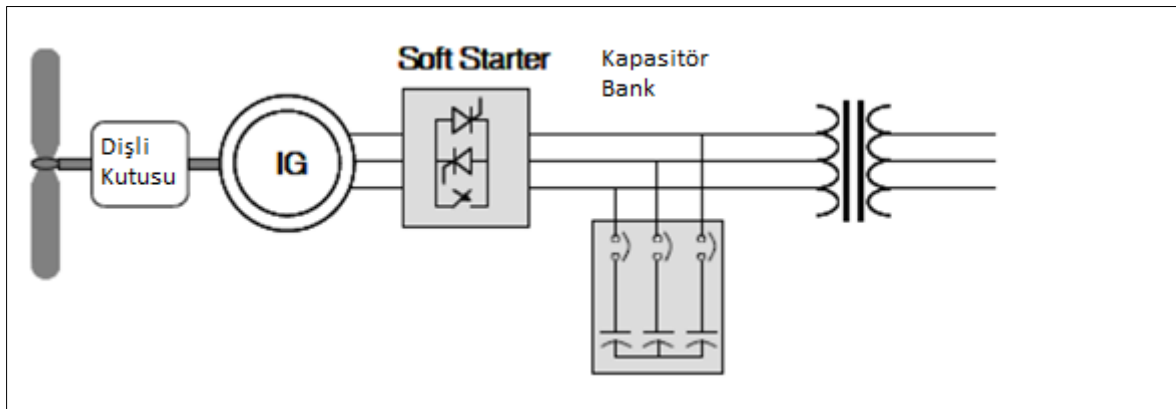
Gerçekleştirilen yük akışı analizlerine ek olarak enerji depolama sisteminin başlangıç doluluk oranının aktif güç çıkışı açısından analizlere etkileri bu çalışma kapsamında 5. Bölüm 5. SONUÇLAR kısmında değerlendirilmiştir. Rüzgâr türbininin aktif güç çıkış değişimi, hedeflenen değerlerden fazla olması durumunda enerji depolama sistemine aktarılabilir güç ancak EDS müsait ise mümkündür. Enerji depolama sisteminin doluluk oranı (SOC) buna izin vermez ise, rüzgâr türbini güç kısmak durumunda kalabilecek ya da elektrik şebekesine bu gücü aktarmak durumunda kalabilecektir. Gerçekleştirilen analizlerde rüzgâr türbininin güç kısma durumu göz ardı edilmiş olup, enerji depolama sistemine aktarılamayan güç doğrudan elektrik şebekesine aktarılmaktadır. Bu sebeple gerçekleştirilen

analizlerde enerji depolama sisteminin başlangıç doluluk oranı hem %50 hem de %100 durumları için gerçekleştirilmiştir.

4.1. Rüzgâr Türbinleri

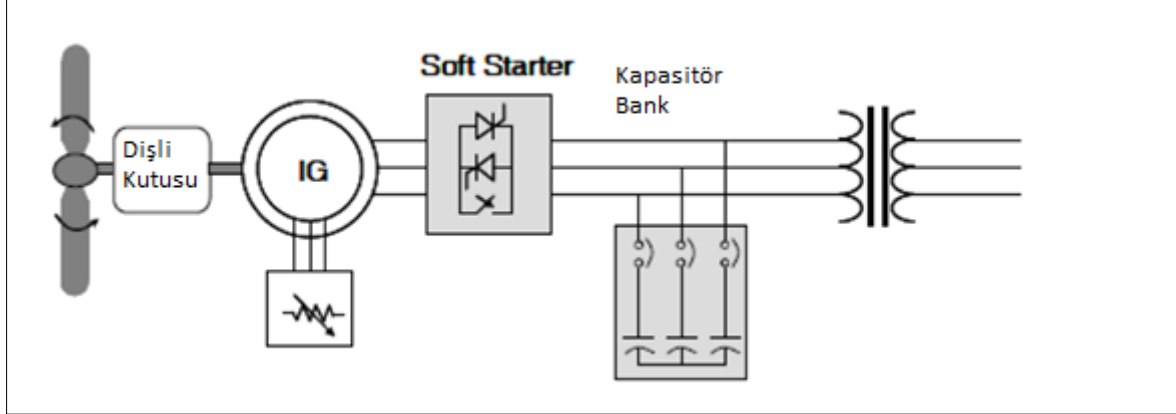
Kullanılan generatör ve güç dönüştürücü tipine bağlı olarak literatürde tanımlanmış 4 farklı tip rüzgâr türbini bulunmaktadır. Bu rüzgâr türbinleri tip-1, tip-2, tip-3, tip-4 şeklinde adlandırıldığı gibi tip-a, tip-b, tip-c, tip-d şeklinde de adlandırılabilir. Tip 1 rüzgâr türbinleri sabit hızlı rüzgâr türbinleridir, tip 2 rüzgâr türbinleri silindirik rotor rüzgâr türbinleridir, tip 3 rüzgâr türbinleri generatörün statorunun doğrudan şebekeye bağlı olduğu rotorunun güç dönüştürücü üzerinden şebeke bağlandığı rüzgâr türbinleri olup, tip 4 rüzgâr türbinleri ise generatörün senkron ya da asenkron olabildiği, generatör çıkışının tam ölçekli güç dönüştürücü üzerinden şebekeye bağlandığı rüzgâr türbinleridir.

Şekil 4.2’de tip 1 rüzgâr türbini yapısı görünmektedir. Bu tip rüzgâr türbinleri sabit hızlı rüzgâr türbinleri olarak adlandırılmakta olup, yaklaşık 20 yıl önce kurulan ilk türbinler bu tiptedirler. Bu tip rüzgâr türbinlerinde asenkron generatör doğrudan transformatöre bağlı olup üretilen güç transformatöre aktarılmaktadır. Şekilde 4.2’de görüldüğü gibi generatörün endüktif etkisini minimize etmek için kapasitör bulunmaktadır. Bu tip rüzgâr türbinlerinin istenmeyen durumlarından bir tanesi, anlık rüzgâr hızındaki değişim durumudur. Anlık rüzgâr hızında değişiklik oluşması durumunda, mekanik eylemsizlik elektriksel çıkıştaki değişimi limitlemektedir.



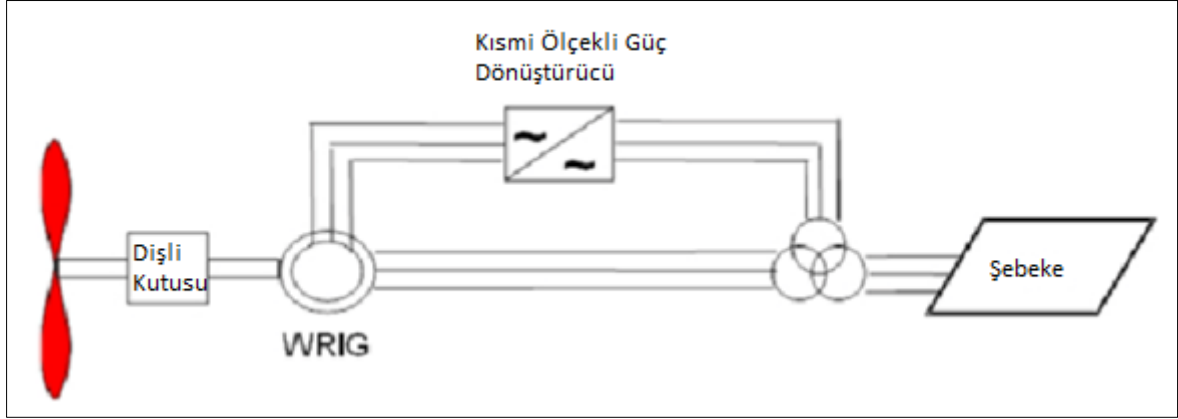
Şekil 4.2. Tip 1 rüzgâr türbini yapısı [82]

Şekil 4.3 tip 2 rüzgâr türbini yapısını göstermektedir. Bu yapıda, generatörün statoru doğrudan elektrik şebekesine bağlanmakta olup, rotoru üzerinde resistör bulunmaktadır. Böylece rüzgâr hızında gust oluşması durumunda ya da anlık değişimlerde, rüzgâr türbini daha yumuşak etkiler oluşturmakta şebekeyi daha az olumsuz etkilemektedir.



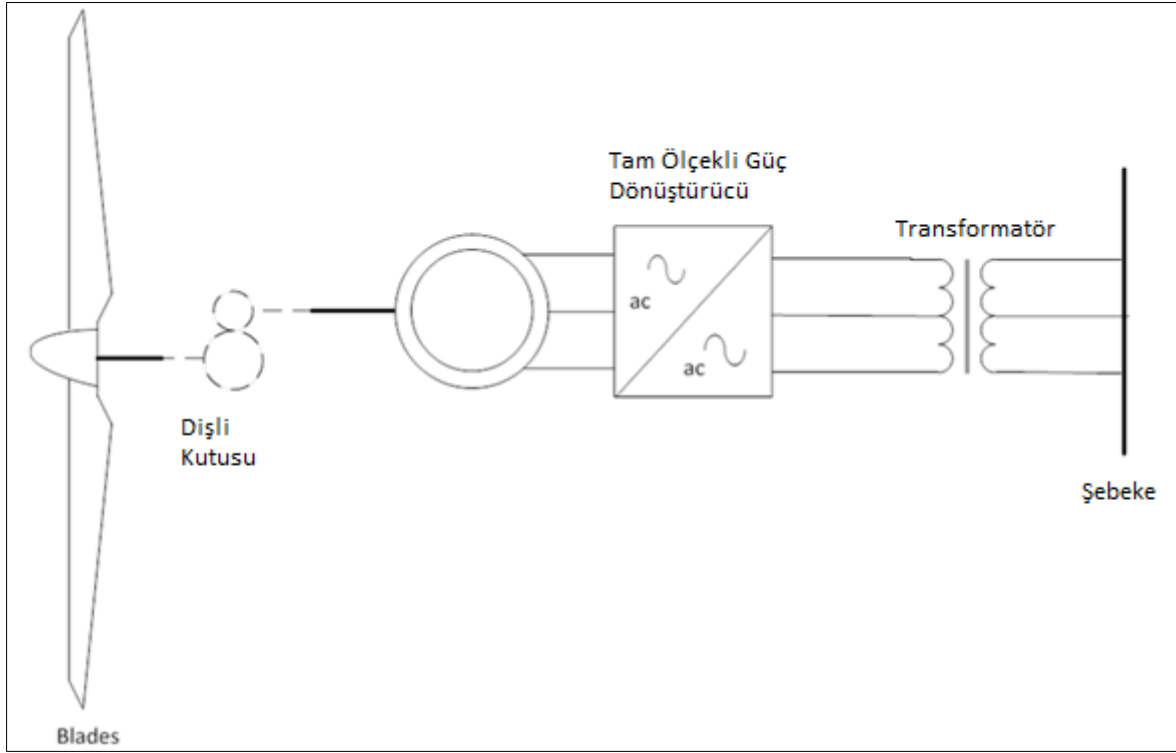
Şekil 4.3. Tip 2 rüzgâr türbini yapısı [82]

Şekil 4.4 tip 3 rüzgâr türbini yapısını göstermektedir. Bu yapıdaki rüzgâr türbinlerinin generatörünün statoru doğrudan transformatör bağlanmış olup, rotoru kısmi ölçekli güç dönüştürücü üzerinden transformatöre bağlanmaktadır. Statordan aktarılan güç, üretilen gücün yaklaşık %70'ine denk gelmekte olup, rotor üzerinden aktarılan güç üretilen gücün yaklaşık olarak %30'una denk gelmektedir. Güç dönüştürücü kullanılması sayesinde, ülkelerin şebeke kodlarına uygun olarak güç aktarımı yapılmasına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda kısmi ölçekli güç dönüştürücü kullanılması, güç dönüştürücü maliyetlerini tam ölçekli güç dönüştürücülerine nazaran daha az olmasını sağlamaktadır. En yaygın rüzgâr türbini tiplerinden bir tanesi tip 3 rüzgâr türbinleridir.



Şekil 4.4. Tip 3 rüzgâr türbini yapısı [83]

Şekil 4.5, tip 4 rüzgâr türbini yapısını göstermektedir. Bu tip rüzgâr türbinlerinde generatör tam ölçekli güç dönüştürücüye bağlı olup, güç dönüştürücü transformatöre bağlanmaktadır. Tam ölçekli güç dönüştürücü kullanılması sayesinde, rüzgâr türbini tamamıyla kontrol edilebilmekte, ülkelerin zorlayıcı şebeke kodlarına uyumluluk sağlanabilmektedir. Gelişen teknoloji sayesinde, IGBT fiyatlarının düşmesi rüzgâr türbini üreticilerini tam ölçekli güç dönüştürücü kullanılan tip 4 rüzgâr türbinlerinin kullanılması noktasında teşvik etmektedir. Zorlayıcı şebeke bağlantı gereksinimleri sebebiyle, dünyada tüm rüzgâr türbini üreticileri tip 4 rüzgâr türbinine geçiş yapmaya başlamıştır. Son yıllarda tip 4 rüzgâr türbinlerine geçişin artması sebebiyle, bu çalışma kapsamında sistem tam ölçekli güç dönüştürücüye sahip olması nedeniyle tip 4 rüzgâr türbini kullanılmaktadır. Seçilen rüzgâr türbininin generatörü, sincap kafesli asenkron generatördür.



Şekil 4.5. Tip 4 rüzgâr türbini yapısı

Mevcut çalışmada kullanılan rüzgâr türbini modeli V117/4200'dür. Bu rüzgâr türbinine ilişkin teknik veriler WindPRO yazılımından alınmıştır [80]. İlgili teknik veriler;

- Rüzgâr türbini anma gücü 4200 kW,
- Rüzgâr türbini rüzgâr sınıfı IIA,
- Rotor çapı 117 m,
- Sincap kafesli asenkron jeneratör ve tam ölçekli güç dönüştürücüden oluşmaktadır,
- Devreye girme rüzgâr hızı 3 m/s,
- Devreden çıkma rüzgâr hızı 25 m/s.

Rüzgâr türbinleri temelde mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmekte ve bunu şebeke kodlarına uygun olarak elektrik şebekesine aktarmaktadır. Mekanik enerji, rüzgâr enerjisi sayesinde elde edilmekte olup, bu noktada kanat tasarımları büyük önem arz etmektedir. Rüzgâr türbinlerinin ürettiği enerji rotor çapı, kanat süpürme alanı, hava yoğunluğu, rüzgâr türbini verimliliği ve rüzgâr hızı ile orantılıdır.

$$A = \pi L^2$$

A süpürme alanı olup birimi m^2 , L yarıçap olup birimi m'dir.

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 C_p A$$

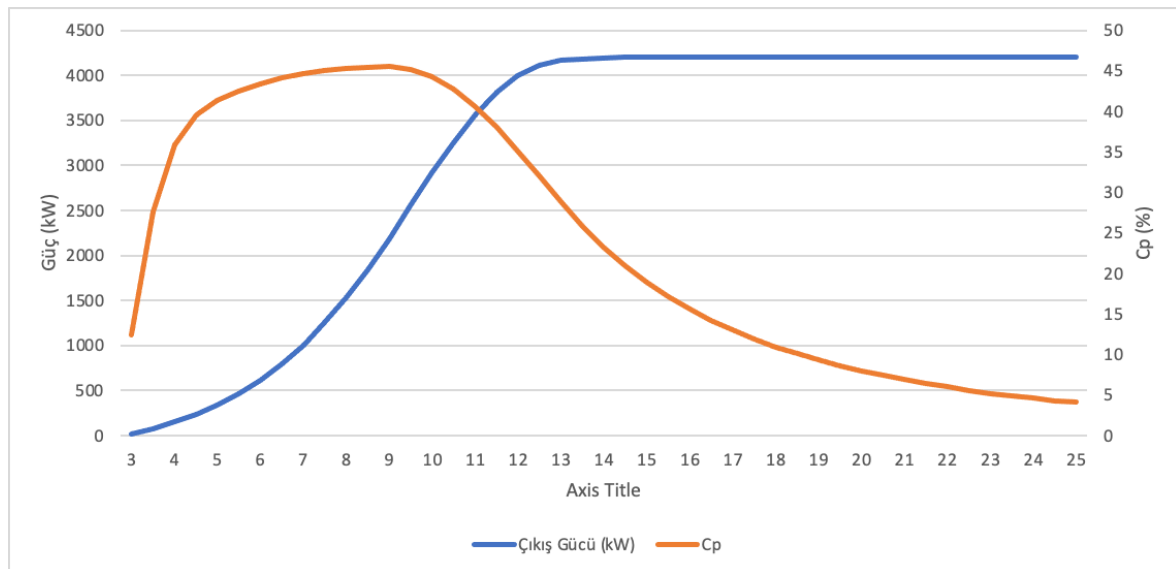
P hesaplanan aktif güç olup birimi kW, ρ hava yoğunluğu olup varsayılan değer olarak 1.225 alınmış olup, rüzgâr türbininin kurulacak olduğu yere göre hava yoğunluğu değişebilecektir. Rüzgâr türbininin kurulduğu yere göre bu değer değişecektir. V rüzgâr hızı olup birimi m/s, C_p rüzgâr türbininin güç katsayısı olup, bir diğer değişle rüzgâr türbininin verim değeridir, A ise kanat süpürme alanıdır.

Rüzgâr hızı ve güç katsayısı değerleri üretilen gücü hesaplamak için en kritik ve gerekli verilerdir. Rüzgâr türbini güç katsayısı her bir rüzgâr değeri için değişiklik göstermektedir. Bu veri Windpro yazılımından elde edilmiştir. Windpro, rüzgâr türbini ve rüzgâr çiftliği tasarımı ve planlaması için kullanılan endüstri lideri bir yazılım paketidir. WindPRO yazılımı, rüzgâr veri analizi, enerji verimlerinin hesaplanması, belirsizliklerin ölçülmesi, saha rüzgâr türbini uygunluğunun değerlendirilmesi, rüzgâr türbini ve rüzgâr çiftliği için çevresel etkinin hesaplanması ve görselleştirilmesi ile ilgili tüm gerekli bilgileri ve uygulamaları içermektedir. WindPRO rüzgâr verileri ile oluşacak enerji üretim verilerinin detaylı analizi için de kullanılmaktadır [84]. Bu yazılım hem yatırımcılar hem türbin üreticileri hem de danışmanlık şirketleri tarafından kullanılmaktadır. Rüzgâr türbini üreticileri satışını gerçekleştirdikleri rüzgâr türbinlerinin çeşitli paydaşlar tarafından analizlerinde kullanılabilmek için bu programa veri sağlamaktadır. Bu sayede diğer paydaşlar, muhtemelen rüzgâr türbini sahaları için çeşitli rüzgâr türbini opsiyonlarını dikkate alarak analizler gerçekleştirebilmektedirler. Ancak bu program hibrit enerji sistemlerine ilişkin detaylı bir çalışma sağlamamakta sadece rüzgâr türbinleri için kullanılabilmektedir. Bu sebeple, bu yazılımdan elde edilen veriler başka bir uygulama olan CYME yazılımına aktarılmıştır.

Rüzgâr türbinlerinde güç katsayısı değeri her bir rüzgâr hızı için değişkenlik göstermektedir. En başta betz limitinden dolayı rüzgâr türbinlerinin rüzgârdan elde edebileceği verim %59,3 değerini geçememektedir [85]. Betz limiti açık akışta bir rüzgâr türbininin tasarımından bağımsız olarak rüzgârdan elde edilebilecek maksimum gücü gösterir. Bu varsayım ilk olarak Alman fizikçi Albert Betz tarafından 1919 yılında ortaya atılmıştır. Betz limitine ek olarak rüzgâr türbinlerinde kullanılan güç aktarma organlarının (dişli kutusu, generatör, güç dönüştürücü, transformatör) farklı rüzgâr hızları için verimlilikleri farklılık göstermektedir. Ek olarak, rüzgâr türbinlerinde kullanılan pitch ve stall sistemlerinde rüzgâr türbini

verimliliği üzerine direk etkisi bulunmaktadır. Tüm bu değerlerin çarpımından elde edilen değer C_p değeri olarak ifade etmek mümkündür. Bu değer sayesinde, rüzgâr türbini üreticileri belirli bir rüzgâr hızından sonra, rüzgâr türbini aktif güç çıkışını anma gücüne sabitlemektedir. Bu sebeple, üreticinin tanımladığı bu değeri baz alarak ilerlemek daha doğru sonuç elde edilmesini sağlayacaktır.

Şekil 4.6’da seçilen rüzgâr türbinine ilişkin her bir rüzgâr hızına denk gelen güç değerleri ve C_p değerleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere rüzgâr türbini, 3 m/s hızda devreye girmekte, 25 m/s rüzgâr hızında devreden çıkmaktadır. Nominal güce 14,5 m/s rüzgâr hızında ulaşmaktadır.



Şekil 4.6. V117/4200 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi ve C_p Grafiği

Çizelge 4.1.’de, seçilen rüzgâr türbinine ilişkin her bir rüzgâr hızına denk gelen güç değerleri ve C_p değerleri görülmektedir. Tabloda da görüldüğü üzere rüzgâr türbini, 3 m/s hızda devreye girmekte, 25 m/s rüzgâr hızında devreden çıkmaktadır. Nominal güce 14,5 m/s rüzgâr hızında ulaşmaktadır. Buna karşın, rüzgar türbinin C_p değeri 9 m/s rüzgar hızında en yüksek değerine ulaşırken, nominal rüzgar hızı değeri aşıldıktan sonra rüzgar türbinin pitch açılarıyla oynaması sebebiyle hızlı bir şekilde azalmaktadır.

Çizelge 4.1. V117/4200 Rüzgâr Türbini Güç Eğrisi

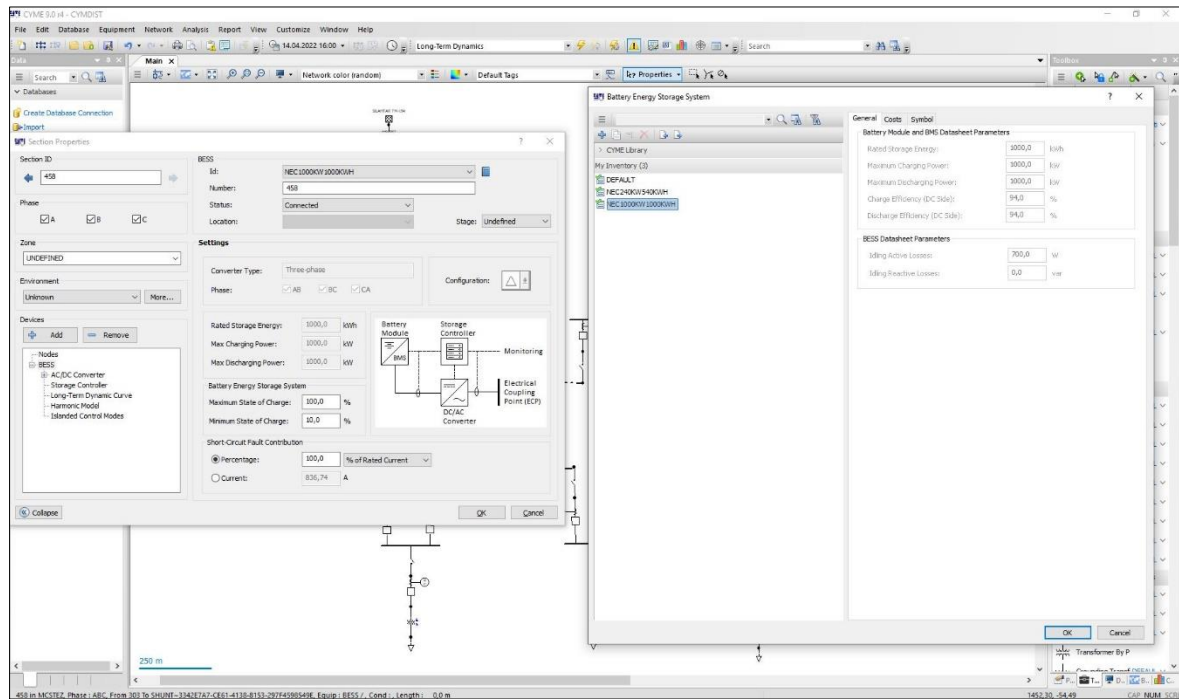
Rüzgâr hızı (m/s)	Çıkış Gücü (kW)	C _p
3	22	0,124
3,5	78	0,276
4	151	0,358
4,5	237	0,395
5	341	0,414
5,5	466	0,425
6	618	0,434
6,5	797	0,441
7	1 008	0,446
7,5	1 250	0,45
8	1 526	0,453
8,5	1 838	0,454
9	2 185	0,455
9,5	2 551	0,452
10	2 915	0,443
10,5	3 253	0,427
11	3 555	0,406
11,5	3 807	0,38
12	3 997	0,351
12,5	4 115	0,32
13	4 173	0,288
13,5	4 184	0,258
14	4 196	0,232
14,5	4 200	0,209
15	4 200	0,189
15,5	4 200	0,171
16	4 200	0,156
16,5	4 200	0,142
17	4 200	0,13
17,5	4 200	0,119
18	4 200	0,109
18,5	4 200	0,101
19	4 200	0,093
19,5	4 200	0,086
20	4 200	0,08
20,5	4 200	0,074
21	4 200	0,069
21,5	4 200	0,064
22	4 200	0,06
22,5	4 200	0,056
23	4 200	0,052
23,5	4 200	0,049
24	4 200	0,046
24,5	4 200	0,043
25	4 200	0,041

Bu veri seti CYME programına tanımlanmıştır. Buna ek olarak rüzgâr türbini için anma gücündeki reaktif güç kapasite değeri de CYME programında belirtilmiştir. CYME programına girilecek rüzgâr hızlarında, rüzgâr türbininin ne kadarlık aktif, reaktif güç sağlayabileceği sistem tarafından otomatik olarak hesaplanabilecektir.

4.2. Enerji Depolama

Çalışma kapsamında yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj ve deşarjı sahip olması sebebiyle lityum batarya tercih edilmiştir. Şekil 4.7’de enerji depolama sisteminin özelliklerinin girildiği kısım görülmektedir. Bu ekran üzerinde enerji depolamanın başlangıç doluluk oranı, çalışırken aşmaması için belirtilecek maksimum ve minimum doluluk oran değerleri tanımlanmaktadır. Aynı zamanda ilgili EDS için teknik özellikler; maksimum çıkış gücü, kapasitesi, güç faktörü, verimlilik değerleri de tanımlanmaktadır. Bu şekilde görüldüğü üzere enerji depolama sistemi özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Maksimum şarj ve deşarj gücü 1000 kW
- Kapasitesi 1000 kWh
- Nominal Gerilim 690 V
- Maksimum doluluk oranı %100
- Minimum doluluk oranı %10
- Şarj ve deşarj verimlilik değeri %94



Şekil 4.7. Enerji depolama sistemi teknik özellikleri

4.3. Mast Verisi

Rüzgâr enerji santrallerine rüzgâr türbinleri kurulmadan önce nem, sıcaklık, basınç, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü verilerini ölçmek için ölçüm kulesi (MAST) kurulmaktadır. Rüzgâr santrali sahasının rüzgâr sınıfını hesaplamak için en az 1 yıllık ölçüm gereklidir. Bu kuleden alınan veriler baz alınarak rüzgâr sahasının rüzgâr sınıfı, rüzgâr hâkim yönü vb. bilgileri belirlenmekte ve kurulacak tüm rüzgâr türbinlerinin konumlandırılması yapılabilmektedir. Çok geniş alana sahip rüzgâr sahalarında birden fazla ölçüm direği kurulumu dahi gerekebilmektedir. Rüzgâr türbinlerinin, ilgili sahada yerleşim çalışması mikro konumlandırma olarak adlandırılmaktadır. İlave olarak, elde edilen bu veriler rüzgâr santralinin yıllık enerji üretim (AEP) hesabı için de gereklidir. Yatırımcılar bu hesaplamalara göre finansal destek alabilmektedir.

IEC 61400-1(ed. 3)'e göre 3 farklı rüzgâr sınıfı ve 3 rüzgâr şiddeti bulunmaktadır. Rüzgâr sınıfları ilgili yükseklikteki 10 dakikalık ortalama ölçüme dayanarak hesaplanmış rüzgâr verisi ile belirlenmektedir. Ortalama rüzgâr hızı en fazla 10 m/s olan sahalar class I, en fazla 8,5 m/s olan sahalar class II, en fazla 7 m/s olan sahalar class III olarak tanımlanmaktadır. Rüzgâr şiddeti açısından değerlendirildiğinde, 0.16 rüzgâr şiddetindeki sahalar A sınıfı, 0.14 değerindeki sahalar B sınıfı ve 0.12 değerindeki sahalar C sınıfı olarak adlandırılmaktadır. Rüzgâr türbinleri, rüzgâr sahasının sınıfına uygun olarak seçilmelidir. Her bir rüzgâr türbini için tanımlanmış bir rüzgâr sınıfı değeri bulunmaktadır. Rüzgâr türbinleri IEC 61400-1'e göre sertifikalandırılmaktadır[86]. Bu sertifikalandırma kapsamında, rüzgâr türbinlerinin, ilgili rüzgâr sınıfı değerlerine uygun olarak gerekli testleri geçmesi beklenmektedir. Bu testler kapsamında, rüzgâr türbinlerinin ilgili rüzgâr şartlarına dayanabilirliği ve 20 yıl boyunca çalışabilirliği belgelenmiş olacaktır. Aynı zamanda, rüzgâr türbinine ait veriler kullanılarak, ölçüm direğinden alınan verilerle gerçeğe en yakın enerji hesaplaması yapılabilmektedir.

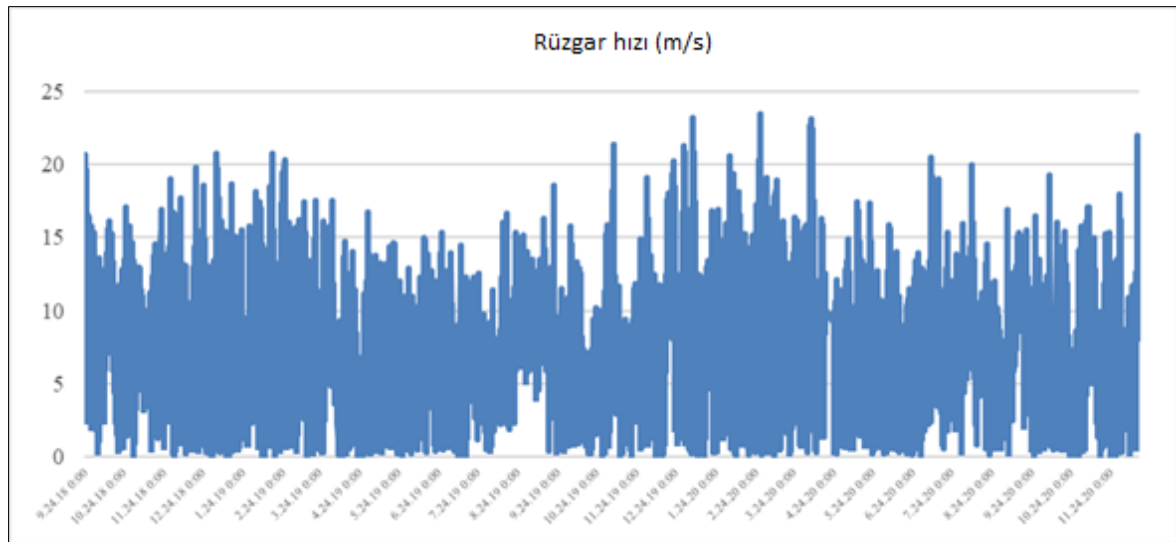
Mevcut çalışmada kullanılan MAST verileri, Türkiye'nin kuzeybatı kesiminde, deniz seviyesinden 428 m yüksekliğe kurulmuş bir ölçüm direğinden alınmıştır. Veri sahibi, konum bilgisinin paylaşılmasına izin vermemesi dolayısıyla mevcut tez kapsamında kesin konum bilgisi paylaşımı yapılamamıştır. Ölçüm verileri 24.09.2018 ile 10.12.2020 tarihleri arasını kapsamaktadır. Direk uzunluğu 100 m olup, birbiri üzerinde hatalı ölçüm yapılmasını önlemek için farklı irtifalarda 6 adet rüzgâr hız sensörü ve 3 adet rüzgâr gülü, bir adet

sıcaklık sensörü ve bir adet basınç sensörü bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, rüzgar türbin yüksekliğinin 100 m olduğu dikkate alınarak, 101 m'deki rüzgâr hız sensörü verileri kullanılmıştır. Tüm veriler 10 dakikalık çözünürlüğe sahiptir. Bu kapsamda ortalama rüzgâr hızı verileri dikkate alınmış olup veri istatistikleri aşağıdaki gibidir;

Çizelge 4.2. Rüzgâr hızı verisi istatistikleri

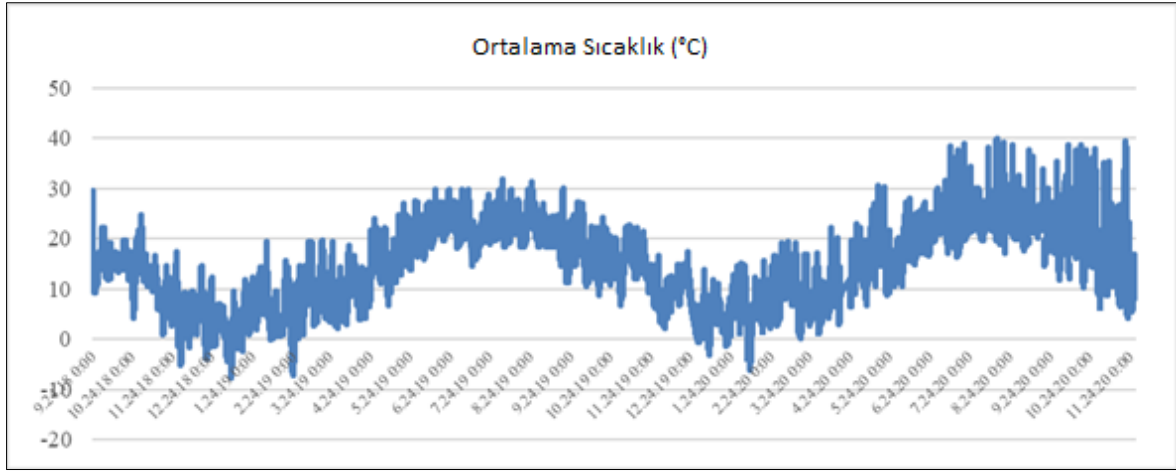
Ortalama rüzgâr hızı (m/s)	7,73
Maksimum rüzgâr hızı (m/s)	23,4
Minimum rüzgâr hızı (m/s)	0
Toplam data sayısı	114 536

Ölçüm direğinin kurulduğu lokasyondaki çevresel şartlara ilişkin veriler Şekil 4.8-4.10 arasında gösterilmiştir. Her ne kadar rüzgâr hızı farklı yükseltiler için değişiklik göstermekle birlikte, 101 m'deki ortalama rüzgâr hızı 7,73 m/s'dir. Şekil 4.8'de ilgili sensörden alınan veriler görselleştirilmiştir.



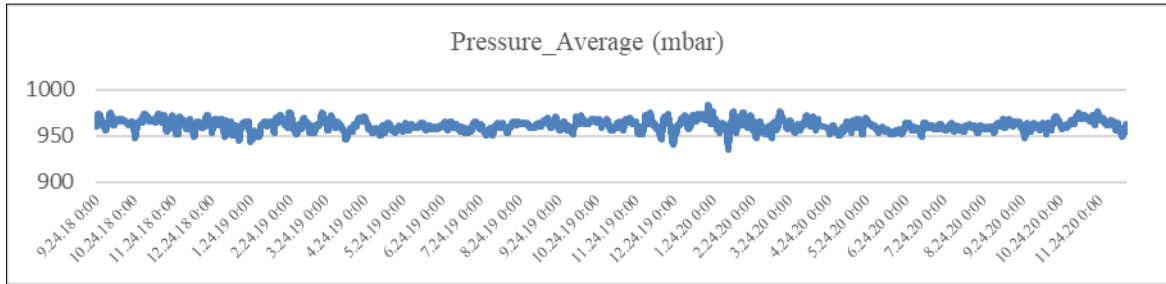
Şekil 4.8. Mast noktasındaki rüzgâr hızı verisi

Ortalama sıcaklık 14 °C olup, sıcaklıkla ilgili tüm veriler Şekil 4.9'a görselleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Mast noktasındaki ortalama sıcaklık

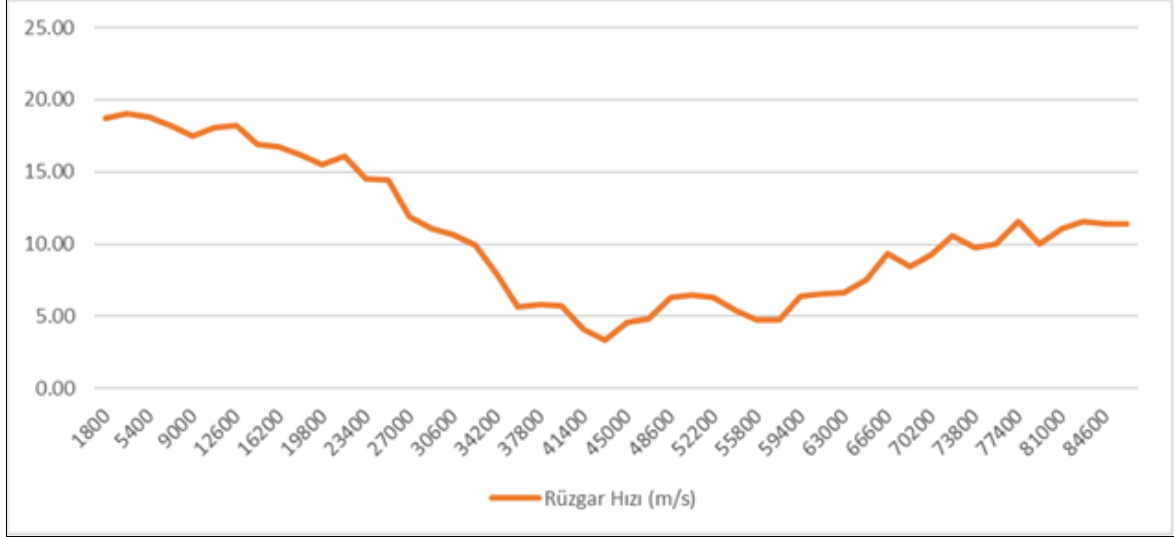
Ortalama basınç 961,63 mbar olmakla birlikte toplanan tüm veriler Şekil 4.10'de görselleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Mast noktasındaki ortalama basınç

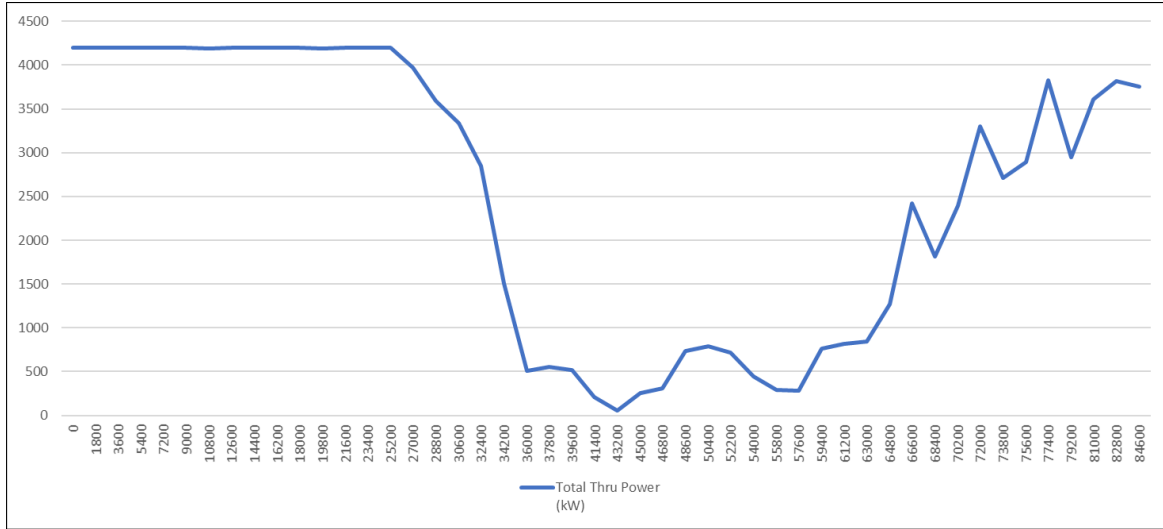
Çok fazla veri olması ve anlık hızlı değişiminden dolayı yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü üzere bu değerler net olarak değerlendirilememektedir. Tüm verilerle bir analiz yapmak mümkün olsa da, sonuçlar görselleştirildiğinde anlaşılamamaktadır. Aynı durum EDS kullanıldığında da ortaya çıkacaktır. Ayrıca, EDS benzer olaylar üzerinde aynı aksiyonları alacaktır. Bu sebeple, tüm verilere odaklanmak yerine, belirli bir veriye odaklanmak, enerji depolama sisteminin rüzgâr türbinleri üzerindeki etkisini analiz etmek için yeterli olacaktır. MAST'ta kullanılan sensörlerin kalibrasyonu veri güvenilirliği açısından çok önemlidir. Bu sebeple, MAST'ın kurulduğu ilk tarihlerdeki verinin kullanılması daha doğru veri alınması açısından önemlidir. Diğer taraftan, MAST'ın kurulu olduğu bölgede kışın en yüksek ortalama rüzgâr hızları görülmüyorken, yazın en düşük

ortalama rüzgâr hızları görülmektedir. Sonbahar ve ilkbahar ortalama rüzgâr hızına en yakın değerlerin görüldüğü dönemdir. Mast'ta kullanılan ekipmanların kalibrasyonu da dikkate alınarak, 25.09.2018 tarihindeki verilerin kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 4.11'de görüldüğü üzere, 25.09.2018 tarihindeki veride rüzgâr hızı keskin değişimler yapmaktadır.



Şekil 4.11. 25.09.2018 tarihindeki rüzgâr hızı verisi

Şekil 4.12'de 25.09.2018 tarihindeki rüzgar türbinin aktif çıkış güç grafiği görülmektedir. Rüzgar türbinin 14,5 m/s rüzgar hızında nominal hıza ulaşmış olması dolayısıyla 14,5 m/s ile 25 m/s rüzgar hızlarında anma gücünde çalışacaktır. Bu sebeple grafiğin yaklaşık 25200. Saniyesine kadar, rüzgâr türbini anma gücünde çalışmaktadır. Bundan sonraki rüzgâr hızının 14,5 m/s hız değerinin altına indiği kısımda ise, rüzgâr hızının küpüyle orantılı olarak aktif çıkış gücü değişmektedir.



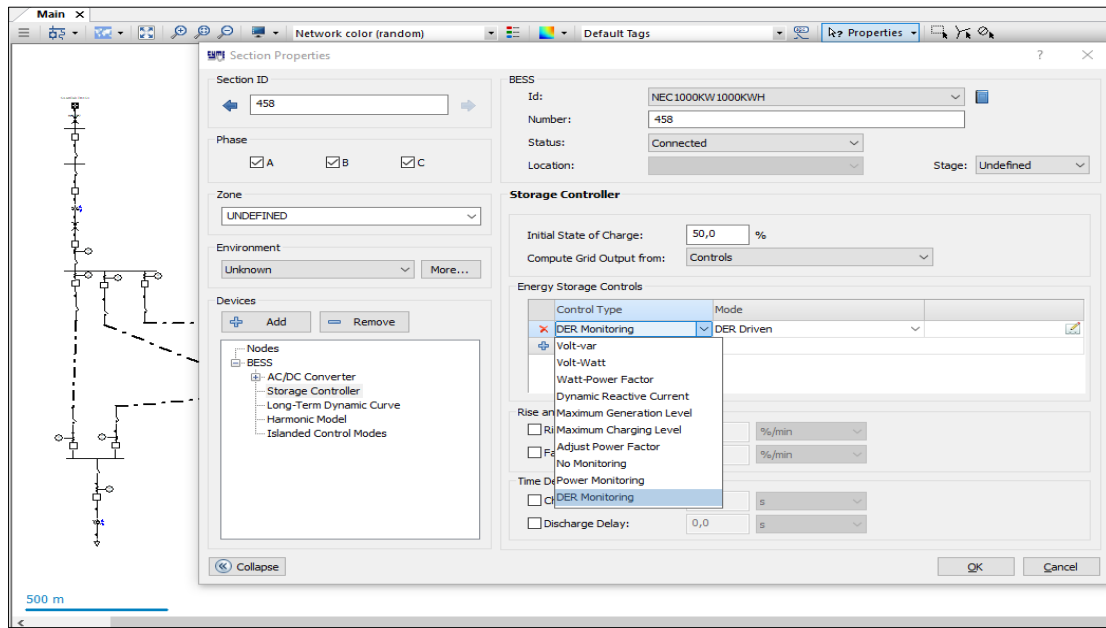
Şekil 4.12. 25.09.2018 tarihindeki rüzgâr türbini aktif çıkış gücü (kW)

4.4. CYME Programı

Tez çalışmasında kullanılan CYME yazılımı Kanadalı Eaton firmasına ait bir güç sistem analiz programıdır. CYME International 1986 yılında, CYME programını geliştirmek ve ticarileştirmek üzere kurulmuştur. Dünyada 100’den fazla ülkede 5000’den fazla müşterinin kullandığı kendini kanıtlamış bir güç sistem analiz programıdır [81].

Toplanan tüm veriler CYME güç sistem analiz programında işlenmiştir. Güç sistem analiz programı olan CYME, DER etki analizi, dinamik ve statik yük akış analizleri, harmonik analizi, mikro şebeke modelleme, şebeke konfigürasyon optimizasyonu gibi güç sistemi analizlerinin yapılmasına olanak sağlayan bir güç sistem analiz yazılımıdır. Bu tür güç sistem yazılımları, elektrik dağıtım ve/veya iletim işletmecileri, ilgili elektrik şebekesi modeli üzerinde güç sistem analizleri yapmak için kullanılmaktadır. Şebeke modellemede kullanılan ekipmanlardan bazıları yazılım içerisinde default olarak bulunmakla birlikte, kullanılacak ekipmanların uygulamada bulunmamasından dolayı modellenilebilmektedir. Yazılım, ekipman teknik verilerini tanımlamak için detaylı bilgi giriş ekranlarına sahiptir. Modellenen şebeke Türkiye elektrik şebekesinde kullanılan gerilim seviyeleri olmasından dolayı ve bu gerilim seviyesinde herhangi bir ekipman CYME programında tanımlanmamasından dolayı (program Amerikan sistemine göre tasarlanmasından dolayı), kullanılan tüm ekipmanlar tek tek CYME programında tanımlanmıştır.

CYME programının, diğer güç sistem yazılımlarına nazaran en büyük avantajı birçok algoritmayı içerisinde barındırmasıdır. Şekil 4.13'da görüldüğü gibi enerji depolama sistemlerinin çalışma durumlarına ilişkin birçok fonksiyon yazılım içerisinde halihazırda bulunmaktadır. Bu fonksiyonlardan bazıları, Volt-Var, Volt-Watt, Watt-power factor, Dynamic reactive current, DER monitoring, power monitoring şeklindedir. Her bir kontrol tipi içerisinde tanımlanmış çeşitli modlar bulunmaktadır. Bu modlar kendi içlerinde konfigüre edilebilmektedir. Böylece, programı kullanacaklara çok geniş aralıkta hızlı şekilde analiz yapma imkânı sunmaktadır.



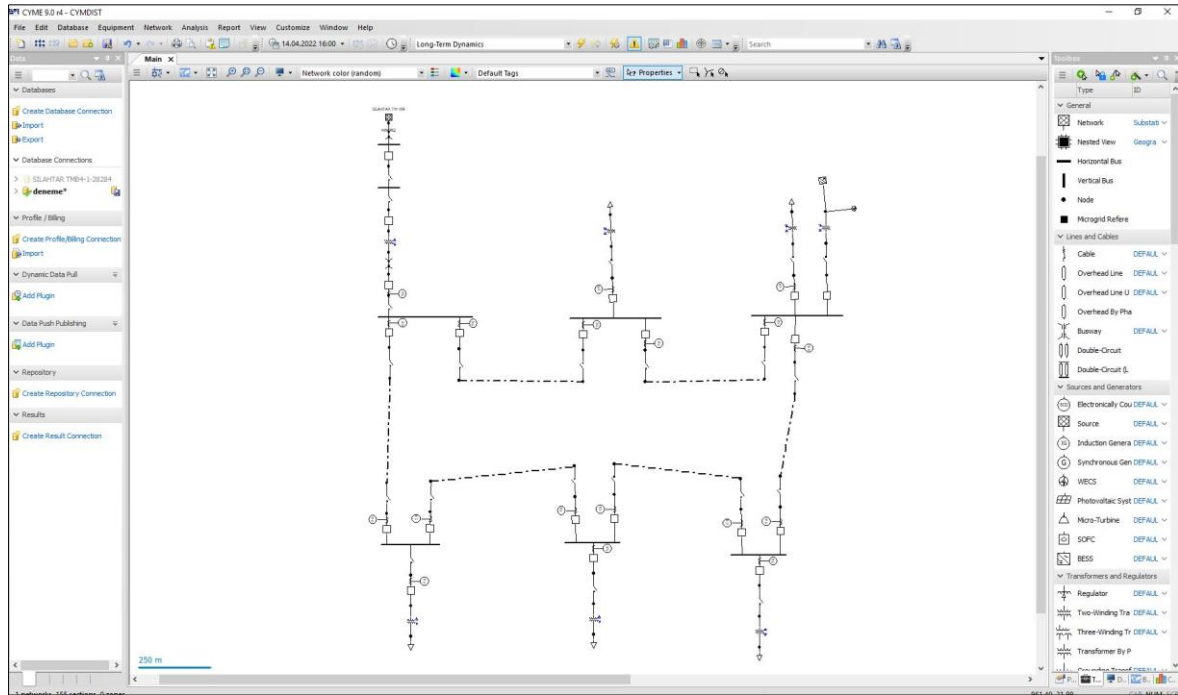
Şekil 4.13. CYME programı enerji depolama kontrol tipleri

Buna ek olarak, analiz aşamasında enerji depolama sistemi için başlangıç doluluk oranı, maksimum ve minimum doluluk oranları tanımlanabilmektedir. Bu veriler sağlandıktan sonra, enerji depolama sistemi için tanımlanan fonksiyon, kısıtlara uygun olarak çalışmaktadır.

İlave olarak, CYME programının python yazılım diliyle olan entegrasyonu sayesinde, python'da geliştirilen yazılımlara uygun olarak gerekli analizleri gerçekleştirmek de mümkündür.

4.5. Şebeke Modeli

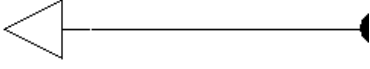
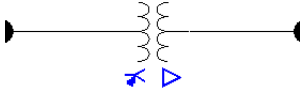
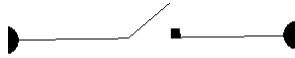
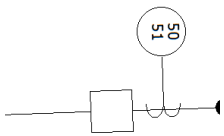
Modellenen elektrik şebekesi Şekil 4.14’de görülmektedir. Modellenen elektrik şebekesinde 9 baralı şebeke olup 8 adet 34,5 kV busbar, 1 adet 154 kV busbar bulunmaktadır. Literatürde daha önce 9 baralı şebeke modeli üzerinde rüzgar türbini ve enerji depolama sistemi çalışması sebebiyle 9 baralı şebeke modeli tercih edilmiştir[87]. Model de 5 adet alçak gerilim (AG) yük farklı transformatörler üzerinden orta gerilime (OG) bağlanmaktadır. AG yüklerden bir tanesinde aynı orta gerilim baraya bağlı enerji depolama ve rüzgâr türbini bulunmaktadır. Hem rüzgâr türbininin hem de enerji depolama sisteminin çıkış gerilimi 0,69 kV olarak modellenmiştir. Aşağıda görüldüğü üzere, enerji depolama ve rüzgâr türbini aynı AG baraya bağlı olup, 0,69 kV / 34,5 kV transformatör üzerinden OG baraya bağlanmaktadır. Her bir ekipman öncesinde kesici ve ayırıcı kullanılmıştır.



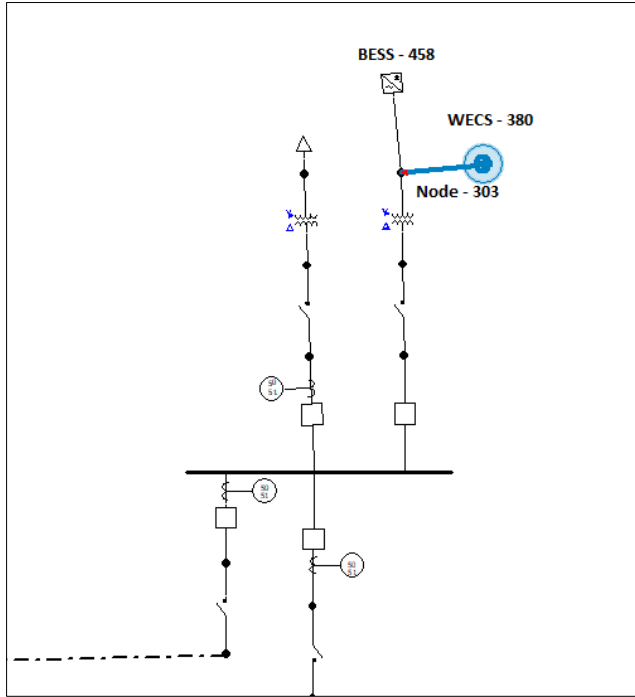
Şekil 4.14. Model elektrik şebekesi

CYME şebeke modelinde kullanılan ekipmanların sembolleri ve açıklamaları Çizelge 4.3.’de yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Sembol Tablosu

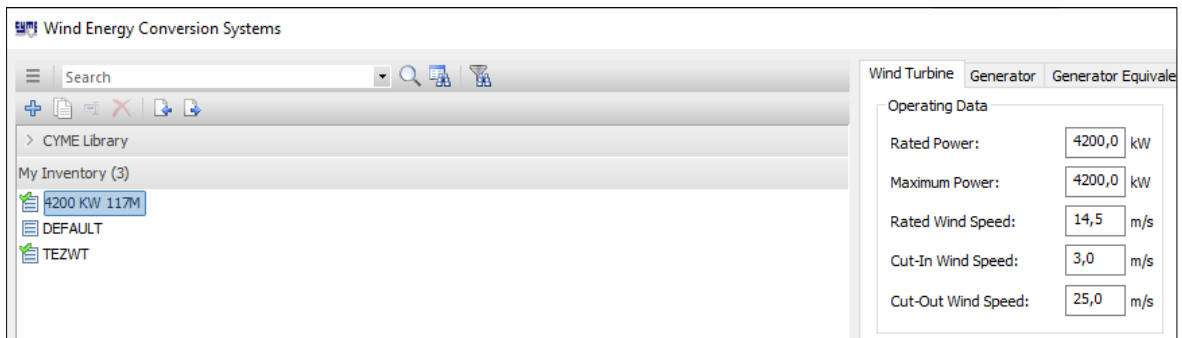
Semboller	Açıklama
	Yük
	Transformatör
	Enerji Depolama Sistemi
	Rüzgar Türbini
	Ayırıcı
	Kesici

Şekil 4.15’de enerji depolama sistemi ve rüzgâr türbinin bağlı olduğu şebeke modeli daha net görülebilmektedir. Aynı görselde belirtilen BESS-458, WECS-380 ve Node-303 sırasıyla enerji depolama sisteminin, rüzgâr türbininin ve bu iki ekipmanın bağlı olduğu AG barayı belirtmektedir. Yapılan analiz sonuçları bu noktalar için elde edilmiştir. Uygulamada, enerji depolama sistemi için referans noktası rüzgâr türbini olarak seçilmiştir. EDS, tanımlanan fonksiyonu dikkate alarak, rüzgâr türbini çıkışına uygun olarak gerekli aksiyonları alacaktır.



Şekil 4.15. Enerji depolama sistemi ve rüzgâr türbini bağlantı yapısı

Şekil 4.16.'te şebeke modelinde kullanılan rüzgâr türbinine ilişkin teknik özellikler gösterilmektedir. Rüzgâr türbini anma gücü, maksimum çıkış gücü, anma rüzgâr hızı, C_p değeri, devreye girme ve devreden çıkma rüzgâr hızı verilerinin sisteme girilmesi gerekmektedir. Rüzgâr türbini modeli sisteme işlendikten sonra, program, tanımlanan özellikleri dikkate alarak gerekli çıkış aktif, reaktif gücü hesaplamalarını yapmaktadır.



Şekil 4.16. Rüzgâr türbini teknik özellikleri

Modellenen şebekede, rüzgâr türbini ve enerji depolama sistemi haricinde birçok ekipman kullanılmaktadır. Bu ekipmanlardan başlıcaları Çizelge 4.4.'da görülmektedir. Bu ekipmanların modele tanıtılması aşamasında, üreticilerin sağladığı teknik dokümanlardan faydalanılmıştır.

Çizelge 4.4. Ana ekipmanlara ait istatistikler

Ekipman Tipi	Teknik Özelliği	Adet
Transformatör	154kV-33-kV-80 MVA	1
Transformatör	33kV-0,4kV-1 250 kVA	3
Transformatör	33kV-0,4kV-1 600 kVA	2
Transformatör	33kV-0,69kV-4 800 kVA	1
Kablo	33kV_3x1x240 XLPE_CU	

Kullanılan transformatörlere ilişkin teknik özellikler Şekil 4.17-4.20'den görüldüğü üzere CYME programında tanımlanmıştır. Tüm veriler, hali hazırda kullanılan ürünlerin özelliklerinden seçilmiştir. Her bir ekipmanın model çıktıları (aktif güç, hat akımları vb.) üzerinde önemli etkisi olmasından dolayı ekipman özellikleri çok kritiktir. Dağıtım transformatörleri Dyn11, rüzgâr türbini transformatörü Dyn5, yüksek gerilim transformatörü YNyn0 bağlantı grubundan seçilmiştir.

The screenshot displays the 'Two-Winding Transformer' configuration window in the CYME software. The left sidebar shows a list of transformer models, with '33KV-4800KVA-WT' highlighted. The main window is divided into several tabs: General, Loading Limits, LTC, Reliability, Costs, and Symbol. The 'General' tab is active, showing the following parameters:

- Nominal Data:**
 - Transformer Type: Three Phase
 - Insulation Type: Liquid-filled
 - Winding Type: Shell Form
 - Nominal Rating: 4800,0 kVA
 - Primary Voltage: 34,5 kVLL
 - Secondary Voltage: 0,69 kVLL
 - No Load Losses: 6,0 kW
 - Magnetizing Current: 0,0 %
- Sequence Impedances:**
 - Z1: 7,0 %
 - Z0: 7,0 %
 - X1/R1: 12,0
 - X0/R0: 12,0
- Grounding Impedances:**
 - Primary: 0,0
 - Secondary: 0,0
- Configuration:**
 - Primary: (Symbol)
 - Secondary: (Symbol)
 - Phase Shift: Dyn5
 - Reversible: ☒

Buttons for 'Apply', 'OK', and 'Cancel' are located at the bottom right of the window.

Şekil 4.17. 0,69 kV / 34,5 kV 4800 kVA transformatör özellikleri

The screenshot shows the 'Two-Winding Transformer' dialog box with the 'General' tab selected. The left pane lists various transformer models, with '33KV-1600KVA' highlighted. The right pane contains the following settings:

- Nominal Data:**
 - Transformer Type: Three Phase
 - Insulation Type: Liquid-filled
 - Winding Type: Shell Form
 - Nominal Rating: 1600,0 kVA
 - Primary Voltage: 34,5 kVLL
 - Secondary Voltage: 0,4 kVLL
 - No Load Losses: 2,8 kW
 - Magnetizing Current: 0,0 %
- Configuration:**
 - Primary: [Symbol]
 - Secondary: [Symbol]
 - Phase Shift: Dyn11
 - Reversible: ☒
- Sequence Impedances:**
 - Z1: 6,0 %
 - Z0: 6,0 %
 - X1/R1: 6,0
 - X0/R0: 6,0
- Grounding Impedances:**
 - Primary: Rg: 0,0 Ω , Xg: 0,0 Ω
 - Secondary: Rg: 0,0 Ω , Xg: 0,0 Ω

Buttons at the bottom: Apply, OK, Cancel.

Şekil 4.18. 0,4 kV / 34,5 kV 1600 kVA transformatör özellikleri

The screenshot shows the 'Two-Winding Transformer' dialog box with the 'General' tab selected. The left pane lists various transformer models, with '33KV-1250KVA' highlighted. The right pane contains the following settings:

- Nominal Data:**
 - Transformer Type: Three Phase
 - Insulation Type: Liquid-filled
 - Winding Type: Shell Form
 - Nominal Rating: 1250,0 kVA
 - Primary Voltage: 34,5 kVLL
 - Secondary Voltage: 0,4 kVLL
 - No Load Losses: 2,23 kW
 - Magnetizing Current: 0,0 %
- Configuration:**
 - Primary: [Symbol]
 - Secondary: [Symbol]
 - Phase Shift: Dyn11
 - Reversible: ☒
- Sequence Impedances:**
 - Z1: 6,0 %
 - Z0: 6,0 %
 - X1/R1: 6,0
 - X0/R0: 6,0
- Grounding Impedances:**
 - Primary: Rg: 0,0 Ω , Xg: 0,0 Ω
 - Secondary: Rg: 0,0 Ω , Xg: 0,0 Ω

Buttons at the bottom: Apply, OK, Cancel.

Şekil 4.19. 0,4 kV / 34,5 kV 1250 kVA transformatör özellikleri

The screenshot shows the 'Two-Winding Transformer' software window. The left pane lists various transformer models, with '154KV-33KV-80MVA' selected. The right pane shows the configuration settings for this transformer.

General Tab:

- Nominal Data:**
 - Transformer Type: Three Phase
 - Insulation Type: Liquid-filled
 - Winding Type: Shell Form
 - Nominal Rating: 100000,0 kVA
 - Primary Voltage: 154,0 kVLL
 - Secondary Voltage: 34,5 kVLL
 - No Load Losses: 60,0 kW
 - Magnetizing Current: 0,0 %
- Configuration:**
 - Primary: [Symbol]
 - Secondary: [Symbol]
 - Phase Shift: YNyn0
 - Reversible: ☒
- Sequence Impedances:**

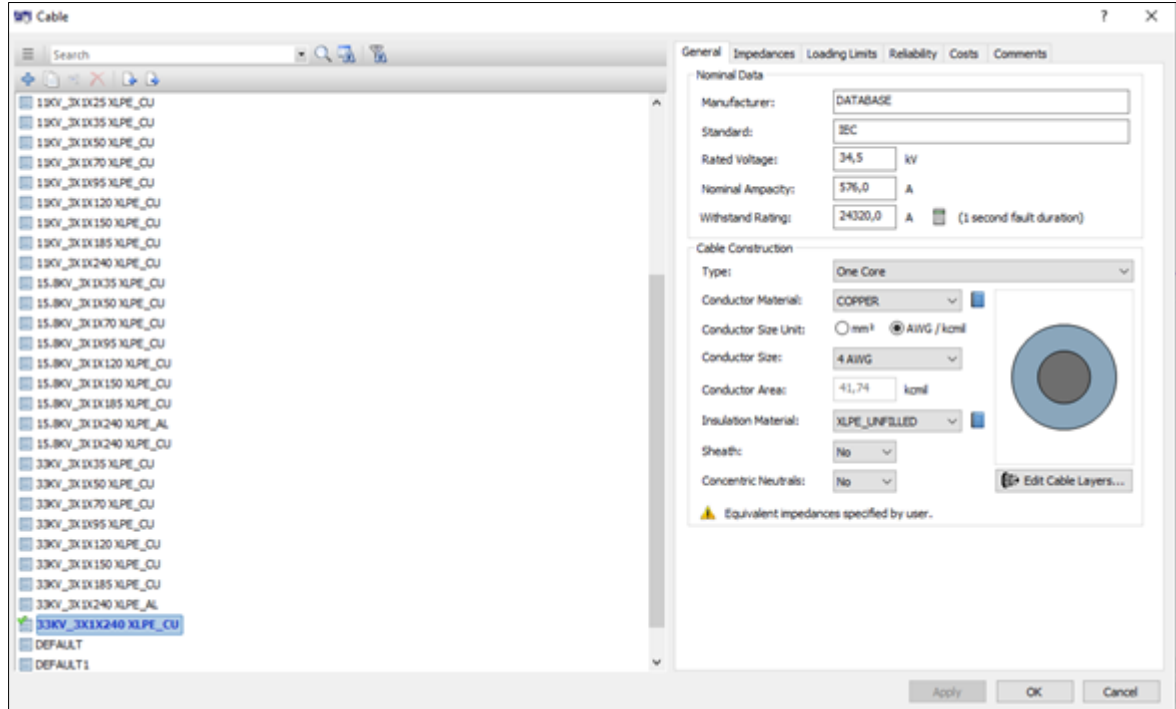
	Z1	%	X1/R1	
Estimate...	12,0	%	34,0	
Z0	10,6	%	X0/R0	34,0
- Grounding Impedances:**

	Rg	Xg	
Primary:	0,0	0,0	Ω
Secondary:	20,0	0,0	Ω

Buttons at the bottom: Apply, OK, Cancel.

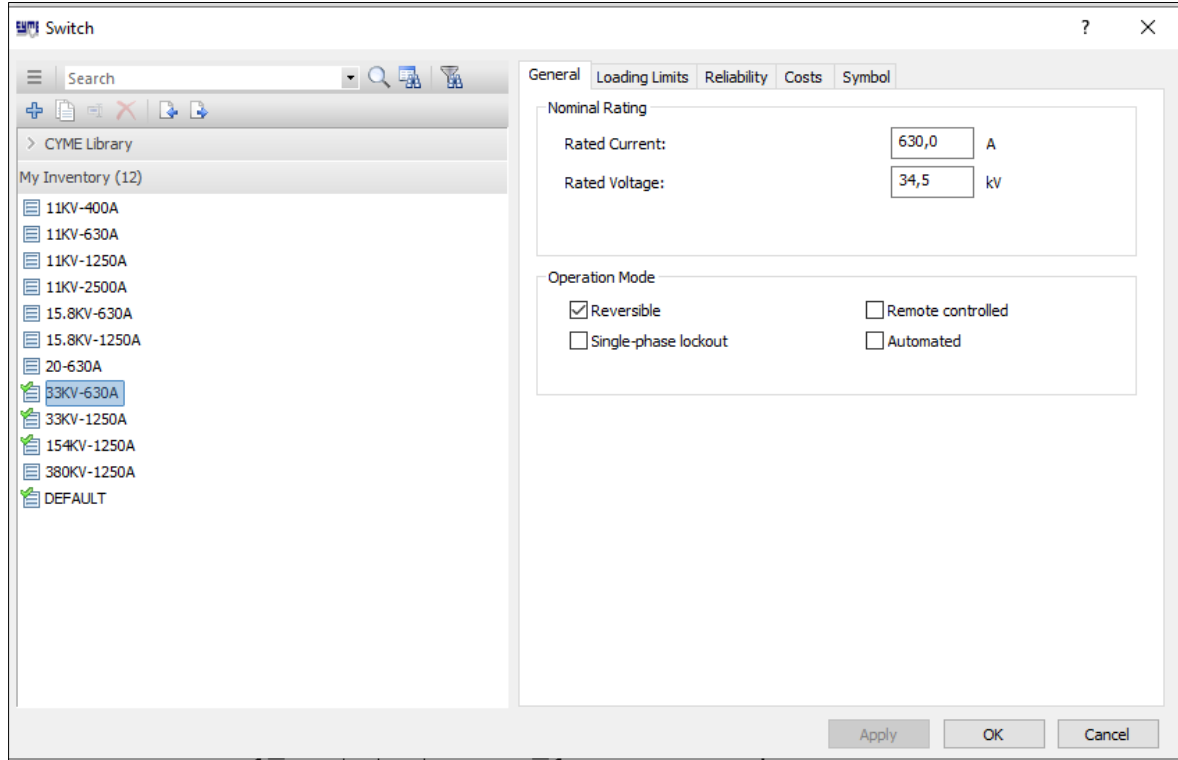
Şekil 4.20. 34,5 kV / 154 kV 80 MVA transformatör özellikleri

Modellenen şebekede, doğrudan AG baraya bağlanan tüm ekipmanlar AG kablosu dikkate alınmadan modellenmiştir. Ancak modelde OG baralar arası OG kablolar kullanılmıştır. Kullanılan orta gerilim kabloların kablo tipi 3x1x240 XLPE olup yeraltı kablosudur. Bu kabloun nominal gerilimi 34,5 kV, nominal akım kapasitesi 576 A'dır. Kabloun taşıdığı toplam güç yaklaşık 33 kW'dır. Model şebekenin toplam kurulu gücü göz önüne alındığında, akım taşıma kapasitesi açısından herhangi bir kısıtlama yaratmamaktadır.



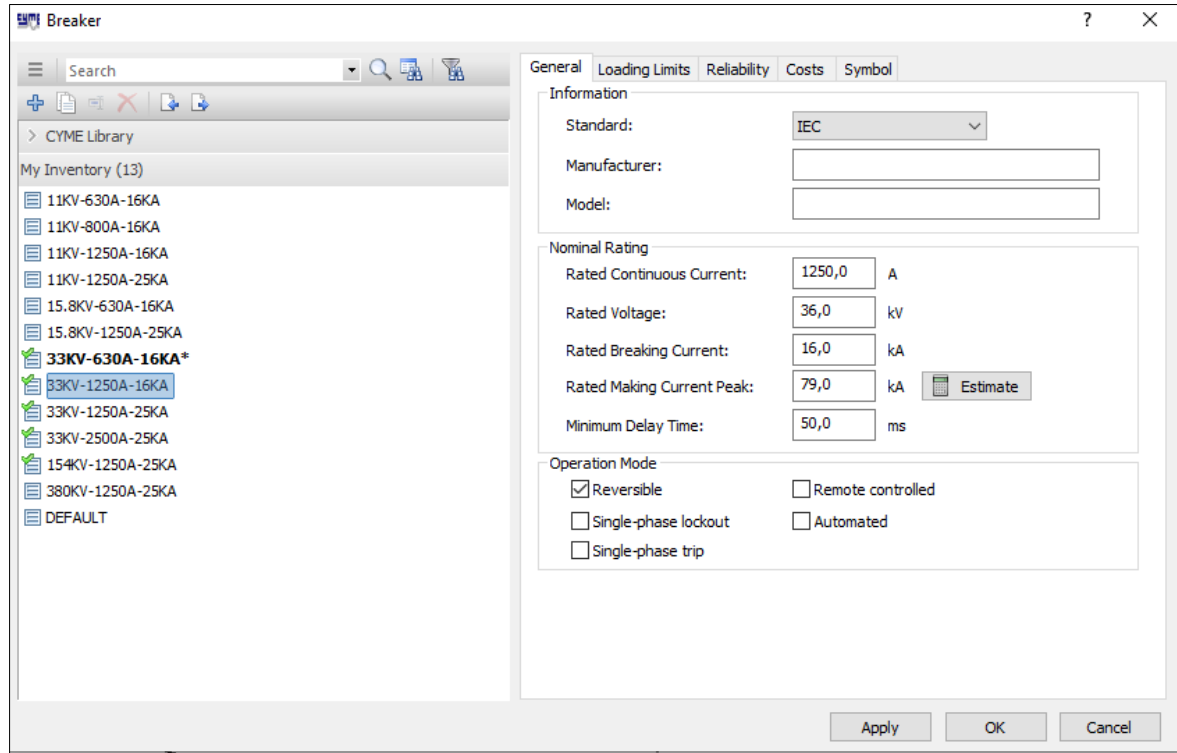
Şekil 4.21. 34,5 kV 3x1x240 XLPE bakır kablo teknik özellikleri

Sistemde kullanılan ana bileşenlerin yanı sıra ayırıcı, kesici gibi birçok ekipman kullanılmaktadır. Bu ekipmanların teknik verileri de üretici kataloglarından alınmıştır. Kullanılan ayırıcılar 33kV – 630 A, 33 kV – 1250 A, 154 kV – 1250 A olup teknik özellikleri Şekil 4.22’de görülmektedir.

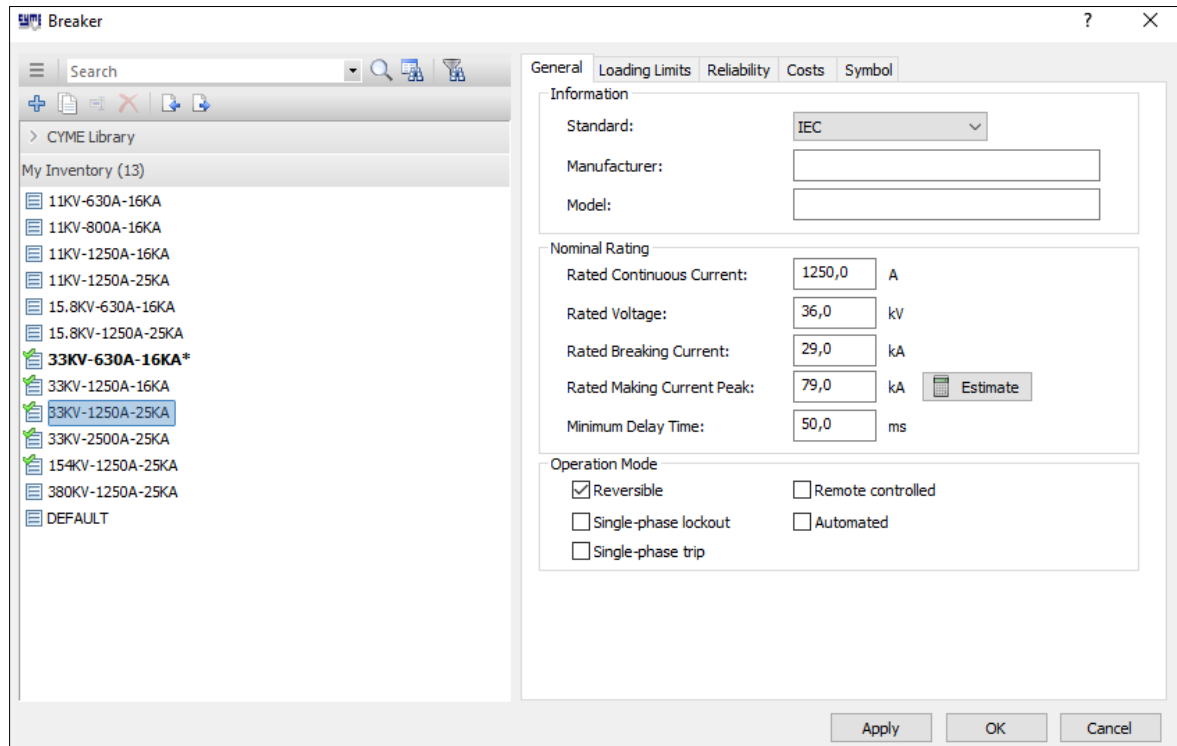


Şekil 4.22. Mevcut çalışmada kullanılan ayırıcı tipleri ve özellikleri

Şekil 4.23’de görüldüğü üzere modelde 5 farklı kesici kullanılmıştır. Kullanılan kesici tipleri 33kV-630 A- 16kA, 33kV-1250 A- 16kA, 33kV-630 A- 25 kA, 33kV-1250 A- 25kA, 154 kV – 1250 A – 25 kA olup, anma akımları 630 A ve 1250 A’dır. 16 kA ve 25 kA kısa devre akım değerleri Şekil 4.23 verilmiştir.



Şekil 4.23. 1 250 A – 16 kA kesici teknik özellikleri

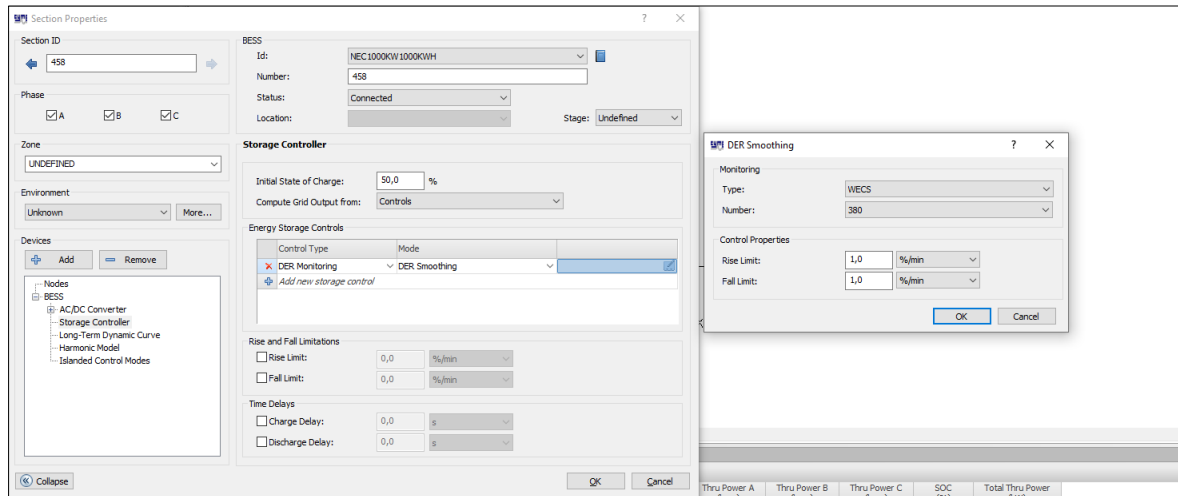


Şekil 4.24. 1 250 A – 25 kA kesici teknik özellikleri

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasının amacı, rüzgâr hızı değişikliği sebebiyle rüzgâr türbini aktif güç çıkışında oluşan salınımların enerji depolama uygulamaları ile çözülmesine yönelik analizleri içermektedir. Bir diğer deyişle, enerji depolama sistemi, rüzgâr türbini aktif güç çıkışını yumuşatarak şebeke üzerinde, aktif güçteki salınım etkilerini sınırlayarak elektrik şebekesine daha stabil enerji akışının sağlanmasıdır. Simülasyonlar CYME programında gerçekleştirilmiştir ve sonuçları aşağıda sunulmuştur. Kullanılan ekipman teknik verileri, hali hazırda kullanılan ürün kataloglarından alınmış, CYME programına işlenmiş ve çalışma kapsamında ilgili kısımlarda belirtilmiştir.

Mevcut çalışma kapsamında önerilen sistemde, optimum çözümün bulunabilmesi için farklı EDS kontrol tipleri ve modları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi en optimum sonuç, DER Monitoring kontrol tipinde ve DER Smoothing kontrol modu ile elde edilmiştir. EDS için referans noktası rüzgâr türbini seçilmiştir.



Şekil 5.1. CYME enerji depolama sistem kontrolcüsü

DER Smoothing modu, adından da anlaşılabilir olduğu gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının aktif güç çıkışını yumuşatmak için kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında rüzgâr türbini aktif çıkış gücündeki değişim, kurulu gücünün %10'dan fazla olur ise EDS'nin devreye girerek gerekli fonksiyonu çalıştırması beklenmektedir. Rüzgâr türbininin kurulu gücü 4200 kW olup %10 güç sapması 420 kW'dır. Buna ilişkin olarak EDS'nin kontrol özellikleri izlenen rüzgâr türbini için 1 %/dk. artış limiti ve 1 %/dk. düşüş limiti şeklinde tanımlanmıştır. Bu sayede rüzgâr türbininin kurulu gücünün yaklaşık olarak %10'undan

fazla değişim olması durumunda, EDS koşulları tanımlanan limit dahilinde ise devreye girecektir. Ek olarak, iki farklı başlangıç doluluk oranlarına göre analizler tekrarlanmıştır. Bu sayede enerji depolamanın başlangıç koşulundaki doluluk oranına göre etkisi de analiz edilmiştir.

Seçilen gün için, 1 günlük rüzgâr verisi CYME programına işlenmiştir. Model çalışmaları tamamlandıktan sonra, 24 saatlik yük akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelendiğinde, enerji depolama sistemi rüzgâr türbini çıkışına göre gerekli aksiyonları aldığı sonuçlardan görülmektedir. Enerji depolama sisteminin enerji kapasitesi ve güç kapasitesi ise rüzgar türbininin etkilerini limitlediği ve yumuşattığı görülmektedir. Model şebekede rüzgâr türbininin güç kısıması gerçekleştirilmemiştir.

Çizelge 5.1’te Rüzgâr türbinine ilişkin analiz sonuçları görülmektedir. 24 saatlik veri saniye cinsinden uygulamaya işlenmiştir. CYME yazılımının her bir 10 dakika için ölçüm verilerini sisteme girmeye izin vermemesi dolayısıyla veriler yarım saatlik periyotlara indirgenmiştir. Yazılıma girilmiş rüzgar hızlarına ilişkin her bir yarım saat (1800 s) için rüzgar türbini üretimi analiz sonucu tabloda görülmektedir. Türbin kurulu gücünün 4200 kW olması sebebiyle, ± 420 kW’dan fazla olan değişimler tabloda belirtilmiştir. Negatif değerdeki değişim, rüzgar hızının azaldığını buna bağlı olarak rüzgar türbini çıkış gücünde azaldığını, pozitif değerdeki değişim, rüzgar hızının arttığını buna bağlı olarak da rüzgar türbini gücünün arttığını göstermektedir.

Bununla birlikte her bir güç değeri için faz akımları ve faz güçleri de görülebilmektedir. Analizler esnasında dengeli yüklenme seçilmesinden dolayı tüm fazlardaki akım değerleri ve güç değerleri aynı ve dengeli olarak çıkmaktadır. Akım değerler amper olarak gösterilmiş olmakla birlikte, güç değerleri kW birimi baz alınarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.1’de rüzgar türbininin çıkış gücü değerleri CYME programına girilen rüzgar hızı verisi ve rüzgar türbinin güç eğrisi baz alınarak CYME programı tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Akım değerleri hesaplanırken, rüzgâr türbininin çıkış noktasındaki gerilim değeri de baz alınmıştır.

Çizelge 5.1. WECS- 380 analiz sonuçları

Zaman (s)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	PA (kW)	PB (kW)	PC (kW)	Toplam Güç (kW)	420kW'dan fazla değişimler (kW)
0	3,611	3,611	3,611	1,400	1,400	1,400	4 200	
1 800	3,611	3,611	3,611	1,400	1,400	1,400	4 200	
3 600	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
5 400	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
7 200	3,611	3,611	3,611	1,399	1,399	1,399	4 198	
9 000	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
10 800	3,602	3,602	3,602	1,396	1,396	1,396	4 187	
12 600	3,611	3,611	3,611	1,400	1,400	1,400	4 199	
14 400	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
16 200	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
18 000	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
19 800	3,602	3,602	3,602	1,396	1,396	1,396	4 188	
21 600	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 200	
23 400	3,610	3,610	3,610	1,399	1,399	1,399	4 198	
25 200	3,612	3,612	3,612	1,400	1,400	1,400	4 199	
27 000	3,419	3,419	3,419	1,323	1,323	1,323	3 970	
28 800	3,097	3,097	3,097	1,196	1,196	1,196	3 589	
30 600	2,886	2,886	2,886	1,113	1,113	1,113	3 340	
32 400	2,469	2,469	2,469	950	950	950	2 850	-490
34 200	1,318	1,318	1,318	503	503	503	1 510	-1 340
36 000	446	446	446	169	169	169	508	-1 002
37 800	488	488	488	185	185	185	556	
39 600	456	456	456	173	173	173	520	
41 400	185	185	185	70	70	70	210	
43 200	47	47	47	18	18	18	53	
45 000	222	222	222	84	84	84	252	
46 800	272	272	272	103	103	103	309	
48 600	646	646	646	245	245	245	736	427
50 400	692	692	692	263	263	263	790	
52 200	626	626	626	238	238	238	714	
54 000	387	387	387	147	147	147	441	
55 800	259	259	259	98	98	98	294	
57 600	251	251	251	95	95	95	286	
59 400	667	667	667	253	253	253	760	474
61 200	712	712	712	271	271	271	813	
63 000	736	736	736	280	280	280	840	
64 800	1,115	1,115	1,115	425	425	425	1 275	435
66 600	2,106	2,106	2,106	808	808	808	2 423	1 148
68 400	1,584	1,584	1,584	606	606	606	1 819	-604
70 200	2,080	2,080	2,080	798	798	798	2 393	574
72 000	2,851	2,851	2,851	1,099	1,099	1,099	3 297	904
73 800	2,349	2,349	2,349	903	903	903	2 709	-588
75 600	2,507	2,507	2,507	965	965	965	2 894	
77 400	3,299	3,299	3,299	1,275	1,275	1,275	3 826	932
79 200	2,548	2,548	2,548	981	981	981	2 944	-882
81 000	3,115	3,115	3,115	1,203	1,203	1,203	3 610	666
82 800	3,290	3,290	3,290	1,273	1,273	1,273	3 818	
84 600	3,239	3,239	3,239	1,253	1,253	1,253	3 758	

Çizelge 5.2. BESS - 458 simülasyon sonuçları

Zaman (s)	IA (A)	IB (A)	IC (A)	PA (kW)	PB (kW)	PC (kW)	SOC (%)	Toplam Güç (kW)
0	01	01	01	00	00	00	50	-1
1 800	01	01	01	00	00	00	50	-1
3 600	01	01	01	00	00	00	50	-1
5 400	01	01	01	00	00	00	50	-1
7 200	01	01	01	00	00	00	50	-1
9 000	01	01	01	00	00	00	50	-1
10 800	01	01	01	00	00	00	50	-1
12 600	01	01	01	00	00	00	50	-1
14 400	01	01	01	00	00	00	50	-1
16 200	01	01	01	00	00	00	50	-1
18 000	01	01	01	00	00	00	50	-1
19 800	01	01	01	00	00	00	50	-1
21 600	01	01	01	00	00	00	50	-1
23 400	01	01	01	00	00	00	50	-1
25 200	01	01	01	00	00	00	50	-1
27 000	01	01	01	00	00	00	50	-1
28 800	65	65	65	27	27	27	50	80
30 600	01	01	01	00	00	00	46	-1
32 400	156	156	156	63	63	63	46	190
34 200	778	778	778	313	313	313	36	939
36 000	01	01	01	00	00	00	10	-1
37 800	01	01	01	00	00	00	10	-1
39 600	01	01	01	00	00	00	10	-1
41 400	01	01	01	00	00	00	10	-1
43 200	01	01	01	00	00	00	10	-1
45 000	01	01	01	00	00	00	10	-1
46 800	01	01	01	00	00	00	10	-1
48 600	107	107	107	-43	-43	-43	10	-128
50 400	01	01	01	00	00	00	16	-1
52 200	01	01	01	00	00	00	16	-1
54 000	01	01	01	00	00	00	16	-1
55 800	01	01	01	00	00	00	16	-1
57 600	01	01	01	00	00	00	16	-1
59 400	146	146	146	-58	-58	-58	16	-175
61 200	01	01	01	00	00	00	24	-1
63 000	01	01	01	00	00	00	24	-1
64 800	112	112	112	-45	-45	-45	24	-135
66 600	701	701	701	-283	-283	-283	31	-849
68 400	252	252	252	101	101	101	70	304
70 200	227	227	227	-92	-92	-92	54	-275
72 000	497	497	497	-202	-202	-202	67	-605
73 800	236	236	236	96	96	96	95	287
75 600	01	01	01	00	00	00	80	-1
77 400	518	518	518	-211	-211	-211	80	-633
79 200	478	478	478	194	194	194	100	581
81 000	300	300	300	-122	-122	-122	69	-366
82 800	01	01	01	00	00	00	86	-1
84 600	01	01	01	00	00	00	86	-1

Çizelge 5.2.'de EDS'yle ilgili sonuçlar görülebilir. EDS aktif değilken dahili kayıplardan dolayı EDS yaklaşık 1 kW iç tüketim kaynaklı enerji tüketmektedir. Bu nedenle en sağdaki sütunda 1 kW tüketim görülmektedir. Negatif değerler şarjı, pozitif değerler deşarjı göstermektedir. Aynı zamanda EDS'nin başlangıç doluluk oranı %50'dir.

Çizelge 5.3.'da Node – 303, yani EDS ve rüzgâr türbininin bağlandığı baraya ilişkin veriler görülmektedir. Bu tabloda negatif ve pozitif değerler güç yönünü gösterir. Değer pozitif ise şebekeye güç akışı, değer negatif ise rüzgar türbini ve/veya EDS'ye doğru güç akışı gerçekleşmektedir.

Çizelge 5.3. Node- 303 simülasyon sonuçları

Zaman (s)	Toplam Güç (kW)	420kW'dan fazla değişimler (kW)
0	4 199	
1 800	4 199	
3 600	4 199	
5 400	4 199	
7 200	4 198	
9 000	4 199	
10 800	4 187	
12 600	4 198	
14 400	4 199	
16 200	4 199	
18 000	4 199	
19 800	4 187	
21 600	4 199	
23 400	4 197	
25 200	4 198	
27 000	3 969	
28 800	3 669	
30 600	3 340	
32 400	3 040	
34 200	2 449	-590
36 000	507	-1 942
37 800	555	
39 600	519	
41 400	209	
43 200	53	
45 000	251	
46 800	308	
48 600	608	

Çizelge 5.4. Node- 303 simülasyon sonuçları (devamı)

Zaman	Toplam Güç	420kW'dan fazla değişimler (kW)
(s)	(kW)	
50 400	789	
52 200	713	
54 000	440	
55 800	293	
57 600	285	
59 400	585	
61 200	812	
63 000	839	
64 800	1 139	
66 600	1 574	435
68 400	2 123	549
70 200	2 118	
72 000	2 692	575
73 800	2 996	
75 600	2 893	
77 400	3 193	
79 200	3 525	
81 000	3 243	
82 800	3 817	574
84 600	3 757	

Sadece rüzgâr türbini kullanılması durumunda, şebekeye aktarılan güç ile, enerji depolama sistemi kullanılması durumunda şebekeye aktarılan güç (sistem güç çıkışı) Çizelge 5.5 görülmektedir. Yine tabloda enerji depolama sistemi kullanılması sayesinde rüzgâr türbini aktif güç çıkışının yumuşatılmasına ilişkin olarak sistem güç çıkışı tablosu altında 420 kW'da fazla olan değişim sayısının azalması ile de görülebilmektedir.

Çizelge 5.5'ü daha anlaşılabilir kılmak için iki farklı durum üzerinden ilerleyelim. 34 200. Saniyeye baktığımızda, 32 400. Saniyeye göre rüzgar türbini çıkış gücü 1 340 kW azalmıştır. Rüzgar türbini kurulu gücü olan 4200 kW'ın %10'undan fazla bir değişim gerçekleştiği için bu an tablo üzerinde belirtilmiştir. Sistem, %10'dan fazla değişimi kısıtlamak için enerji depolama sistemini devreye almış ve enerji depolama sisteminin %94 verim değerini ve yaklaşık 1 kW iç tüketim değerini dikkate alarak sisteme 939 kW güç basmıştır (deşarj

olmuştur.). Basılan bu güç ile enerji depolama sistemi doluluk oranı %36 seviyesinden %10 seviyesine düşmüş olup minimum doluluk değerine inmiştir. Bu sayede sistem seviyesi çıkış gücü 2 449 kW'a çıkmıştır. Ama yinede bir önceki ana göre sistem seviyesi çıkış gücü kurulu gücün %10 değerini aşmış ve -590 kW olmuştur. Uygulama için belirtilen tüm kısıtlara uyularak sistem gerekli aksiyonu almış olmasına rağmen yeterli olmamıştır. Rüzgar türbini bir sonraki anda da çıkış gücünü, kurulu gücünün %10'undan fazla düşürmüştür. Enerji depolama sisteminin devreye girmesi gerekmesine rağmen, minimum doluluk seviyesine ulaşmasından dolayı sistem güç basamamıştır.

Rüzgar türbininin çıkış gücü %10'dan fazla arttığı 81 000. Saniyeye baktığımızda, bir önceki ana göre rüzgar türbini çıkış gücü 666 kW artmıştır. Enerji depolama sistemi bu güç değişimini limitlemek için şarj moduna geçmiş ve 366 kW güç ile şarj olarak, %10'dan fazla olan güç değişimini limitleyerek %10'un altında kalmasını sağlamıştır. Enerji depolama sisteminin şarj olması sayesinde doluluk oranı %69'dan %86 değerine çıkmıştır.

Çizelge 5.5. Rüzgâr türbini gücünün %10'undan fazla olan değişimler

Zaman (s)	Rüzgar Türbini			Enerji Depolama Sistemi		Sistem Çıkış Gücü		
	Rüzgar Türbini Aktif Güç (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim	Doluluk Oranı (%)	EDS Aktif Güç (kW)	Sistem Aktif Çıkış Gücü (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim
0	4 200			50	-1	4 199		
1 800	4 200		0,00	50	-1	4 199		0,00
3 600	4 200		0,00	50	-1	4 199		0,00
5 400	4 200		0,00	50	-1	4 199		0,00
7 200	4 198		0,09	50	-1	4 198		0,09
9 000	4 200		0,09	50	-1	4 199		0,09
10 800	4 187		0,70	50	-1	4 187		0,70
12 600	4 199		0,63	50	-1	4 198		0,63
14 400	4 200		0,07	50	-1	4 199		0,07
16 200	4 200		0,00	50	-1	4 199		0,00
18 000	4 200		0,00	50	-1	4 199		0,00
19 800	4 188		0,68	50	-1	4 187		0,68
21 600	4 200		0,68	50	-1	4 199		0,68
23 400	4 198		0,12	50	-1	4 197		0,12
25 200	4 199		0,07	50	-1	4 198		0,07
27 000	3 970		12,74	50	-1	3 969		12,74
28 800	3 589		21,14	50	80	3 669		16,67

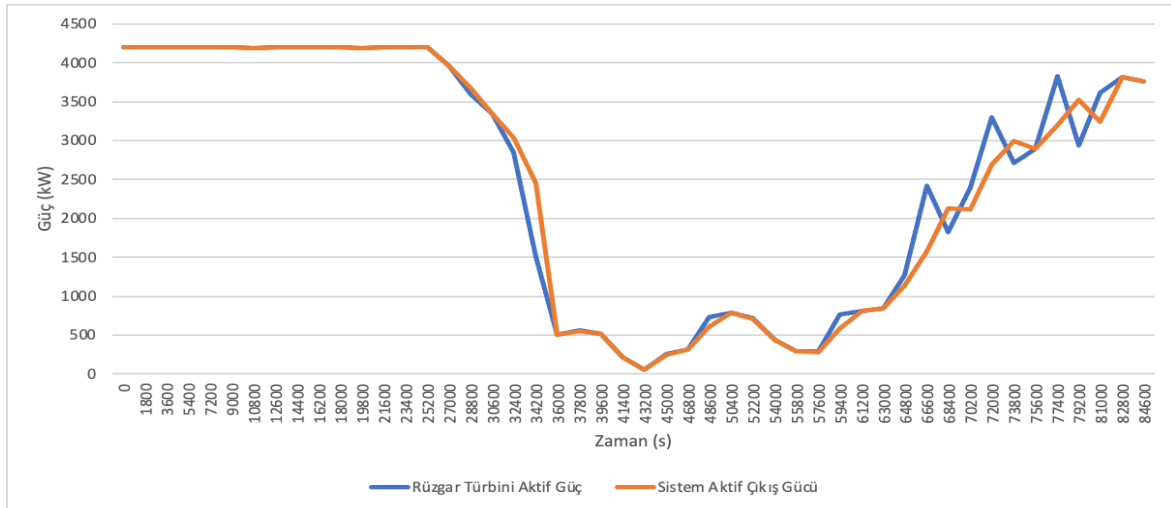
Çizelge 5.6. Rüzgâr türbini gücünün %10'undan fazla olan değişimler (devam)

Zaman (s)	Rüzgar Türbini			Enerji Depolama Sistemi		Sistem Çıkış Gücü		
	Rüzgar Türbini Aktif Güç (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim	Doluluk Oranı (%)	EDS Aktif Güç (kW)	Sistem Aktif Çıkış Gücü (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim
30 600	3 340		13,84	46	-1	3 340		18,31
32 400	2 850	-491	27,25	46	190	3 040		16,67
34 200	1 510	-1 340	74,43	36	939	2 449	-590	32,80
36 000	508	-1 002	55,67	10	-1	507	-1942	107,90
37 800	556		2,68	10	-1	555		2,68
39 600	520		2,03	10	-1	519		2,03
41 400	210		17,20	10	-1	209		17,20
43 200	53		8,70	10	-1	53		8,70
45 000	252		11,04	10	-1	251		11,04
46 800	309		3,17	10	-1	308		3,17
48 600	736	427	23,73	10	-128	608		16,67
50 400	790		2,96	16	-1	789		10,03
52 200	714		4,20	16	-1	713		4,20
54 000	441		15,17	16	-1	440		15,17
55 800	294		8,17	16	-1	293		8,17
57 600	286		0,47	16	-1	285		0,47
59 400	760	475	26,37	16	-175	585		16,67
61 200	813		2,92	24	-1	812		12,62
63 000	840		1,52	24	-1	839		1,52
64 800	1 275	435	24,15	24	-135	1 139		16,67
66 600	2 423	1 149	63,82	31	-849	1 574	435	24,15
68 400	1 819	-605	33,60	70	304	2 123	549	30,48
70 200	2 393	575	31,92	54	-275	2 118		0,27
72 000	3 297	904	50,21	67	-604	2 692	575	31,92
73 800	2 709	-588	32,64	95	287	2 996		16,88
75 600	2 894		10,24	80	-1	2 893		5,73
77 400	3 826	932	51,80	80	-633	3 193		16,67
79 200	2 944	-882	49	100	581	3 525		18,47
81 000	3 610	666	36,98	69	-366	3 243		15,67
82 800	3 818		11,55	86	-1	3 817	574	31,87
84 600	3 758		3,34	86	-1	3 757		3,34

Çizelge 5.5’de görüldüğü üzere, sadece rüzgâr türbini kullanılması durumunda kurulu gücün %10’unu aşan durum sayısı 14 iken, enerji depolama sistemi kullanılması durumunda bu

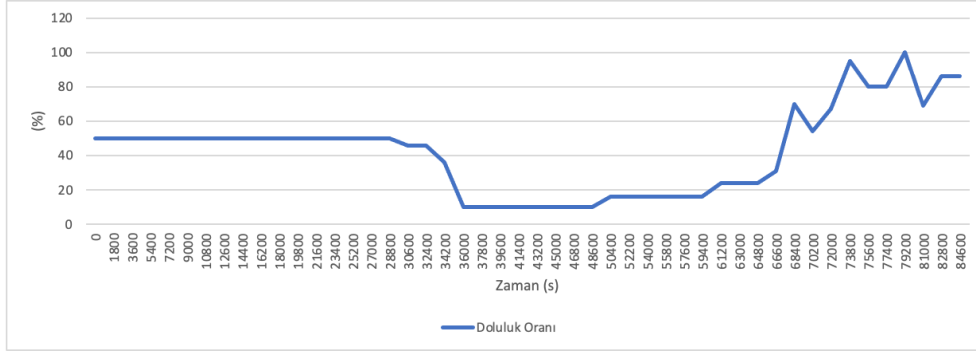
sayı 6'ya düşürülmüştür. Tablo detaylı incelendiğinde ise, enerji depolama sisteminin her an için yeterli olmamasının sebebinin, şarj-deşarj güç limiti veya minimum-maksimum doluluk limiti olduğu görülmektedir.

Şekil 5.2'te görüldüğü üzere rüzgâr türbini çıkış gücü keskin bir şekilde artabilmekte ya da azalabilmektedir. EDS kullanımı sayesinde, rüzgâr türbini güç çıkışı yumuşatılmıştır (turuncu renk ile gösterilen kısım). Bazı kısımlarda ise mavi ile turuncu renk benzer hareketleri göstermektedir. Bunun başlıca sebebi, enerji depolama kapasitesinin gerekli işlemi yapmak için yeterli olmaması durumudur. Yani EDS, sisteme güç basması gerekiyorsa ve doluluk oranı minimum limitteyse ya da şebekeden güç çekmesi gerekiyorsa fakat doluluk maksimuma geldiyse EDS gerekli aksiyonu alamamaktadır.



Şekil 5.2.Rüzgâr türbini & Sistem aktif güç çıkış karşılaştırması

Şekil 5.3'te, Rüzgâr türbini çıkışına göre, enerji depolama sisteminin doluluk oranındaki değişim görülmektedir. Tanımlanan minimum %10 ve maksimum %100 seviyeleri aşılmamıştır.



Şekil 5.3. EDS doluluk oranı (%) (başlangıç doluluk oranı %50)

EDS'nin başlangıç doluluk oranı olarak tanımlanan %50 değerine ek olarak başlangıç doluluk oranı %10 ve %100 durumu içinde analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.7'de EDS'nin başlangıç durumunda %100 doluluk durumu yapılan analiz sonuçları görülmektedir.

Çizelge 5.7'i daha anlaşılabilir kılmak için iki farklı durum üzerinden ilerleyelim. 34 200. Saniyeye baktığımızda, 32 400. Saniyeye göre rüzgar türbini çıkış gücü 1 340 kW azalmıştır. Rüzgar türbini kurulu gücü olan 4200 kW'ın %10'undan fazla bir değişim gerçekleştiği için bu an tablo üzerinde belirtilmiştir. Sistem, %10'dan fazla değişimi kısıtlamak için enerji depolama sistemini devreye almış ve enerji depolama sisteminin %94 verim değerini ve yaklaşık 1 kW iç tüketim değerini dikkate alarak sisteme 939 kW güç basmıştır (deşarj olmuştur.). Basılan bu güç ile enerji depolama sistemi doluluk oranı %86 seviyesinden %36 doluluk seviyesine inmiştir. Bu sayede sistem seviyesi çıkış gücü 2 449 kW'a çıkmıştır. Ama yinede bir önceki ana göre sistem seviyesi çıkış gücü kurulu gücün %10 değerini aşmış ve - 590 kW olmuştur. Uygulama için belirtilen tüm kısıtlara uyularak sistem gerekli aksiyonu almış olmasına rağmen yeterli olmamıştır. Rüzgar türbini bir sonraki anda da çıkış gücünü, kurulu gücünün %10'undan fazla düşürmüştür. Değişimi %10 limitinde tutabilmek için enerji depolama sistemi devreye girmiş ve sisteme 701 kW güç basarak doluluk oranını %36 seviyesinden %10 seviyesine düşürmüştür. Yine de, sistem seviyesinde çıkış gücü değişimini %10 limitinde tutmak için yeterli olmamıştır

Rüzgar türbininin çıkış gücü %10'dan fazla arttığı 81 000. Saniyeye baktığımızda, bir önceki ana göre rüzgar türbini çıkış gücü 666 kW artmıştır. Enerji depolama sistemi bu güç değişimini limitlemek için şarj moduna geçmiş ve 366 kW güç ile şarj olarak, %10'dan fazla

olan güç değişimini limitleyerek %10'un altında kalmasını sağlamıştır. Enerji depolama sisteminin şarj olması sayesinde doluluk oranı %69'dan %86 değerine çıkmıştır.

Çizelge 5.7. EDS %100 doluluk durumu için ekipman parametreleri

Rüzgâr Türbini				Enerji Depolama Sistemi		Sistem Çıkış Gücü		
Zaman (s)	Rüzgar Türbini Aktif Güç (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim (%)	Doluluk Oranı (%)	EDS Aktif Güç (kW)	Sistem Aktif Çıkış Gücü (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim (%)
0	4 200			100	-1	4 199		
1 800	4 200		0,0	100	-1	4 199		0,0
3 600	4 200		0,0	100	-1	4 199		0,0
5 400	4 200		0,0	100	-1	4 199		0,0
7 200	4 198		0,1	100	-1	4 198		0,1
9 000	4 200		0,1	100	-1	4 199		0,1
10 800	4 187		0,7	100	-1	4 187		0,7
12 600	4 199		0,6	100	-1	4 198		0,6
14 400	4 200		0,1	100	-1	4 199		0,1
16 200	4 200		0,0	100	-1	4 199		0,0
18 000	4 200		0,0	100	-1	4 199		0,0
19 800	4 188		0,7	100	-1	4 187		0,7
21 600	4 200		0,7	100	-1	4 199		0,7
23 400	4 198		0,1	100	-1	4 197		0,1
25 200	4 199		0,1	100	-1	4 198		0,1
27 000	3 970		12,7	100	-1	3 969		12,7
28 800	3 589		21,1	100	80	3 669		16,7
30 600	3 340		13,8	96	-1	3 340		18,3
32 400	2 850	-491	27,3	96	190	3 040		16,7
34 200	1 510	-1 340	74,4	86	939	2 449	-590	32,8
36 000	508	-1 002	55,7	36	701	1 209	-1 240	68,9
37 800	556		2,7	10	-1	555	-654	36,3
39 600	520		2,0	10	-1	519		2,0
41 400	210		17,2	10	-1	209		17,2
43 200	53		8,7	10	-1	53		8,7
45 000	252		11,0	10	-1	251		11,0
46 800	309		3,2	10	-1	308		3,2
48 600	736	427	23,7	10	-128	608		16,7
50 400	790		3,0	16	-1	789		10,0
52 200	714		4,2	16	-1	713		4,2
54 000	441		15,2	16	-1	440		15,2
55 800	294		8,2	16	-1	293		8,2
57 600	286		0,5	16	-1	285		0,5

Çizelge 5.8. EDS %100 doluluk durumu için ekipman parametreleri (devam)

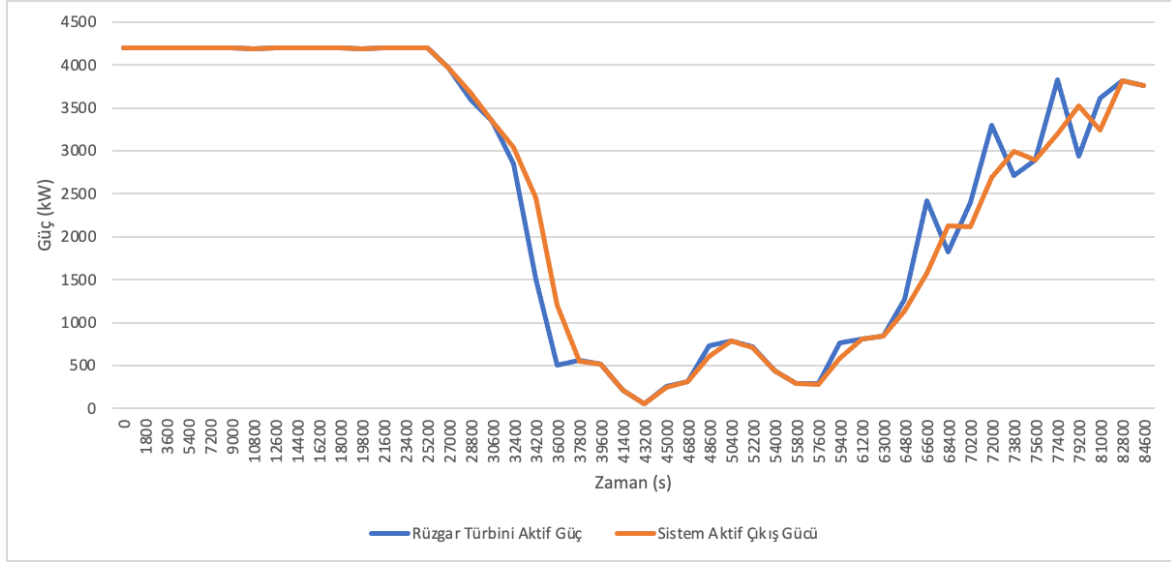
Rüzgâr Türbini				Enerji Depolama Sistemi		Sistem Çıkış Gücü		
Zaman (s)	Rüzgâr Türbini Aktif Güç (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim (%)	Doluluk Oranı (%)	EDS Aktif Güç (kW)	Sistem Aktif Çıkış Gücü (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim (%)
59 400	760	475	26,4	16	-175	585		16,7
61 200	813		2,9	24	-1	812		12,6
63 000	840		1,5	24	-1	839		1,5
64 800	1 275	435	24,1	24	-135	1 139		16,7
66 600	2 423	1 149	63,8	31	-849	1 574	435	24,1
68 400	1 819	-605	33,6	70	304	2 123	549	30,5
70 200	2 393	575	31,9	54	-275	2 118		0,3
72 000	3 297	904	50,2	67	-605	2 692	575	31,9
73 800	2 709	-588	32,6	95	287	2 996		16,9
75 600	2 894		10,2	80	-1	2 893		5,7
77 400	3 826	932	51,8	80	-633	3 193		16,7
79 200	2 944	-882	49,0	100	581	3 525		18,5
81 000	3 610	666	37,0	69	-366	3 243		15,7
82 800	3 818		11,5	86	-1	3 817	574	31,9
84 600	3 758		3,3	86	-1	3 757		3,3

Enerji depolama sisteminin başlangıç doluluk oranının %100 olarak kullanılması durumuyla ilgili olarak, sadece rüzgâr türbini kullanılması durumunda kurulu gücün %10'unu aşan an sayısı 14 iken, enerji depolama sistemi kullanılması durumunda bu sayı 7'ye düşürülmüştür. Tablo detaylı incelendiğinde ise, enerji depolama sisteminin her an için yeterli olmamasının sebebinin, şarj-deşarj güç limiti veya minimum-maksimum doluluk limiti olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.7.'e bakıldığında EDS'nin başlangıç doluluk oranının yüksek olmasının en büyük etkisinin eğimin düşürülmesi olduğu 36 000. Saniyeye bakıldığında görülebilir.

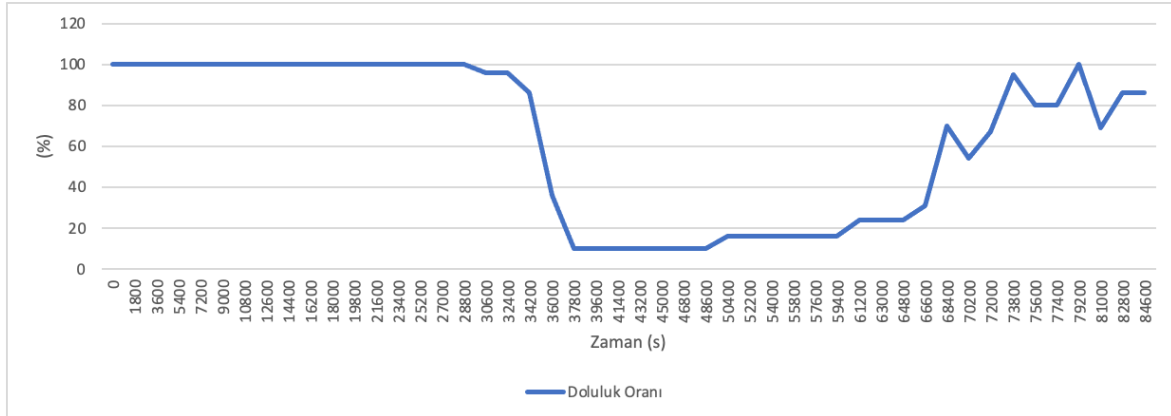
Şekil 5.4'da enerji depolama sisteminin başlangıç doluluk oranının %100 olması durumuna göre aktif güç çıkışı değişimleri gösterilmektedir. Şekil 5.4'de görüldüğü üzere, başlangıç kapasitesinin daha yüksek olması sayesinde enerji depolama daha uzun süre şebekeye güç basabilmiş bu sayede rüzgâr türbini çıkışında oluşan keskin düşüşleri yumuşatabilmiştir. Bu

durum gerçekleşen olayların durumuna ve sıralamasına bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte doluluk oranının önemli bir parametre olduğu görülmüştür.



Şekil 5.4. Rüzgar türbini & node aktif güç çıkış karşılaştırması

Şekil 5.5'te, Rüzgâr türbini çıkışına göre doluluk oranındaki değişim görülmektedir. Tanımlanan minimum %10 ve maksimum %100 seviyelerinin aşılmadığı görülmektedir.



Şekil 5.5. EDS doluluk oranı (%) (başlangıç doluluk oranı %100)

Çizelge 5.9'da EDS'nin başlangıç durumunda %10 doluluk durumu yapılan analiz sonuçları görülmektedir.

Çizelge 5.9'yı daha anlaşılabilir kılmak için iki farklı durum üzerinden ilerleyelim. 34 200. Saniyeye baktığımızda, 32 400. Saniyeye göre rüzgar türbini çıkış gücü 1 340 kW azalmıştır. Rüzgar türbini kurulu gücü olan 4200 kW'ın %10'undan fazla bir değişim gerçekleştiği için

bu an tablo üzerinde belirtilmiştir. Sistem, %10'dan fazla değişimi kısıtlamak için enerji depolama sistemini devreye almış ve ancak enerji depolama sisteminin minimum doluluk oranı olan %10 değerinde olmasından dolayı sisteme güç basamamıştır. Bundan dolayı sistem seviyesi çıkış gücü rüzgar türbini çıkış gücü olan 1 510kW olarak sabit kalmıştır. Rüzgar türbini bir sonraki anda da çıkış gücünü, kurulu gücünün %10'undan fazla düşürmüştür. Değişimi %10 limitinde tutabilmek için enerji depolama sistemi devreye girmiş ancak yine enerji depolama sistemi minimum doluluk seviyesinde olmasından dolayı bir etkisi olmamıştır.

Rüzgar türbininin çıkış gücü %10'dan fazla arttığı 81 000. Saniyeye baktığımızda, bir önceki ana göre rüzgar türbini çıkış gücü 666 kW artmıştır. Enerji depolama sistemi bu güç değişimini limitlemek için şarj moduna geçmiş ve 366 kW güç ile şarj olarak, %10'dan fazla olan güç değişimini limitleyerek %10'un altında kalmasını sağlamıştır. Enerji depolama sisteminin şarj olması sayesinde doluluk oranı %69'dan %86 değerine çıkmıştır.

Çizelge 5.9. EDS %10 doluluk durumu için ekipman parametreleri

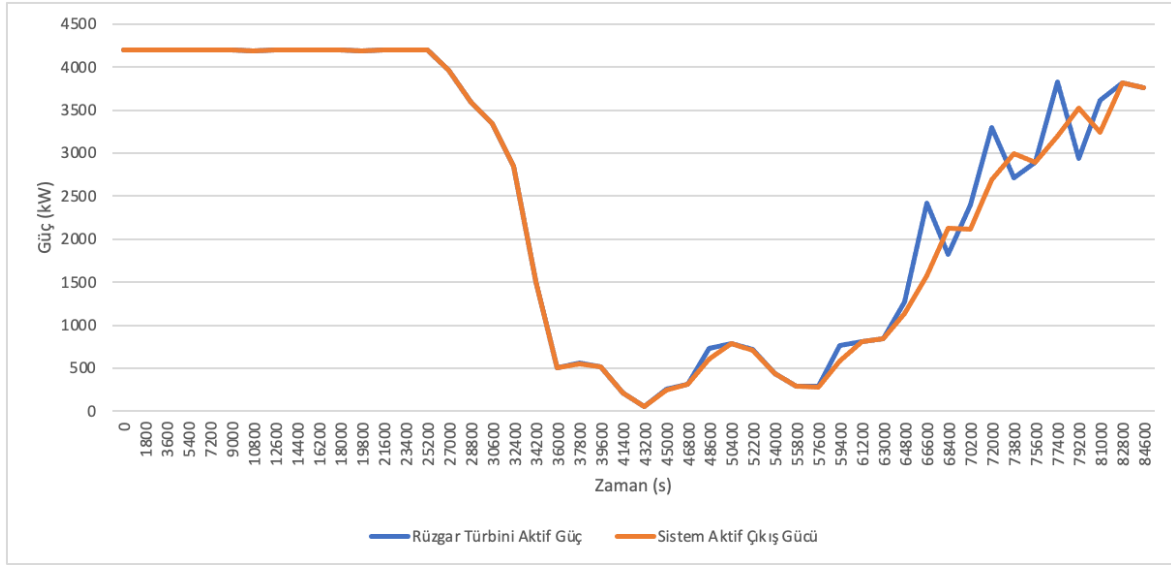
Zaman (s)	Rüzgâr Türbini			Enerji Depolama Sistemi		Sistem Çıkış Gücü		
	Rüzgar Türbini Aktif Güç (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim (%)	Doluluk Oranı (%)	EDS Aktif Güç (kW)	Sistem Aktif Çıkış Gücü (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	Eğim (%)
0	4 200			10.00	-1	-4199		
1 800	4 200		0,0	10.00	-1	-4199		0.0%
3 600	4 200		0,0	10.00	-1	-4199		0.0%
5 400	4 200		0,0	10.00	-1	-4199		0.0%
7 200	4 198		0,1	10.00	-1	-4198		-0.1%
9 000	4 200		0,1	10.00	-1	-4199		0.1%
10 800	4 187		0,7	10.00	-1	-4187		-0.7%
12 600	4 199		0,6	10.00	-1	-4198		0.6%
14 400	4 200		0,1	10.00	-1	-4199		0.1%
16 200	4 200		0,0	10.00	-1	-4199		0.0%
18 000	4 200		0,0	10.00	-1	-4199		0.0%
19 800	4 188		0,7	10.00	-1	-4187		-0.7%
21 600	4 200		0,7	10.00	-1	-4199		0.7%
23 400	4 198		0,1	10.00	-1	-4197		-0.1%
25 200	4 199		0,1	10.00	-1	-4198		0.1%
27 000	3 970		12,7	10.00	-1	-3969		-12.7%
28 800	3 589		21,1	10.00	-1	-3589		-21.1%
30 600	3 340		13,8	10.00	-1	-3340		-13.8%

Çizelge 5.10. EDS %10 doluluk durumu için ekipman parametreleri (devam)

Zaman (s)	Rüzgâr Türbini		Eğim (%)	Enerji Depolama Sistemi		Sistem Çıkış Gücü		Eğim (%)
	Rüzgar Türbini Aktif Güç (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)		Doluluk Oranı (%)	EDS Aktif Güç (kW)	Sistem Aktif Çıkış Gücü (kW)	420 kW'dan fazla olan değişimler (kW)	
32 400	2 850	-491	27,3	10.00	-1	-2849	-491	-27.3%
34 200	1 510	-1 340	74,4	10.00	-1	-1509	-1340	-74.4%
36 000	508	-1 002	55,7	10.00	-1	-507	-1002	-55.7%
37 800	556		2,7	10.00	-1	-555		2.7%
39 600	520		2,0	10.00	-1	-519		-2.0%
41 400	210		17,2	10.00	-1	-209		-17.2%
43 200	53		8,7	10.00	-1	-53		-8.7%
45 000	252		11,0	10.00	-1	-251		11.0%
46 800	309		3,2	10.00	-1	-308		3.2%
48 600	736	427	23,7	10.00	-128	-608		16.7%
50 400	790		3,0	15.98	-1	-789		10.0%
52 200	714		4,2	15.98	-1	-713		-4.2%
54 000	441		15,2	15.98	-1	-440		-15.2%
55 800	294		8,2	15.98	-1	-293		-8.2%
57 600	286		0,5	15.98	-1	-285		-0.5%
59 400	760	475	26,4	15.98	-175	-585		16.7%
61 200	813		2,9	24.18	-1	-812		12.6%
63 000	840		1,5	24.18	-1	-839		1.5%
64 800	1 275	435	24,1	24.18	-135	-1139		16.7%
66 600	2 423	1 149	63,8	30.51	-849	-1574	435	24.1%
68 400	1 819	-605	33,6	70.40	304	-2123	549	30.5%
70 200	2 393	575	31,9	54.19	-275	-2118		-0.3%
72 000	3 297	904	50,2	67.09	-605	-2692	575	31.9%
73 800	2 709	-588	32,6	95.47	287	-2996		16.9%
75 600	2 894		10,2	80.18	-1	-2893		-5.7%
77 400	3 826	932	51,8	80.18	-633	-3193		16.7%
79 200	2 944	-882	49,0	100.00	581	-3525		18.5%
81 000	3 610	666	37,0	69.04	-366	-3243		-15.7%
82 800	3 818		11,5	86.23	-1	-3817	574	31.9%
84 600	3 758		3,3	86.23	-1	-3757		-3.3%

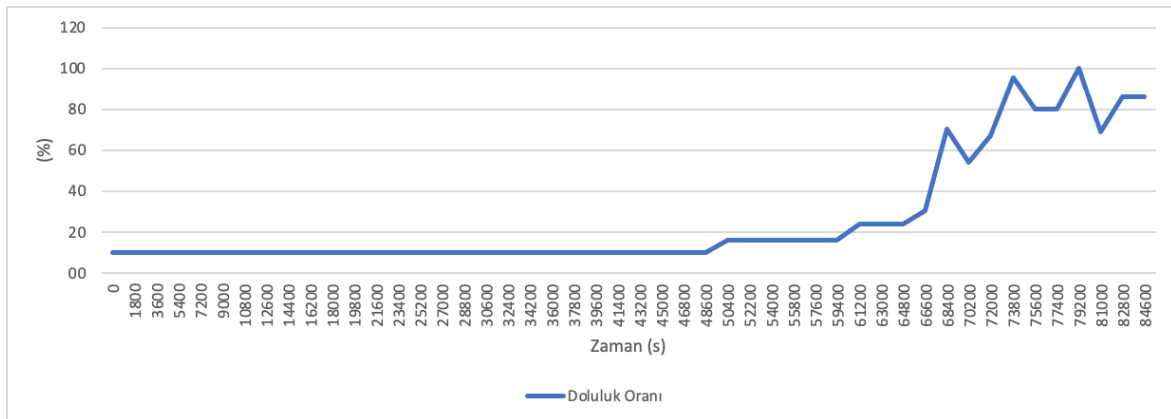
Enerji depolama sisteminin başlangıç doluluk oranının %10 olarak kullanılması durumuyla ilgili olarak, sadece rüzgâr türbini kullanılması durumunda kurulu gücün %10'unu aşan an sayısı 14 iken, enerji depolama sistemi kullanılması durumunda bu sayı 7'ye düşürülmüştür. Tablo detaylı incelendiğinde ise, enerji depolama sisteminin her an için yeterli olmamasının sebebinin, şarj-deşarj güç limiti veya minimum-maksimum doluluk limiti olduğu görülmektedir.

Şekil 5.6’da görüldüğü üzere, başlangıç kapasitesinin daha düşük olmasından dolayı ilk gerçekleşen olaylar için gerekli aksiyonları alamamıştır. Yine de belirli miktar şarj olduktan sonra oluşan %10’dan fazla güç değişimlerinde gerekli aksiyonları alabilmiştir. Bu durum gerçekleşen olayların durumuna ve sıralamasına bağlı olarak değişiklik göstermekle birlikte doluluk oranının önemli bir parametre olduğu görülmüştür.



Şekil 5.6. RT & node aktif güç çıkış karşılaştırması (EDS başlangıç doluluk %10)

Şekil 5.7’te, Rüzgâr türbini çıkışına göre doluluk oranındaki değişim görülmektedir. Tanımlanan minimum %10 ve maksimum %100 seviyelerinin aşılmadığı görülmektedir.



Şekil 5.7. EDS doluluk oranı (%) (başlangıç doluluk oranı %10)

Çalışma kapsamında, enerji depolama sisteminin başlangıç doluluk oranının etkisini analiz etmek amacıyla üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Başlangıç durumunda yüksek doluluk oranıyla analizleri gerçekleştirmek, rüzgâr hızındaki düşüş anlarında enerji depolama

sisteminin daha uzun süre etkin olmasına izin verdiğini göstermektedir. Başlangıç durumunda düşük doluluk oranıyla analizleri gerçekleştirmek, rüzgar hızındaki düşüş anlarında enerji depolama sisteminin etkin olmasını engellemiş olmakla birlikte, rüzgar hızındaki artış anlarında enerji depolama sisteminin etkin olmasına izin vermiştir.

Rüzgâr türbinlerinin toplam yatırım maliyetlerinin düşürülebilmesi için farklı lokasyonlarda tek türbin kurulumu yerine rüzgâr çiftliği tercih edilmektedir. Ancak, uygulanabilir sahaların kısıtlılığı iç tüketim amaçlı rüzgâr türbinlerin kurulması ile tekil türbin kurulumlarının yıllar içinde artması beklenmektedir. Bu çalışma kapsamında, güç sistemi üzerinde tekil rüzgâr türbini ve enerji depolamanın etkisi incelenmiştir. EDS'nin farklı ilk doluluk oranlarına göre analizler yapılmış olup, aktif güç açısından etkileri gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, enerji depolama sistemleri rüzgâr türbini gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının aktif güç çıkışlarını yumuşatmak, daha düzleştirmek amaçlı kullanılabilir. Bu sayede, üretim ve tüketimin dengelenmesi, aktif gücün frekansa etkisi anlamında daha kontrol edilebilir rüzgâr türbinleri inşa etmek mümkündür. Diğer taraftan iç tüketim amaçlı bakıldığında, rüzgâr enerjisinin yetersiz olduğu durumlarda bataryadan karşılanacak enerji ile de ihtiyaç karşılanabilecektir.

6. DEĞERLENDİRMELER VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Simülasyon sonuçları, EDS'nin rüzgâr türbini çıkış gücünü olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Şebekedeki artan rüzgâr türbini sayısı göz önüne alındığında, yan etkileri azaltmak için EDS, en öne çıkan çözümlerden birisi olduğunu göstermektedir. Enerji depolama sistemi %10'dan fazla değişen gücün %70'ine kadar gerekli gücü sağlayabilmektedir. EDS %50 başlangıç doluluk oranında çalışmaya başlaması durumunda 1 günde gerçekleşen 14 tane olayın 8 'ini temizlemiş, %10 ve %100 başlangıç doluluk oranı durumlarında gerçekleşen 14 tane olayın 7'sini temizlemiştir. Bu durumda EDS'nin başlangıç doluluk oranının etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, tek bir rüzgâr türbini için enerji depolama sistemi kullanılmış ve enerji depolama sisteminin rüzgâr türbinine aktif güç açısından etkileri, faydaları CYME güç analiz yazılım programında analiz edilerek sunulmuştur. Sonuçlar enerji depolama sistemi kullanılarak, rüzgâr türbinlerinin aktif güç yumuşatması yapılabileceğini göstermektedir. Farklı doluluk oranları da dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ile dergi de yayın çıkartılması planlanmaktadır. Rüzgâr türbini aktif güç salınımları tek bir rüzgâr türbini için sunulmuş olup, belirli bir rüzgâr çiftliğinin üretilen güç değerleri elde edilerek analiz edilmesi de çalışmanın yaygınlaştırılması için faydalı olacaktır. Rüzgâr çiftlikleri üretim verisinin elde edilememesinden dolayı bu çalışma kapsamına dahil edilmemiş olmakla birlikte bundan sonraki çalışmalarda yeni verilerin elde edilerek çalışmalara dahil edilmesi planlanmaktadır.

Ek olarak, EDS boyutlandırılması mevcut çalışmada dikkate alınmamıştır. Seçilen EDS 1000 kWh ve 1000 kW şarj ve deşarj gücüne sahiptir. Ancak, EDS boyutlandırması, enerji depolama seçimi sürecinde bir diğer önemli konudur. Yüksek kapasiteli batarya kullanımı daha fazla alan kaplayacağı gibi, daha yüksek yatırım ihtiyacı da ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, EDS'nin boyutlandırılması ile ilgili olarak, boyutlandırma optimizasyonu çalışmalarına ihtiyaç vardır. Ek olarak, rüzgâr çiftliği içerisinde enerji depolama kullanılması durumu için enerji depolama sisteminin konumlandırma çalışmasının yapılması da gerekmektedir. Bu optimizasyonlar, EDS'nin kullanım amaç fonksiyonlarının belirlenmesinden sonra gerçekleştirilmesi daha uygun olacaktır. Bu sayede, EDS birden fazla amaç için kullanılabilecektir. Enerji depolama kapasitesi artışının olumlu etkileyeceği

değerlendirildiğinden, bundan sonraki çalışmalarda analizlerin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Türkiye'nin rüzgar enerjisi kurulu gücü 10 bin megavatı aştı - Son Dakika Ekonomi Haberleri | NTV Haber. WEB: <https://www.ntv.com.tr/ekonomi/turkiyenin-ruzgar-enerjisi-kurulu-gucu-10-bin-megavati-asti,G91OrnFUjE-kKAx3g9KxuQ>, Son Erişim Tarihi 05.02.2022.
2. İnternet: Rüzgar - Enerji İşleri Genel Müdürlüğü - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2002). WEB: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar>, Son Erişim Tarihi 02.03.2022.
3. EPDK(2018). Ocak 2018 Dönemi Kabul Edilen Ar-Ge Projeleri, *Pakistan Research Journal of Management Sciences*, 7(5), 1–2.
4. İnternet: Energy Storage Analysis – IEA, (2021). WEB: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>, Son Erişim Tarihi 02.03.2022.
5. Lu, M. S., Chang, C. L., Lee, W. J., and Wang, L. (2009). Combining the Wind Power Generation System With Energy Storage Equipment, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(6). 2109–2115.
6. Yang,Z. Xia, L. and Guan, X. (2020) Fluctuation Reduction of Wind Power and Sizing of Battery Energy Storage Systems in Microgrids, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*,17(3), 1195–1207.
7. D. K. Kim, S. Yoneoka, A. Z. Banatwala, Y.-T. Kim, and K.-Y. Nam, (2018). *Handbook on Battery Energy Storage System* (Birinci Baskı). Filipinler: Asia Development Bank.
8. A. R. of the W. E. (2004), Council, Energy End-Use Technologies for the 21st Century, *A Report of the World Energy Council*.
9. P. Li, Y. Huang, W. Qi, and J. Gan, (2019). *Capacity Co-Optimization of Thermal and Battery Energy Storage System in Multi-energy Complementary System*, 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019, 3815–3819.
10. İnternet: Henze, V. (2020), Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh, 2020. WEB: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>, Son Erişim Tarihi 02.03.2022.
11. İnternet: Goldie-Scot, L. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices, (2019). WEB: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices>, Son Erişim Tarihi 02.03.2022.

12. García Reyes, L. E. (2013), *Type of Lithium-ion Batteries*, Journal of Chemical Information and Modeling.
13. İnternet: What is a flow battery? – The International Flow Battery Forum, (2021). WEB: <https://flowbatteryforum.com/what-is-a-flow-battery/>, Son Erişim Tarihi 11.05.2022.
14. İnternet: Lead–acid battery – Wikipedia (2021). Web: https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery, Son Erişim Tarihi 11.05.2022.
15. İbraheem, F. H. (2018). *Feasible Time for Extraction of Lead from Spent Paste by Pyrometallurgical Process*, Aro-the Scientific Journal of Koya University, 6(2), 63.
16. Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., and Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, 19(3). Science Press, 291–312.
17. Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Applied Energy*, 137, 511–536.
18. Divya, K. C. and Østergaard, J. (2009). *Battery energy storage technology for power systems-An overview*, Electric Power Systems Research, 79(4), 511–520.
19. Evans, A., Strezov, V. and Evans, T. J. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4141–4147.
20. Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H. and Matseelar, H. S. C. (2014). A review of available methods and development on energy storage; Technology update, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 532–545.
21. Lam, L. T. and Louey, R. (2006) *Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications*, Journal of Power Sources, 158(2), 1140–1148.
22. Kaldellis, J. K., Zafirakis, D. and Kavadias, K. (2009). Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 378–392.
23. Campbell, R. J. (2019) Electricity Storage: Applications, Issues, and Technologies. *CRS Report*. Washington, 5-20.
24. Electric Power Research Institute (2011), Common Functions for Smart Inverters. *EPRI*. California, 2-45.

25. Li, D. Hui, and Lai, X. (2013). Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(2), 464–473.
26. İnternet: Microgrids – What Are They and How Do They Work? – N-Sci Technologies (2019). Web: <https://nsci.ca/2019/11/08/microgrids-what-are-they-and-how-do-they-work/>, Son Erişim Tarihi 11.05.2022.
27. Lasseter, R. H., (2002), *MicroGrids*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, New York, 305–308.
28. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuña, L. G. and Castilla, M. (2011) Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1), 158–172.
29. Lopes, J. A. P., Moreira, C. L., and Madureira, A. G. (2006). Defining control strategies for microgrids islanded operation, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 916–924.
30. Wang, J., Hashemi, S., You, S. and Troholt, C. (2017). *Active and reactive power support of MV distribution systems using battery energy storage*, Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 382–387.
31. Nick, M., Hohmann, M., Cherkaoui, R., and Paolone, M. (2012). *On the optimal placement of distributed storage systems for voltage control in active distribution networks*, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Berlin,
32. Hill, C. A., Such, M. C., Chen, D., J. Gonzalez, and W. M. K. Grady (2012). Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 850–857.
33. Gabash, A. and Li, P. (2012). Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage, *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2026–2035.
34. Wang, W., He, W., Cheng, J., Huang, X. and Liu, H. (2017). *Active and reactive power coordinated control strategy of battery energy storage system in active distribution network*, in *Proceedings - 2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, YAC 2017*, 462–465.
35. Sourkounis, C. and Tourou, P. (2013). *Grid Code Requirements for Wind Power Integration in Europe*, Conference Papers in Energy, 1–9.
36. Deutsch, T. and Einfalt, A., (2014). CIRED Workshop - Rome, 11-12 June 2014 Paper 0331 *Avoiding Grid Congestions With Traffic Light Approach And The Flexibility Operator Cired Workshop - Rome, 11-12 June 2014*, 0331, 11–12, 2014.

37. Hemmati, R., Saboori, H., and Jirdehi, M. A. (2017), Stochastic planning and scheduling of energy storage systems for congestion management in electric power systems including renewable energy resources, *Energy*, 133, 380–387.
38. Oh, H. (2011) Optimal planning to include storage devices in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3), 1118–1128.
39. Nick, M., Cherkaoui, R., and Paolone, M. (2014). Optimal allocation of dispersed energy storage systems in active distribution networks for energy balance and grid support, *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(5), 2300–2310.
40. Nick, M., Cherkaoui, R., and Paolone, M. (2014). *Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers*. 2014 Power Systems Computation Conference, 33-39
41. Alnaser, S. W., and Ochoa, L. F. (2016). Optimal Sizing and Control of Energy Storage in Wind Power-Rich Distribution Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(3), 2004–2013.
42. Lim, M. M. (2014), *Optimization of Sizing and Placement of Energy Storage Systems on an Islanded Grid with High Penetration of Renewables*, Doktora Tezi, Colorado Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Colorado.
43. Khani, H., Zadeh, M. R. D., and Hajimiragha, A. H. (2016). Transmission Congestion Relief Using Privately Owned Large-Scale Energy Storage Systems in a Competitive Electricity Market, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2), 1449–1458.
44. Del Rosso, A. D. and Eckroad, S. W. (2014). Energy storage for relief of transmission congestion, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 1138–1146.
45. Vargas, L. S., Bustos-Turu, G., and Larrain, F. (2015). Wind Power Curtailment and Energy Storage in Transmission Congestion Management Considering Power Plants Ramp Rates, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5), 2498–2506.
46. İnternet: Voltage regulation – Wikipedia, (2021). WEB: https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_regulation, Son Erişim Tarihi 27.01.2022.
47. Choi, J. H., and Kim, J. C. (2001). Advanced voltage regulation method of power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems (revised), *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2), 329–334.
48. Answer, S. N. and Normdist, E. F. (2015), *A study on the optimal voltage regulation methods in power distribution systems interconnected with dispersed energy storage and generation systems*, Proceedings 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery EMPD '95, 95, 8–10.

49. Li, B. et al., (2018). *Distributed Control of Energy-Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Network with High PV Penetration*, 2018 UKACC 12th International Conference on Control, CONTROL 2018, 169–173.
50. Khadkikar, V., Varma, R. K., and Seethapathy, R., (2009). *Grid voltage regulation utilizing storage batteries in PV solar - Wind plant based distributed generation system*, 2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, Montreal.
51. Wang, Y., Tan, K. T., Peng, X. Y., and So, P. L., (2016). Coordinated Control of Distributed Energy-Storage Systems for Voltage Regulation in Distribution Networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(3), 1132–1141.
52. Nazaripouya, H., Wang, Y., Chu, P., Pota, H. R., and Gadh, R., (2015). *Optimal sizing and placement of battery energy storage in distribution system based on solar size for voltage regulation*, IEEE Power and Energy Society General Meeting.
53. Karanki, S. B. and Xu, D., (2017). Optimal capacity and placement of battery energy storage systems for integrating renewable energy sources in distribution system.
54. Venu, C., Riffonneau, Y., Bacha, S., and Baghzouz, Y., (2009). *Battery storage system sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems*, 2009 IEEE Bucharest Power Tech.
55. Chua, K. H., Lim, Y. S., Taylor, P., Morris, S., and Wong, J., (2012). Energy storage system for mitigating voltage unbalance on low-voltage networks with photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(4), 1783–1790.
56. Yang, Y., Li, H., Aichhorn, A., Zheng, J., and Greenleaf, M., (2014). Sizing strategy of distributed battery storage system with high penetration of photovoltaic for voltage regulation and peak load shaving, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 982–991.
57. Zillmann, M., Yan, R., and Saha, T. K., (2011). *Regulation of distribution network voltage using dispersed battery storage systems: A case study of a rural network*, IEEE Power and Energy Society General Meeting.
58. İnternet: Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği (2021). WEB: https://www.emo.org.tr/mevzuat/mevzuat_detay.php?kod=65, Son Erişim Tarihi 20.01.2022.
59. International Energy Agency (2010), *Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment*, IEA, Paris.
60. Yahyaie, F. and Soong, T., (2012) *Optimal operation strategy and sizing of battery energy storage systems*, 25th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering: Vision for a Greener Future.

61. Dusonchet, L., Ippolito, M. G., Telaretti, E., Zizzo, G., and Graditi, G., (2013). *An optimal operating strategy for combined RES-based generators and electric storage systems for load shifting applications*, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 552–557.
62. Lu, C., Xu, H., Pan, X., and Song, J. (2014). Optimal sizing and control of battery energy storage system for peak load shaving, *Energies, Basel*, 7(12), 8396–8410.
63. Atzeni, I., Ordóñez, L. G., Scutari, G., Palomar, D. P., and Fonollosa, J. R., (2013). Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(2), 866–876.
64. Fathima, H. and Palanisamy, K., (2015). *Optimized Sizing, Selection, and Economic Analysis of Battery Energy Storage for Grid-Connected Wind-PV Hybrid System*, Modelling and Simulation in Engineering.
65. Di Giorgio, A., Pimpinella, L., and Liberati, F., (2012). *A model predictive control approach to the load shifting problem in a household equipped with an energy storage unit*, 2012 20th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2012 - Conference Proceedings, 1491–1498.
66. Oudalov, A., Cherkaoui, R., and Beguin, A., (2007). *Sizing and optimal operation of battery energy storage system for peak shaving application*, 2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proceedings, 1, 621–625.
67. Mateo, C. Reneses, J., Rodriguez-Calvo, A., Frías, P., and Sánchez, Á., (2016). *Cost-benefit analysis of battery storage in medium-voltage distribution networks*, IET Generation, Transmission and Distribution, 10(3), 815–821.
68. Su, W. F. and Huang, S. J., (2001). Economic analysis for demand-side hybrid photovoltaic and battery energy storage system, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(1), 171–177.
69. Walawalkar, R., Apt, J., and Mancini, R., (2007). Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York, *Energy Policy*, 2558–2568.
70. Eyer, J., Iannucci, J., and Butler, P. C., SUR (2005) Estimating Electricity Storage Power Rating and Discharge Duration for Utility Transmission and Distribution Deferral A Study for the DOE Energy Storage Program, *Sandia Report*, Albuquerque.
71. Salehi, J., Esmaeilpour, S., Safari, A., and Gazijahani, S., (2017). *Investment Deferral of Sub-Transmission Substation Using Optimal Planning of Wind Generators and Storage Systems*, Research Article Journal of Energy Management and Technology.
72. Wogrin, S. and Gayme, D. F., (2015). Optimizing Storage Siting, Sizing, and Technology Portfolios in Transmission-Constrained Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3304–3313.

73. Teng, J. H., Chen, C. Y., and Martinez, I. C., (2013). *Utilising energy storage systems to mitigate power system vulnerability*, IET Generation, Transmission and Distribution, 7(7), 790–798.
74. Stanojević, V., Bilton, M., Dragovic, J., Schofield, J., and Strbac, G., (2013). *Electricity Distribution Application Of Demand Side Response And Energy Storage To Enhance The Utilization Of The Existing Distribution Network Capacity*, C I R E D 22 nd International Conference.
75. S. R. Deeba, R. Sharma, T. K. Saha, D. Chakraborty, and A. Thomas, (2016). Evaluation of technical and financial benefits of battery-based energy storage systems in distribution networks, *IET Renewable Power Generation*, 10(8), 1149–1160.
76. Zhang, F., Hu, Z., and Song, Y., (2013). *Mixed-integer linear model for transmission expansion planning with line losses and energy storage systems*, IET Generation, Transmission and Distribution, 7(8), 919–928.
77. İnternet: List of most powerful wind turbines – Wikipedia (2021). WEB: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_powerful_wind_turbines, Son Erişim Tarihi 20.10.2021.
78. Swierczynski, M., Teodorescu, R., Rasmussen, C. N., Rodriguez, P., and Vikelgaard, H., (2010). *Overview of the energy storage systems for wind power integration enhancement*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 3749–3756.
79. İnternet: Elektrik Şebeke Bağlantı Yönetmeliği Ek 18, (2021). WEB: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2017/04/20170422-8.htm>, Son Erişim Tarihi 23.10.2021.
80. İnternet: Vestas—Page 2, (2021). WEB: <https://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/4mw-platform-brochure/?page=2>, Son Erişim Tarihi 23.10.2021.
81. İnternet: CYME International Inc. – Home (2022). WEB: <https://www.cyme.com/>, Son Erişim Tarihi 02.03.2022.
82. Wind Turbine Generators for Wind Power Plants The application of WTGs in modern wind power plants (WPPs) requires an understanding of a number of different aspects related to the design, 2005, *IEEE PES Wind Plant*.
83. Das, K., Hansen, A. D., and Sørensen, P. E., (2016). Understanding IEC standard wind turbine models using SimPowerSystems, *Wind Engineering*, 40(3), 212–227.
84. İnternet: windPRO - Used by large Corporations and EntrepreneursEMD International (2021). WEB: <https://www.emd-international.com/windpro/>, Son Erişim Tarihi 24.10.2021.

85. İnternet: Limit, B. (2021), Understanding Coefficient of Power (C_p) and Betz Limit, *Kidwind science snack: betz limit*, 3–5, WEB: cdn.teachersource.com/downloads/lesson_pdf/betz_limit_0.pdf, Erişim Tarihi 23.11.2021.
86. Commission électrotechnique internationale (2020), Wind energy generation systems Part 1, Design requirements / Systèmes de génération d'énergie éolienne - Partie 1, Exigences de conception /Commission Electrotechnique International, *IEC*, Geneva.
87. Datta, U., Kalam, A., and Shi, J., (2020). Battery energy storage system for aggregated inertia-droop control and a novel frequency dependent state-of-charge recovery, *Energies*, Basel, 13(8).



GAZİ GELECEKTİR..