

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

**YENİLENEBİLİR ENERJİYE DAYALI GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ
DEPOLAMANIN SİSTEM KARARLILIĞI ÜZERİNE ETKİLERİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşe ACAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

EYLÜL 2022

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

**YENİLENEBİLİR ENERJİYE DAYALI GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ
DEPOLAMANIN SİSTEM KARARLILIĞI ÜZERİNE ETKİLERİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ayşe ACAR
(36193615031)**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım Kaygusuz

EYLÜL 2022

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında yardım ve desteğini eksik etmeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ' a,

Hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen annem Birsen YOLDAŐ ve babam Nihat YOLDAŐ' a, eőim M. Fatih ACAR' a, ananem Vesile AIKAY ve dedem Mustafa AIKAY' a

Tezin uygulama aşamasında vermiő oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, TÜBİTAK ve İnönü Üniversitesi BAP birimine

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Güç Sistemlerinde Enerji Depolamanın Sistem Kararlılığı Üzerine Etkileri” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ayşe ACAR



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
ONUR SÖZÜ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
TABLolar DİZİNİ.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT	X
1.GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	3
1.2. Tezin Amacı ve İçeriği.....	9
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Enerji Depolama Sistemlerine Genel Bakış	11
2.1.1. Mekaniksel enerji depolama	11
2.1.1.1. Pompa depolamalı hidroelektrik sistemler	11
2.1.1.2. Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama	12
2.1.1.3. Volanlar	13
2.1.2. Elektriksel enerji depolama	14
2.1.2.1. Yakıt hücreleri.....	14
2.1.2.2. Ultra kapasitörler/süper kapasitörler	14
2.1.2.3. Süper iletken manyetik enerji depolama.....	14
2.1.3. Elektrokimyasal enerji depolama	15
2.1.3.1. Batarya	15
2.1.3.2. Hidrojen depolama teknolojisi	15
2.2. Akıllı Şebekeler Kapsamında Enerji Depolama Sistemleri	16
2.3. Enerji Depolama Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları	18
2.4. Dünya'daki ve Türkiye'deki Enerji Depolama Sistemi Gelişimi.....	22
2.5. Elektrik Güç Sistemleri Kararlılığı	24
2.5.1. Gerilim kararlılığı	25
2.5.2. Rotor açısı kararlılığı	26
2.5.3. Frekans kararlılığı.....	27
2.6. Enerji Depolama Sistemlerinin Şebekeye Entegrasyonu ve Güç Sistem Kararlılığına Etkileri	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31

3.1. Materyal	31
3.1.1. Analizde tercih edilen test sistemleri ve sistem profillerinin tanıtılması	31
3.2. YÖNTEM.....	36
3.2.1. Sistem kararlılık analizi.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	38
4.1. 14 Baralı Sistemde Enerji Depolama Sistemi Çalışması	39
4.3. 30 Baralı Sistemde Enerji Depolama Sistemi Çalışması	60
5. SONUÇ.....	68
6. KAYNAKLAR.....	71
7. EKLER.....	74
EK 1: 14 BARALI SİSTEMİN JENERATÖR DATASI.....	74
EK 2: ÖZGEÇMİŞ	75

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Depolama sistemlerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması.....	19
Tablo 2.2: Elektriksel Moment Bileşenlerinin Değişimi	27
Tablo 4.1: 14 baralı güç sistemine yapılan modifikasyonlar	40
Tablo 4.2: Test sistemlerinin 300 MW ve 150 MW' lık EDS ile frekans değerleri.....	59
Tablo 4.3: 30 baralı güç sistemine yapılan modifikasyonlar	61



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Enerji depolama sistemlerinin gruplandırılması (Çaliker & Özdemir, 2013).....	11
Şekil 2.2: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral (Ünver, Bilgin, & Güven, 2015)	12
Şekil 2.3: Volan enerji depolama sistemi(Vergili, 2019).....	13
Şekil 2.4: SMES sistemi bileşenleri(Kocaman, 2013).....	15
Şekil 2.5: Enerji Depolamanın Akıllı Şebekeler İçindeki Yeri(Koç, 2015).....	17
Şekil 2.6: Gerçek zamanlı günlük rüzgâr ve güneş enerjisi üretimi(“Gerçek Zamanlı Üretim - Gerçekleşen Üretim - Üretim EPİAŞ Şeffaflık Platformu”).....	19
Şekil 2.7: Geleneksel, rüzgar ve güneş enerji santrallerinin yük profilleri (“Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama Sistemlerinin Uygulanması”, 2019).....	20
Şekil 2.8: Enerji Depolama Sistemi Kullanımı(İ. M. Koç, 2015).	21
Şekil 2.9: a) Bölgelere göre enerji depolama kapasitesinin ve pazar değerinin değişimi b) Enerji depolama kapasitesi birikmiş yıllık artış hızı	23
Şekil 2.10: SHURA Türkiye çalışması enerji depolamanın gelecek öngörülleri(Kaytez, 2018)	24
Şekil 2.11: Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması	25
Şekil 2.12: Gerilim seviyelerinin karşılaştırması(Bahçeci ve Daldaban, 2017).....	29
Şekil 2.13: Güç kayıplarının karşılaştırması(Bahçeci ve Daldaban, 2017).....	30
Şekil 3.1: (a) IEEE 14 baralı sistem, (b) IEEE 30 baralı sistem.....	32
Şekil 3.2: (a) 14 baralı test sisteminin güneş 24 saatlik üretim profili (b) 30 baralı test sisteminin güneş 24 saatlik üretim profili	33
Şekil 3.3: (a) 14 baralı test sisteminin rüzgar üretim birimine ait 24 saatlik üretim profili, (b) 30 baralı test sisteminin rüzgar üretim birimine ait 24 saatlik üretim profili.....	34
Şekil 3.4: (a) 14 baralı güç sisteminin sanayi tipi yük tüketim grafiği (b) 14 baralı güç sistemi mesken tipi yük tüketim grafiği (c) 30 baralı güç sisteminin sanayi tipi yük tüketim grafiği (d) 30 baralı güç sisteminin mesken tipi yük tüketim grafiği	35
Şekil 4.1: (a)Test sistemi 1, (b) Test sistemi 2, (c) Test sistemi 3, (d)Test Sistemi 4	42
Şekil 4.2: (a) 14 baralı sistem mevcut durum, (b) Test sistemi 1’in, (c) Test sistemi 2’ nin, (d) Test sistemi 3’ ün, (e) Test sistemi 4’ ün 24 saatlik Aktif Güç grafikleri.....	43
Şekil 4.3: (a) Mevcut durumun, (b) Test sistemi 1’in, (c) Test sistemi 2’nin, (3b) Test sistemi 3’ün, (4b) Test sistemi 4’ün 24 saatlik gerilim seviyeleri grafikleri.....	46
Şekil 4.4: (a) Mevcut durumun, (b) Test sistemi 1’in (c) Test sistemi 2’in, (c) Test sistemi 3’nin, (d) Test sistemi 3’ün, (e) Test sistemi 4’ün 24 saatlik Voltaj seviyelerinin per unit gösterimi	48
Şekil 4.5: (a) Mevcut sistemin, (b) Test sistemi 1’in, (c) Test sistemi 2’nin, (d) Test sistemi 3’ün ve (e) Test sistemi 4’ün 4. Saat dilimindeki 30 saniyelik rotor aç farkı grafikleri	51
Şekil 4.6: (a) IEEE 14 baralı sistem mevcut sistemin, (b) Test sistemi 1’in, (c) Test sistemi 2’nin, (d)Test sistemi 4’ün 4. Saat dilimindeki 15 ve 60 saniyelik frekans kararlılığı grafikleri	54
Şekil 4.7: Test sistemlerinin her saat dilimi için arıza karşısında kararlı kalma süreleri	55
Şekil 4.8: (a) Test sistemi 1’in, (b) Test sistemi 2’nin, (c) Test sistemi 3’ün, (d) Test sistemi 4’ün 24. saat dilimindeki 30 saniyelik rotor aç kararlılığı grafikleri	58
Şekil 4.9: 14 Baralı Test sistemlerinin her saat dilimi için arıza karşısında kararlı kalma süreleri ..	59

Şekil 4.10: (a) Test sistemi 1, (b) Test sistemi 2	62
Şekil 4.11: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24 saatlik Aktif güç değerleri	63
Şekil 4.12: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24 saatlik Voltaj değerleri	64
Şekil 4.13: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24 saatlik Voltaj seviyelerinin per unit gösterimi	65
Şekil 4.14: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24. Saat dilimindeki rotor açısı farkı grafikleri	66
Şekil 4.15: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24. Saat dilimindeki frekans kararlılığı grafikleri	67
Şekil 4.16: 30 Baralı Test sistemlerinin her saat dilimi için arıza karşısında kararlı kalma süreleri	67



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

EDS	: Enerji Depolama Sistemi
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı
CAES	: Sıkıştırılmış Hava Enerjisi Depolama
PHES	: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
DÜB	: Dağıtık Üretim Birimi
BDES	: Batarya Enerji Depolama Sistemi
TSKB	: Türkiye Sınai Kalkınma Bankası
Li-ion	: Lityum iyon
GZFT	: Güçlü yönler, Zayıf yönler, Fırsat, Tehdit
TÜBA	: Türkiye Bilimler Akademisi
GES	: Güneş Enerji Santrali
RES	: Rüzgar Enerji Santrali
MW	: Mega Watt
YÖK	: Yüksek Öğretim Kurulu
GW	: Giga Watt
CO₂	: Karbon dioksit
W	: Watt
\$: Dolar
FV	: Fotovoltaik
H	: Atalet sabiti/Eylemsizlik sabiti
Wh	: Watt saat
δ	: Rotor açısı değeri
tc	: Arıza temizleme süresi
Hz	: Hertz
m³	: Metreküp
SMES	: Süper İletken Manyetik Enerji Depolama
EPIAŞ	: Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ DEPOLAMANIN GÜÇ SİSTEM KARARLILIĞINA ETKİLERİ

AYŞE ACAR

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

76+X sayfa

2022

Danışman: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Günümüzde fosil yakıt kökenli üretim yollarının kaynakları günden güne tükenmekte ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Fosil kaynakların sınırlı olması, bizi yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile yapılan üretim ise değişen küresel iklim şartları problemini beraberinde getirmektedir. Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları gün içerisinde farklı üretim profillerine sahip oldukları için dalgalanan talebe hızlı ve güvenilir yanıt verememektedir. Bu da enerjiden daha verimli ve sürekli faydalanmak adına enerjinin depolanması konusunu beraberinde getirmektedir.

Bu tezde yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinde enerji depolama sisteminin sistem kararlılığına etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz için IEEE 14 ve 30 baralı güç sistemleri kullanılarak analizler için enerji depolama sistemi, güneş ve rüzgâr üretim birimleri entegre edilen test sistemleri oluşturulmuştur. Güç sistemlerinde yaşanması olası arızalar oluşturularak sistemlerin bu arızalar karşısında verdiği tepkiler incelenmiştir. Simülasyonlar Matlab programında; Hadi Saadat'ın kararlılık analizi için temel kabul edilen programı üzerinden geliştirilerek hazırlanan kodlar, gerçek zamanlı üretim profilleri kullanılarak rotor açısı, frekans ve gerilim kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalıştırılan test sistemlerinde sistemde oluşan arıza anında deşarj durumunda olan bir EDS(Enerji depolama sistemi)'nin sistemin kararlı kalma süresini arttırdığı, frekans ve gerilim kararlılığında iyileşme gösterirken, rotor açısı kararlılığında genel olarak olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca enerji depolama sisteminin gücünün artırılmasıyla sistemin arıza karşısında kararlı kalma süresinin düşük güçteki EDS'ye göre genel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Rotor açısı ve frekans kararlılığında güneş üretim biriminin EDS ile kullanıldığı modifikasyon hariç sistem kararlılığını korumuştur. Üretim birimlerine uzak noktada oluşturulan arızanın sistemi kararsızlığa sürüklediği görülmüştür. Genel olarak bakıldığında; depolama sisteminin güç değeri, atalet sabitinin değeri, güneş ve rüzgâr üretim birimlerinin değeri, sanayi ve ev tipi yük değerlerinin, sistemde oluşan arızanın konumu ve türünün, EDS' nin şarj ve deşarj saatlerinin seçiminin kararlılığı etkilediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Depolama, Dağıtık üretim, Güç sistem kararlılığı

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECTS OF ENERGY STORAGE ON POWER SYSTEM STABILITY IN RENEWABLE ENERGY BASED POWER SYSTEMS

AYŞE ACAR

Inonu University

Graduate School of Nature and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

76+X page

2022

Supervisor: Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Today, the sources of fossil fuel-based production routes are being depleted day by day and cause environmental pollution. The limited fossil resources lead us to renewable energy sources. Production with renewable energy sources brings with it the problem of changing global climate conditions. Since renewable energy sources such as solar and wind have different production profiles during the day, they cannot respond quickly and reliably to fluctuating demand. This brings with it the issue of storing energy in order to benefit from energy more efficiently and continuously.

In this thesis, the effect of energy storage system on system stability in power systems based on renewable energy has been analyzed. The possible faults in power systems are created and the reactions of the systems in the face of these faults are examined. Simulations in Matlab program; Rotor angle, frequency and voltage stability analyzes were carried out by using real-time generation profiles and codes developed over Hadi Saadat's program, which is considered the basis for stability analysis. In the test systems operated, an EDS(Energy storage system) that is in the discharge state at the time of failure in the system increases the stability of the system, improves frequency and voltage stability, while generally negative results are obtained in rotor angle stability. In addition, it was observed that by increasing the power of the energy storage system, the stability time of the system against failure generally increased compared to the low power EDS. The system remained stable except for the modification in which the solar generation unit was used with EDS in terms of rotor angle and frequency stability. It has been observed that the fault created at the far point of the production units does not drag the system into instability. In general terms; It has been observed that the power value of the storage system, the value of the inertia constant, the value of the solar and wind generation units, the industrial and household load values, the location and type of the fault in the system, the choice of charge and discharge hours of the EDS affect the stability.

Keywords: Energy Storage, Distributed Generation, Power System Stability

1.GİRİŞ

Gündelik hayatımızda anahtar konumunda olan enerji, tüm Dünya ülkeleri için sosyal ve ekonomik açıdan çok önemlidir. Enerji kelimesi belleğimize öncelikle hayatımızın mihenk taşı olan elektrik enerjisi getirmektedir. Enerji, üretimi esnasında kullanılan çeşitli kaynaklar sayesinde hayatımızın birçok yerinde farklı formlarda kullanılabilir. Aydınlatma, ısınma, sanayi, haberleşme, ulaşım gibi hayatımızın birçok alanında kullandığımız enerji miktarı Dünya nüfusunun gün geçtikçe artması ve teknolojinin sürekli gelişmesinden ötürü artmaktadır ve artmaya devam edecektir.

Hayatımızda büyük bir paya sahip enerji kaynaklarını tükenen ve tükenmeyen enerji kaynakları olarak iki guruba ayırabiliriz. Bu ayrıma göre, doğal bir devir esnasında değişmeyen, kullanıldıkça bitmeyen kaynaklara tükenmeyen yani yenilenebilir enerji kaynakları; tek kullanımda tükenen ve yeri dolmayan kaynaklara tükenen yani yenilenemez enerji kaynakları denir. Fosil ve çekirdek tabanlı kaynaklar yenilenemez kaynaklar arasında sayılır. Günlük yaşantımızda çokça kullandığımız doğal gaz, kömür ve petrol fosil tabanlı kaynakları oluştururken toryum ve uranyumu çekirdek tabanlı yenilenemez kaynaklar arasında gösterebiliriz (Koç & Kaya, 2015).

Küresel enerji talebinin çoğu fosil tabanlı kaynaklardan, çekirdek tabanlı kaynaklardan faydalanılan sistemlerden ayrıca su kaynaklarından faydalanılan büyük ölçekli santrallerden karşılanmaktadır. Bahsi geçen sistemlerde enerji üretim bakımından büyük verim elde edilmekle beraber bu sistemlerin konumlandırıldığı mekanın seçiminde maddi, ekolojik ve emniyet konularının bir bütün olarak değerlendirilmesi şarttır. Herhangi bir hidroelektrik santrali ele aldığımızda santralin kurulacağı konumun çevresel, yerbilimsel, güvenlik, maddi etkileri göz önünde bulundurulmalıdır (Turan, 2014).

Sürekli olarak enerji talebinde bir artış yaşanmaktadır. Talepteki bu artışa paralel olarak üretim de artmaktadır. Günümüzde bu artışa cevap verebilmek adına üretim sahalarında sürekli ve verimli enerji talep edilmektedir. Bununla birlikte tükenen fosil yakıt kaynağı ve sonucunda oluşabilecek enerji krizleri, çevre kirliliği ve küresel iklim değişimi bizi YEK(Yenilenebilir Enerji Kaynakları) kullanımına yönlendirmektedir. YEK ile yapılan üretim ile enerji verimliliği sağlamak hedeflenmiştir. Öncelikle kaynağı güneş ve rüzgâr olan yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin, çevreye zarar vermemeleri

ve kaynakları tükenmediğinden ötürü küresel enerji dairesindeki yeri gün geçtikçe büyümektedir.

Ancak güneş ve rüzgâr gibi YEK'lere dayalı sistemlerin mevsimsel olarak gün içerisinde dalgalı ve kesintili güç çıkışlarının ve günümüzde kullanılan geleneksel şebeke alt yapısının YEK'lere dayalı güç sistemlerine uygun olmayışı bizi bu probleme çözüm bulmaya yönlendiriyor. Akıllı şebeke alt yapılarının geliştirilmesiyle beraber enerji verimliliğini ve sürekliliğini sağlamak adına EDS(Enerji Depolama Sistemleri)'lerin kullanımının yaygınlaşacağı hedefleniyor. Enerji depolama sistemleri belirli zamanda artan elektriği depolayıp ihtiyaç olduğu zamanda şebekeye geri verirler.

Akıllı şebekelerde enerji depolama(Özdemir, 2017);

- Gücü kısa ya da uzun sürelerde temin edebilme seçeneklerinin olması,
- YEK ile birlikte kullanılabilme,
- Ara kazanç,
- Gücün niteliğini arttırması,
- Ek faydalar; dönen rezerv, gerilim regülasyonu, frekans cevabı,
- Yük eğrisindeki yük akış dalgalanmalarının düzeltilmesi, pik noktalarının düzeltilmesi,
- Esnek zamanlı kullanım ve emniyet.

gibi birçok avantajlara sahiptir. Ayrıca enerji depolama sistemleri enerji talebi ve üretim kapasitesi arasındaki farkı azaltarak frekans ve gerilimde kararlılık sağlar. Enerji depolama sistemleri (EDS) büyük ölçekli üretim yapan üreticiler için daha kararlı güç temin eder. Bu özelliği, sistemde güç bazında oluşabilecek problemleri çözeceğinden artan talebe paralel olarak üretim sistemlerinin arttırılması yerine enerji depolama sistemlerinin kullanımı santral kurulum ve işletim maliyetleri gibi maddi zararlardan koruyacaktır. Enerjinin dağıtılması esnasında enerji depolama sistemlerinin kullanımının yaygınlaşması şebekelerin çalışmasını daha verimli hale getirerek verimi yükseltir. Talep edilen enerjiden fazlasını depolamanın birkaç yöntemi mevcuttur. Klasik güç sistemlerindeki YEK entegrasyonu yaygınlaştıkça, kesintisiz, verimli ve emniyetli güç kullanımı için enerji

depolama yöntemlerine olan gereksinim kilit rol oynayacaktır. Yeni santraller kurmaya gerek kalmayacağından finansal açıdan da fayda sağlayacaktır.(Özdemir vd., 2017).

Artan nüfus, endüstriyel büyüme ve teknolojik gelişimler göz önüne alındığında yapılan yatırımların ve devlet teşvikinin büyük kısmının artan enerji talebini karşılamaya yönelik olduğu görülmektedir. Bütün bunlar gösteriyor ki toplumsal kalkınma ve refah için ihtiyaç duyulan kesintisiz enerjiyi sürekli ve doğa dostu yöntemlerle elde etme çabası giderek artacaktır. Yaygınlaşan YEK kullanımıyla sürekli ve kesintisiz enerji ihtiyaç için EDS kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu da EDS'lerin teknik, maliyet, güç sistem alt yapısına uygunluğu, sisteme entegre edildikten sonra sistemin kararlılığı üzerindeki etkisinin araştırılması önemli bir konu haline gelmiştir.

1.1 Literatür Taraması

Sürekli artan nüfus değeri ile beraber enerji yönetimi bakımından daha fazla elektrik enerjisine ihtiyaç olduğu gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu enerji ihtiyacını sadece fosil yakıtlardan temin etmeye çalışmak hem sınırlı rezervlerin dünyada bitmesine hem de iklim değişikliğine neden olmaktadır. Dolayısıyla devletler, sosyal ve ekonomik ilerlemelerine paralel olarak yeni enerji yöntemleri üretip yürütmeye koymaktadırlar (Aydın vd., 2020). Bu enerji politikalarının başında YEK kullanımı gelmektedir. Ancak güneş ve rüzgâr gibi mevsimsel, günlük hatta anlık olarak değişen YEK'lerden en verimli şekilde faydalanmak adına enerji fazlasının depo edilip gerektiğinde şebekeye aktarımı yapılan Enerji Depolama Sistemleri ile ilgili yakın geçmişte yapılan çalışmalardan bazıları şunlardır:

2004 yılında Barton vd.; üretilen elektriğin verimini artırmak adına enerji depolama kapasitesini tahmin etmek için basit bir olasılıksal yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, gömülü yenilenebilir üretim seviyesinin voltaj artışıyla sınırlı olacağı yerlerde rüzgâr jeneratörlerinin bağlanmasına odaklanmışlardır. 1 saatten daha az bir süreyi kapsayan kısa süreli depolamanın, ağ tarafından çekilebilecek elektrik miktarında yalnızca küçük bir artış sağladığını öne sürmüşlerdir. Bir güne kadar olan süreler boyunca depolamanın, daha fazla enerji avantajı sağladığı, ancak önemli ölçüde daha pahalı olduğu sonuçlarına varmışlardır (Barton ve Infield, 2004).

2008 yılında H. İbrahim vd.; yazdıkları makalede yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin anında talebe karşılık verebildiğini söylemişlerdir. Bu soruna çözüm olarak kurşun pilleri önermişlerdir. Ancak kurşun pillerin büyük enerji miktarına dayanamadığını belirtmişlerdir. Çalışmada enerji depolamanın sürekliliği sağlamak

açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır. Hâlihazırda olan ve geliştirilmekte olan enerji depolama sistemlerinden bahsederek elektrik depolama yöntemlerinin temel özelliklerini ve kullanım yerlerini (temelli veya taşınabilir, uzun veya kısa süreli depolama, gereken en yüksek güç vb.) incelemişlerdir (İbrahim vd., 2008).

2010 yılında Kurt; çalışmasında rüzgâr gücündeki varyasyonu yumuşatacak, talep-üretim istikrarına fayda sağlayacak ve rüzgâr enerjisinin güç sistemine eklenmesine yardımcı olacak enerji depolama yöntemlerinin uygulama ve finansal karakteristiklerini, kullanım yerlerini ve kapasitelerini tanımlamıştır. Yenilenebilir enerjinin ve bilhassa rüzgâr enerjisinin payının hem küresel hem de ülkemizde gün geçtikçe arttığını belirterek enerji rezervi zaman içinde değişiyorsa ve enerji dağıtımı kısmında entegrasyonu yapılmadan işletimi yönetiliyorsa depolamanın önemli ve hayati olduğunu eklemiştir. Bu kaynakların mevcut üretim, iletim ve dağıtım sistemleri arasında olan ağa entegre edilmişse depolamadaki talebin asgari olduğuna ancak ileride enerji rezervinin farklılaşmasından kaynaklı güç sisteminde istikrarsızlığa neden olabileceğine dikkat çekmiştir. CAES ve PHES' in uzun süreli rüzgâr gücü değişikliğinden oluşacak üretim fazlası enerjinin depolanması adına ideal teknolojiler olduğu sonucuna varmıştır (Kurt, 2010).

2012 yılında Kozak vd.; birçok enerji depolama teknolojisinin üretilmiş olmasına karşın bunlardan hiç birinin var olan sistemlerin ihtiyacı olan niteliklere tamamıyla sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Depolama sistemi hangi uygulamada kullanılacaksa uygun depolama yönteminin tercih edilmesi yöntemlerin sahip olduğu eş temel özelliklerin kıyaslanmasıyla belirlenebileceğini söylemişlerdir. Yürütülen sistem sayısının azlığı ve bazı yöntemlerin ticari yönden gelişmemiş olması sebebiyle bazı ön kabullerimizin olması gerektiğini belirtmişlerdir. Depolama sistemleri arasında yaptıkları karşılaştırmada büyük ölçekli sistemlerde maliyet açısından en ideal yöntemin basınçlı hava depolama, kapasite ve ekonomik açıdan en uygun tekniğin hidroelektrik depolama tekniği olduğunu söylemişlerdir (Kozak, 2012).

2012 yılında Chen vd.; çalışmalarında, rüzgar santralının dağıtılabilişliği için bir enerji depolama boyutlandırma yöntemini önermişlerdir. Rüzgâr gücü tahminleri oluşturmak için kalıcılık yöntemi kullanılmış ve şarj-deşarj verimliliği göz önünde bulundurularak enerji depolama kapasitesinin en aza indirilmesi için saatlik dağıtım stratejisi önerilmiştir. Gerçek rüzgâr gücü ile sevk seviyeleri arasındaki zaman serisi güç farkı üzerinde, güç farkının dağılımına uyması için parametrik olmayan tahmin kullanılmıştır.

Ayrıca, farklı nominal güçler altındaki minimum kapasitelere uyacak şekilde eğri uydurma benimsenmiştir. Optimal enerji depolama boyutunu bulmak için enerji depolamanın hizmet ömrü dikkate alınarak bir maliyet fonksiyonu verilmiş ve genetik algoritma ile çözülmüştür. Boyutlandırma yöntemini göstermek için lityum iyon pil enerji depolama sistemine sahip bir örnek dahil edilmiştir(Chen vd., 2012).

2012 yılında Hill vd.; çalışmalarında genel güç dağıtım sistemi verimliliğini ve işletimini geliştirirken güneş enerji sistemlerinin entegrasyonunun olumsuz etkilerini azaltmak için tasarlanmış şebeke ölçeğinde bir enerji depolama sistemi için işletim ve kontrol metodolojilerini açıklamaktadırlar. PV üretimi arttıkça, elektrik şebekesi, sistem üzerindeki çeşitli noktalarda üretim ve güç akışındaki ani değişikliklere giderek daha fazla maruz kalacağını belirterek, bir enerji depolama sisteminin, yüksek solar PV üretim penetrasyonundan kaynaklanan istenmeyen etkileri etkileri yöneterek veya azaltarak güneş PV üretiminin düzenli entegrasyonuna yardımcı olabileceğini öne sürmüştür(Hill vd., 2012).

2013 yılında Kocaman enerjinin depolanması için geliştirilen öncelikli yöntemlerden olan elektriksel, mekaniksel, kimyasal ve ısı depolama teknolojilerini ayrıntılarıyla tanımlamıştır. Enerji depolama sistemlerinin özelliklerini karşılaştırmış ve basınçlı hava depolama yöntemi, yatırım maliyeti açısından en ekonomik teknoloji olduğunu ve yeti ve ömür açısından en uygun tekniğin hidroelektrik depolama tekniği olduğu sonucuna varmıştır. Enerji depolama sistemlerinin uygulama alanlarıyla ilgili yaptığı çalışmada ise elektriksel ve kimyasal EDS'den elektrikli otomobil sektöründe, kimyasal ve ısı EDS' den meskenlerde, elektriksel, mekaniksel, kimyasal ve ısı EDS'den ise akıllı şebekelerde faydalandığını ifade etmiştir(Kocaman, 2013).

2013 yılında Özer vd.; çalışmasında enerjinin depolanmasında en yaygın teknik kimyasal pillerle yapılmakta olduğunu ifade etmiştir. Ancak bu teknikle depolanan enerji düşük güçtedir. Bundan dolayı elektrik enerjisinin istikrarlı bir şekilde üretilmesi ve tüketilmesi için farklı depolama teknikleri tercih edilmektedir. Çalışmada bu tekniklerle ilgili bilgi verilmekte ve ülkemiz şartlarında en ideal elektrik enerjisi depolama tekniğinin hangisi olduğu tartışılmaktadır. Ülkemiz şartlarında uygulanabilirlik ve idare bakımından en ideal sistemin su ve hava depolama teknolojileri olduğu sonucuna varmışlardır. Ülkemizin su bakımından sahip olduğu zenginlik göz önüne alındığında kıyılarda tesis edilecek üretim sistemlerinde üretilen enerjinin rahatlıkla depolanabileceği ve dağıtılabileceğini vurgulamışlardır. (Özer ve Sönmez, 2013).

2013 yılında Çaliker vd.; çalışmasında, bu günlerde kullanılan ve özellikleri arttırılmaya devam eden enerji depolama teknolojileri ayrıntılı biçimde analiz edilirken teknolojilerin kıyaslanması ve uygulama yerleri irdelenmiştir. Güncel güç sistemlerinden olan akıllı şebekelerin de ana unsurlarından olan enerji depolama teknolojilerinde gerçekleştirilen analizlerde kişilere enerjiye arzu ettikleri mekânda ve arzu ettikleri anda erişebilme imkânı vereceğini ve geçmişten bu güne var olan depolama sistemlerine bakıldığında kayda değer gelişim olduğunu göstererek insanlara bu imkânın ulaşılabilir olduğunu göstermiştir (Çaliker ve Özdemir, 2013).

2013 yılında Tanrıöven tarafından yapılan çalışmada enerji depolama sistemleri incelenmiş ve özellikle açık denizlerde yapılan ada şeklindeki yeni açılımlara değinilmiştir. Enerjinin depolama kısa, orta ve uzun dönemli olarak yapılabilmekte olduğu belirtilmiştir, türlerine göre enerji depolama sistemlerinden bahsedilmiştir. Gün geçtikçe gelişen akıllı şebeke sistemine bağlı yenilenebilir rezervlerden temin edilen enerjinin kesintili olduğu fakat ileriki zamanlarda kullanımının artacağı düşünüldüğünde üretim gücü büyük olan depolama sistemlerinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Yüksek güçlü depolama sistemleri yalnızca lisanslı olarak inşa edilmeyip devlet teşviklerinin arttırılıp lisanssız olarak da inşa edilebilmesi önerisinde bulunmuştur (Tanrıöven, 2013).

2015 yılında Koç vd.; tarafından yapılan çalışmada akıllı şebeke ve yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemleriyle ilgili hususta literatürdeki genellemelerle ilgili bilgi verilmekte ve içerikleri özetlenmektedir. Verimli bir tüketici yönetimi olabilmesi açısından tek yöntemin Dağıtık Üretim Birimleri(DÜB) ile beraber kullanılan enerji depolama teknolojileri olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji depolama sistemlerinin akıllı şebekelerde çok önemli bir yerinin olduğu ifade edilmiştir (Koç vd., 2015).

2015 yılında Kuşdoğan tarafından yapılan çalışmada güç sistemini daha etkin, istikrarlı ve emniyetli hale getirmek için, makul mali değerlere sahip enerji depolama sistemlerine yönelim artmıştır. Enerji depolama sistemlerinin türlerine göre ayırma, teknolojilerin kıyaslanması ve sistemin ihtiyaçlarını ele almıştır. Depolama teknikleri depolama kapasitesi, elde edilen verim yönünden kıyaslanmıştır. (Kuşdoğan, 2015).

2016 yılında Özdemir vd.; tarafından yapılan çalışmada yürürlüğe alınacak uygulamada hangi depolama sisteminin tercih edilmesinin belirlenmesinde sistemlerde var olan ortak en önemli niteliklerin kıyaslanması yöntemiyle belirlenebileceğini ifade etmiştir. Depolama sistemlerinin süre ve kapasite yönlerinden farklı yönleri vardır. Mali yönden ise

işletim ve kurulum maliyetleri bakımından farklı değerlere sahiptir. Depolama teknolojisi seçimini yapacağımız esnada bu özelliklerin sisteme uyması için iyice incelenmelidir. Yapılan analizlere bakıldığında kurulum maliyeti açısından en ideal tekniğin basınçlı hava depolama tekniği, kapasite ve ömür bakımından ise en uygun tekniğin hidroelektrik depolama yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır (Özdemir ve Hadra, 2016).

2017 yılında Bahçeci vd.; çalışmasında 30 baralı güç sisteminde rastgele seçilen 3 baraya güneş üretim birimi ve enerji depolama sistemi entegre edilmiş ve güç sistemi üzerindeki tesiri incelenmiştir. Analiz sonucunda gerilim düzeyinde artış ve hat kaybında azalma gözlemlenmiştir. Güneş enerji sistemleri gibi süreksiz enerji sağlayan sistemlerin puant zamanlarda ürettiği enerjiyi sisteme geri veren enerji depolama sistemleri, geleneksel şebekelerden temin edilecek enerji miktarını azaltacak ve lisanssız üreticilerin kazancını arttıracak ifade edilmiştir (Bahçeci ve Daldaban, 2017).

2019 yılında Mazman vd.; enerji depolama tekniklerini seçerken uygulama türüne, gereksinime, doğal imkanlar ve maliyet başlıklarının göz önünde bulundurulması gerektiğini ifade etmiştir. Güneş enerjisi depolamada kurşun asit ve li-ion pillerin öne çıkmakta olduğunu ifade etmiştir. Büyük ölçekli depolama sistemi kurulumuyla güneş enerjisinin temel enerji rezervi olarak kullanım imkânları artmakta olacağı sonucuna varmıştır (Mazman ve Yılmaz, 2019).

2019 yılında Karadeniz vd.; tarafından yapılan çalışmada, ilk olarak güneş enerjisine dayalı güç sistemlerinin gelişim süreci ve son durumu ifade edilmiş, ardından bu güç sistemlerinin şebekede oluşturduğu sorunları içeren uluslararası güç kalite standartları incelenmiştir. Güneş üretim profiline bakıldığında kesintili bir üretim profiline sahip üretim profilinin, gerilim dalgalanması ve yükselmesi sorunlarına, inverterler sebebiyle harmonik bozulma gibi sorunlar ortaya koyduğu görülmüştür. Bu sorunların önüne geçebilmek adına oluşturulan uluslararası standartlardan bahsedilmiştir.(Karadeniz ve Balci, 2019).

2020 yılında Aydın vd.; çalışmada ilk olarak şebeke bazında enerji depolama sistemlerinin kullanım gayelerinden söz edilmiş ve bu gayelerden sağlanacak yararlar belirtilmiştir. Fakat enerji depolama sistemlerinin hala yüksek maliyetlerde olması kurulum öncesi titiz bir şekilde uygulanabilirlik analizinin yapılmasını mecbur kılmaktadır. Kurulum için ideal sistemin seçimi hedefiyle bir yöntem var edilmiş ve detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Uygun teknolojinin belirlenmesi yöntemlerini sistematik bir şekilde sunmak

yatırımcıya ve yükleniciye güven vereceği ifade edilmiştir. Bu sistematik yöntemle 5 dağıtım şirketi için uygulama tekniği belirlenmiştir (Aydın vd., 2020).

2020 yılında Karahan vd.; çalışmada, mobil batarya elektrik depolama sistemlerinin elektrik dağıtım sistemlerine entegre edilebilmesi ve dağıtım sistemindeki güç kaybı, gerilim düşümü ve kısa devre arızası gibi parametrelere etkisi incelenmiştir. IEEE 13-baralı test sistemi kullanılarak farklı senaryolarda analizler yapılmıştır. OpenDSS programı ile yapılan analiz sonuçlarına göre farklı batarya konumlarına göre mobil batarya elektrik depolama sistemlerinin dağıtım sistemlerine etkileri yorumlanmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır; uygulanan senaryolarla birlikte temel duruma göre en fazla %23,07'lik güç kaybı azalması gözlemlenmiştir. Göz önüne alınan yüklenme durumu için farklı batarya konumlandırmalarına göre alınan analiz sonuçlarında tüm bara gerilimleri sınırlar içerisinde kalmıştır. Bataryanın konumunun kısa devre arıza akımı üzerine az da olsa etkisi olduğu görülmüştür. Bu noktada optimum batarya konumlandırmasının önemli olduğu görülmüştür(Karahan vd., 2020).

2020 yılında Özan tarafından yapılan çalışmada batarya enerji depolama sistemlerinin(BEDS) gelişmesi devam eden bir sistem olduğu ve pek çok yerde kullanılabileceği ifade edilmiştir. Kullanım yerlerine göre BEDS'lerin değişik formlarda biçimlendirileceği ve biçimlenen modellerin ne olduğu belirtilmiştir. Modellemelerin oluşumu esnasında öncelikle güç sisteminde faz düzensizliği oluşturmak adına yükler düzensiz bir biçimde arttırılmıştır. Ardından sisteme batarya depolama sistemi bağlanarak sisteme olan etkisi incelenmiştir. Yapılan işlemler neticesinde, maksimum faz dengesizliğinin ve sistemde oluşacak kayıpların azaltılabileceği sonucuna varılmıştır (Özan, 2020).

2020 yılında Türkiye Sınai Kalkınma Bankası'nin hazırlamış olduğu rapora göre batarya depolama sistemlerinin gerekliliğinden bahsedilmiş. BEDS'lerin sınıflandırılması yapılmış ve sistemlerin kıyaslaması yapılmış enerji yoğunluğu bakımından li-ion(lityum iyon) pillerin daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Batarya teknolojisindeki ilerlemeler güçlü enerji yoğunluğu konusuna yönelmekte olup son üretim pillerin ve şarj edilebilir pillerin de enerji yoğunluğunun artacağı ve pillerin maliyetinin düşeceği beklentisini doğurmaktadır. Li-ion batarya teknolojisinin 2018 yılındaki bedeli ve maliyetlerdeki azalma göz önüne alındığında gelecekteki projeksiyonu oluşturulmuş, 2030 yılında fiyatın azalacağı tahmin edilmiştir. Yapılan GZFT analizine göre rüzgâr ve güneşte

kurulu gücün artması güç sisteminin esnekliğini arttıracak batarya tipi depolama sistemlerine olan mevduatın arttırılmasının önemli olduğu sonucuna varılmıştır.(TSKB, 2020).

2020 yılında TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu'na göre ülkemizde yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlardan bahsedilmiştir ve 2023 yılında RES kurulu gücünün 20.000 MW ve GES kurulu gücünün 5000 MW olması hedeflenmiştir. Türkiye'deki büyük ölçekli depolama teknoloji projelerinden bahsedilmiştir. Rapora göre enerji depolama mevcut şebekede olduğu gibi akıllı şebekelerin esnek, emniyetli, kesintisiz ve verimli çalışması adına önemli rol oynayacaktır. Enerji depolama, gün geçtikçe artan bir yöntem olup son dönemlerde talebin, üretimin yaşamın her kısmında çokça uygulanmaya başlanmıştır. Ayrıca enerji depolama konusundaki makale sayıları ve YÖK veri tabanında yayınlanan tez sayıları artış göstermiştir. Küresel çapta kullanımda olan depolama sistemlerinin beş sene içerisinde artış göstermesi beklenmektedir. (Dinçer ve Ezan, 2020).

1.2. Tezin Amacı ve İçeriği

Yapılan literatür çalışmaları baz alınarak, yıllar geçtikçe yenilenebilir enerjiye duyulan ihtiyaç artmakta ve buna bağlı yenilenebilir enerji santrallerinin sayısı artmaktadır. Yeryüzünde tükenen geleneksel üretim rezervlerine seçenek olarak yenilenebilir ve çevre dostu özellikleriyle öne çıkan güneş ve rüzgâr enerjileri bilhassa Avrupa Birliğinin 20 20 20 projesi (2020 yılında ;% 20 enerji yenilenebilir kaynaklardan üretilecek, % 20 CO₂ azalımı sağlanacak) kapsamında öne çıkmıştır(Tanrıöven, 2013). Akıllı şebekelere bağlı yenilenebilir enerji üretimi sürekli olmadığından gelecekte yaygın olarak kullanılacağı göz önünde bulundurulduğunda depolama sistemlerinin varlığı büyük önem kazanmaktadır. Elektrik enerjisi, depolama sistemleri ile enerji maliyetinin az olduğu esnada depolanıp, enerji maliyetinin fazla olduğu esnada kullanılarak enerji maliyetlerini düşürür. Doğal afetlerden ötürü, şebekelerde oluşacak sorunlarda, güç kaynağının emniyetini artırmak adına müşterilere destek olur. Hatta şebekelerin frekans ve gerilimlerini emniyete alarak güç vasfını arttırmaktadır. Bahsi geçen faydalarından ötürü; elektrik enerjisi depolama sistemleri, akıllı şebekelerin ilerlemesinde en mühim maddelerden biridir. İleri zamanlarda güç sisteminin iki yönlü ilerleyişi ve akıllı şebekelere yönleneceği düşünülürse, enerji depolama sistemlerinin akıllı ve mikro şebekeler üzerindeki önemi iyi biçimde idrak edilecektir (Kocaman, 2013).

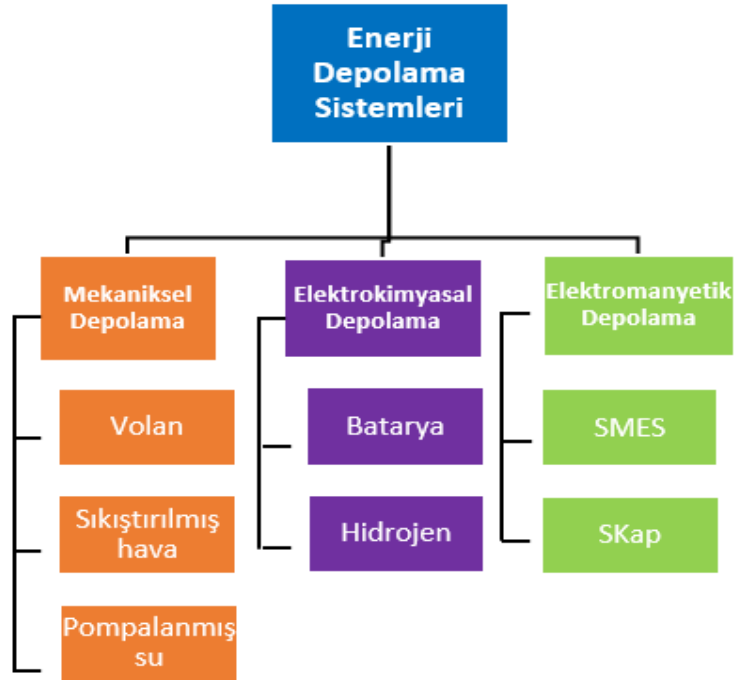
Bu sebeple akıllı şebekelere uygun olan EDS'lerin belirlenebilmesi, maliyetlerinin incelenmesi, şebekeye entegre edildikten sonra şebeke kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi konuları ciddi önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında IEEE 14 ve 30 baralı güç sistemlerine yenilenebilir enerji sistemleri ve enerji depolama sistemi modellenerek eklenmiştir ve bu modellemeler üzerinden çeşitli arıza senaryoları oluşturularak yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinin artan enerji talebine karşılık bir çözüm olarak sunulması sisteme entegre edilen enerji depolama sistemlerinin güç akışında ve sistem kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmış olup EDS'lerin, gerçek zamanlı üretim ve tüketim profilleri oluşturularak çeşitli senaryolar üzerinden yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlere entegre edildiğinde oluşturacağı olası etkiler incelenmiştir. Senaryolarda oluşturulan olası arızaların güç akışına, rotor açısı, frekans ve gerilim kararlılığına etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir ve sonuç olarak olası problemlere karşı çözüm önerilerinde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Enerji Depolama Sistemlerine Genel Bakış

Enerji depolama enerjinin daha sonra kullanılmak üzere, özellikle kesikli üretim yapan kaynakların sürekliliğini sağlamak için enerjinin aynı biçimde ya da farklı bir biçimde saklanmasına denir. Enerji birçok formda depolanabilmektedir. Bunlardan bazıları biyolojik depolama, kimyasal depolama, ısıl depolama, elektriksel depolama, potansiyel enerji, yerçekimi potansiyel enerjisi, kinetik enerji vs. dir. Günümüzde şebekelerde tercih edilen depolama sistemleri çoğunlukla, mekanik, termal ve elektrokimyasal sistemler olarak ifade edilebilir (Erdoğan, 2021). Şekil 2.1' de enerji depolama sistemlerinin gruplara ayrıldığı görülmektedir.



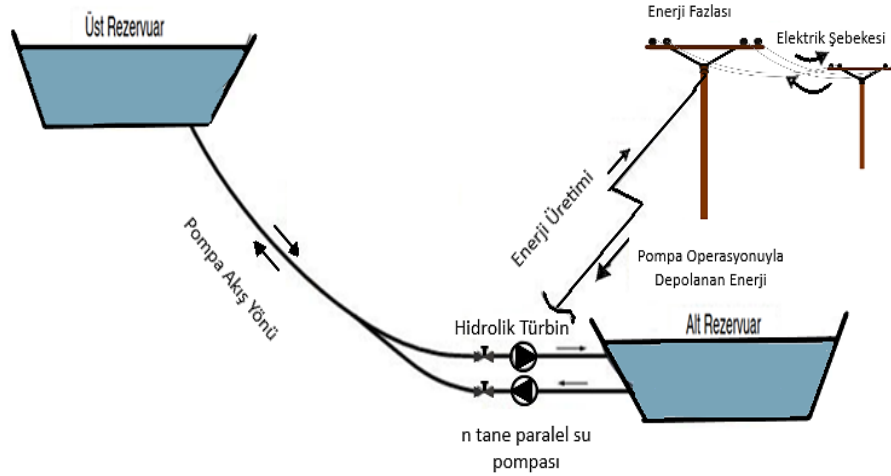
Şekil 2.1: Enerji depolama sistemlerinin gruplandırılması (Çaliker & Özdemir, 2013)

2.1.1. Mekaniksel enerji depolama

2.1.1.1. Pompa depolamalı hidroelektrik sistemler

Pompa depolamalı hidroelektrik sistemlerin temel çalışma şekli, birbirinden değişik yükseklik değerlerine sahip suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden yararlanmaya yöneliktir. Alt kaynakta bulunan su, elektrik ihtiyacının az olduğu zamanlarda pompalar aracılığıyla üst kaynaktaki su deposuna iletilerek potansiyel enerji arttırılmış olur (Şekil 2.2).

Yüksek enerji ihtiyacı olan zamanlarda ise su üst kaynaktan alt kaynağa iletilerek suyun kinetik enerjisinden ilk mekanik ardından elektrik enerjisi üretilir (Özdemir ve Hadra, 2016).



Şekil 2.2: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral (Ünver, Bilgin, & Güven, 2015)

Bu sistemin en önemli faydası, yüksek güçte depolama gerçekleştirmesidir. Sistemin kaybı ise veriminin sistemde kullanılan araçların özelliğine göre değişmesinin yanında %65-80 değerinde olmasıdır. Yani, depolanan 10 kW enerjiye karşın 6-8 kW elektrik elde edilmektedir (Özdemir ve Hadra, 2016).

2.1.1.2. Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama

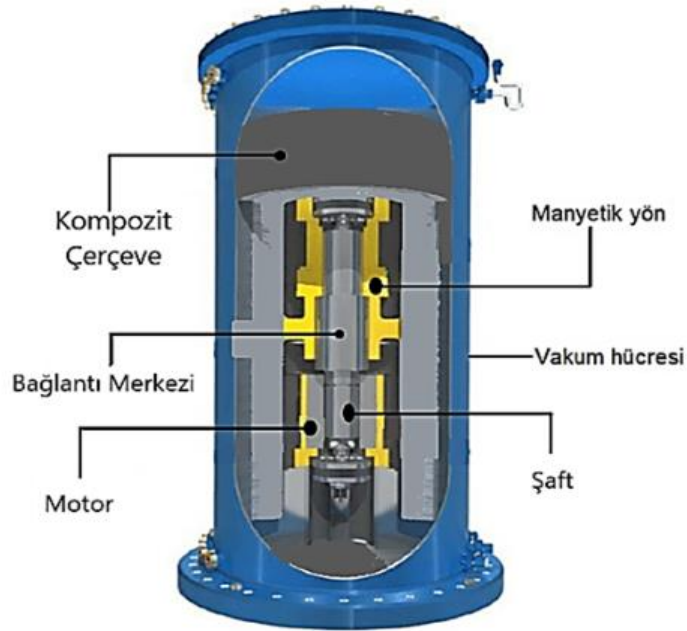
Sıkıştırılmış hava depolama sistemi, elektrik enerjisi talebinin yüksek olmadığı anlarda bir kompresör aracılığıyla enerjinin basınçlı hava tarzında depolanmasına yarar. Depolama anında, sıkıştırılmış hava depoya iletilirken santral jeneratörü kompresör vasıtasıyla tersine hareket ederek mekanik enerji ihtiyacı doğurur. Santral boşaldığı esnada ise sıkıştırılan hava içten yanmalı türbinleri çalıştırmak adına kullanılır ve bu esnada doğal gaz yakılarak benzer biçimde türbinler döndürülerek elektrik enerjisi elde edilir (Kozak, 2012).

Sıkıştırılmış hava depolama yönteminde havanın sıkıştırıldığı esnada oluşan sıcaklık sistemin verimini sınırlı değerde tutar. Bu yöntemin verimi yaklaşık %75 değerindedir. Bu sistemler, yanma olmadan yürütülmez zira egzoz havası az olan sıcaklıklarda elde edilecek

ve sonuçta malzemelerde kırılabilirlik, donma gibi durumlar meydana gelir. Kaynak olarak yenilenebilir enerji kaynakları kullanılır ise tam verim elde edilebilir. Sistemden karbon salınımı, en düşük değere ulaşacak fakat diğer zararlı gazlar halen yayılmayı sürdürecektir. Sıkıştırılan havanın, yeraltında ideal olan maden ocaklarında, büyük mağaralarda, tuzlu kayaların içinde depolanması sağlanabilir(Kozak, 2012).

2.1.1.3. Volanlar

Enerji depolama kinetik enerji biçimindedir. Yüksek hacimli bir gövdenin dönmesiyle hacmi daha az volanlar hızlı dönme hareketi gerçekleştirir. Bu depolamada güç yoğunluğu fazla, enerji yoğunluğu azdır. Süper kapasitörlerdeki gibi kısa süreli depo tekniklerinde kullanımı aktiftir. Hususen mobil uygulamaları daha geniştir. Az zamanda yüksek hızlara yükselip sonrasında az zamanda çok düşük hızlara düştüğü anlarda tercih edilmektedir. Hızlanma devrinde volan çok yüksek hızlara ulaştığında yavaşlama hareketine devam ederek hızını yükseltirken verilen enerjinin depolanması sağlanmaktadır. Hızını azaltma kısmından sonra yeniden hızını yükseltmesi kinetik enerji formunda depolanan enerji sisteme yeniden verilerek geri kazanılmaktadır(Mazman ve Yılmaz, 2019). Şekil 2.3.'de tipik volan enerji depolama sistemi verilmiştir. Fakat volanlarda bekleme esnasında enerji kaybı fazla olmaktadır (self deşarj).



Şekil 2.3: Volan enerji depolama sistemi(Vergili, 2019)

2.1.2. Elektriksel enerji depolama

2.1.2.1. Yakıt hücreleri

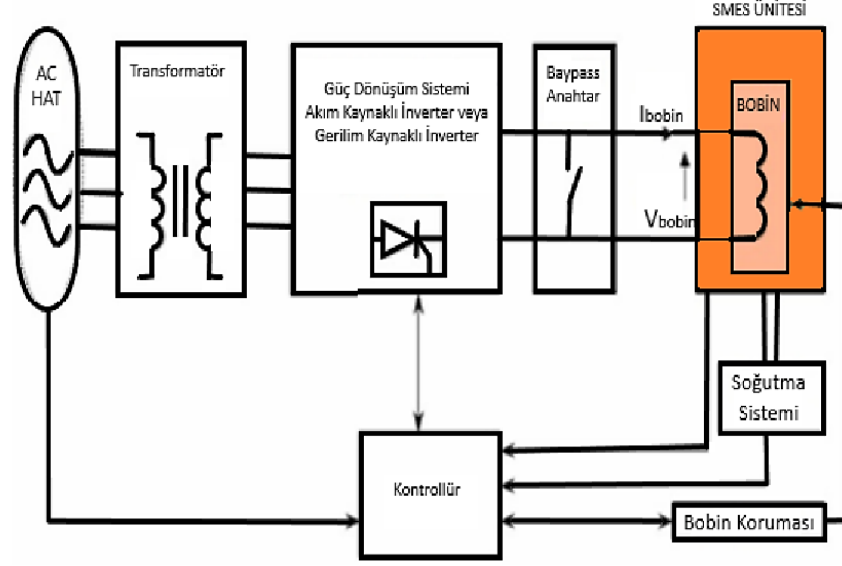
Yakıt hücrelerinin evveli bataryalardan çok daha eski zamanlara dayanır. Öncelikle hidrojen – oksijen hücre prensibi ifade edilmiştir. Yakıt hücreleri bataryalar gibi yakıt ve yakıcılarını yapısında bulundurmazlar. Bunun alternatif olarak yakıt ve yakıcılarını dışarıdan bir kaynaktan devamlı şekilde temin ederler. Hâlbuki bataryaların yakıt ve yakıcıları kendi bünyesinde mevcuttur. Yakıt hücreleri özgül enerji bakımından bataryalardan daha fazla değeri temin ederken özgül güç açısından daha az verimlere sahiptir. Ayrıca, yakıt hücrelerinin fiyatı çok yüksektir ve yükte meydana gelen değişimlere hemen uyum sağlayamamaktadır. Diğer teknolojilere kıyasla güç kapasitesi fazla değildir(Kozak, 2012).

2.1.2.2. Ultra kapasitörler/süper kapasitörler

Elektrik enerjisini kapasitörlerle depo edebiliriz. Sığaçlar enerjiyi pozitif ve negatif plakalar arasında depolar. Kapasitörler iki tane iletken plaka ile bunları ayıran ve dielektrik olarak isimlendirilen yalıtkan malzemelerden meydana gelmiştir. Yalıtkan malzeme levhalar arasında kıvılcım oluşumunu engelleyerek daha fazla depo yapılmasına fayda sağlar. Geleneksel kapasitörler güç yoğunlukları çok fazladır. Ancak enerji yoğunlukları çok azdır. Geleneksel kapasitörler çoğunlukla elektrolitik kapasitörler diye isimlendirilir. Süperkapasitörler ise geleneksel kapasitörlerin geliştirilmiş halidir. Enerji yoğunlukları düşük ancak boşalma süreleri hızlı ve çevrim ömrü daha yüksektir (Kozak, 2012).

2.1.2.3. Süper iletken manyetik enerji depolama

Süper iletken manyetik enerji depolama sistemi de enerji depolama için kullanılan çok mühim enerji depolama tekniklerinden birisidir. Bu sistemde enerji, halka biçiminde sarılmış iletkenlerden meydana gelen bir bobinden oluşur. Üretim fazlası enerji bobine verilir ve istenildiği an kullanılacak biçimde manyetik alan olarak depolanması sağlanır. Sistemin verimi oldukça yüksektir ve yanıt süresi çok azdır. Şekil 2.4' te tipik bir Süper İletken Manyetik Enerji Depolama(SMES) sisteminin bileşenleri gösterilmiştir(Kocaman, 2013).



Şekil 2.4: SMES sistemi bileşenleri(Kocaman, 2013)

2.1.3. Elektrokimyasal enerji depolama

2.1.3.1. Batarya

Bataryalar kimyasal tepkime sonucunda elektrik elde etmemizi sağlar. Batarya hücresinin içeriğinde iki değişik kimyasal vardır, bunlardan biri yükü negatif olan katoda ve diğeri yükü pozitif olan anota bağlanmıştır. Bataryaların herhangi bir cihazla bağlantısı yapıldığında negatif yükler cihazın üzerinden geçerek pozitif yüke doğru hareket eder. Katot ve anot elektrolit adı verilen kimyasalla örtülüdür. Kullanım esnasında çeşitli bataryalar tercih edilmektedir, en çok kullanılanlar arasında kurşun-asit, nikel -kadmium, nikel–metal hidrat, sodyum sülfür, sodyum nikel klor ve lityum-iyon sayılabilir. Teknolojinin gelişmesiyle beraber gündeme gelen akışkan bataryalar ise vanadyum, krom ve demir elektrokimyasını sıkça tercih edilir. Elektrik enerjisi depolayan her bataryanın yeti, depolama/boşalma düzeyi, enerji ve güç çıkışı, kullanım ömrü ve elde edilen verim açısından kendine has nicelikleri vardır. Bu değişiklikler, kurulum, kullanım biçimi ve koruma şartları ile yürütme bakım ve atık idare biçimleri de değişiktir. Bataryaların, maliyetinin yüksek olması, kiloca fazla olması ve az ömürlü olması da eksik yönlerindedir (Erdoğan, 2021).

2.1.3.2. Hidrojen depolama teknolojisi

Tipik bir hidrojen depolama sisteminde, elektrik vasıtasıyla elektrokimyasal bir çevirici olan elektrolizer sayesinde su moleküllerine ayrılır. Oluşan hidrojen ve oksijen

atomları depo edilir. Tüketimin çoğaldığı zamanlarda depolanan hidrojen atomu, yakıt pili yardımıyla elektrik elde etmek için kullanılır. Hidrojen atomunun saklanması yüksek basınçta sıkıştırma, hidrokarbonlar, sıvılaştırma ve hidrürler, karbon nano tüplerinin kullanılması gibi farklı metotlar tercih edilmektedir. Kullanılan depolama metotlarının çeşidine göre depo edilen hidrojenin depo yüküne oranı %2 ile %68 civarındadır. %2 civarında çok az depo yük oranına sahip türde tüp yükü çok problem olmakta birlikte %68 civarında iyi bir depo yük oranı sağlayan karbon nano tüp metodunda ise maliyetin çok fazla olması büyük bir sorundur. Bahsi geçen bu teknolojinin, sorunların çözümü sonucunda çevreye pozitif etki sağlayacak. İleride vazgeçilmez enerji depolama teknikleri arasında olacaktır (Çaliker ve Özdemir, 2013).

2.2. Akıllı Şebekeler Kapsamında Enerji Depolama Sistemleri

Bu günlerde sürekli artan enerji talebine bağlı olarak güç sistemlerine yeni yükler ve sistemler ilave edilmektedir. 20.yy'dan günümüze kadar benzer ilkelerle çalışan güç sistemleri 21.yy'a has bilgisayar ve ağ sistemi ilave edilerek ilerinin Akıllı Şebekelerini (Smart Grids) meydana getirmektedir. Bahsi geçen akıllı şebekeler bazı yapılardan oluşmaktadır. Bütünleştirilmiş haberleşme, akıllı üretim, akıllı sayaçlar, akıllı dağıtım ve ileri kontrol yöntemlerinden meydana gelmektedir(Turan, 2014). Enerji ihtiyacını karşılamak için gelişen teknolojiyle beraber sürdürülebilir, verimli ve yönetilebilen sistemler akıllı şebekeler olarak isimlendirilebilir.

Türkiye'de son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemine bağlanmasıyla alakalı yasal düzenlemeler yapılmış ve buna dayanarak bilhassa güneş ve rüzgâr tabanlı yenilenebilir enerji sistemlerinin sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bu gelişmeler neticesinde mevcut güç sistemlerinin akıllı şebekelere çevrilmesi gündemdedir (Koç vd., 2015).

Son zamanlarda kullanımda olan klasik güç sistemlerinde birçok problem karşımıza çıkmaktadır. Bu problemlerin başında hata belirlenmesinin elle gerçekleştirilmesi, gerilim regülasyonunun bağımsızlığı, idealleştirilmemiş güç akışı ve bölgesel güç idaresidir. Akıllı şebekelerin yaygınlaşmasıyla anında hata belirlemesi ve uzaktan yönetilebilen anahtarlamalar, anında güç idaresi ve kayıpları azaltmak hedefiyle etkin benzetimler yapılmaktadır (Turan, 2014b).

Günümüzdeki şebeke altyapısı birbirine bağlı olarak şekillendirilmiştir. Herhangi bir yerdeki arıza durumu kısa zamanda sistemi etkileyebilmekte ve şebekenin zarar görmesine

neden olmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için sistemde oluşabilecek anlık değişimleri algılayabilecek ve anlık müdahale edebilecek bir sisteme ihtiyaç vardır. Bu sistem verimliliği ve güvenilirliği arttırmak adına etkin çalışan bir haberleşme sistemidir. Tüketiciyi enerjiden noksan bırakmamak ve sistemin bütününe etkilenmesinin önüne geçmek için oluşacak olası arızaların temizlenme süresinin hızlı olması önem teşkil etmektedir.

Bütün durumlar göz önüne alındığında bir diğer ifadeyle akıllı şebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve dağıtık üretimin problemsiz bir biçimde sisteme bağlanmasına olanak sağlayan, gün geçtikçe karışıklaşan geleneksel şebekede enerji ihtiyacı ve üretim kararlılığını dengede tutabilmek adına iletişim sistemiyle güç sistemini yanyana getiren rağbet edilen sistemlerdir(Çaliker ve Özdemir, 2013).

Şebekelerde meydana gelen yeniliklerle birlikte ortaya çıkan yeni kavramlar birbirine dayanak olan bir takım kısımları gibi akıllı şebeke kavramı altında bir araya gelmektedir. Şekil 2.5’ te görüldüğü gibi bilhassa “Enerji Depolama Uygulamaları” sistem dâhilinde taahhüt ettikleri vazifelerin çeşitliliği ile akıllı şebeke kavramının önemli faktörü olarak karşımıza çıkmaktadır (Koç, 2015).



Şekil 2.5: Enerji Depolamanın Akıllı Şebekeler İçindeki Yeri(Koç, 2015)

Azalan fosil yakıt kaynakları, olumsuz çevre koşulları, küresel ısınma ve iklimdeki değişim sorunlarına çözüm olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmaktadır. Buna ek olarak YEK’lerin dalgalı ve kesintili güç üretimleri ve klasik şebeke alt yapısının

dağıtık üretim sistemine uygun olmaması bizi akıllı şebeke alt yapısının geliştirilmesine ve enerji depolama uygulamalarının yaygınlaşmasına yöneltmektedir. IEEE' nin 2030 serisi ve 1547 serisi akıllı şebeke standartları ve yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlerin şebekeye entegre edilmesine yönelik standartlar olarak bu çerçevede temel teşkil etmektedir.

2.3. Enerji Depolama Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Günümüz şebeke yapısına bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştığı görülmektedir. Yenilenebilir kaynakların süreksiz üretimlerindeki eksikliklerini gidermek açısından enerji depolama sistemleri önem teşkil etmektedir. Her sistemde olduğu gibi enerji depolama sistemlerinin de şebekeye faydaları ve zararları olabilmektedir.

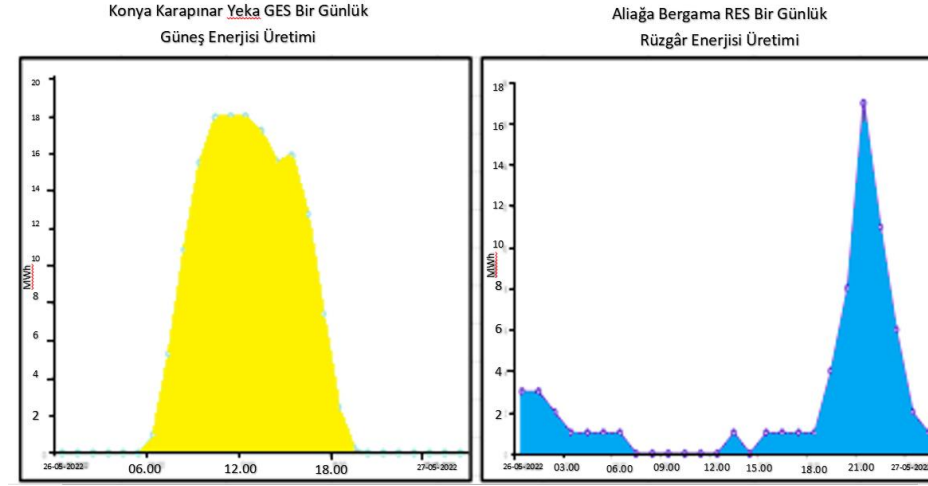
Güç sistemlerinde çeşitli enerji depolama sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler arasından uygunluk, güvenilirlik, boyut, depolama kapasitesi, maliyet, sistemin ömrü, frekans regülasyonu, yük akış eğrisine etkileri vs. gibi birçok kriterin hassasça incelenmesi gerekmektedir. Bütün kriterlerin değerlendirilmesi sırasında enerji depolama sistemlerinin güç sistemlerine fayda sağlayıp sağlamayacağını tespit edilmesi önemli bir konudur.

Bu bağlamda uygun teknolojiyi seçmemiz için depolama teknolojilerinin kıyaslanması önemlidir. Tablo 2.1' de büyük ölçekli enerji depolama metotlarının kıyaslanması görülmektedir.

Tablo 2.1: Depolama sistemlerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması(Vergili C., 2019)

Enerji depolama teknolojileri	Uygulama Alanları	Güç Kapasitesi(MW)	Enerji girişinin enerji çıkışına oranının verimi (%)	Deşarj verimi(≈ %)	Ekonomik Ömür(Yıl)	Yatırım maliyeti(\$/kW)
PDHES	Uzun süreli depolama, rüzgâr enerjisi desteği, ticari amaçlı kullanım	30-5000	70-85	87	50	500-4600
SHDES	Uzun süreli depolama, kontrol (frekans), güç sistemlerine eklenebilme	110-290	42-54	82,5	30	500-1500
Volan	Güç kalitesi, Tüketimin yoğun olduğu saatlerde sisteme enerji ekleme	0,1-20	90-95	95	15	130-500
SKap	Kısa süreli depolama, ticari amaçlı kullanım	≤ 0,2	90-95	95	20	130-515
SMED	Güç kalitesi, güç arz takviyesi	0,02-10	90-95	95	20	130-515

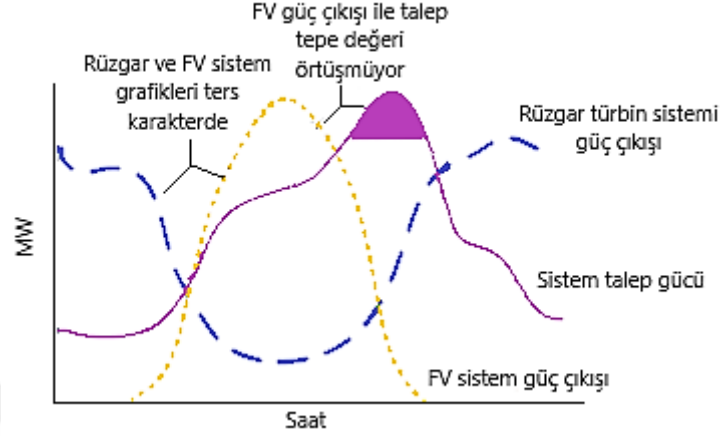
Enerji depolama metotları birbirlerinden enerji kapasitesi, en yüksek depolama zamanı, çevrim ömrü, ömür, kendine has enerji ve kendine has güç değerleri yönünden değişiklik gösterirler. Mali yönden bakıldığında çalıştırma ve inşa etme maliyetlerinde büyük farklılıklar vardır. Kurulum için tercih yapılacağına her bir enerji depolama yönteminin ideallığı titizlikle incelenmelidir (Özdemir ve Hadra, 2016).



Şekil 2.6: Gerçek zamanlı günlük rüzgâr ve güneş enerjisi üretimi(“Gerçek Zamanlı Üretim - Gerçekleşen Üretim - Üretim | EPIAŞ Şeffaflık Platformu”)

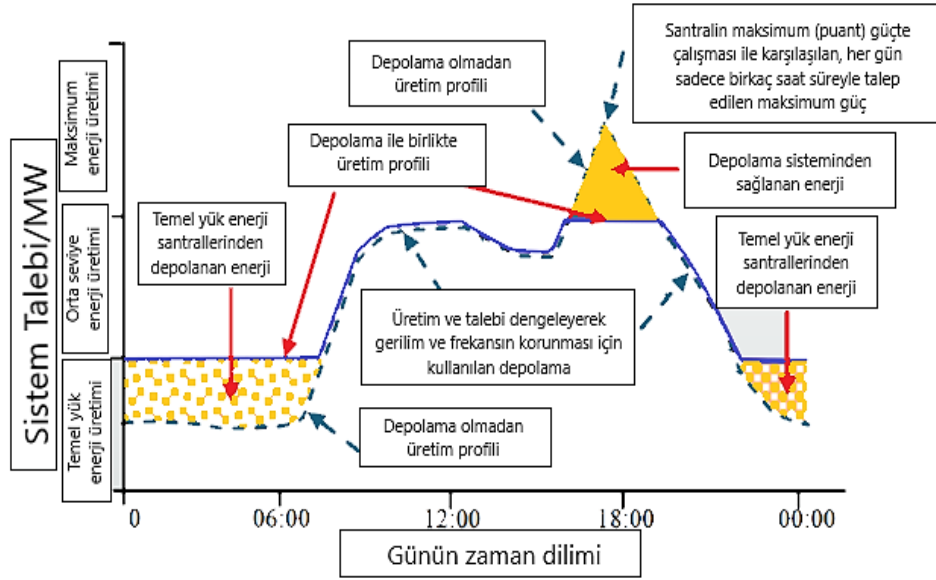
Enerji depolama sisteminin entegre edileceği şebekeye uygunluğunu anlamak için şebekelerin güç üretim yapısının incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.6’ da EPIAŞ’ın

Şeffaflık platformundan elde edilen Konya Karapınar Yeka GES ve Aliğa Bergama RES santrallerinin 2022 yılı mayıs ayının 26. gününe ait gerçek zamanlı üretimi görülmektedir.



Şekil 2.7: Geleneksel, rüzgar ve güneş enerji santrallerinin yük profilleri (“Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama Sistemlerinin Uygulanması”, 2019)

Şekil 2.7’ de güneş ve rüzgâr santral profillerinin mevcut şebeke profiliyle örtüştürüldüğü görülmektedir. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’e bakıldığında: Yüke olan ihtiyaç ve enerji rezervleri arasında potansiyel bir dalgalanma oluşabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu probleminin çözümlenmesi, şebeke, gerilim ve frekans değerlerinin makul limitler dâhilinde tutulması için enerji depolama teknikleri aktif bir çözümdür (“Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama Sistemlerinin Uygulanması”, 2019).



Şekil 2.8: Enerji Depolama Sistemi Kullanımı(İ. M. Koç, 2015).

Yenilenebilir kaynakların bütün bu olumsuz durumları göz önüne alındığında enerji depolamanın günlük tüketim ve üretim profiline nasıl bir etki ettiği önemli bir konudur. Şekil 2.8’ de enerji depolamanın günlük puant enerji üzerindeki etkileri görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere depolama ile talebin en yüksek olduğu noktalarda şebekedeki yüklenmeyi hafifletmek ve sürekli kararlı bir şebeke var etmek imkân dâhilindedir (Mazman ve Yılmaz, 2019). Talep-üretim eğrisindeki tepe noktaların düzleştirilmesi ve çukur noktaların doldurulması sayesinde yük eğrisi oldukça kararlı hale gelecektir. Özetle üretim, iletim ve dağıtım seviyelerinde enerji verimliliği temin edilmekte, işletme ömrü yükselmekte ve kapasite yükseltilmesi gereksinimi ötelenmektedir.(Koç vd., 2015).

Ayrıca depolama sisteminde ara kazanç(arbitraj) tekniğiyle tarife farklılığından yararlanılarak elektrik enerjisinin birim fiyatının düşük olduğu yani enerjiye olan talebin düşük olduğu durumlarda şebeke üzerinden ya da yenilenebilir enerji santrallerinden depolanıp, elektrik enerjisinin birim fiyatının yüksek olduğu yani enerjiye olan talebin yüksek olduğu durumlarda şebekeye geri verilmesi maliyet açısından büyük fayda sağlamaktadır.

Enerji depolama sistemlerinin depolama sürelerine bakıldığında her depolama sisteminin farklı bir depolama süresi vardır. Manyetik ve elektrik enerji depolama saniye seviyesinde çok hızlı depolama sağlarken elektrokimyasal bataryalar saniye-saat sürelerinde

enerji depolama sağlarlar. Bu durum EDS'nin depolanacağı şebeke ve bölge için ayrı ayrı teknoloji seçmeyi gerektirdiğinden bir dezavantajdır.

Sonuç olarak enerji depolama sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarına bakıldığında maliyet ve uzun ömür açısından henüz ideal sistemler mevcut değildir. Ancak enerji depolama sistemlerinin dağıtık üretim birimleri(DÜB) ve akıllı şebekelerle birlikte kullanımı kesikli üretim yapan santrallerdeki üretim-tüketim dengesizliğini minimuma indirmek açısından iyi bir yöntemdir. Ayrıca ülke şartlarında kullanılan tarife farklılığından yararlanılarak yapılan depolamada depolama maliyetleri minimize edilebilir.

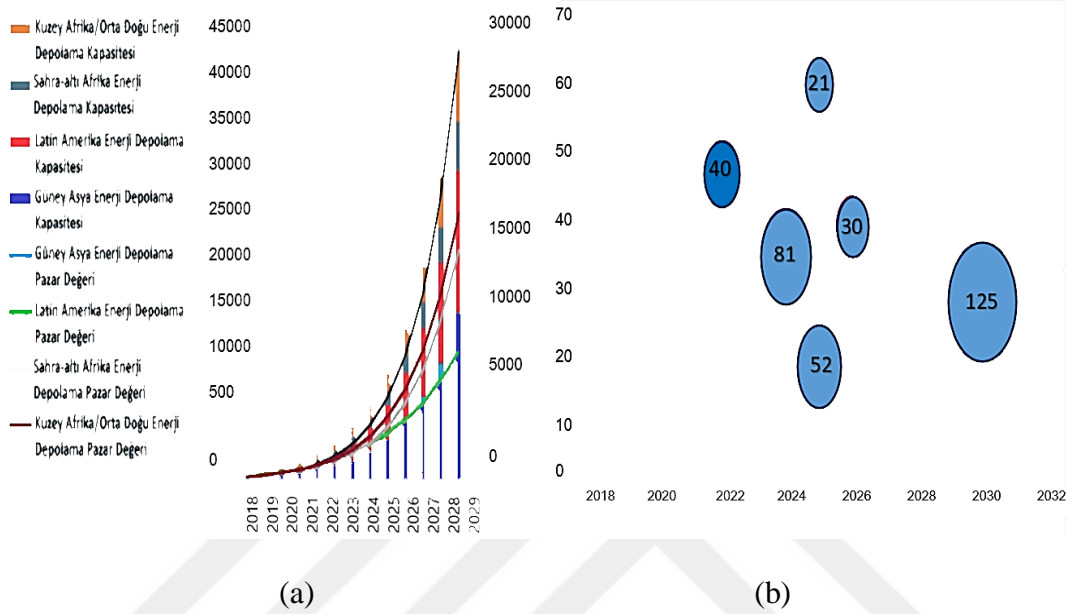
2.4. Dünya'daki ve Türkiye'deki Enerji Depolama Sistemi Gelişimi

Geçmişten günümüze nüfus oranlarının artması ve teknolojinin büyük bir hızla gelişmesi ile enerjiye olan ihtiyacımız gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum da bizi enerjiden kullanım ve maliyet açısından verim elde etmeye yönlendirmektedir ve Dünya'daki enerji üretim kaynaklarının avantaj ve dezavantajlarının araştırılması önemli hale gelmiştir.

Küresel enerji rezervi üretiminde ve tüketiminde son otuz-kırk sene incelendiğinde bir yanda ileri sürülen mühim dönüşüm hareketleri diğer yanda ise sürdürülen eski metotlar fark edilir. Çin, Hindistan ve Endonezya gibi ülkelerin hızla büyüyen ekonomilerinin çok büyük enerji talebi petrol ve kömür gibi geleneksel enerji rezervlerinin önemini koruması sonucunu meydana getirmiştir. Fosil yakıtların küresel enerji üretimindeki bu seçkinliğine karşın gelişmiş sanayi ülkelerinde, küresel ısınmanın olumsuz sonuçları, hava kirliliğinin yükselmesi ve enerji konusunda dışa bağımlılığın düşürülmesi beklentisi yenilenebilir enerji rezervlerine alakayı artırmıştır. Bu alakadan dolayı son elli senede yenilenebilir enerji üretimindeki senelik yaklaşık artış diğer rezervlerdeki artışın yaklaşık beş katı oranında olmuştur (İnat ve Özdemir Daşçioğlu, 2017).

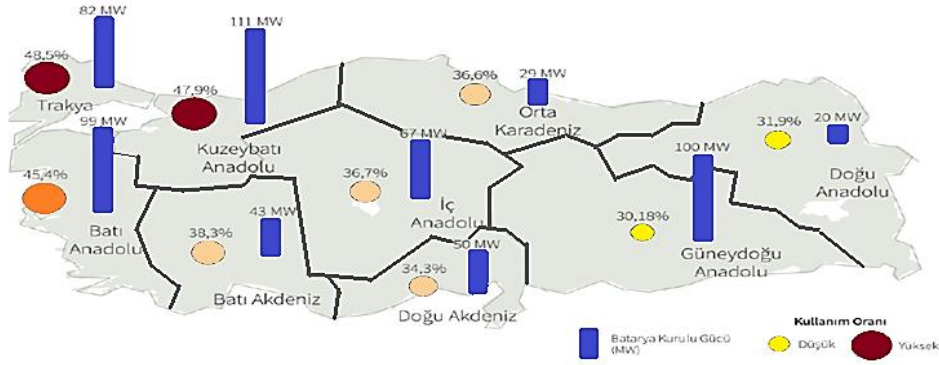
Ülkemizde de katı yakıt, petrol, doğal gaz gibi kaynakların üretim ve tüketimi azımsanacak değerlere sahip değildir. Ancak T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2020 yılı Ulusal Enerji Denge Tablolarına göre katı yakıt arzı %3,1 miktarında düşerek 40,6 milyon tep, petrol arzı %2,2 miktarında yükselerek 42,2 milyon tep, doğal gaz arzı %7,2 miktarında yükselerek 39,8 milyon tep ve yenilenebilir enerji arzı %2,8 miktarında yükselerek 24,6 milyon tep seviyesinde gerçekleşmiştir. Yenilenebilir rezervler bakımından analiz edildiğinde; bir önceki yıla nazaran, jeotermal %9,6, biyoenerji ve atıklar %7,6, güneş %10,0, rüzgâr %14,3 miktarında artış göstermiştir.

Rakamlara bakıldığında YEK'lerde olan artışın diğer kaynaklarda olan artışa göre daha yüksek oranlarda olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak DÜB'lerin kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının üretiminde gördüğümüz kesikli yapı, sürekli ve kesintisiz enerjiye olan ihtiyacımızdan ötürü EDS'ler kilit bir konuma sahiptir.



Şekil 2.9: a) Bölgelere göre enerji depolama kapasitesinin ve pazar değerinin değişimi b) Enerji depolama kapasitesi birikmiş yıllık artış hızı (Dincer ve Ezan, 2020)

BDO(Binder Dijker Otte) global firması enerji depolama pazar büyümesi ve kapasite değişimleri konusunda farklı analiz sonuçlarını derleyerek 2030 projeksiyonlarını oluşturmuştur. Şekil 2.9 (a)'da dünyanın farklı bölgelerindeki enerji depolama kapasitesindeki artışlar ve pazar değeri değişimleri tahminleri sunulmaktadır. Şekil 2.9 (b)'de ise yıllara göre kümülatif artış hızının değişimi gösterilmektedir. Şekil içindeki baloncukların boyutu ve her birinin içindeki rakam, Gigawatt (GW) cinsinden öngörülen toplam kurulu güç kapasitesini göstermektedir (Dincer ve Ezan, 2020). Şekillerden görüldüğü gibi yıllar geçtikçe dünya geneli enerji depolama kapasitesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 2.10: SHURA Türkiye çalışması enerji depolamanın gelecek öngörülere (Kaytez, 2018)

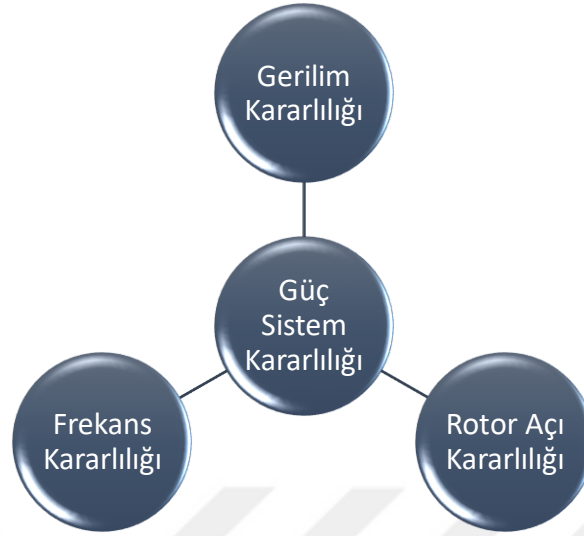
Şekil 2.10’ da Türkiye’ deki batarya kurulu gücünün kullanımının oranı görülmektedir. Ülkemizde Cumhurbaşkanlığı Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Kurulu (BTYPK)’ nun düzenlediği Eylül 2019 toplantısında teknolojik yönden hedef alınan 12 madde içerisinde enerji depolama sistemlerinin yaygınlaştırılması konusunun olması ülkemiz için enerji depolama konusunun önceliğini ve önemini göstermektedir.

2.5. Elektrik Güç Sistemleri Kararlılığı

Güç sistemlerinde kararlılık, normal çalışma durumunda olan bir güç sisteminin herhangi bir olumsuz durum karşısında normal çalışma şartlarına geri dönmeye çalışması durumunu ifade eder. Bozulan ekipmanların izolasyonu sebebiyle ya da güç sisteminin geri kalan bölümünün işletimini dengede tutmak için bilinçli bir şekilde devre dışı bırakılan bölümler dışında, özet olarak güç sisteminin bütününe bozulmadan devam ettiği zaman sistemin tümü muhafaza edilmiş olur. Kararlılık durumu, zıt güçler arasındaki muvazene şartıdır ve kararsızlık durumu, bozucu zıt güçlerin bir kısmının arasında durmaksızın bir istikrarsızlığa neden olduğunda meydana gelir (Yıldırım, 2017).

Güç sistemlerinin büyümesiyle beraber çeşitliliğin artması, teknolojiye olan ilerleme ve sistemin yüklenmenin artmasıyla çalışmasının devam etmesi kararsızlığın başlıklara ayrılmasına sebep olmaktadır. Değişik sebeplerden dolayı kararlılık sorunu kararlılığın sınıflandırılmasını zorunlu kılmıştır. Kararlılığın sınıflara ayrılması, güç sistemlerinin işletimi ve dizaynını basitleştirme yönünden önemini korumasının yanında, kararlılık türlerinin idrak edilmesi ve aralarındaki ilişki yönünden de önemlidir. (Demirci, 2018)

Şekil 2.11’de güç sistem kararlılığının sınıflandırılması görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere kararlılık 3 ana başlık altında incelenmektedir.



Şekil 2.11: Güç sistem kararlılığının sınıflandırılması

2.5.1. Gerilim kararlılığı

Gerilim kararlılığı, sistemin çalışmasını bozan bir etki durumunun ardından ve nominal çalışma durumunda sistemdeki tüm bara gerilim değerlerinin kabul edilebilir sınırdan seyretilmesi durumudur. Güç sisteminin aşırı yüklenmesi ya da sürekli ve kontrol altına alınamayan bir düşüşe sebep olan bir bozucu etkide sistem gerilim açısından kararsız duruma gelir. Gerilim kararsızlığına sebep olan temel neden güç sistemlerinin reaktif güç isteğini karşılamakta yetersiz olmasıdır (Demirören & Zeynelgil, 2004).

Gerilim kararlılığını etkileyen etmenler aşağıda verilmiştir (Demirci, 2018);

- Kontrol ve koruyucu elamanlar arasında uyumlu çalışma eksikliği,
- Çevresel etkiler; yangın, deprem vb,
- Reaktif güç kompanzasyonun yeterli seviyede olmaması,
- Sistemin işletim koşulları
- Üretimin olduğu baraların yüklenmenin olduğu baralara uzak olması,
- Gerilim kaynağının azlığıdır.

Belirtilen bu etkiler sistemlerin kararlılığını yer yer ve zaman zaman etkileyebilmektedir. Bundan ötürü sistemlerin gerilim kararlılığını analiz edeceğimiz zaman bu etmenler göz önüne alınmalıdır. Çünkü sistemin küçük bir bölümünde gerçekleşen kararsızlık tüm sistemi etkisi altına alabilir. Bu durum sistemler için istenmeyen ve çöküşe neden olan olumsuz bir durumdur.

2.5.2. Rotor açısı kararlılığı

Güç sistemine bağlı olan makinaların sistemde meydana gelen herhangi bir bozulma sonucunda eş zamanlı çalışmayı devam ettirmesi durumu rotor açısı kararlılığı olarak isimlendirilir. Olası bir bozulma durumunda sistemde bulunan senkron makinelerin rotorlarında bir hız artışı veya azalması durumları yaşanabilir. Bu durum sistemde bulunan jeneratörlerin hızlarında değişiklik ve rotor açılarında farklılıklar oluşturur. Bu durumda sistem güç-açı ilişkisinden kaynaklı yüklenmenin bir bölümünü hızı yüksek olan makineye verir. Yük dağıtımını olarak isimlendirilen bu olayın sayesinde açı farklarında ve rotor hızlanmasında azalma eğilimi görülür. Ancak bu durum belirli bir sınıra kadar geçerliliğini korur, sınırın aşılması halinde rotor açılarında sapmalar olur. Meydana gelen bu artışlardan kaynaklı güç iletilmesinde azalış ve sapmaların iyice artışa geçmesi durumunda güç sistemi kararsız hale geçebilir. Bozulan sistemin kararlılık durumu, sistemi düzeltecek kadar elektriksel moment oluşup oluşmamasına bağlantılıdır. Bu kararlılık başlığını ve elektriksel momentin daha iyi anlaşılması için salınım grafiklerinin irdelenmesi önemlidir. Aşağıdaki denklemde elektriksel momentin bileşenleri görülmektedir.

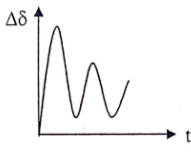
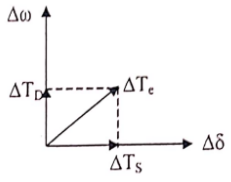
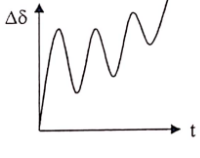
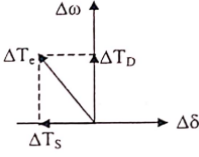
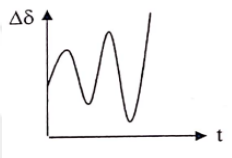
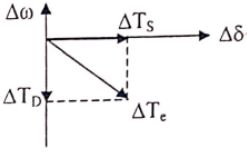
$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_d \Delta \omega$$

T_s : senkronlayıcı moment

T_d : sönümlenme momenti

(2,1)

Tablo 2.2: Elektriksel Moment Bileşenlerinin Değişimi

		Kararlı <ul style="list-style-type: none">• Pozitif T_S• Pozitif T_D
		Salınımsız Kararsız <ul style="list-style-type: none">• Negatif T_S• Pozitif T_D
		Salınımlı Kararsız <ul style="list-style-type: none">• Pozitif T_S• Negatif T_D

Elektriksel moment bileşenlerinden herhangi bir tanesinin yoksunluğunda kararsızlık olayı meydana gelebilir. Tablo 2.2’ de gösterildiği üzere senkronlayıcı moment yeterli miktarda oluşmazsa periyodik olmayan kararsızlık durumu, sönümleme momenti yeterli miktarda oluşmaz ise salınımlı kararsızlık durumu meydana gelmektedir.

2.5.3. Frekans kararlılığı

Herhangi bir bozucu etkilenme sonucu sistemin frekans değerini durağan kalma kabiliyetidir. Güç sistemlerinin herhangi bir yerinde meydana gelen kısa süreli bozulmalar ya da nominal işletim halinde oluşan bozulma etkisinde ötürü oluşan farklılıklara sistemin yanıtı genellikle frekans kararlılığı başlığı altında birleşir. Frekansta meydana gelen kararsızlık güç sistemi üzerindeki üretim birimi ve yüklerin devre dışı olmasına neden olur. Bu salınımlara sebebiyet veren bozucu etkiler, güç akışı, gerilim, frekans vb. sistem parametrelerinde normal değerlerin dışına çıkmasına neden olur. Bilhassa gerilim değerinde oluşan büyük sapmalar da güç sisteminin emniyetini eksilten önemli bir güç sistem problemidir.

Bütünsel olarak düşünüldüğünde frekanstaki kararlılık sorunları cihazların eksikliğine, kontrol ve muhafaza elemanları arasındaki yeterli olmayan üretim rezervine

bağlıdır. Birbirlerinden ayrılmış parçalı düzeneklerde frekans kararlılığı yüksek ölçüde yük kaybına veya üretim kaybına neden olan herhangi bir bozulmayla alakalı olabilir. Frekansın salınım anında, alçak frekansta devre dışında bırakılan yükler, sistem koruma ekipmanları ve jeneratör denetimleri gibi cihazların elverişli bir şekilde yanıtı çok kısa sürelerde gerçekleşebildiği gibi üretim birimi sistemleri ve yük gerilim düzenleyicileri gibi cihazların uygun bir şekilde yanıtı daha uzun zaman(dakikalar) alabilir. Bu nedenle frekans kararlılığı kısa bir zamanda meydana gelebildiği gibi uzun zamanlarda da meydana gelebilir(Keleş, 2012).

2.6. Enerji Depolama Sistemlerinin Şebekeye Entegrasyonu ve Güç Sistem Kararlılığına Etkileri

Enerji depolama sistemlerinin güç sistemlerine entegrasyonu ile fazla enerjiyi depolayarak güç eksikliği olan zamanlarda sisteme bu gücü geri ileterek güç sistemini fazla yüklenmekten kurtarır. Ayrıca elektrik şebekesinde dağıtık üretim sistemleriyle kullanılan EDS'ler, elektrik dağıtım ve iletim kısımlarında değişik gerilim düzeylerinde akıllı şebekeye bazı önemli faydalar sağlayabilir(Özdemir vd., 2017). Güç sistemindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı arttıkça depolama sistemleriyle olan etkileşimi önemli bir konu haline gelmiştir ve YEK'lerin EDS'lerle kullanımı akıllı şebekelerde kilit rol oynamaktadır.

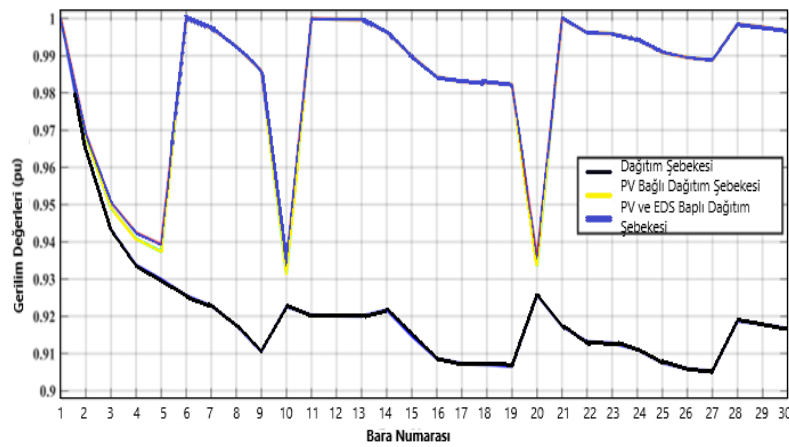
Dağıtım sistemleri yenilenebilir enerjiye dayalı güç santrallerinin eklenmesine uygun şekilde düzenlenmediklerinden günümüzde dağıtık üretim santrallerinin şebeke entegrasyonunda iyi bir kontrol yürütme yapılmadığında aşağıda ifade edilen olumsuzluklar meydana gelmektedir (Tanrıöven, 2013);

- Değişen reaktif ve aktif güç üretiminden ötürü şebekede istenmeyen gerilim değişimleri,
- Mevcut şebeke öğelerinin ısı dayanım kapasitelerinde ve kısa devre sınırlarında zorlanma,
- Harmonik ve fliker üretimlerinde belli edilen limitlerin aşılması,
- Anlık devreye girme durumu ve anahtarlama durumu (inverterlerin) gibi süreksiz durumlarda şebeke kararlılığının sınır miktarının aşılması

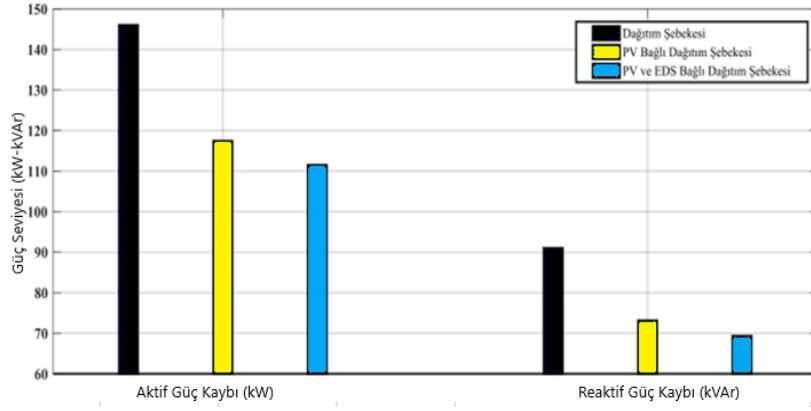
enerji depolama sistemlerinin DÜS'lerle kullanımı bu problemlere çözüm sağlayacaktır.

Güç sisteminin, sistem operatörleri bakımından en mühim özelliği gün içerisindeki güç talep eğrisindeki yüksek noktalardır. Güç sistemi için lazım olan üretim değeri bu tepe noktalarını karşılayacak biçimde tasarlanmıştır. Eş zamanlı olarak gün içerisinde tepe yük miktarı ve düşük yük miktarı sistem operatörlerinde olumsuz bir durum meydana getirmektedir (Sezgin vd., 2018). Bu olumsuz durumlara çözüm olarak ya elektrik üretim tesislerinin sayısı artırılmalı ya da mevcut elektrik tesisleri üzerinden değişiklikler yapılmalıdır. Yeni üretim tesislerinin fayda sağlamasının yanı sıra çevreye verdiği zararlar göz önüne alındığında mevcut enerji tesisleri üzerinden çözüme gitmek daha mantıklı olacaktır. Bu çözüm yük kaydırma ve tepe tıraşlamadır. Ülkemizde enerji tüketim fiyatlandırılması üç tarifeye ayrılmıştır. Güç tüketim eğrisi göz önüne alındığında enerji talebinin yüksek olduğu tepe durumlarının enerji talebinin düşük olduğu kısımlara yani fiyatlandırmanın düşük olduğu zamana kaydırılıp tepe noktaları tıraşlanarak güç talep eğrisinde oluşan dengesiz durumu daha düzenli hale getirmek hedeflenmiştir. Ancak bu durum yük kaydırma işlemini yani güç talep eğrisinin düzgün hale getirilmesi işleminin tüketiciye bırakılması anlamına gelmektedir. Bu durumda tüm tüketicilerin tüketim tarzlarını değiştirmesi beklendiğinden esnekliği az bir çözümdür. Bu durumda enerji depolama sistemlerinin kullanımı en iyi çözümdür.

Enerji depolama sistemlerinin güç sistemine etkisiyle ilgili literatüre bakıldığında birçok çalışma yapılmıştır. Şekil 2.12’de ve Şekil 2.13’de enerji depolama sisteminin YEK entegrasyonu ile yapılan örnek bir çalışmanın şebekeye olan etkisini göstermektedir. Buradan da görüleceği gibi enerji depolama sistemlerinin şebekeye entegrasyonu güç kayıplarında azalma ve bazı gerilim seviyelerinde olumlu düzelme sağlamıştır.



Şekil 2.12: Gerilim seviyelerinin karşılaştırılması(Bahçeci ve Daldaban, 2017)



Şekil 2.13: Güç kayıplarının karşılaştırması(Bahçeci ve Daldaban, 2017)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

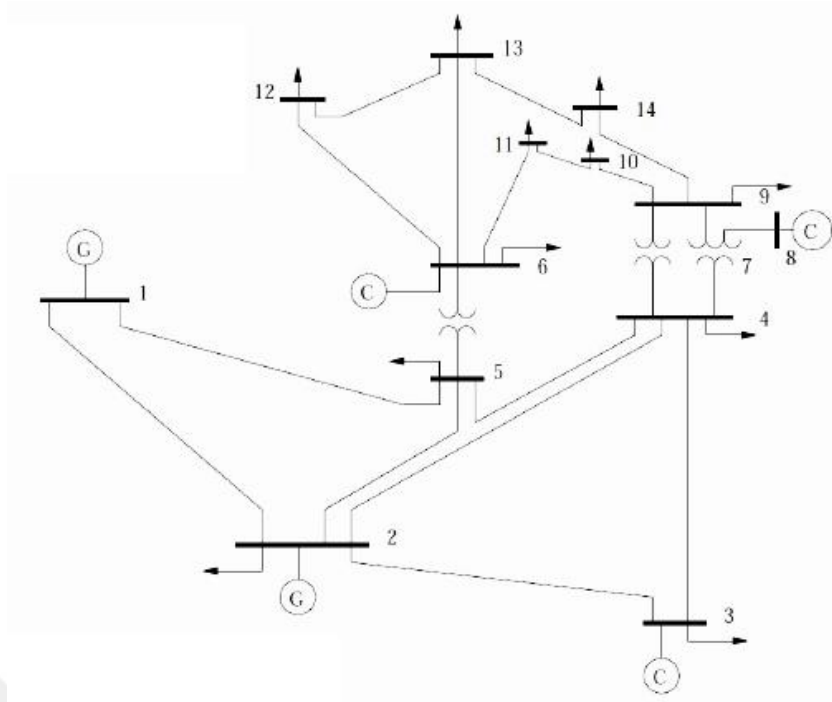
3.1.1. Analizde tercih edilen test sistemleri ve sistem profillerinin tanıtılması

Akıllı şebekeler, küçük ölçekli enerji üretiminden büyük güçlü enerji sistemlerine kadar çok büyük bir alanı kapsayan enerji rezervlerinin dağıtım şebekesine bağlanmasına imkân sağlamaktadır (Turan, 2014). Ayrıca YEK, EDS gibi sistemlerin de entegresine uyumlu olan akıllı şebekeler günümüzde enerji sektöründe büyük öneme sahiptir. Akıllı şebekelerin dağıtık üretimle ve enerji depolama sistemleriyle olan etkileşimini incelemek açısından gerçeğe yakın test sistemleri oluşturulup bu sistemler üzerinden simülasyonlar gerçekleştirilmelidir.

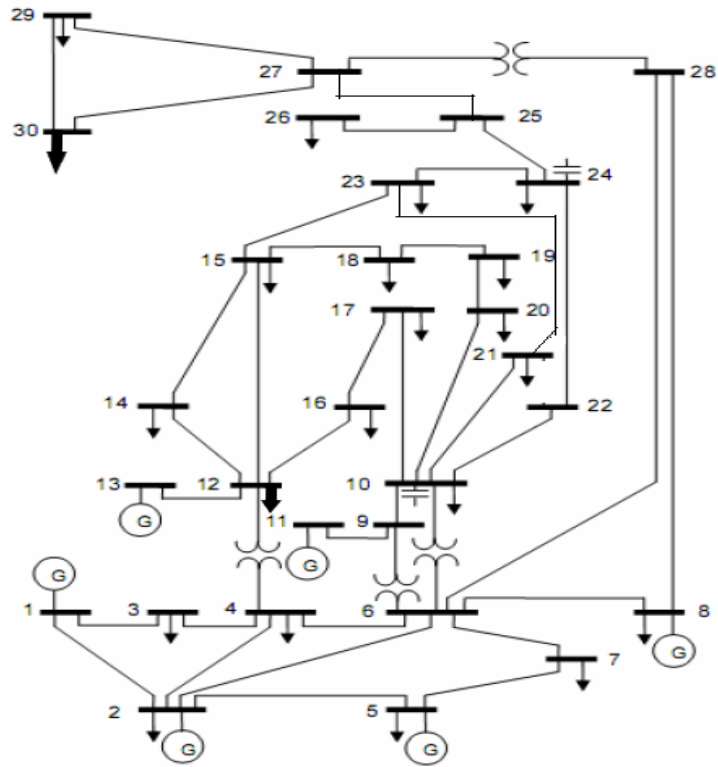
Bu tez çalışmasında enerji depolama sistemlerinin güç sistemi kararlılığını nasıl etkilediğini incelemek için bazı senaryolar üzerinden test sistemleri oluşturulmuştur. Test sistemleri için IEEE' nin 14 ve 30 baralı güç sistemleri kullanılmıştır. Simülasyonlar Matlab programı üzerinden gerçekleştirilmiş olup programın yazılımı için Hadi Saadat' ın kararlılık analizi için temel olarak görüldüğü yazılım üzerine enerji depolama sistemleri uyarlanarak geliştirilmiştir.

Bu sistemlerin merkezi formda üretimlerini gösteren mevcut durumlarına ilişkin temel bilgiler aşağıdaki gibidir:(Kaygusuz, 2020)

- 14 baralı güç sistemi: 15 iletim hattı, 3 transformatör, 5 makine ve 11 yükten meydana gelen 14 baralı güç sistemine ilişkin mevcut durum Şekil 3.1 (a)'de gösterilmiştir.
- 30 baralı güç sistemi: 37 iletim hattı, 4 transformatör, 6 makine ve 21 yükten meydana gelen 30 baralı güç sistemine ilişkin mevcut durum Şekil 3.1 (b)'de gösterilmiştir.



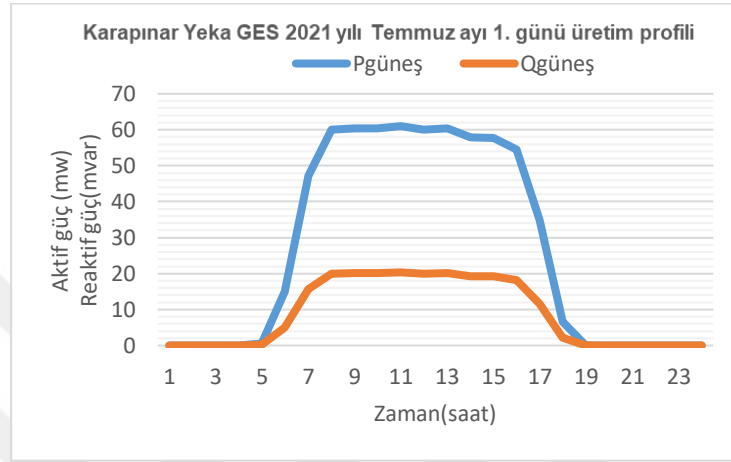
(a)



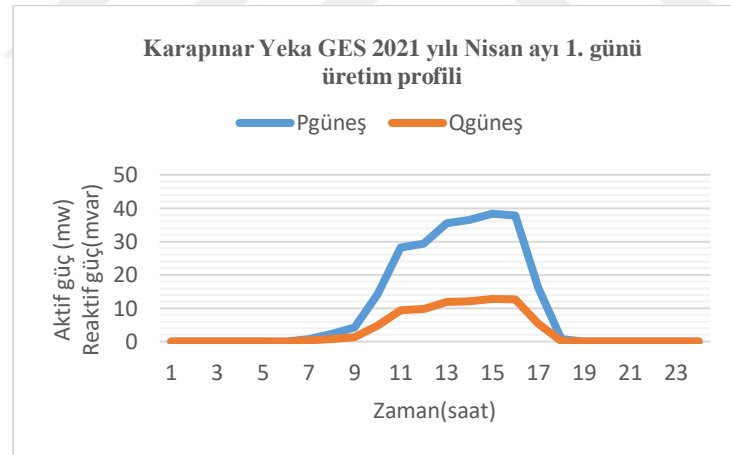
(b)

Şekil 3.1: (a) IEEE 14 baralı sistem, (b) IEEE 30 baralı sistem

Enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı güç sistemlerindeki etkisini inceleyebilmek için Şekil 3.1’ de verilen mevcut güç sistemleri güneş, rüzgar ve değişken yük birimleri kullanılarak tekrardan modellenmiştir. Güneş ve rüzgâr enerjisinin 24 saatlik üretim değerleri EPIAŞ’ ın şeffaflık platformundaki gerçek zamanlı üretim değerlerinden faydalanılarak oluşturulmuştur.

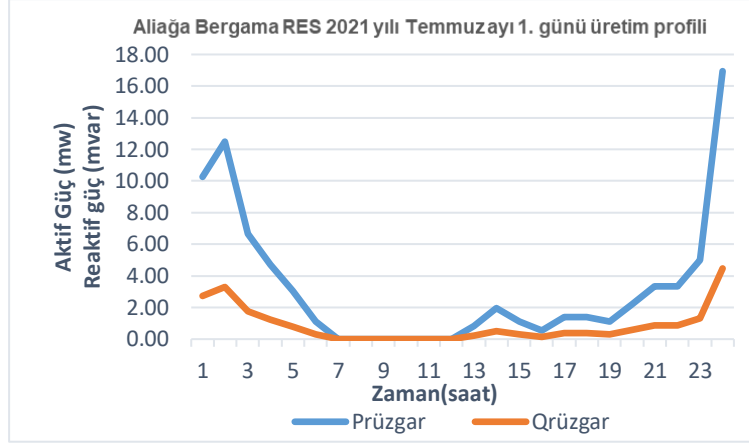


(a)

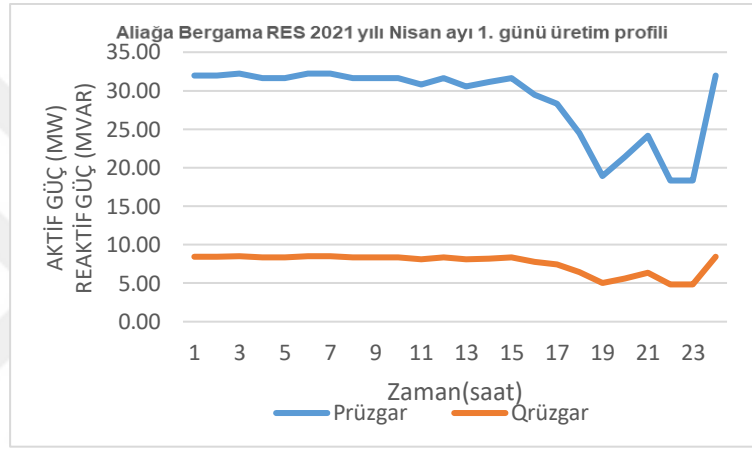


(b)

Şekil 3.2: (a) 14 baralı test sisteminin güneş 24 saatlik üretim profili (b) 30 baralı test sisteminin güneş 24 saatlik üretim profili

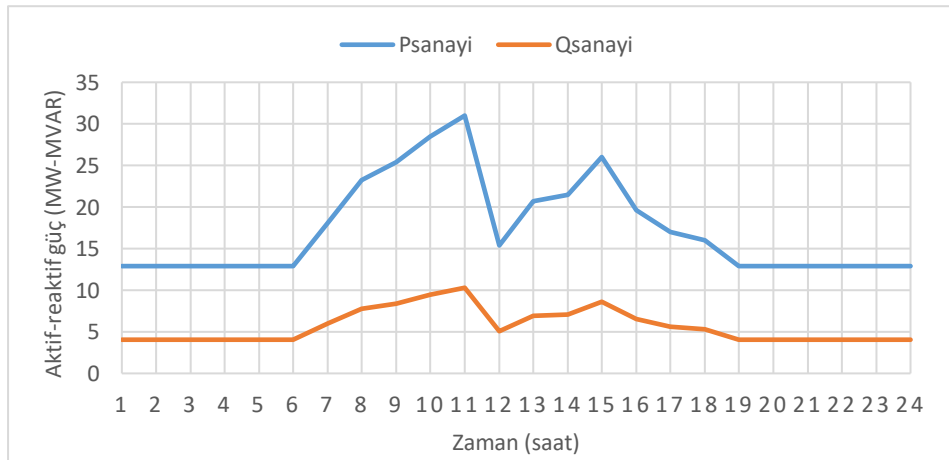


(a)

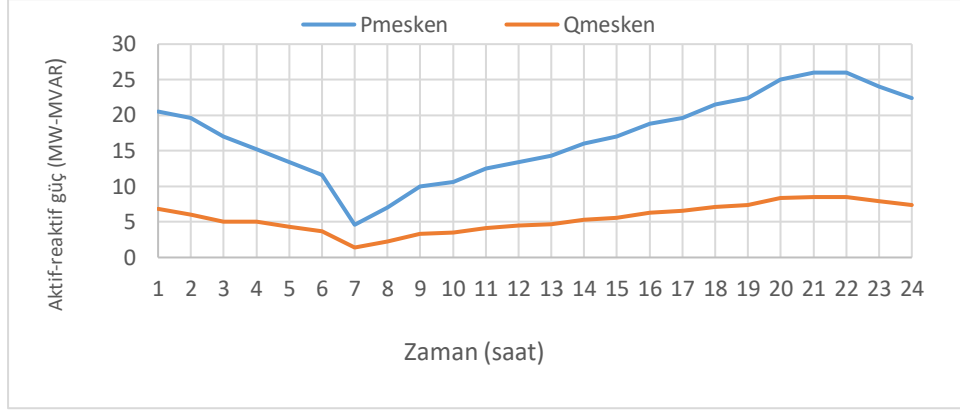


(b)

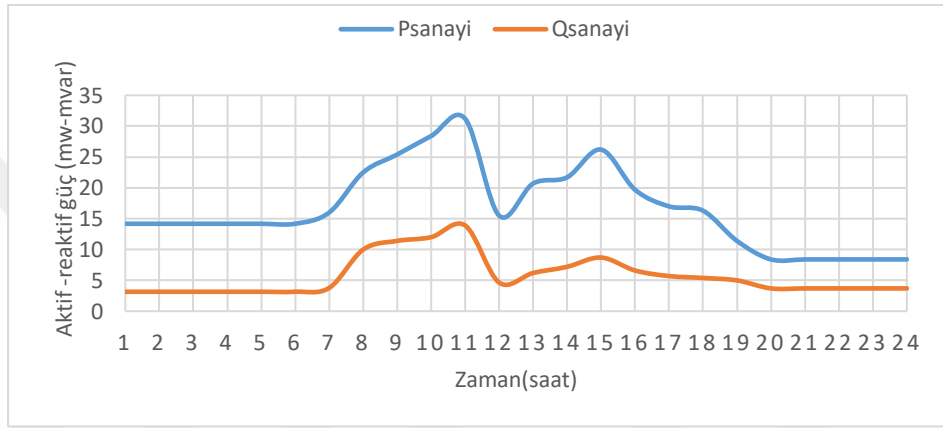
Şekil 3.3: (a) 14 baralı test sisteminin rüzgar üretim birimine ait 24 saatlik üretim profili, (b) 30 baralı test sisteminin rüzgar üretim birimine ait 24 saatlik üretim profili



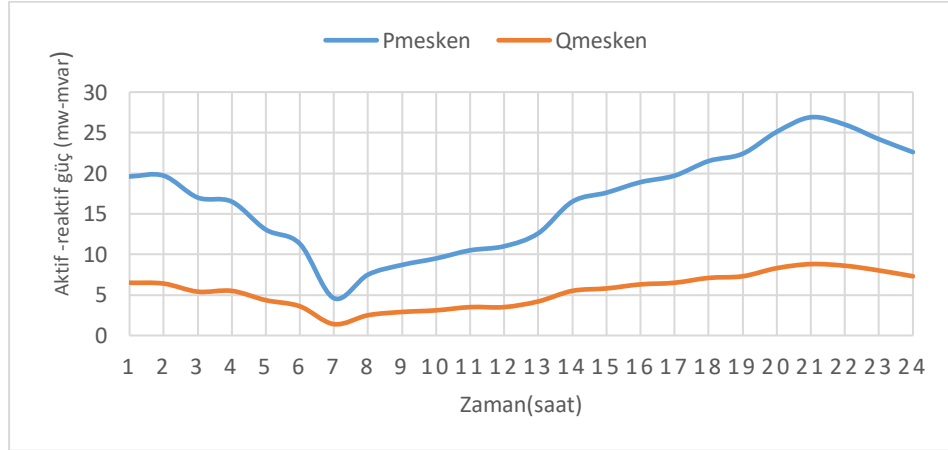
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.4: (a) 14 baralı güç sisteminin sanayi tipi yük tüketim grafiği (b) 14 baralı güç sistemi mesken tipi yük tüketim grafiği (c) 30 baralı güç sisteminin sanayi tipi yük tüketim grafiği (d) 30 baralı güç sisteminin mesken tipi yük tüketim grafiği

Yükler sanayi tipi ve mesken tipi olarak düşünülmüştür. Sanayi tipi yükler sanayi bölgelerindeki tüketimi ifade etmektedir ve P_{sanayi}/Q_{sanayi} şeklinde ifade edilmektedir. Mesken tipi yükler ise yerleşim yerlerindeki tüketimi ifade etmektedir ve P_{mesken}/Q_{mesken} şeklinde ifade edilmektedir.

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Sistem kararlılık analizi

Çalışmada kullanılan IEEE güç sistemleri çok makinalı sistemlerdir. Çok makinalı sistemlerin nonlinear denklemlerinin çözümünde Newton-Raphson yük akış metodu kullanılmıştır. n baralı bir şebekede yük baralarına ilişkin reaktif ve aktif güç değerleri denklem (3.1) ve denklem (3.2)' de belirtildiği gibidir (Yeşilbudak vd., 2017).

Analiz aşağıdaki formüller kullanılarak yapılır.

$$P_i (\text{Aktif Güç}) = |V_i| \sum |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), n k=1 i = 1,2, \dots, n \quad (3.1)$$

$$Q_i (\text{Reaktif Güç}) = -|V_i| \sum |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i), n k=1 i = 1,2, \dots, n \quad (3.2)$$

Reaktif ve aktif güç ifadelerinde ilk değer civarında Taylor serisi açılımı uygulanarak denklem (3.3)' deki lineer denklem sistemi kümesine dönüştürülür (Tuttokmağ, 2019):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \hline \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2|^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Jakobyen matrisinin her bir alt matrisinin aralıklı yapısı düğüm admitans matrisi ile benzerdir. Denklem (3.4) meydana gelirken tüm baraların PQ yük barası olduğu farz edilir.

Bir PV (üretim) barası için yalnızca güç bellidir ve gerilimin genliği sabittir. Yani her bir üretim barasında ΔQ ve ΔV 'ye karşılık gelen ifadeler gerek kalmaz. Bu amaçla, Jakobyenin her bir üretim barası için yalnızca bir satır ve bir sütunu vardır. Kısmi PV ve QV eğrileri, güç akışı programlarını aracılığıyla basitçe analiz edilir. Böylece, jeneratörlerin reaktif güç çıkışları, jeneratör terminal gerilimleri belli limitler dahilinde olduğu müddetçe nominal ölçülerde muhafazası sağlanırken yük merkezinde bulunan baraların talepleri sabit bir güç faktöründe artırılır. Şayet bir jeneratörün reaktif güç sınırı geçirilirse ilgili jeneratör barası başka bir yük barası olarak kabul edilir (Yıldırım, 2017).

Güç sistemlerinden en iyi verimi elde edebilmek adına kararlılık analizlerinin doğru yapılması çok önemlidir. Güç sistemine entegre edilen enerji depolama sistemlerinin güç sistem kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda tasarlanan depolama sistemi belirlenen saatlerde jeneratör veya yük gibi davranarak şarj ve deşarj durumunu gerçekleştirmektedir. Depolama sisteminin devreye girdiği saat dilimlerinde güç sistemi üzerindeki etkisini incelemek için sanal ortamda yapılan analizlerin doğru bir şekilde sonuçlanması gerçek güç sistemlerinin depolama sistemlerine vereceği tepkiyi anlamak için oldukça önemlidir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Enerji üretim konusu hayatımızda büyük bir öneme sahiptir. Enerjinin düzenli ve kararlı bir şekilde üretilmesi kavramı ise daha önemlidir. Günümüzde sürekli artmakta olan yenilenebilir kaynaklı dağıtık üretim sistemleri klasik şebekeleri gölgede bırakacaktır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim profili sürekli enerji talebindeki artışa karşılık yetersiz kalacaktır. Özellikle güneş ve rüzgâr kaynaklarının üretim yaptığı esnada talep fazlası üretimin depolanıp ihtiyaç halinde sisteme geri verilmesini sağlayan enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynaklarıyla takım halinde çalışmasının faydalı olacağı ve giderek sayılarının artacağı öngörülmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada gerçek zamanlı üretim değerleri ve varsayımsal olarak oluşturulan yük değerleri kullanılarak oluşturulan test sistemleri üzerinden tasarlanan EDS'nin güç sistem kararlılığında oluşturabileceği durumlar incelenmiştir. EDS tasarımı yapılırken güneş ve rüzgâr üretim profilleri esas alınmıştır. İki kaynağın aynı anda üretimde olduğu saat dilimlerinde sisteme yeterli enerji üretildiği düşünülerek EDS'nin sistem üzerinden şarj olması sağlanmıştır. Enerji talebinin yüksek olduğu ve üretimin az olduğu saat dilimlerinde depolanan EDS'nin sistem üzerinden deşarj olması sağlanarak tasarım yapılmıştır.

Tezin bu bölümünde EDS'nin sistem kararlılığı üzerindeki etkisini incelemek için sırasıyla aşağıdaki simülasyon aşamaları izlenmiştir.

1.Aşama: Gerçek zamanlı üretim değerleri, varsayımsal yük değerleri kullanılarak ve tasarlanan EDS sistemi ile birlikte test sistemi oluşturulmuştur.

2.Aşama: Matlab programı aracılığıyla test sistemleri üzerinden yük akış analizi yapılarak 24 saatlik gerilim kararlılığı grafikleri elde edilmiştir.

3.Aşama: Sistemde oluşabilecek 3 faz arızası geçici durum kabul edilerek bu durum üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda;

a) rotor açısı kararlılığı

b) frekans kararlılığı

grafikleri elde edilmiştir.

4.Aşama: 3.aşamada yapılan işlemler bir günün her saati için uygulanmıştır.

Bu işlemler 4 test sistemine uygulanarak sonuçlar aşağıda gösterilmiştir.

4.1. 14 Baralı Sistemde Enerji Depolama Sistemi Çalışması

IEEE 14 baralı sistem; 3 trafo, 5 makine, 15 iletim hattı ve 11 yükten oluşmaktadır. Sistem Şekil 3.1 (a)'de gösterilmektedir. Test sistemleri oluşturulurken şekil 3.2 (a), şekil 3.3 (a) ve şekil 3.4 (a), (b) değerleri kullanılmıştır. Dağıtık üretim birimi ve EDS entegrasyonu yapılırken sistemin yük yoğunluk haritasına bakılmıştır. Bunun sonucunda 2. bara %73, 4. bara %63 yoğunluğa sahipken bunları 5. bara takip etmektedir. Sistemde kullanılan EDS 150 MW gücündedir ve 3 saatte dolup- boşalacak şekilde tasarlanmıştır. Şarj ve deşarj saatlerinin seçimi yapılırken rüzgâr ve güneş üretim profillerinde ortak üretimlerinin yoğun olduğu saat dilimleri şarj zamanı, ortak üretimlerinin en az olduğu saat dilimleri deşarj zamanı olarak belirlenmiştir.

Mevcut sistem analiz edildikten sonra; depolama entegre edilen sistemler, yenilenebilir kaynaklar(rüzgar, güneş) ile birlikte depolama sistemleri entegre edilen sistemler ve bunlara ek yük de entegre edilen sistemler analiz edilerek yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinde enerji depolama sisteminin güç sistem kararlılığı üzerindeki etkisini analiz etmek amaçlanmıştır. Enerji depolama sistemlerinin rotor açısı kararlılığına etkisini gözlemleyebilmek adına atalet sabiti (H) rüzgar için 2.4 ve güneş için 0.3 değerinde kabul edilmiştir.

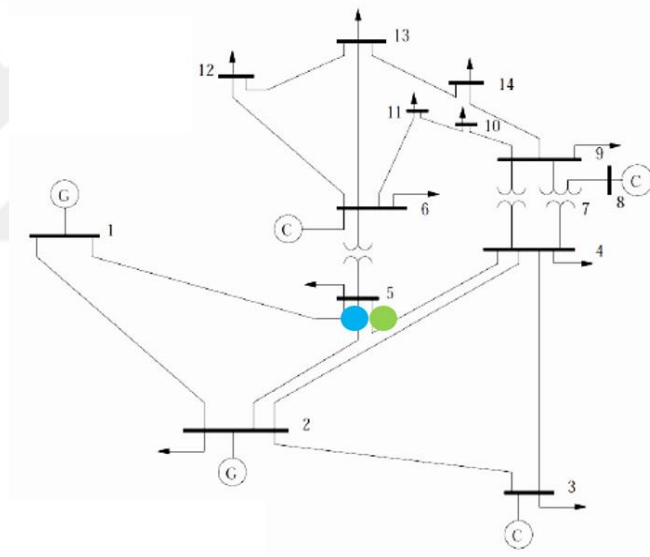
Analizde 5-6 hattı arasında 5. baraya yakın bir arıza oluşturulmuştur. Şekil 3.1 (a) incelendiğinde arızanın 5 ve 6. bara arasındaki trafonun çalışmasını olumsuz etkileyeceğini ve bu baralara entegre edilecek DÜB, EDS'lerin çalışmasının etkileneceği hatta devre dışı kalabileceği göz önüne alınması gerekmektedir. Bir diğer arıza ise 13-14 hattı arasında 14. baraya yakın bir 3 faz arızası oluşturulmuştur. Bu arıza jenaratör ve trafoları uzak bir noktada oluşturulmuş bir arızadır. Kararlılık analizleri yapabilmek açısından oluşturulan test sistemleri Çizelge 4.1' de gösterilmiştir. Çizelgede bara kodu sütununda gösterilen 0 kodu baranın yük barası olduğu, 1 kodu referans (slack) bara olduğu, 2 kodu gerilim kontrollü bara olan üretim barası olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca P_{eds} enerji depolama sisteminin sağladığı gücü, $P_{rüzgâr}-P_{güneş}$ sırasıyla rüzgâr ve güneş üretim birimlerinin sağladığı gücü, PQ_{sanayi} sanayi tipi yükü ve PQ_{mesken} mesken tipi yükü temsil etmektedir.

Test sistemi şekillerinde IEEE 14 baralı sistem üzerinde görülen yeşil renkli daireler enerji depolama sistemini, sarı renkli daireler güneş enerji santralini, mavi renkli daireler rüzgâr üretim santralini, bordo renkli ok sanayi tipi yükü, mor renkli ok mesken tipi yükü temsil etmektedir. Analizler için IEEE 14 baralı sistem ve Şekil 4.1' de gösterilen Test

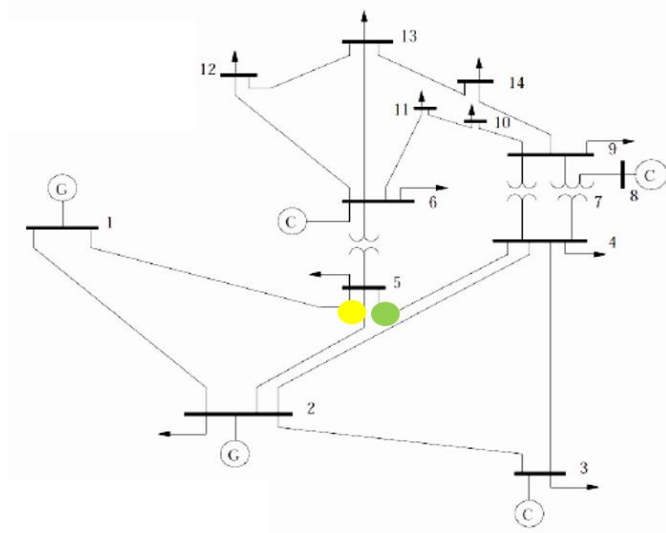
sistemleri kullanılmıştır. Yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinin EDS'ler ile kullanımının çok makineli sistemlerde güç sistem kararlılığı üzerine etkilerinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

Tablo 4.1: 14 baralı güç sistemine yapılan modifikasyonlar

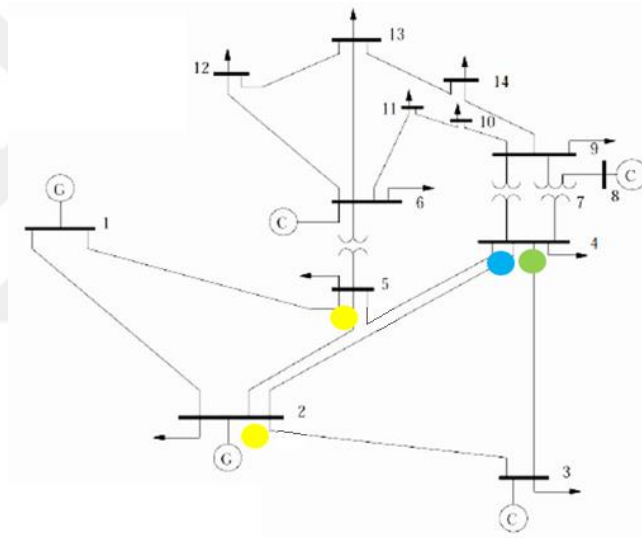
Bara Numarası	Bara Kodu	Test Sistemi 1	Test Sistemi 2	Test Sistemi 3	Test Sistemi 4
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2+P _{güneş}	2+P _{güneş} +PQ _{mesken}
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0+P _{rüzgar} +P _{eds}	0+P _{güneş} +P _{eds} +PQ _{sanayi}
5	0	0+P _{rüzgar} +P _{eds}	0+P _{güneş} +P _{eds}	0+P _{güneş}	0+P _{güneş} +PQ _{mesken}
7	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0



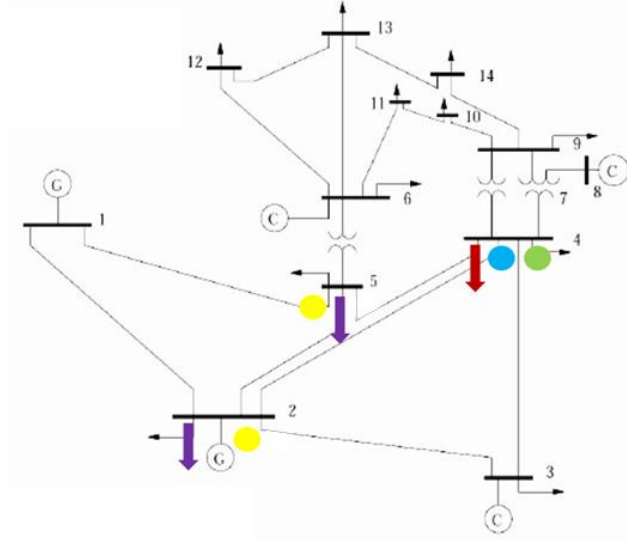
(a)



(b)



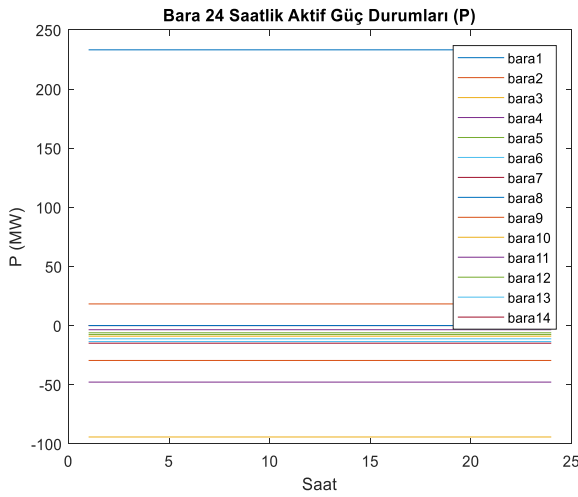
(c)



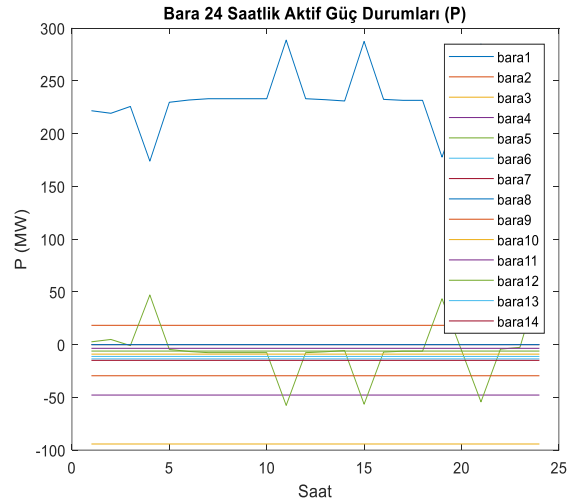
(d)

Şekil 4.1: (a) Test sistemi 1, (b) Test sistemi 2, (c) Test sistemi 3, (d) Test Sistemi 4

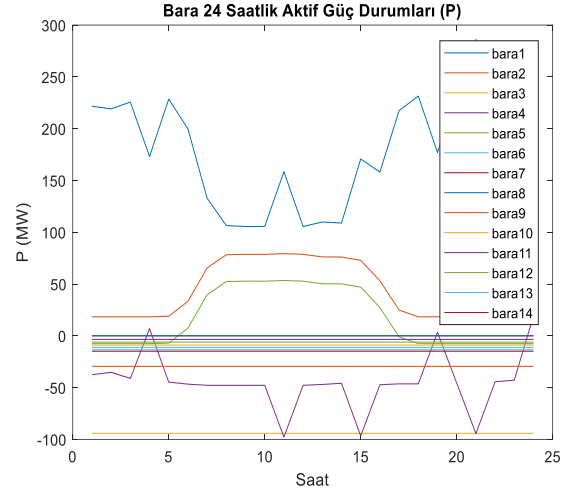
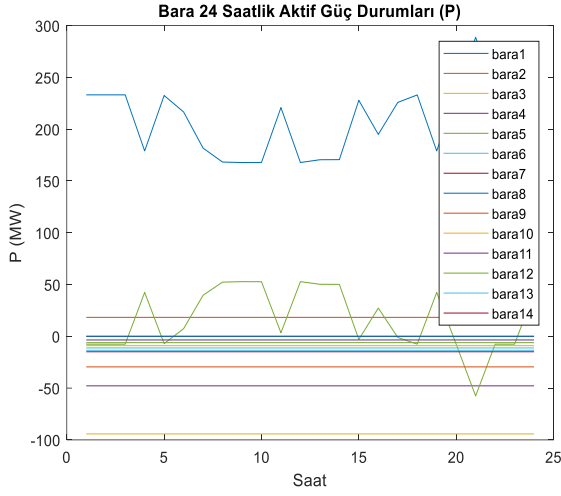
Simülasyonun 2. aşaması uygulanarak Aktif güç değerleri Şekil 4.2’de, 24 saatlik gerilim değerleri Şekil 4.3’de ve 24 saatlik gerilim seviyelerinin per unit değerinde blok gösterimi Şekil 4.4’da gösterilmiştir.



(a)

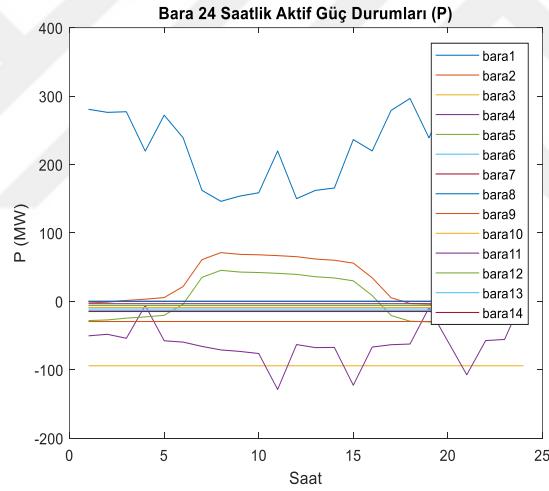


(b)



(c)

(d)

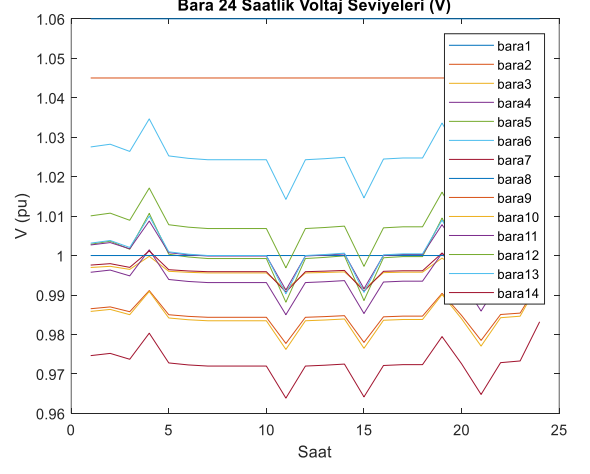
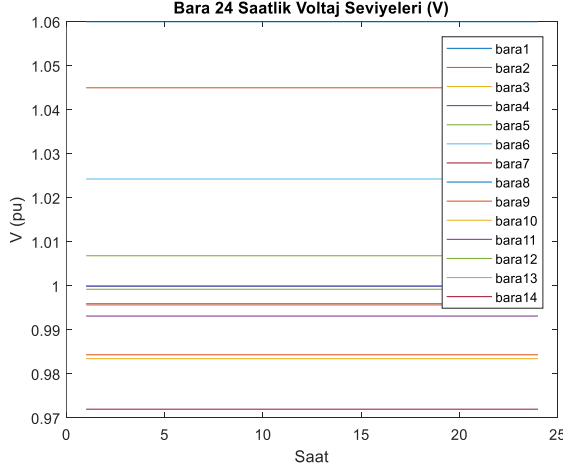


(e)

Şekil 4.2: (a) 14 baralı sistem mevcut durum, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin, (d) Test sistemi 3'ün, (e) Test sistemi 4'ün 24 saatlik Aktif Güç grafikleri

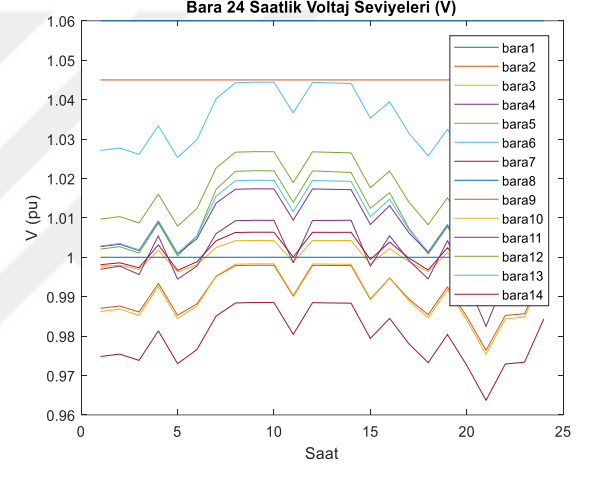
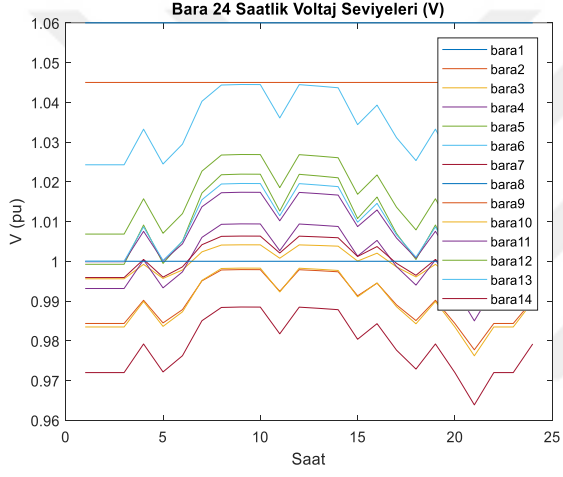
Grafiklerde görülen 0'ın altındaki değerlere sahip baralar tüketim barasını, 0'ın üzerindeki değerler üretim barasını, 0 değeri ise baranın geçiş barası olduğunu göstermektedir. Şekil 4.2'de; mevcut durum incelendiğinde aktif güç değerlerinin sabit olduğu görülmektedir. Test sistemi 1'i temsil eden (b) şekli incelendiğinde; rüzgar üretim biriminin ve EDS entegrasyonun 1. bara(grafikte mavi ile gösterilen) olan referans barayı ve

entegre yapılan 5. barayı(grafikte yeşil ile gösterilen) etkilediği görülmektedir. Grafiğe bakıldığında 5. bara üzerinde depolama sisteminin sisteme yük sağladığı deşarj saatleri olan 4, 19 ve 24. saat dilimlerinde gücün mevcut duruma göre yükseldiği, 11, 15 ve 21. saat dilimlerinde sistem üzerinden depolandığı şarj durumundan ötürü güç değerinde olan azalma 5. ve 1. bara üzerinden açıkça görülmektedir. Şekil 3.3 (a) incelendiğinde; rüzgar üretim biriminin 24 saatte toplam sağladığı 77,5 MW'lık gücün EDS'nin deşarj saatlerinde sağladığı toplam 150 MW'lık güç bir arada düşünülürse sistemin mevcut duruma göre iyileşmesi olası bir durumdur. Test sistemi 2'nin grafiği incelendiğinde; entegre edilen güneş üretim biriminin etkin olduğu 6-18 saat dilimlerinde sağladığı gücün ve EDS' nin 5. bara üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere depolama sisteminin sistemden güç çektiği 21. saat dilimi hariç şarj olduğu saatlerde dahi gücün kısmen mevcut durumla aynı olduğu yani kötü olmadığı görülmektedir. Şekil 3.2 (a) incelendiğinde güneş üretim biriminin 24 saatte toplamda 636 MW sağladığı ayrıca EDS'den gelen 150 MW göz önüne alındığında mevcut duruma göre ve Test sistemi 1' e göre daha iyi bir durumun oluşması doğal bir durumdur. Şeklin (d) öncülü yani Test sistemi 3 incelendiğinde entegre edilen güneş üretim biriminin etkisi 5. bara(grafikte yeşil ile gösterilen) ve 2. bara(grafikte turuncu ile gösterilen) üzerinde görülmektedir. 4. bara(grafikte mor ile gösterilen) üzerinde ise rüzgâr üretim birimi ile EDS'nin etkisi görülmektedir. Depolama sisteminin sisteme güç verdiği saat dilimleri mevcut durumla karşılaştırıldığında güç değerleri daha yüksektir, sistemden güç çektiği saat dilimlerinde ise mevcut duruma göre daha düşük güç değerlerinde olduğu açıkça görülmektedir. Şekil (e)' ye bakıldığında güneş üretim birimlerinin varlığı 2. bara(grafikte turuncu ile gösterilen) ve 5. bara(grafikte yeşil ile gösterilen)da görülmektedir ancak şekil (d) ile karşılaştırıldığında bu baralara entegre edilen mesken tipi ve sanayi tipi yükler güç değerinde bir azalmaya neden olmuştur. Ayrıca depolama sisteminden kaynaklanan güç artışı da şekil (d)'ye göre daha azdır.



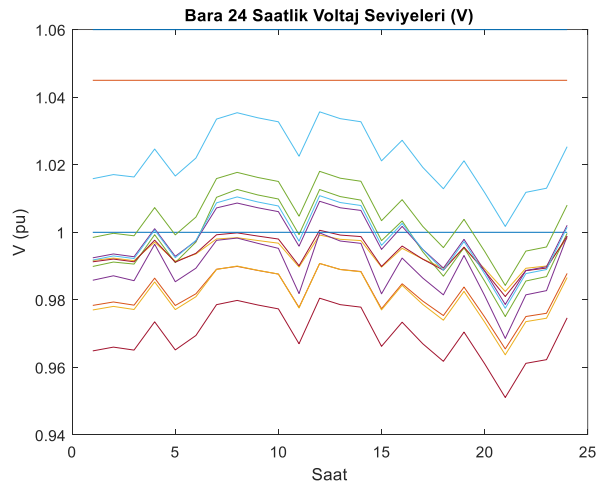
(a)

(b)



(c)

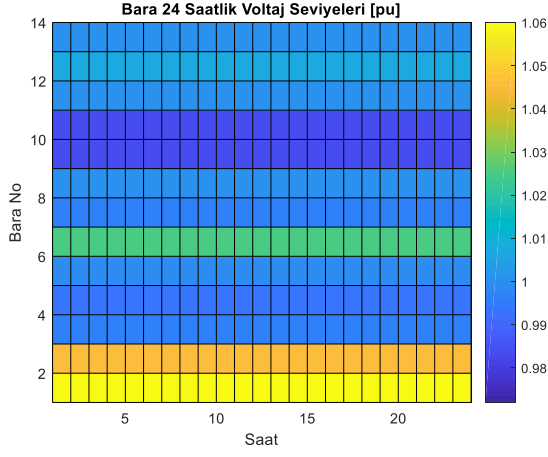
(d)



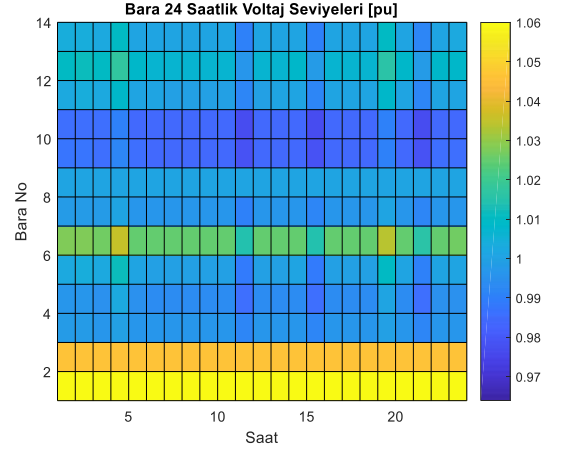
(e)

Şekil 4.3: (a) Mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin, (3b) Test sistemi 3'ün, (4b) Test sistemi 4'ün 24 saatlik gerilim seviyeleri grafikleri

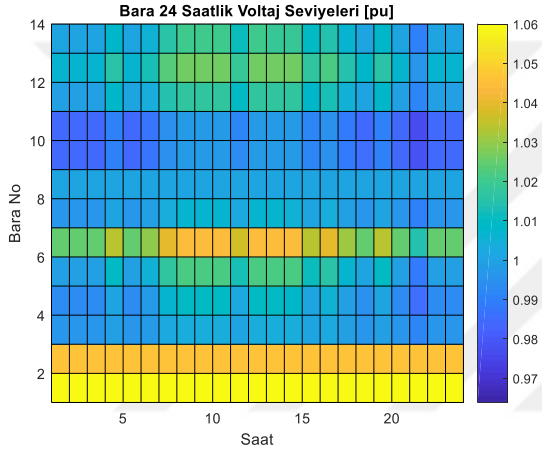
Şekil 4.3 incelendiğinde; mevcut durumun(a) gerilim değerlerinin sabit olduğu, test sistemi 1(b)'e bakıldığında entegre edilen rüzgar üretim biriminin yanında enerji depolama biriminin etkileri yani depolama sisteminin şarj-deşarj saatleri hemen her baranın üzerinde açıkça görülmektedir. Depolama sisteminin sisteme güç verdiği 4, 19 ve 24. saat dilimlerine bakıldığında mevcut duruma göre güç değerlerinde bir yükselme görülmekte olup sistemden güç çektiği saatlerde(11, 15, 21) ise güç değerlerinde mevcut duruma göre bir azalma görülmektedir. Test sistemi 2(c)'ye bakıldığında ise güneş üretim biriminin etkin olduğu saatler şekil (a)'ya kıyaslandığında net bir biçimde görülmektedir. Depolama sisteminin güneş üretim birimiyle varlığı sistemden 21. saat dilimi hariç yük çekilen saat dilimlerinde bile mevcut durumdan daha iyi gerilim seviyelerine sahiptir. Bunun nedeni depolama sisteminin güç çekmesi, rüzgâr üretim biriminin sağladığı gücün yetersiz oluşu ve güneş üretim biriminin bu saat diliminde etkin olmayışıdır. Test sistemi 3(d)'e bakıldığında özellikle 1-3 saat dilimlerinde rüzgâr üretim biriminin varlığı şekil (c)'ye kıyaslandığında açıkça görülmektedir ek olarak güneş üretim biriminin varlığı da etkin olduğu saat dilimlerinde görülmektedir. Bunun dışında 19. saat diliminde grafik üzerinde net bir biçimde görülmesi de test sistemi 2'ye göre bir yükselme söz konusudur. Ancak 11. saat diliminde(şarj) 4. baradaki gerilim seviyesi diğer baralara nazaran daha da düşmüştür. Bunun nedeni EDS'nin bu baraya bağlı oluşudur. Ayrıca 21. saat diliminde olan durum şekil (c)'deki değerden daha fazla olmakla birlikte nedeni de aynıdır. Son olarak Test sistemi 4(e) incelendiğinde diğer tüm sistemlerden kısmen gerilim seviyesi en düşük olan sistemdir. Sisteme yük verilen saat dilimlerinde bir gerilim artışı görülse de diğer sistemlerdeki artıştan düşüktür. Özellikle 11. ve 21. saat dilimlerinde özellikle depolama sisteminin bağlı olduğu 4. bara(grafikte mor ile gösterilen) üzerindeki düşüş diğer tüm sistemlerden daha fazladır. Depolama sisteminin sistemden yük çekmesinin dışında Şekil 3.4 (a)-(b) incelendiğinde mesken tipi yükün maksimum değerinin 21. saat dilimi olduğu ve sanayi tipi yükün maksimum değerinin 11. saat diliminde olduğu görülmektedir. Bundan dolayı bu saat dilimlerinde özellikle bir düşüş yaşanmaktadır. 11. saat diliminde güneşin de etkin olduğunu düşünürsek bu saat dilimindeki düşüş 21. saat dilimine göre daha azdır.



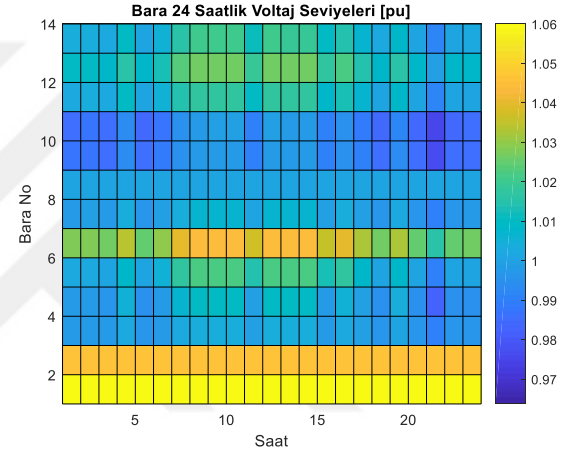
(a)



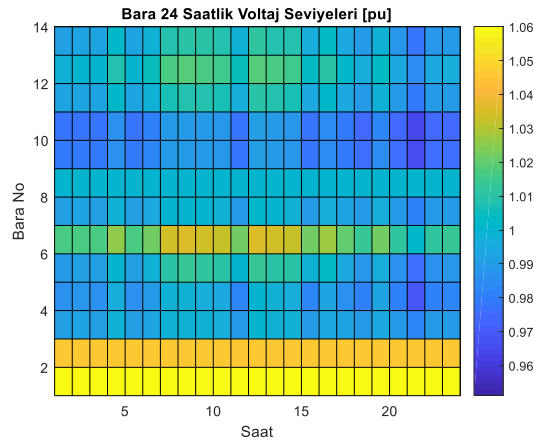
(b)



(c)



(d)



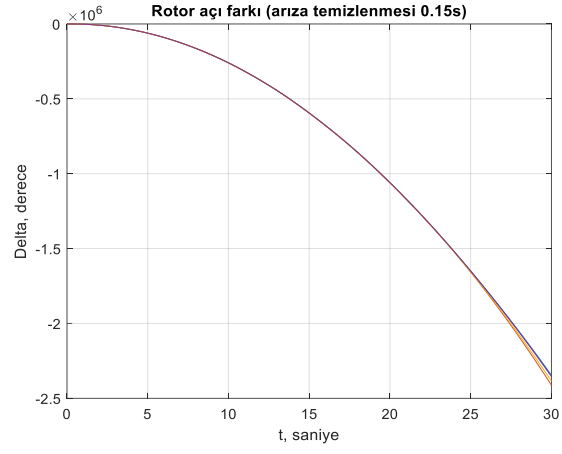
(e)

Şekil 4.4: (a) Mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in (c) Test sistemi 2'in, (c) Test sistemi 3'nin, (d) Test sistemi 3'ün, (e) Test sistemi 4'ün 24 saatlik Voltaj seviyelerinin per unit gösterimi

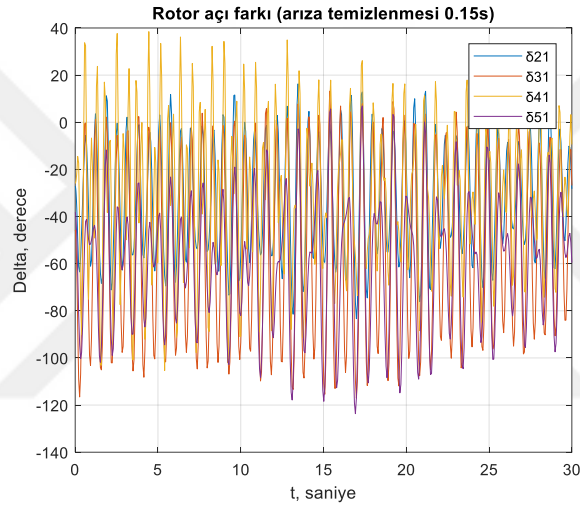
Şekil 4.4’de Test sistemlerinin voltaj seviyelerinin blok gösterimi görülmektedir. Mevcut duruma bakıldığında tüm saat dilimlerinde renk göstergesinde bir farklılık olmadığı görülmektedir. Tüm test sistemlerine bakıldığında enerji depolama sistemlerinin şarj olduğu saat dilimleri(11, 15, 21) ve deşarj olduğu saat dilimleri(4, 19, 24) diyagramlar üzerinde görülmektedir. Test sistemi 2, Test sistemi 3 ve Test sistemi 4’de ayrıca güneş üretim birimlerinin varlığı da güneşin etkin olduğu saat dilimlerinde açıkça görülmektedir. Test sistemi 3 ile Test sistemi 2’ye bakıldığında aynı değerlere sahip gibi görünse de depolama sisteminin şarj olduğu saat dilimlerine ve sistemin geneline bakıldığında Test sistemi 2’ den fazla 1 güneş üretim birimi, 1 rüzgâr üretim biriminin varlığından kaynaklı Test sistemi 3’ün daha avantajlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak tüm sistemlerin genel olarak mevcut durumdan avantajlı olduğu görülmektedir.

Dağıtık üretim birimleriyle birlikte enerji depolama sistemlerinin pozitif varlığı gerilim kararlılığı açısından bakıldığında olumlu sonuçlar oluşturmuş ancak referans bara (1 nolu bara) nominal değerini (1.05) üzerinde seyretmiştir. Bu da güç sisteminde problem teşkil etmektedir.

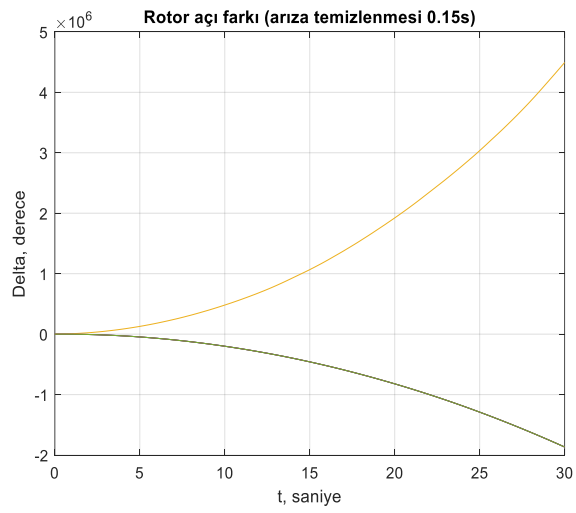
Rotor açısı kararlılığını görmek için simülasyonun 3a aşaması gerçekleştirilmiştir. Arıza durumu olarak 5-6 hattı arasında 5 numaralı baraya yakın trafo arızası oluşturulmuştur. Arızanın konumuna ve yakın olduğu baraya bakıldığında DÜB, EDS ve yüklerin bağlı olduğu bir baradır. Bu noktaya yakın bir arızanın entegre edilen üretim birimlerinin çalışmalarının aksaması dahası devre dışı kalması anlamına gelmektedir. Bu bilgiler ışığında yapılan analiz 4. saat diliminde gerçekleştirilmiştir. Arızanın temizlenme süresi 0.20 s olacak biçimde analiz yapılmıştır. Simülasyon 30 saniye boyunca sürdürülmüştür. Analiz sonuçları aşağıda gösterilmiştir.



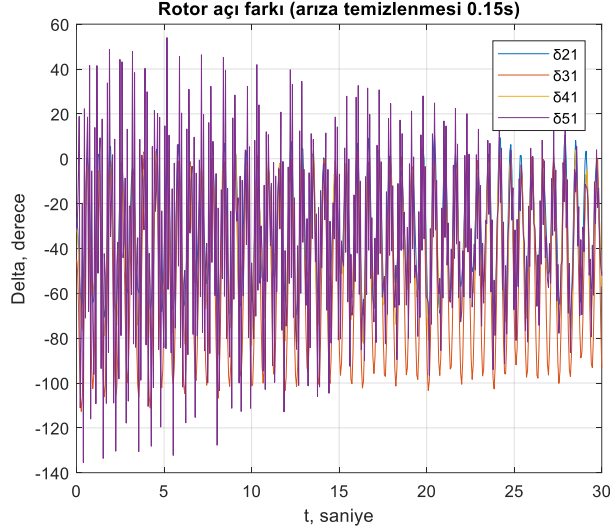
(a)



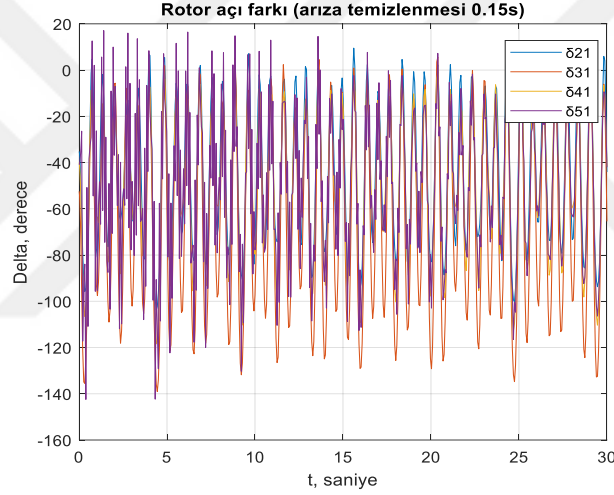
(b)



(c)



(d)



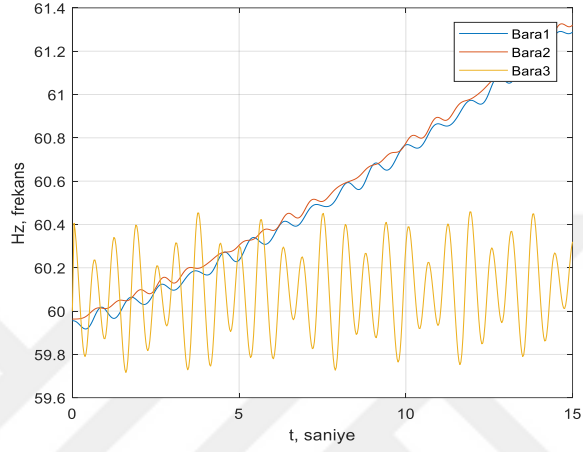
(e)

Şekil 4.5: (a) Mevcut sistemin, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin, (d) Test sistemi 3'ün ve (e) Test sistemi 4'ün 4. Saat dilimindeki 30 saniyelik rotor aç farkı grafikleri

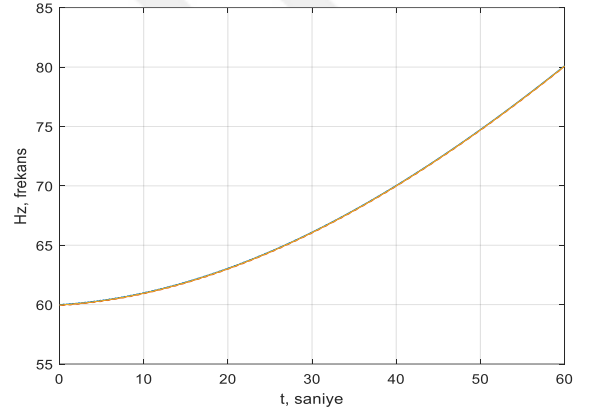
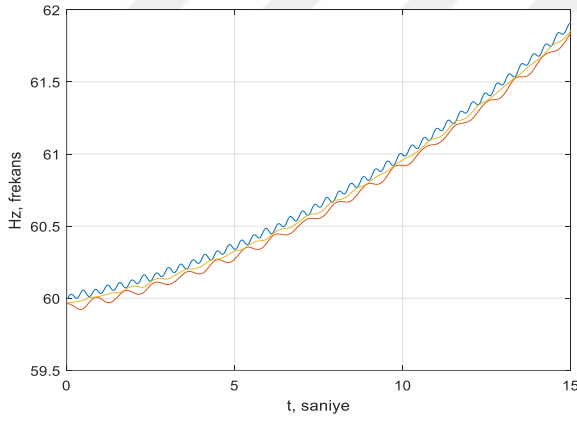
Şekil 4.5 incelendiğinde mevcut durum ve test sistemlerinin 5-6 hattında 5. Baraya yakın bir arıza varlığında 0.15. saniyedeki rotor aç farkı grafikleri görülmektedir. Test sistemi 2 ve mevcut durumda bu arıza bilgilerinde sistemler kararsızlığa gitmiştir. Test sistemi 1'e bakıldığında 6. baradaki jeneratörü temsil eden δ_{41} 'deki salınımlar daha büyük genliğe sahiptir. Rüzgâr üretim birimi 5. bara üzerindedir ancak 2. ve 6. barayla bağlantılı olduğu göz önüne alınırsa etkisi δ_{41} üzerinde görülmektedir. Test sistemi 3'e bakıldığında 8. baradaki jeneratörü temsil eden δ_{51} 'deki salınımların diğer jeneratörlere göre daha düzensiz

salınım yaptığı görülmektedir. Test sistemi 4' e bakıldığında jeneratör etkilenme durumu test sistemi 3 ile aynıdır. Ancak salınımların genlikleri sistem 3'e göre düşük ve salınımlar daha seyrektrir.

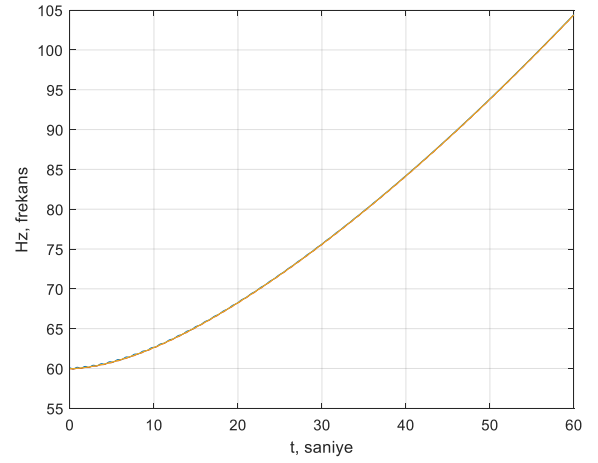
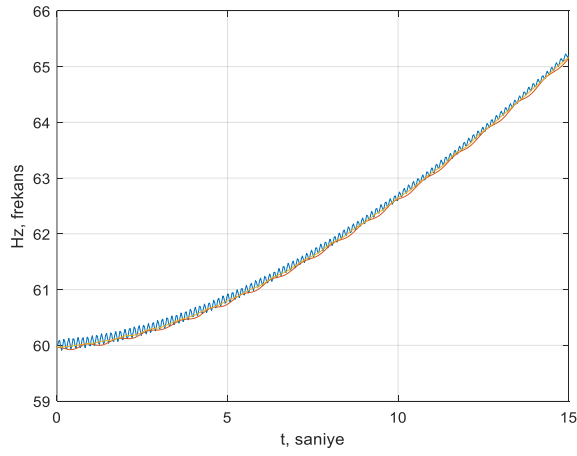
Simülasyonun 3b aşaması gerçekleştirilerek frekans kararlılığı analizi yapılmıştır. Analiz 15 saniye gerçekleştirilmiştir. Sistemin oluşturulan arızaya karşı verdiği tepki aşağıda gösterilmiştir.



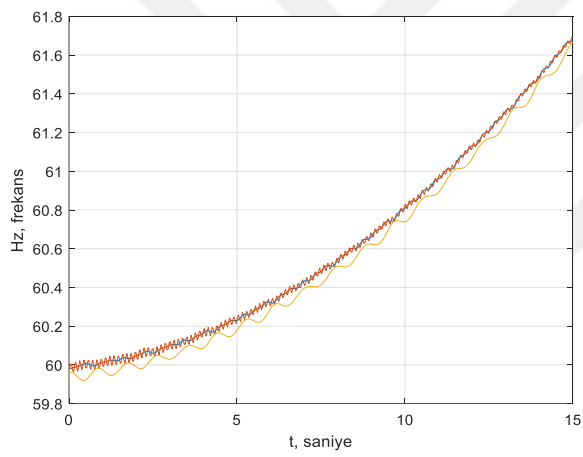
(a)



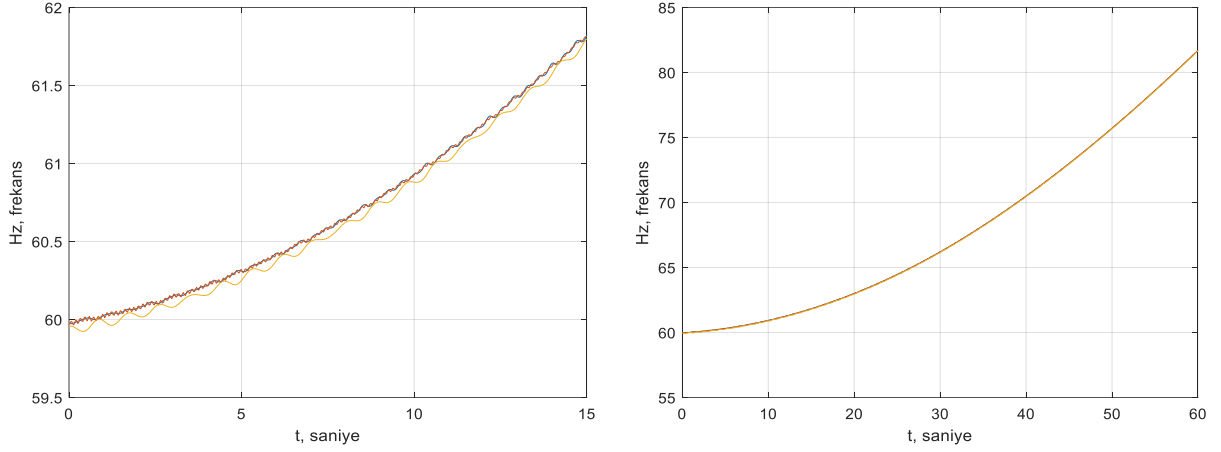
(b)



(c)



(d)



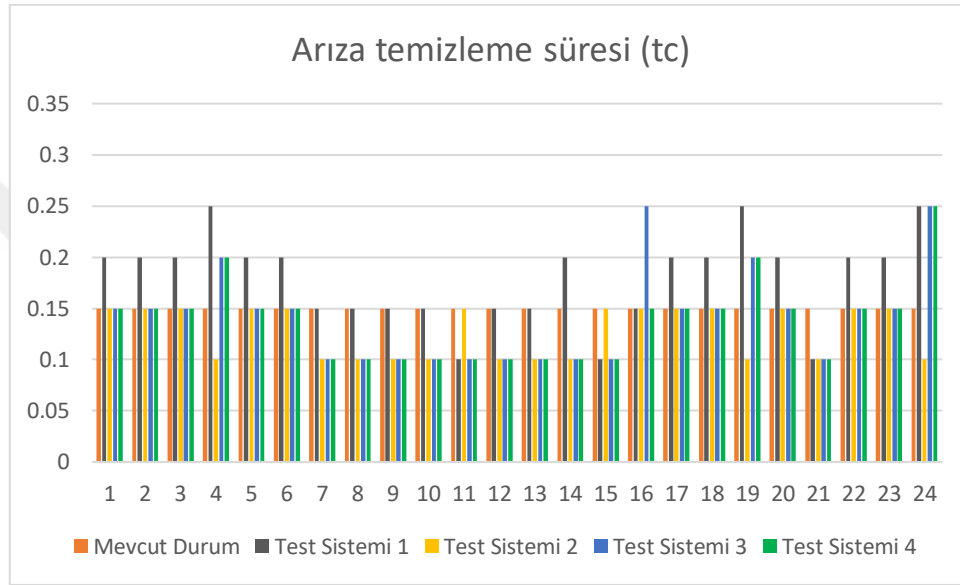
(e)

Şekil 4.6: (a) IEEE 14 baralı sistem mevcut sistemin, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin, (d) Test sistemi 4'ün 4. Saat dilimindeki 15 ve 60 saniyelik frekans kararlılığı grafikleri

Şekil 4.6 incelendiğinde sistemlerin aynı arıza koşullarında 4. saat diliminde 15 saniyelik frekans analizi görülmektedir. Frekans değerlerine göz atıldığında mevcut durumda (a) standart değerden (60 Hz) % 2.2, Test sistemi 1 (b) standart değerden % 3, Test sistemi 2 standart değerden % 8.5, Test sistemi 3 standart değerden % 2.75, Test sistemi 4 standart değerden % 2.91 uzaklaşmıştır. Sistemi frekans olarak kararsız saymamız için kararlılık üst sınırı 62.99 Hz değerini aşması gerekmektedir. Bu duruma göre Test sistemi 3 hariç diğer sistemler 15 saniye süresince frekans olarak kararlılık aralığındadır denilebilir. Şekillerden görüleceği üzere analizi 1 dakika devam ettirdiğimizde ise frekans değerleri yükselmekte ancak belli bir sınırdan kalmaktadır ve kararlılık üst sınırı olan 62.99 Hz değerini tüm sistemler aşmaktadır. Bu durumun genel nedeni arızanın enerji depolama birimi ve dağıtık üretim birimlerine çok yakın bir yerde olması ve sisteme eklenen yükler, EDS'nin sistemden temin ettiği güçtür diyebiliriz ancak sistemleri ayrı ayrı ele almak daha doğru olacaktır. Frekans sapma değeri en kötü durumda olan sistem 2. sistemdir. 2. sistemin en kötü değerlere sahip olmasındaki neden DÜB olarak sadece H sabiti sıfıra yakın olan güneş üretim birimi kullanılmasıdır. Yani H sabitinin düşük oluşundan kaynaklı sistem arıza anında dayanıklılığını koruyamamıştır. 3. sistemde ise güneş üretim birimi ile beraber H sabiti yüksek olan rüzgâr üretim biriminin kullanılmasıdır. Test sistemi 1'in en azından bu mantığa göre sistem 4'e göre rüzgâr üretim biriminden kaynaklı frekans olarak en iyi sistem olması beklenir ancak bu durum farklıdır. Çünkü sadece 1 rüzgâr üretim biriminin sisteme verdiği güç yetersiz kalmıştır.

Güç değerlerinde genellikle olumlu sonuçlar doğuran dağıtık üretim birimleriyle enerji depolamanın varlığı frekans ve rotor açısı bakımından kararsızdır. Yüklerin artması arıza noktasının yaklaşması ve daha ağır durumların oluşması halinde sistemin daha da negatif sonuçlar doğuracağı kaçınılmazdır.

Simülasyonun 4. aşaması uygulanarak tüm test sistemlerinin 5-6 hattı arasında 5. baraya yakın arıza karşısında temizleme süreleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.7: Test sistemlerinin her saat dilimi için arıza karşısında kararlı kalma süreleri

Şekil 4.7 incelendiğinde mevcut durumun 0.15 saniyeye kadar kararlı kaldığı ve bu durumun 24 saatte değişiklik göstermediği görülmektedir. Test sistemi 1 incelendiğinde depolama sisteminin sisteme güç verdiği saat dilimlerinde(4, 19, 24) sistemin arıza karşısında daha uzun süre kararlı kaldığı görülmektedir. Sistemden güç çekilen saat dilimlerinde(11, 15, 21) ise kararlı kalma süresi mevcut durumun kararlı kalma süresinden de düşüktür. Teorik olarak depolama sistemlerinin sisteme güç verdiği saat dilimlerinde sistemin arıza karşısında kararlı kalma süresinin mevcut durumdan daha uzun olması beklenir. Test sistemi 2' ye bakıldığında teoriden farklı bir durum söz konusudur. 4, 19 ve 24. saat dilimlerinde mevcut durumdan düşük tc(arıza temizleme süresi) süresine sahiptir. Bu durumun nedeni bu test sistemi 2' de dağıtık üretim birimi olarak güneş üretim birimi kullanılmasıdır. Sayılan saat dilimlerinde güneşin etkin olmadığı ve H sabitinin de sıfıra

yakın bir değerde olduğu düşünülürse sistem arıza karşısında yeterli sönümleme momenti üretememiştir denilebilir. Test sistemi 3'e bakıldığında deşarj saatlerinde kararlı kalma süresi mevcut duruma göre daha uzundur, şarj saatlerinde ise kararlı kalma süresi 0,1 değeriyle mevcut durumdan düşüktür. Test sistemi 4'de 24. saat diliminde 0.25 olan süre, 4. ve 19. saat dilimlerinde 0.2'ye düşmüştür ancak bu değer yine mevcut durumdan iyidir. Deşarj saatlerinde ise durum diğer test sistemlerinden farksız değildir. En avantajlı sistemin de sistem 1 olduğu görülmektedir. Genel olarak incelendiğinde güneş üretim biriminin düşük atalet sabiti ve sınırlı saatlerde etkin oluşu, rüzgâr üretim biriminin sınırlı saatlerde etkin oluşu, sistemlere yüklenen ekstra yükler ve depolama sisteminin güç sistemlerinden temin ettiği yük nedeniyle zaman zaman kararlı kalma süresi mevcut durumdan düşük değerleri görmüştür. Tam tersi sisteme güç takviyesi yapan EDS ve DÜB'ler sayesinde zaman zaman kararlı kalma süresi mevcut durumdan yüksek değerleri görmüştür.

13-14 hattında 14. baraya yakın oluşturulan arızada simülasyonun ilk 2 aşamasının arızanın hangi hatta olduğuyla bir ilgisi olmadığından değerler aynıdır. Simülasyonun 3. aşamanın a öncülü incelendiğinde sistemler bu arıza bilgileri karşısında her saat dilimi için tek tek incelendiğinde kararsızlık durumu oluşmamıştır. Bu durum arıza noktasının üretim birimleri ve depolama sistemine olan uzaklığına bağlıdır. Simülasyonun 3. aşamasının b öncülü incelendiğinde 1. ve 2. senaryoda frekans değeri, standart frekans değerinden %1.58 değerinde bir değişimle 60.95 Hz değerinde olduğu görülmektedir, 3. senaryoda standart değerden %1.75 değerinde bir değişim ile 61.05 Hz değerinde olduğu görülmüştür. 4. senaryoda ise standart değerden %1.33 değerinde bir değişim ile 60.72 Hz değerinde bir yükselme göstermiştir. Bu durumda tüm sistemlerde kararsızlık sınırı aşılmadığı için sistemler frekans bakımından kararlıdır diyebiliriz.

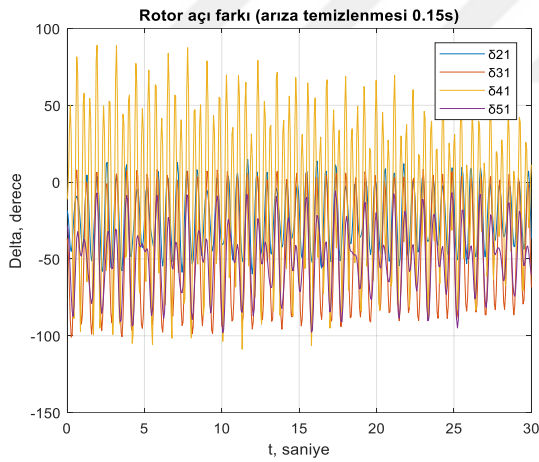
Tüm parametreler aynı tutulup sadece depolama sisteminin gücü değiştirilerek gücün kararlılık üzerindeki etkisini açıkça görmek hedeflenerek depolama sisteminin gücü 150 MW' dan 300 MW'a yükseltip 5-6 hattı arasında 5. baraya yakın bir arıza verilerek simülasyonun ilk 3 aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda aktif güç değerlerinde depolama sisteminin güç ve yük artışından kaynaklı 11. saat dilimi referans alınarak yapılan karşılaştırmada; senaryo 1 için; ortalama %16.9 oranında güç değerinde bir artış, senaryo 2 için ortalama %21.42 oranında artış, senaryo 3 için; ortalama %23.8 oranında artış görülmüştür. Senaryo 4 için, kayda değer bir azalma veya artma görülmemiştir. Voltaj

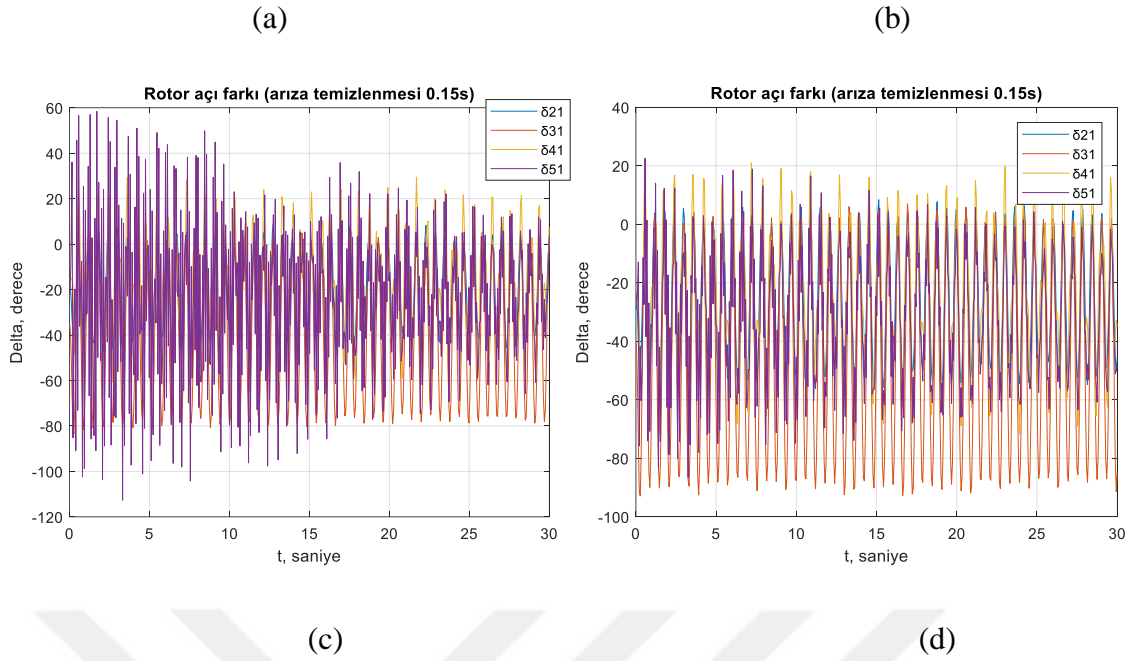
seviyesi grafiklerine bakıldığında genel olarak şarj saatlerinde ortalama %23 değerinde artış, deşarj saatlerinde kayda değer bir artış ya da düşüş görülmemiştir.

21. saat dilimi referans alınarak gerilim değerleri 150 MW'lık sistemlerle karşılaştırıldığında; 1. senaryoda % 0.3'lük bir yükselme, 2. senaryoda % 0.8 değerinde bir yükselme, 3. senaryoda % 0.7 değerinde bir yükselme görülmüştür. Bu yükselme olumlu bir durumdur ancak çok yüksek değerlerde bir artış değildir. 4. senaryoda durum farklıdır; %1.3'lük düşüşle sistemin bu saat dilimine ait gerilim değeri 0.95 sınırının altına düşmüştür. Bu 4. senaryoyu gerilim olarak kararsız duruma geçirmektedir.

Voltaj seviyesi blok diyagramlarına bakıldığında deşarj saatlerinde kayda değer bir değişiklik görülmemekle beraber şarj saatlerinde voltaj değerlerinde ortalama % 0.08-0.05 oranında bir artış görülmüştür. Genel olarak bakıldığında bu artışlar olumlu bir durum olmasına rağmen çok yüksek değerler değildir.

Simülasyonun 3. aşaması için 5-6 hattında 5. baraya yakın sisteme arıza verilip 4. saat dilimindeki frekans ve rotor açısı kararlılığı grafikleri elde edilmiştir. Sistemlerin $t_c=0.15$ saniye seçilip 30 saniye boyunca rotor açısı analizi yapılmıştır.





Şekil 4.8: (a) Test sistemi 1'in, (b) Test sistemi 2'nin, (c) Test sistemi 3'ün, (d) Test sistemi 4'ün 24. saat dilimindeki 30 saniyelik rotor açısı kararlılığı grafikleri

Şekiller incelendiğinde Test sistemi 2'de güneş üretim biriminin düşük H değerinden kaynaklı kararsız olduğu görülmektedir. Test sistemi 1'e bakıldığında 6. baradaki jeneratörü temsil eden δ_{41} 'deki salınımlar daha büyük genliğe sahiptir. Rüzgâr üretim birimi 5. bara üzerindedir ancak 2. ve 6. barayla bağlantılı olduğu göz önüne alınırsa etkisi δ_{41} üzerinde görülmektedir. Test sistemi 3'e bakıldığında 8. baradaki jeneratörü temsil eden δ_{51} 'deki salınımların diğer jeneratörlere göre daha düzensiz salınım yaptığı görülmektedir. Test sistemi 4'e bakıldığında 3. jeneratörü temsil eden δ_{31} 'deki salınımların daha büyük genliğe sahip olduğu görülmektedir. Salınımlar test sistemi 3'e göre daha düzenlidir.

Tüm test sistemleri 150 MW'lık depolama sistemindeki rotor açısı grafikleriyle karşılaştırıldığında Test sistemi 2 hariç diğer sistemlerde kararlılık bakımından 300 MW'lık depolama sisteminin daha avantajlı olduğu görülmektedir.

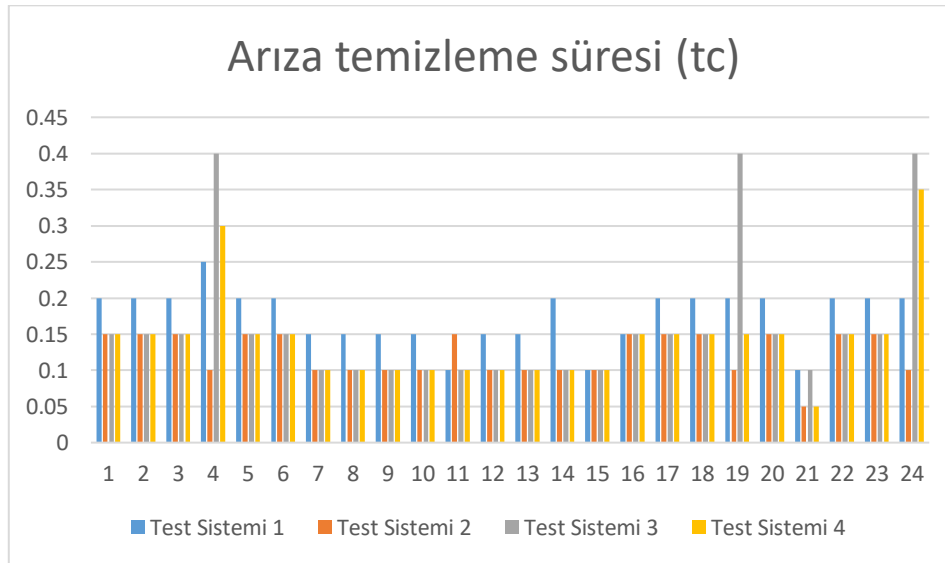
Simülasyonun 3b aşamasında 150 MW ve 300 MW değerlerindeki depolama sistemlerinin frekans değerleri aşağıdaki tabloda karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2: Test sistemlerinin 300 MW ve 150 MW'lık EDS ile frekans değerleri

EDS Gücü	Test sistemi 1	Test sistemi 2	Test sistemi 3	Test sistemi 4
150 MW	61,9	65,1	61,72	61,6
300 MW	62	73	61,8	61,5

Tablodan görüleceği üzere frekans grafiklerinden ortalama değerler elde edilmiştir. Test sistemi 2 hariç tüm sistemlerde frekans değerleri birbirine çok yakındır. Test sistemi 2'de kullanılan güneş üretim biriminin H sabitinin sıfıra yakın değerde olmasından dolayı yeterli sönümlenme momenti üretilmemiş ve sistem frekans olarak kararsızdır. 300 MW'a ait diğer tüm frekans olarak kararludur ancak frekans değerleri artış eğilimi gösterip bir süre sonra sabit kalmaktadır. Ayrıca 300 MW'lık depolama sisteminin sisteme verdiği güç değerinin olumlu sonuçları olsa da depolama yaptığı zamanlarda sistem üzerinden kendine sağladığı güç değeri de büyük olduğundan frekans değerini olumsuz yönde etkilemiştir.

Simülasyonun 4. aşaması gerçekleştirilerek depolama sisteminin güç artışının sistemin kararlı kalma süresindeki etkisini incelemek amaçlanmıştır. Analiz sonuçları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.9: 14 Baralı Test sistemlerinin her saat dilimi için arıza karşısında kararlı kalma süreleri

Şekil 4.9 incelendiğinde genel olarak tüm test sistemlerinin depolama sisteminin sisteme ekstra güç verdiği zaman dilimlerinde kararlı kalma sürelerinde artış görülmektedir. Test sistemi 2’de durum farklıdır, genel olarak bu sistem arıza karşısında diğer sistemlere göre kararlı kalamamıştır. H sabitinin sıfıra yakın bir değerde tercih edilmesi arıza karşısında sistemi dayanıksız hale getirmiştir. Özellikle saat 21’de sistem 2 ve sistem 4’ün en kötü değerlere(0.05) sahip olduğu görülmektedir. Sistem 4’e eklenen ekstra yükler sistemi kısa sürede kararsızlığa sürüklemiştir. Test sistemi 3’e bakıldığında deşarj saatlerinde sistem 0,4 saniyelere kadar kararlı kalmıştır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.9’da en çok olumlu değişiklik Test sistemi 3’de görülmüştür. EDS’deki güç artışı, rüzgâr ve güneş üretim birimlerinin birlikte varlığı sayesinde sistem kararlılığını uzun süre korumuştur. Diğer test sistemlerinin değerlerinde çok bir fark görülmemiştir.

4.3. 30 Baralı Sistemde Enerji Depolama Sistemi Çalışması

IEEE 30 baralı güç sistemi; 37 iletim hattı, 4 transformatör, 6 makine ve 21 yükten oluşmaktadır. Sistem Şekil 3.1 (b)’de gösterilmiştir. Test sistemleri oluşturulurken Şekil 3.2 (b) ve Şekil 3.3 (b)’deki üretim değerleri ve Şekil 3.4 (c)-(d)’deki tüketim değerleri kullanılmıştır. Sistemin güç yoğunluk haritasına bakılarak entegrasyon yapılmıştır. Yoğunluklar sırayla 1. ve 3. bara arası %134. 2. ve 4. baralar arası %67. 1. ve 3. baralar arası %68.3. ve 4. baralar arası %63. 2. ve 5. baralar arası %63 ve son olarak 4. ve 6. baralar arası yoğunluk %57’dir. Güç yoğunluğu fazla olan ve yük bağlı olan baralara DÜB ve EDS entegrasyonu yapılarak yük yoğunluğunun azaltılması ve dengelenmesi hedeflenmiştir. Analizlerde 150 MW’lık depolama sistemi kullanılmıştır. Ayrıca şarj ve deşarj saatlerinde 14 baralı sisteme göre farklılık yapılmıştır. Depolama sistemi saat 12, 15 ve 20’de jeneratör olarak görev yapmakta, saat 7, 13 ve 19’da sistem üzerinden kendini depolamakta yani yük gibi davranmaktadır.

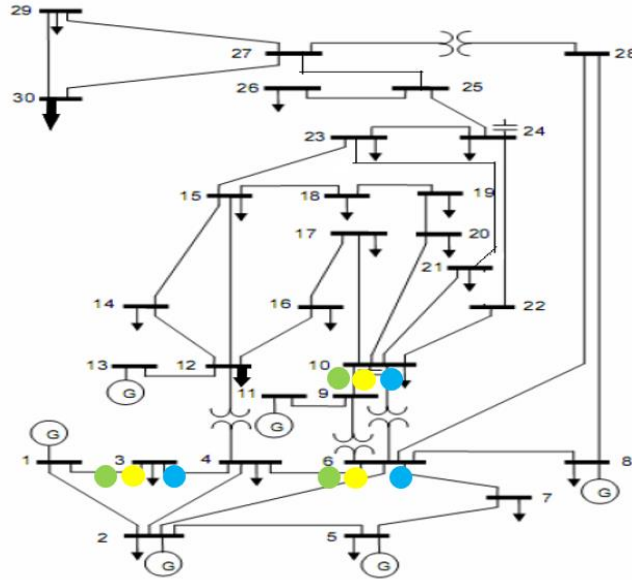
Dağıtık üretim birimlerinin atalet sabiti(H); rüzgar ve güneş üretim birimlerinin aynı barada kullanıldığı hibrit sistemlerde ortak olarak 1.5 değerinde kabul edilmiştir. Oluşturulan senaryolar Tablo 4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: 30 baralı güç sistemine yapılan modifikasyonlar

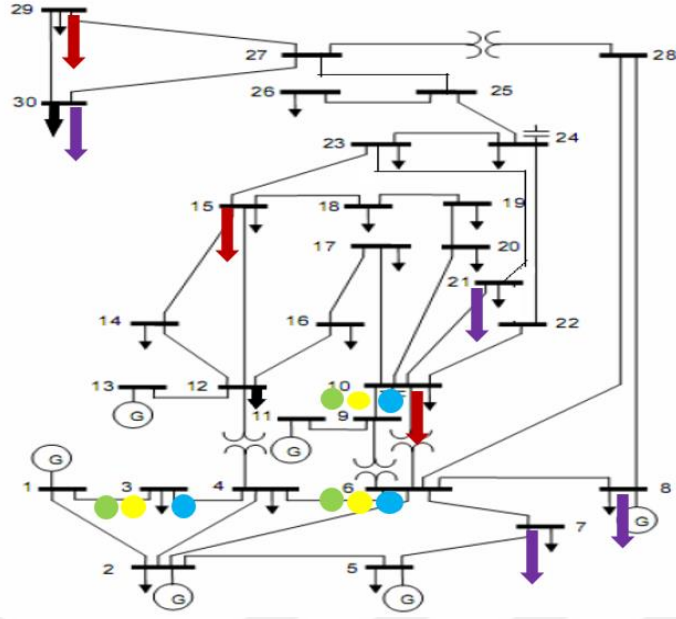
Bara Numarası	Bara Kodu	Test Sistemi 1	Test Sistemi 2
1	1	1	1
2	2	2	2
3	0	0+P _{güneş+rüzgâr}	0+P _{güneş+rüzgâr} +P _{EDS}
5	2	2	2
6	0	0+P _{güneş+rüzgâr}	0+P _{güneş+rüzgâr} +P _{EDS}
7	0	0	0+PQ _{mesken}
8	2	2	2+PQ _{mesken}
10	0	0	0+P _{güneş+rüzgâr} +P _{EDS} +PQ _{sanayi}
11	2	2	2
15	0	0	0+PQ _{sanayi}
21	0	0	0+PQ _{mesken}
29	0	0	0+PQ _{sanayi}
30	0	0	0+PQ _{mesken}

Çizelgeden görüleceği üzere 3. ve 6.baralara hibrit sistem ve EDS entegre edilerek Test Sistemi 1 elde edilmiştir. Test sistemi 1'e ek olarak 10. baraya hibrit sistem ve EDS eklenmiş ayrıca 7, 8, 21 ve 30. baralara mesken tipi yük, 10, 15 ve 29. baralara sanayi tipi yük entegre edilerek Test sistemi 2 elde edilmiştir. Aynı sistemde 3., 6. ve 10. baralara EDS eklenerek senaryo 2 kabul edilmiştir.

Senaryoların kararlılık analizi için belirlenen arıza; 6-9 hattı arasında 6. baraya yakın trafo arızasıdır. DÜB birimlerine ve EDS'ye oldukça yakın bir konumdadır.



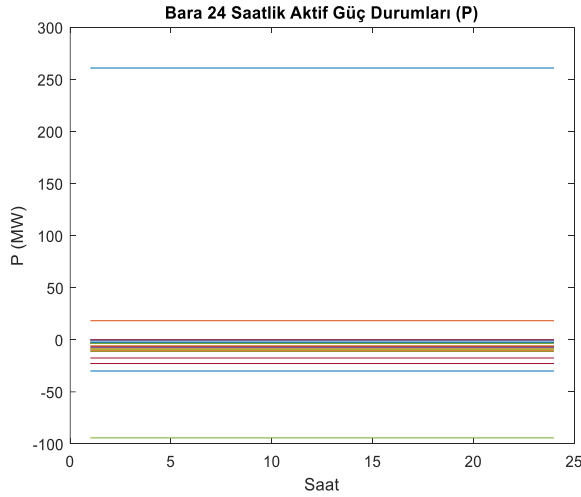
(a)



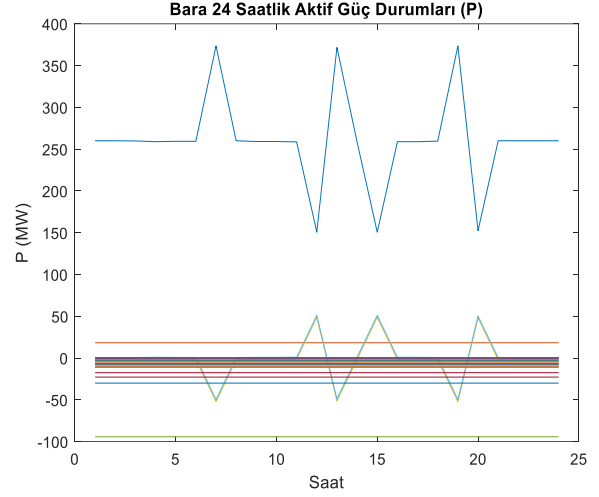
(b)

Şekil 4.10: (a) Test sistemi 1, (b) Test sistemi 2

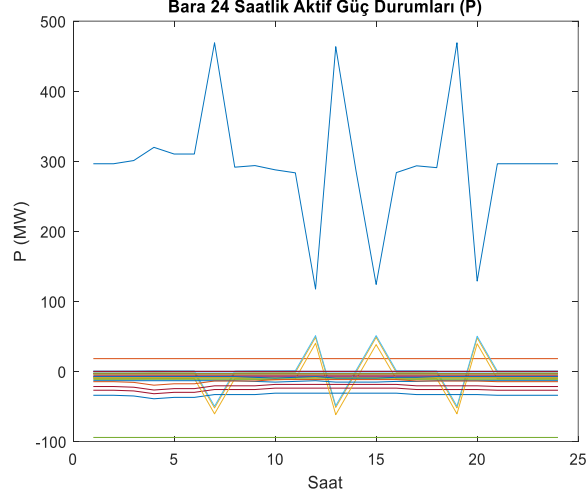
2. simülasyon aşaması uygulanarak; aktif güç değerleri elde edilmiş ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir, 24 saatlik voltaj değerleri Şekil 4.13’de ve 24 saatlik voltaj seviyelerinin per unit değerinde blok gösterimi Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



(a)



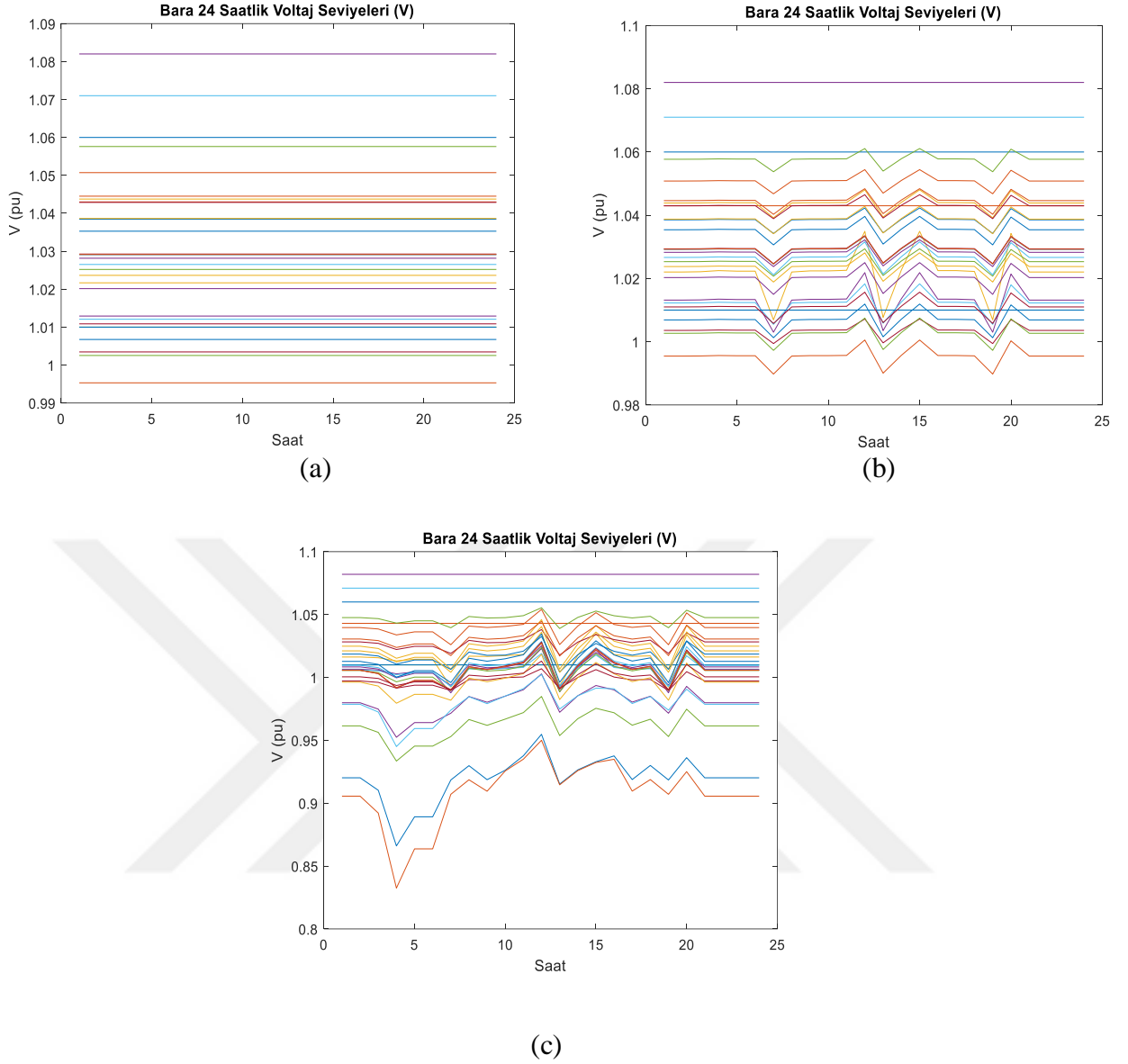
(b)



(c)

Şekil 4.11: (a) 30 baralı sistem mevcut durumunun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24 saatlik Aktif güç değerleri

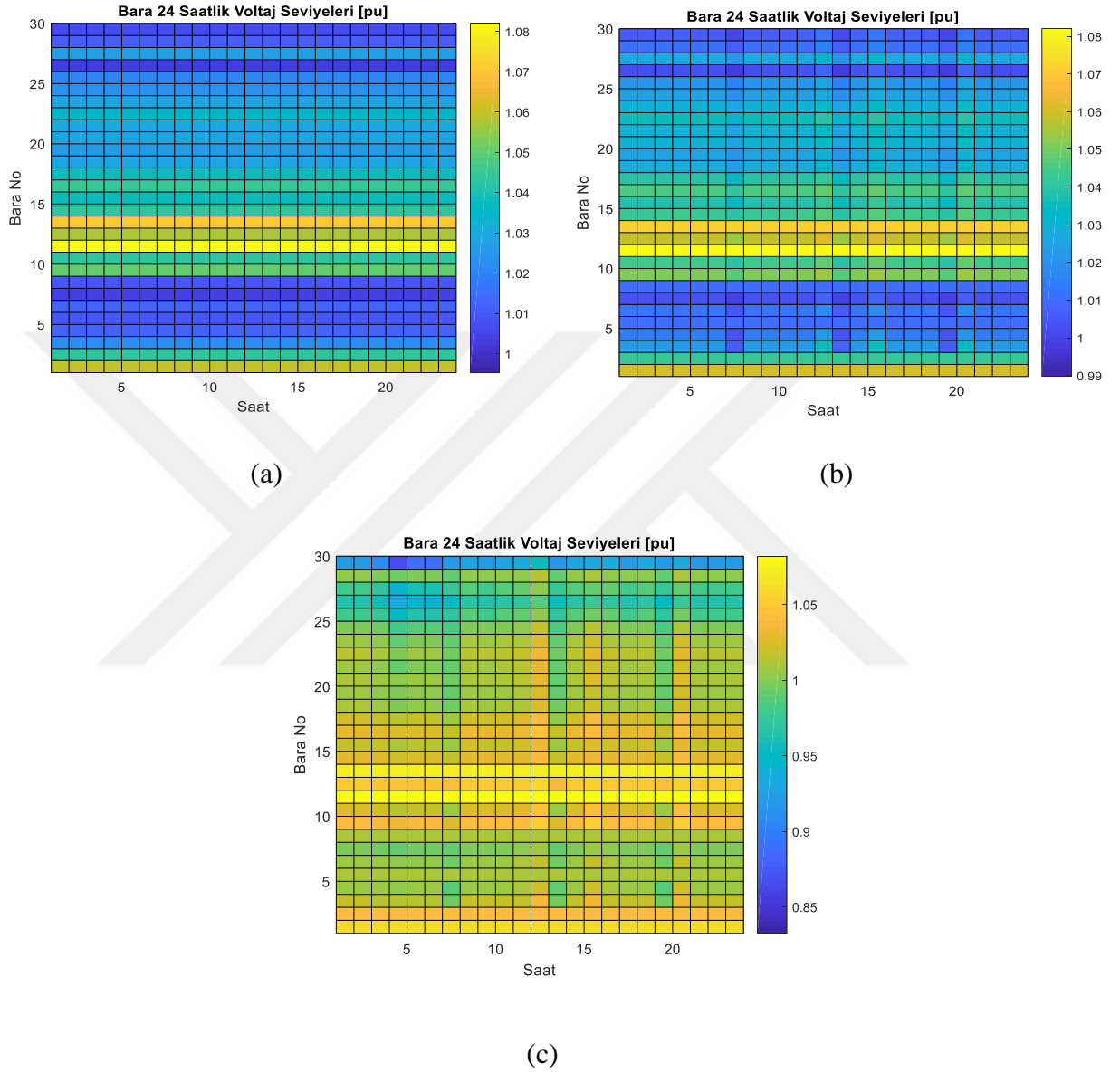
Şekiller incelendiğinde mevcut sistemin aktif güç değerlerinin sabit olduğu görülmektedir. Test sistemi 1'in grafiği incelendiğinde EDS'nin varlığı 3. bara(grafikte turuncu ile gösterilen) ve 6. bara(grafikte açık mavi ile gösterilen) üzerinde görülmektedir. Mevcut durumda sabit olan bara değerlerinin deşarj saatlerinde 0'ın üzerine çıktığı görülmektedir. Şarj saatlerinde ise bu durum tam tersidir. Ayrıca yapılan entegrasyonlar referans bara olan 1. bara(grafiklerde mavi ile gösterilen) üzerinde görülmektedir ve deşarj saatlerinde aktif güçte artış görülmektedir. Test sistemi 2'ye bakıldığında ise aktif güç değerlerinin sisteme eklenen ekstra hibrit sistem ve EDS'den kaynaklı deşarj saatlerinin diğer sistemlere göre daha yüksek olduğu ancak şarj saatlerinde değerlerin diğer sistemlere göre düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca sistemde yapılan yük entegrasyonları da 7. bara(grafikte kahverengi ile gösterilen) ,8. bara(grafikte açık mavi ile gösterilen), 21. bara(grafikte borda ile gösterilen), 30. bara(grafikte hardal ile gösterilen) üzerindeki yüklenmeyi arttırdığı görülmektedir.



Şekil 4.12: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24 saatlik Voltaj değerleri

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere mevcut durumun gerilim değerlerinin sabit olduğu, Test sistemi 1'e bakıldığında genel olarak tüm baraların gerilimlerinin EDS ve DÜB'lerden etkilendiği görülmektedir. 7, 13, 19. saat dilimlerinde depolama sisteminin sistemden şarj olduğu, 12, 15, 20. saat dilimlerinde sisteme ekstra güç sağladığı görülmektedir. Bu durumdan en çok etkilenen baranın özellikle sisteme güç verdiği 12. saat dilimindeki % 2.46'lık artış ve yük gibi davranıp depolama yaptığı 13. saat diliminde % 1.12'lik azalma ile 3. bara(turuncu ile gösterilen) olduğu görülmektedir. Test sistemi 2 incelendiğinde genel olarak tüm baraların etkilendiği ve Test sistemi 2 ile kıyaslandığında ekstra hibrit sistem ve EDS'den kaynaklı deşarj saatlerinde sistemde az da olsa artışlar görülse de şarj saatlerinde

entegre edilen mesken ve sanayi tipi yüklerden kaynaklı voltaj değerlerinde azalma görülmektedir. Bu durumdan en çok etkilenen baraların 30. bara(koyu turuncu ile gösterilen) mesken tipi yükü temsilen ve 29. bara(mavi ile gösterilen) sanayi tipi yükü temsilen olduğu görülmektedir.

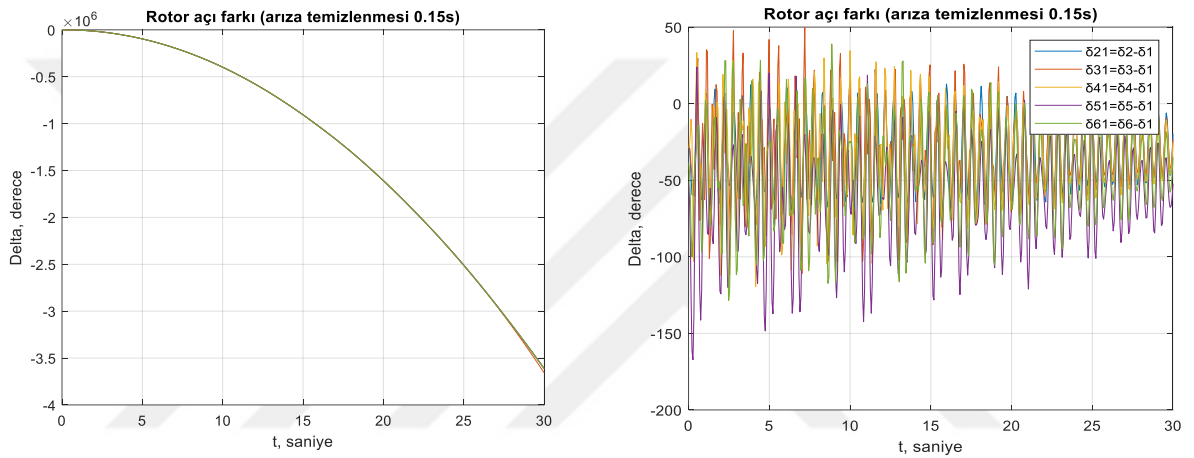


Şekil 4.13: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24 saatlik Voltaj seviyelerinin per unit gösterimi

Şekil 4.13'de gerilim değerlerinin blok gösterimi görülmektedir. Mevcut durumun blok gösteriminin sabit olduğu, Test sistemi 1'e bakıldığında şarj ve deşarj saatlerindeki değişim görülmektedir. Sistem mevcut sisteme göre kısmen daha iyi değerlere sahiptir. Test

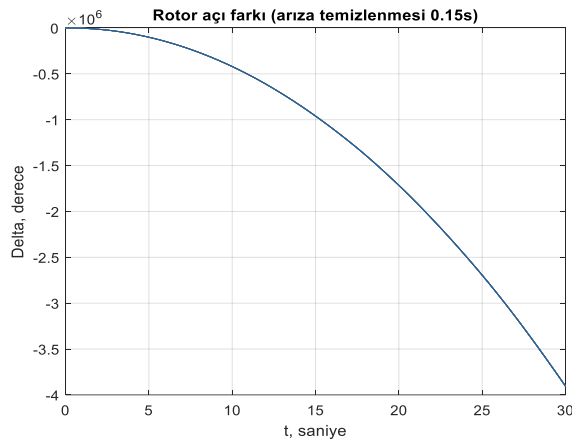
sistemi 2'ye bakıldığında şarj saatlerindeki gerilim azalması gözle görülmektedir. Sisteme entegre edilen mesken ve sanayi tipi yükler olmasına rağmen sistemin gerilim değerlerindeki yükselme görülmektedir.

Rotor açısı kararlılığını görmek için simülasyonun 3a aşaması gerçekleştirilmiştir. Arıza durumu olarak 6-9 hattı arasında 6 numaralı baraya yakın trafo arızası oluşturulmuştur. Analiz 24. saat diliminde gerçekleştirilmiştir. Arızanın temizlenme süresi 0.15 saniye olacak biçimde analiz yapılmıştır. Rotor açısı kararlılığı için simülasyon 30 saniye boyunca sürdürülmüştür. Analiz sonuçları Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



(a)

(b)

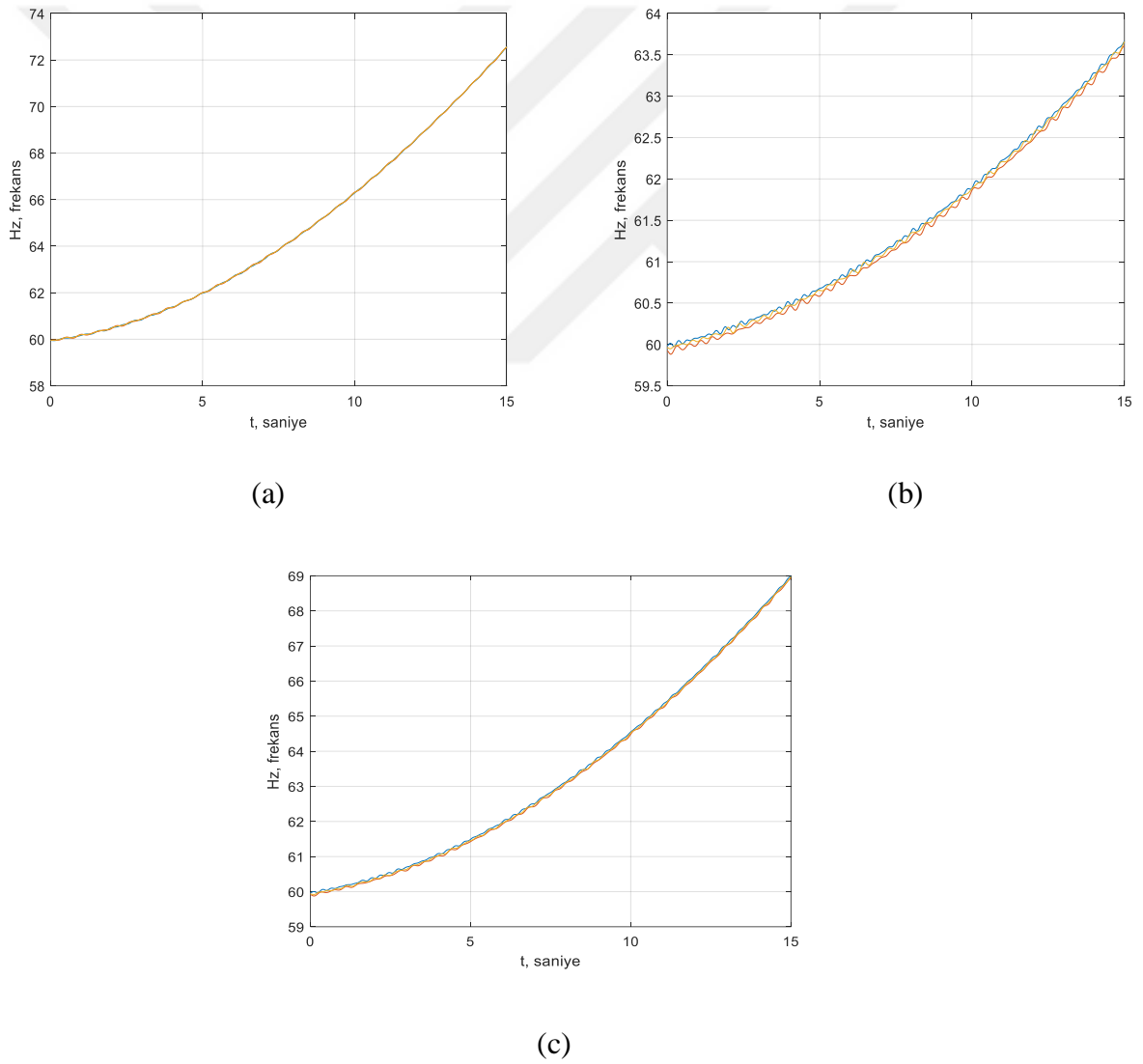


(c)

Şekil 4.14: (a) 30 baralı sistem mevcut durumun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24. Saat dilimindeki rotor açısı farkı grafikleri

Şekil 4.14 incelendiğinde mevcut durum ve Test sistemi 2'nin bu arıza bilgileri karşısında kararsız olduğu görülmektedir. Test sistemi 2'de sistemin kararsızlığa gitmesinde sisteme eklenen ekstra yüklerin ve depolama sisteminin yük gibi davrandığı saatlerin etkisi vardır. Test sistemi 1'de ise durum farklıdır. Sistem uç noktada kararlıdır. Grafik üzerinde 11. bara üzerinde bulunan jeneratörün salınımlarının(mor ile gösterilen) en büyük olduğu görülmektedir. Bu baranın 3., 6. ve 10. baraların merkezinde bulunması en çok bu salınımların etkilenmesinin nedenidir.

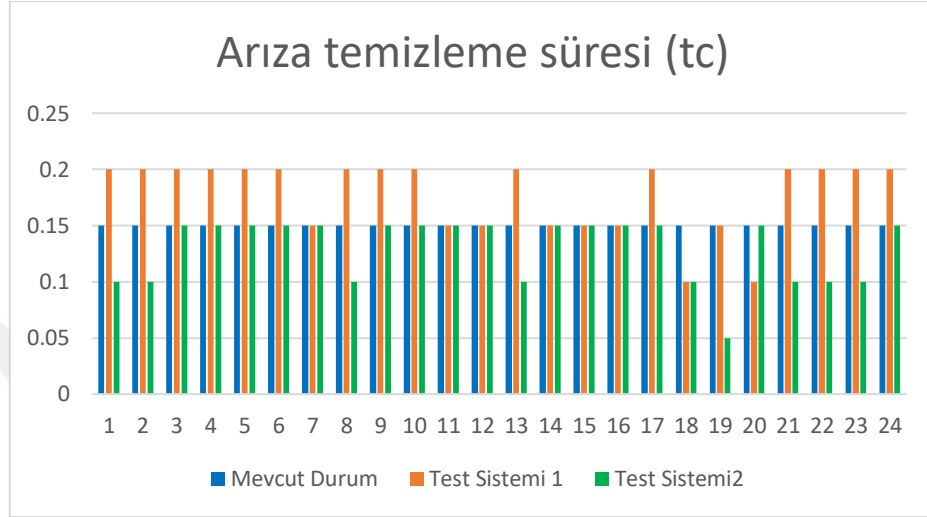
Simülasyonun 3b aşaması gerçekleştirilerek frekans kararlılığı analizi yapılmıştır. Analizde kullanılan arıza bilgileri rotor açısı analizindeki bilgiler ile aynıdır. Simülasyon 15 saniye çalıştırılmıştır ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.15: (a) 30 baralı sistem mevcut durumunun, (b) Test sistemi 1'in, (c) Test sistemi 2'nin 24. Saat dilimindeki frekans kararlılığı grafikleri

Şekil 4.15 incelendiğinde tüm sistemlerin frekans olarak kararsızdır. Test sistemi 1 ve Test sistemi 2'nin mevcut duruma göre frekans değerleri daha iyidir ancak tüm frekans değerleri artış eğilimindedir. Ayrıca frekans kararlılık tolerans sınırı olan 62,99 değerinin üzerinde olduğu için tüm sistemler kararsız olarak isimlendirilmektedir.

Simülasyonun 4. aşaması gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.16: 30 Baralı Test sistemlerinin her saat dilimi için arıza karşısında kararlı kalma süreleri

Şekil incelendiğinde mevcut durumun arıza bilgileri ışığında kararlı kalma süresi her saat dilimi için sabittir. Test sistemi 1 incelendiğinde 18. ve 20. saat dilimleri dışında kararlı kalma sürelerinin mevcut durumla eş hatta genel olarak daha iyidir. Bu saat dilimlerinde hibrit sistemlerin ürettiği enerjinin ve H sabitinin yetersiz kalmasından kaynaklı bu saat dilimlerinde mevcut durumdan kısa sürede kararsızlığa gitmiştir. Test sistemi 2'ye bakıldığında sistem 1'den fazla depolama sistemi ve hibrit sistem olmasına rağmen entegre edilen mesken tipi ve sanayi tipi yüklerin varlığından kaynaklı sistemin kararlı kalma süresi mevcut durumla kısmen aynı kısmen de kötüdür. 13 ve 19. saat dilimlerinde depolama sisteminin yük gibi davranmasından kaynaklı kararlı kalma süresi oldukça düşüktür.

5. SONUÇ

Her geçen gün artan enerji ihtiyacını karşılamak için YEK'ler kullanılmaktadır. YEK'lerdeki güç dalgalanmalarını kararlı hale getirmek ve tüketiciye verimli enerji sunmak için çözümlerden birinin enerji depolama sistemi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu tez çalışmasında mevcut güç şebekelerinde ve dağıtık üretim birimleri eklenmiş şebekelerde enerji depolama sistemleri entegre edildiğinde sistemin bu duruma verdiği cevap analiz edilmiştir. Analizler için IEEE 14 ve 30 baralı güç sistemleri kullanılmıştır. 14 baralı sistem için 4, 30 baralı sistem için 2 test sistemi Matlab programı üzerinden çalıştırılarak yük akış analizleri yapılmıştır. Sistemlerin gerilim, rotor açısı ve frekans kararlılığı analiz edilmiştir.

Enerji depolama sisteminin konumu, dağıtık üretim birimlerinin konumu, arıza noktalarının EDS ve DÜB'lerine olan yakınlığı ya da uzaklığı, test sistemlerinin bara sayısı, DÜB'lerin H sabitinin değeri, kullanılan EDS ve DÜB'lerin adedi yapılan analizlerin sonuçlarının farklı olmasına neden olmuştur. DÜB'lerin güç sisteminin yük yoğunluğuna bakılarak, yük yoğunluğunun fazla olduğu baralara eklenerek sistemdeki yüklenmenin azaltılması hedeflenmiştir. Ayrıca EDS'nin şarj ve deşarj saatleri belirlenirken elektriğin birim fiyatının düşük olduğu saat dilimlerinde depolama yapıp, birim fiyatının yüksek olduğu saat dilimlerinde sisteme güç vermesi sağlanarak maliyetten kazanç sağlanabilir. Oluşturulan test sistemleri, arıza senaryoları, EDS ve DÜB'ler sistemlerde farklı sonuçlar oluşmasına neden olmuştur. Bu sonuçlar;

- 14 baralı sistemde 2 farklı güçte EDS kullanılmıştır. 150 MW'lık EDS için simülasyonlar gerçekleştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. DÜB'lerle EDS'lerin birlikte varlığı güç voltaj değeri ve aktif güç bakımından sistemlerde olumlu sonuçlar doğurmuştur. Test sistemi 2 hariç tüm sistemlerde frekans olarak kararlılığını korumuştur. Rotor açısı kararlılığına bakıldığında tüm mevcut durum ve sistem 2 kararsız, diğer sistemler uç noktada kararlıdır. Sistemin kararsızlığa gitme sürelerine bakıldığında EDS'lerin sistem üzerinden deşarj olduğu zaman yani sisteme güç temin ettiğinde sistemin kararlı kalma süresinde iyileşme olduğu görülmüştür. Sistemlerde konumuna göre 2 farklı arıza kullanılmıştır. Bunlardan biri depolama sistemlerine ve dağıtık üretim birimlerine yakın bir noktada, diğeri ise bu birimlere uzak noktadadır. Yakın olan arızanın sistemin rotor açısı ve frekans kararlılığında olumsuz sonuçlar oluştururken, uzak noktada olan

arızanın frekans ve rotor açısında kararsızlık durumu oluşturmadığı görülmüştür. 300 MW'lık EDS için sonuçlar daha olumludur. Aktif güç ve gerilim değerlerinde depolama sisteminin sisteme güç verdiği saat dilimlerinde artışlar görülmüştür. Test sistemi 2 rotor açısı ve frekans olarak kararsızdır. Diğer tüm sistemler frekans ve rotor açısı bakımından kararlıdır. Sonuç olarak 14 baralılık sistem yapısından dolayı en ufak bir değişiklik ve arıza durumundan çok çabuk etkilenebilir. Bu bakımdan kararlılık durumları için net bir şey söylemek doğru değildir. Geçici durumu temsil eden arıza karşısında sistemin kararlı kalma süreleri incelendiğinde deşarj saatlerinde sistemin daha uzun süre kararlılığını koruduğu görülmektedir. Gücü yüksek olan depolama sistemi için diğer depolama sistemine göre deşarj saatlerinde daha uzun süre kararlılığını sürdürdüğü görülmüştür. Sonuç olarak 14 baralılık sistemlerde güneş üretim birimleriyle depolama sisteminin birlikte kullanımı olumsuz sonuçlar doğururken; rüzgâr üretim birimiyle birlikte kullanımı ya da güneş/rüzgâr üretim birimlerinin aynı güç sistemlerinde kullanıldığı sistemlerle EDS'ler daha olumlu sonuçlar vermiştir.

- 30 baralılık güç sisteminde hibrit sistem kullanılmış ve bu sistemlerin kullanıldığı her baraya EDS de entegre edilmiştir. Aktif güç ve gerilim değerlerinde olumlu sonuçlar görülürken frekans bakımından tüm sistemler kararlıdır. Rotor açısı kararlılığına bakıldığında ise Test sistemi 1' in kararlılığını koruduğu Test sistemi 2'nin kararlılığını koruduğu görülmüştür. Sistemin geçici durumunu temsil eden arıza karşısında kararlı kalma sürelerine bakıldığında net bir durum oluşmamıştır.

Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yapısından kaynaklı düşük H değerinin negatif etkisinin yok edilmesi sebebiyle bu çalışmalara devam edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda bu yenilenebilir kaynakların değişken ve süreksiz üretim yapısı ve değişken tüketim profillerinden kaynaklanan problemleri uygun enerji depolama sistemiyle çözümlenebiliriz. Ancak depolama sistemlerinin kullanımı da kararlılık probleminin önüne tamamen geçememektedir. Gelecekte yenilenebilir enerji kaynakları payının enerji piyasamızdaki payı oldukça artacaktır. Bu kaynakların giderek artan

uygulamalarıyla beraber bu üretim kaynaklarından üretilen fazla enerji dağıtık depolama şeklinde isimlendirilen elektrik depolama sistemlerinden akıllı şebekeler ile daha da faydalanılması beklenmektedir. Bu sistemler üretim fazlası olan enerjiyi depo edecektir. Bunun sonucunda herhangi bir elektrik kesintisi halinde, enerjinin yetmediği veya sistemde meydana gelen arıza durumlarında, enerji depolama kapasitesi dâhilinde belirli sınıra kadar enerji ihtiyacına karşılık vererek üretimdeki devamlılığı sağlayacaktır.

Depolama sistemlerinin akıllı şebeke alt yapısına uydurulması, güç sistemine uygun teknoloji ve güçte depolama sistemi seçimi, adedi, şarj ve deşarj saatlerinin en verimli sonuç alacak şekilde belirlenmesi sistem kararsızlığı problemlerinin önüne geçebilmek adına farklı senaryo ve güç sistemleriyle birlikte analiz edilmesi çalışmaları hız kesmeden devam ettirilmelidir.

Resmi gazetede 5 Temmuz 2022 yılında yayınlanan elektrik depolama ile ilgili Elektrik Piyasası Kanununa tesis yatırımlarıyla alakalı bir madde eklenmiştir. Bu madde ile yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı güç sistemlerinin en büyük sorunu olan; yani üretimin süreksizliği sorununun önüne geçileceği düşünülmektedir. Maddeye göre enerji depolama tesisi yapmayı üstlenen sermayedarların, kurulacak tesisin gücü sınırında yenilenebilir enerji(rüzgâr ve/veya güneş) yatırımları için bir pürüz oluşmadan lisans sahibi olabileceklerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte enerji depolama tesislerinin kurulumunun devlet tarafından da teşvik edilmesi ile bu tesislerin sayısının gün geçtikçe artması ön görülmektedir. Ancak depolama tesislerinin maliyetleri hala çok yüksek olduğundan bu konunun önünde engel teşkil etmektedir.

Yapılan bu tez çalışması, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı güç sistemlerinin enerji depolama sistemleriyle birlikte modellenmesinin güç sistem kararlılığı adına bir sanal çalışması konumundadır. Bu çalışmadan esinlenilerek temin edilen bilgiler doğrultusunda, ileriki seviyelerde tez çalışmasında kullanılmayan güç sistemleri kullanılarak gerçek güç sistemleri esas alınarak oluşturulan değişik modelleme çalışmaları aracılığı ile akıllı şebekeler için enerji depolama sistemi çalışma planlamaları yapılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Aydin, R. A., Baykal, Ş., Terciyanli, A., & Çam, E.** (2020). Şebeke Seviyesinde Enerji Depolama Uygulamaları için Uygun Teknoloji Seçimi Metodolojisi Önerilmesi. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 12(3), 107-118. <https://doi.org/10.29137/umagd.841452>
- Bahçeci, S., & Daldaban, F.** (2017). Dağıtım Şebekelerinde Güneş Panelleri ve Enerji Depolama Sistemi Uygulaması. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4(3), 308-313. <https://doi.org/10.31202/ecjse.301530>
- Barton, J. P., & Infield, D. G.** (2004). Energy Storage and Its Use with Intermittent Renewable Energy. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 441-448. <https://doi.org/10.1109/TEC.2003.822305>
- Chen, W. Z., Li, Q. B., Shi, L., Luo, Y., Zhan, D. D., Shi, N., & Liu, K.** (2012). Energy storage sizing for dispatchability of wind farm. *2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 382-387. Venice: IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2012.6221407>
- Çaliker, A., & Özdemir, E.** (2013). *Modern Enerji Depolama Sistemleri Ve Kullanım Alanları*. 5.
- Dağıtım Şebekelerinde Enerji Depolama Sistemlerinin Uygulanması.** (2019). Geliş tarihi 15 Kasım 2021, gönderen <https://www.elektrikport.com/makale-detay/dagitim-sebekelerinde-enerji-depolama-sistemlerinin-uygulanmasi/22445#ad-image-0>
- Demirci, M.** (2018). *Güç Sistemlerinde Kararlılık Analizi* (Thesis). Geliş tarihi gönderen <https://dspace.gazi.edu.tr/handle/20.500.12602/150716>
- Demirören, A., & Zeynelgil, L.** (2004). *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*.
- Dincer, I., & Ezan, M.** (2020). *TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu*.
- Erdoğan, Ö.** (2021). *Enerji Depolama*. Geliş tarihi gönderen <http://www.guyad.org/Eklenti/241,guyad-enerji-depolama-101pdf.pdf?0>
- Gerçek Zamanlı Üretim—Gerçekleşen Üretim—Üretim | EPIAŞ Şeffaflık Platformu.** Geliş tarihi 28 Mayıs 2022, gönderen <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml>
- Gerçek Zamanlı Üretim—Gerçekleşen Üretim—Üretim | EPIAŞ Şeffaflık Platformu.** Geliş tarihi 28 Mayıs 2022, gönderen <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/uretim/gerceklesen-uretim/gercek-zamanli-uretim.xhtml>
- Hill, C. A., Such, M. C., Chen, D., Gonzalez, J., & Grady, W. M.** (2012). Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 850-857. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2190113>

- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J.** (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1221-1250. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.023>
- İnat, K., & Özdemir Daşçioğlu, B. Z.** (2022). *Dünya Enerji Trendleri Rezervler, Kaynaklar ve Politikalar*. Geliş tarihi gönderen https://setav.org/assets/uploads/2021/08/K76_Enerji.pdf
- Karadeniz, A., & Balci, M. E.** (2019). Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): Güç kalitesine etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 882-903. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.654556>
- Karahan, O., Özkan, A., & Bağrıyanık, M.** (2020). The Effects of Mobile Battery Electricity Storage Systems On The Distribution Network. *2020 12th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 183-187. <https://doi.org/10.1109/ELECO51834.2020.00036>
- Kaygusuz, A.** (2020). *Dağıtık-Belirsiz Üretim ve Tüketim Koşullarının Güç Sistemlerinin Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi* (TÜBİTAK Projesi Raporu Sy 118E863; ss. 1-88). Geliş tarihi gönderen <https://app.trdizin.gov.tr/proje//dagitik-belirsiz-uretim-ve-tuketim-kosullarinin-guc-sistemlerinin-kararlilik-uzerindeki-etkilerinin-incelenmesi>
- Kaytez, F.** (2018). *Şebeke Arz Güvenliğinde Elektrik Depolama Sistemlerinin Şebeke Entegrasyonu Ve Gelecek Vizyonu*.
- Keleş, C.** (2012). *Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Bölgeleri Arasındaki Salınımların Kontrolü*. 71.
- Kocaman, B.** (2013). *Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri*. 2(1), 119-127.
- Koç, E., & Kaya, K.** (2015). *Enerji Kaynakları-Yenilenebilir Enerji Durumu*. 56(668), 36-47.
- Koç, İ. M.** (2015). *Akıllı Şebekelerde Enerji Depolama Uygulamaları ve Standartların İncelenmesi*. Geliş tarihi gönderen https://www.emo.org.tr/ekler/d6b90f67a125ab7_ek.pdf
- Koç, İ. M., Erhan, K., Aktaş, A., Özdemir, E., & Özdemir, Ş.** (2015). *Akıllı Şebeke Standartlarında Enerji Depolama Uygulamalarının İncelenmesi*. 5.
- Kozak, M.** (2012). *Enerji Depolama Yöntemleri*. 4(2), 13.
- Kurt, G.** (2010). Technical and economical analysis of energy storage technologies used for wind energy storage. *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, 17-21.
- Kuşdoğan, Ş.** (2015). *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Enerji Depolama Uygulamalarının Verimliliği*. 10.

- Mazman, M., & Yılmaz, C. H.** (2019). *Enerji Depolama Çözümleri Ve Genel Eğilimler*. (466), 32-40.
- Özan, A.** (2020). *Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Elektrik Dağıtım Sistemine Etkisi Ve Sezgisel Algoritmalar İle Faz Dengesizliğinin Giderilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özdemir, E., Aktaş, A., Erhan, K., & Özdemir, Ş.** (2017). Akıllı Şebekelerde Enerji Depolama Uygulamalarının Önündeki Fırsatlar Ve Karşılaşılan Zorluklar. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 499-506. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.322175>
- Özdemir, N., & Hadra, M.** (2016). *Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Depolama Yöntemleri*. Geliş tarihi gönderen <http://gsk.cigareturkiye.org.tr/bildiriler2016/4.3.pdf>
- Özer, S., & Sönmez, F.** (2013). *The Alternative Solution Proposals For The Need Of Energy In Turkey*. 1(1), 10.
- Sezgin, M. E., Güdelek, M. U., Arın, E., Çırak, C. R., & Göl, M.** (2018). Enerji Depolama Sistemlerinin Farklı Kullanım Zamanlarının Elektrik Sistemine Olan Etkisi. *Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi*, 7-14.
- Tanriöven, K.** (2013). *Enerji Depolama Sistemleri Ve Yeni Açılımlar*. 4.
- TSKB.** (2020). *Enerji Sektör Görünümü*. Geliş tarihi gönderen <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2020.pdf>
- Turan, M. T.** (2014a). *Akıllı şebekelerde arıza analizi ve koruma*. Geliş tarihi gönderen <http://dSPACE.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/7759>
- Turan, M. T.** (2014b). *Akıllı Şebekelerde Arıza Analizi ve Koruma* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tuttokmağı, Ö.** (2019). *Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü). İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya. Geliş tarihi gönderen <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Ünver, Ü., Bilgin, H., & Güven, A.** (2015). Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Sistemler. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 56(663), 57-64.
- Vergili C.** (2019). *Türkiye Elektrik Piyasasında Risk Duyarlı Enerji Depolama Politikaları Kullanarak Fiyat Arbitraj Potansiyelinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yeşilbudak, M., Ermiş, S., & Bayındır, R.** (2017). *Farklı Bara Sayısına Sahip Güç Sistemlerinde Yük Akışı Analiz Metotlarının Karşılaştırılması*. 5(3), 237-246.
- Yıldırım, B.** (2017). *Mikro Şebekelerin Güç Sistemi Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

7. EKLER

EK 1: 14 BARALI SİSTEMİN JENERATÖR DATASI

%	Gen.	Ra	Xd'	H
gendata=[1	0	0.2995	5.148
	2	0	0.1850	6.54
	3	0	0.1850	5.06
	4	0	0.1850	2.4
	5	0	0.1850	0.3
	6	0	0.232	5.06
	8	0	0.232	5.06];

EK 2: ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Ayşe ACAR

Lisans: İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği(2013-2018)

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- Acar, A., & Kaygusuz, A. (2022). Effect of energy storage on power system stability. 2nd Advanced Engineering Days, 83-85
- Acar, A., & Kaygusuz, A. (2022). Effect of Energy Storage on Power System Stability. Advanced Engineering Science, 1-8.(incelemede)