

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ŞEBEKELERİN SİSTEM KARARLILIĞI BAKIMINDAN
İNCELENMESİ

ÖZGE TUTTOKMAĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ŞEBEKELERİN SİSTEM KARARLILIĞI BAKIMINDAN
İNCELENMESİ

ÖZGE TUTTOKMAĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2019

Tezin Başlığı: Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Özge TUTTOKMAĞI

Sınav Tarihi: 10.06.2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ

İnönü Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

Fırat Üniversitesi

.....

Dr. Öğretim Üyesi Cemal KELEŞ

İnönü Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

ÖZGE TUTTOKMAĞI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AKILLI ŞEBEKELERİN SİSTEM KARARLILIĞI BAKIMINDAN İNCELENMESİ

Özge TUTTOKMAĞI

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

96+ix sayfa

2019

Danışman: Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ

Son dönemlerde küresel iklim değişikliği sorununa ilişkin en önemli konu elektrik enerjisinin çevre dostu, güvenilir ve verimli bir şekilde kullanılabilmesidir. 21. yüzyılın başlangıcından itibaren akıllı şebeke teknolojilerinin popüler araştırma alanlarından biri haline gelmesi, merkezi üretim yapısına sahip elektrik şebekelerini bir değişim sürecine sokmuştur. Akıllı şebeke kavramıyla birlikte dağıtık üretim uygulamalarına yönelik mevcut şebekelerdeki değişim, enerji verimliliği, güvenilirliği, güç kalitesi ve yaşlanmış güç sistemi altyapısı dezavantajlarıyla ilgili birçok sorunu ortadan kaldırmak için büyük bir fırsat sunmaktadır. Değişken ve öngörülemeyen yapıdaki yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim ile değişken yapıdaki tüketim birimlerinin varlığı güç sistemi kararlılığında risk teşkil edebilir. Akıllı şebeke teknolojisinin uygulamaları sayesinde bu değişken yapıdaki üretim ve tüketim dengesi en iyi şekilde yönetilerek sistem kararlılığı sağlanabilecektir.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında enerji talebindeki artışı karşılamak için alternatif olarak tercih edilmeye başlanan belirsiz ve değişken yapıdaki dağıtık üretim ile değişken yapıdaki tüketim birimlerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Öncelikle üretim ve tüketimdeki belirsizlikleri yansıtacak şekilde varsayımsal üretim ve tüketim profilleri oluşturulmuştur. Bu profiller seçilen IEEE güç sistemleri vasıtasıyla modifiye edilerek kararlılık test sistemleri oluşturulmuştur. Dağıtık üretim ve tüketim yapısındaki belirsiz değişimler kullanılarak gerilim kararlılığı incelenirken her sistem için oluşturulan arıza senaryoları üzerinden rotor açısı ve frekans kararlılığı incelenmiştir.

Çalışma sonucunda dağıtık üretim ve değişken tüketimin her sistemde farklı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmekle birlikte oluşturulan analiz prosedürüne göre sistem kararlılığında iyileşmelerin yanı sıra bozulmaların da meydana geldiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER: Akıllı şebeke, dağıtık üretim, değişken tüketim, güç sistemi kararlılığı.

ABSTRACT

Master Thesis

ANALYSIS OF SYSTEM STABILITY ON SMART GRIDS

Özge TUTTOKMAĞI

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

96+ix pages

2019

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Recently, the most important subject regarding the global climate change problem is the use of electric energy in an environmentally friendly, reliable and efficient manner. Since the beginning of the 21st century, smart grid technologies have become one of the popular investigation fields. Therefore, a period of change has begun in the power systems based on centralized generation. Together with the smart grid concept, change from centralized generation units to distributed generation units have begun in conventional grids. This transformation provides a great opportunity to eliminate many problems such as related to the disadvantages of energy efficiency, reliability, power quality, and aging power system infrastructure. Distributed generation based on variable and unpredictable renewable energy, and variable feature consumption units can entail a risk about power system stability. Thanks to the applications of smart grid technology, the balance of variable generation and consumption can manage in the best way. So system stability can be achieved.

In this study, the effects of variable and unpredictable distributed generation and variable consumption units on system stability are investigated. First of all, hypothetical generation and consumption profiles have been formed to reflect the uncertainties in generation and consumption. Then, selected IEEE power systems have modified to add these profiles to establish stability testing systems. While voltage stability was examined through using uncertain changes in the distributed generation and consumption structure, rotor angle and frequency stability were examined through the failure scenarios for each system.

As a result of the study, distributed generation and variable consumption form different effect for each system. According to the analysis procedure, it has been observed deteriorations in system stability, as well as improvements.

KEYWORDS: Smart grid, distributed generation, variable consumption, power system stability.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı yöneten ve çalışmanın her aşamasında ilgi ve desteğini esirgemeyen hocam Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ’a;

Bu tez çalışmasını “Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tez projesini (Proje No: 745) destekleyen İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne;

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve sürekli yanımda olup bana destek olan babam M. Kurtuluş TUTTOKMAĞI’na, annem Nilgün TUTTOKMAĞI’na, abim Cercis TUTTOKMAĞI’na, ablam Özlem YILDIRIM’a ve eniştem Ümit YILDIRIM’a

sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	5
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı	10
2. KURAMSAL TEMELLER.....	13
2.1. Akıllı Şebekelere Genel Bakış	13
2.2. Akıllı Şebeke Özellikleri.....	14
2.3. Akıllı Şebekenin Alt Yapısı	15
2.3.1. Akıllı Üretim	15
2.3.2. Akıllı İletim	16
2.3.3. Akıllı Dağıtım	17
2.3.4. Operasyon Çalışma Alanı.....	18
2.4. Dünyadaki ve Türkiye’deki Akıllı Şebeke Çalışmaları	18
2.5. Güç Sistemi Kararlılığı.....	21
2.5.1. Rotor açısı kararlılığı.....	22
2.5.2. Gerilim kararlılığı.....	23
2.5.3. Frekans kararlılığı	27
2.6. Akıllı Şebekelerde Güç Sistemi Kararlılığı.....	28
2.6.1. Dağıtık üretim uygulamaları	29
2.6.2. Dağıtık enerji üretiminin avantajları	31
3. MATERYAL VE YÖNTEM	37
3.1. Materyal	37
3.1.1. Kararlılık Analizinde Kullanılan Test Sistemlerinin ve Sistemlere Ait Profillerin Tanıtılması	37
3.2. Yöntem.....	43
3.2.1. Kararlılık Analizi.....	43
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	48
4.1. 9 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	48
4.2. 14 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	58
4.3. 30 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	66
4.4. 39 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
6. KAYNAKLAR.....	90
7. EKLER	95
EK 1. JENERATÖR DATA.....	95
EK 2. ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGELER VE KISALTMALAR

B	İletim Hattı Süseptansı
I_{ii}	Barasının Akımı
I_i^*	Akım Eşleniği
J	Jacobian Matrisi
n	Bara sayısı
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
R	İletim Hattı Direnci
X	İletim Hattı Reaktansı
Y_{ii}	Barasının Gerilimi
y_{ij}	i ve j Baraları Arası İletim Hattı Admitansı
ΔV	Gerilimdeki değişim
δ	Rotor Açısı Değeri
ω	Açısal Hız
t_c	Arıza Temizlenme Süresi
H	Eylemsizlik / Atalet Sabiti
BM	Birleşmiş Milletler
ETP	Avrupa Akıllı Şebekeler Teknolojisi Platformu
FACT	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
Hz	Hertz
ICE	Uluslararası Elektrik Komisyonu
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
MW	MegaWatt

MVAR	MegaVoltAmperReaktif
NIST	Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
PV	Üretim Barası
PQ	Tüketim Barası
STATCOM	Statik Senkron Kompansatör
SVC	Statik Reaktif Güç Kompansatör
TSCS	Kontrollü Seri Kompansatör
VFT	Değişken Frekans Transformatörü



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Akıllı şebeke kavramsal modeli [13]	4
Şekil 2.1.	Akıllı şebeke teknolojileri [44]	13
Şekil 2.2.	Akıllı üretim [48]	16
Şekil 2.3.	Akıllı iletim [48]	17
Şekil 2.4.	Operasyonel çalışma alanı [48]	18
Şekil 2.5.	Güç sistemleri kararlılığının sınıflandırılması	21
Şekil 2.6.	Senkronlama ve sönmüleme momenti değişimi [53]	23
Şekil 2.7.	Dağıtık üretim çeşitleri	30
Şekil 2.8.	Dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ile birlikte enerji akışı [59]	33
Şekil 2.9.	Dağıtık üretimin şebeke entegrasyonunda kullanılan bağlantı araçları ..	35
Şekil 3.1.	(a) 9 baralı sistem ait, (b) 14 baralı sistem ait, (c) 30 baralı sistem ait, (d) 39 baralı sistem ait mevcut durum diyagramları	40
Şekil 3.2.	(a) 9 baralı sistem için kullanılan, (b) 14 baralı sistem için kullanılan, (c) 30 baralı sistem için kullanılan, (d) 39 baralı sistem için kullanılan saatlik ortalama üretim profilleri	41
Şekil 3.3.	(a) 9 baralı sistem için kullanılan, (b) 14 baralı sistem için kullanılan, (c) 30 baralı sistem için kullanılan, (d) 93 baralı sistem için kullanılan saatlik ortalama tüketim profilleri	42
Şekil 3.4.	Çok makineli sistem diyagramı	43
Şekil 4.1.	9 baralı modifiye güç sistemleri	50
Şekil 4.2.	Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	52
Şekil 4.3.	Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	52
Şekil 4.4.	Dağıtık üretimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	52
Şekil 4.5.	Jeneratör rotor açısı değişimleri	54
Şekil 4.6.	4 nolu baraya yakın 4-5 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)	56
Şekil 4.7.	Frekans değişimi	57
Şekil 4.8.	14 baralı modifiye güç sistemleri	59
Şekil 4.9.	Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	61
Şekil 4.10.	Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	61
Şekil 4.11.	Değişken tüketimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	61
Şekil 4.12.	Jeneratör rotor açısı değişimleri	63
Şekil 4.13.	7 nolu baraya yakın 4-7 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)	64
Şekil 4.14.	Frekans değişimi	65
Şekil 4.15.	30 baralı modifiye test sistemleri	68

Şekil 4.16. Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi.....	69
Şekil 4.17. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi.....	69
Şekil 4.18. Değişken tüketimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi.....	70
Şekil 4.19. Jeneratör rotor açısı değişimleri.....	72
Şekil 4.20. 10 nolu baraya yakın 10-17 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye).....	73
Şekil 4.21. Frekans değişimi	75
Şekil 4.22. 39 baralı modifiye test sistemleri	77
Şekil 4.23. Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi	79
Şekil 4.24. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi.....	79
Şekil 4.25. Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi... ..	80
Şekil 4.26. Jeneratör rotor açısı değişimleri.....	82
Şekil 4.27. 1 nolu baraya yakın 1-2 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye).....	83
Şekil 4.28. Frekans değişimi	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Elektrik kesinti kronolojisi	24
Çizelge 4.1.	9 baralı test sistemi karakteristikleri	49
Çizelge 4.2.	14 baralı test sistemi karakteristikleri	58
Çizelge 4.3.	30 baralı test sistemi karakteristikleri	67
Çizelge 4.4.	39 baralı test sistemi karakteristikleri	76



1. GİRİŞ

Günümüzün yaşam standartları düşünüldüğünde elektrik enerjisi vazgeçilmez bir kavramdır. Kullanımının kolay olması ve istenildiğinde diğer enerji çeşitlerine çevrilebilmesi elektriğin vazgeçilmez bir kavram olmasında etkili olmuştur. Bunun yanı sıra ülkelerin sosyal, ekonomik ve çevresel kalkınmasıyla doğrudan ilişkili olması da vazgeçilmez olmasında etkili olmuştur.

Bugün kullanmakta olan elektrik sistemleri merkezi üretimli sistemlerdir. Bu sistemler, odak noktasında elektrik enerjisini üreten büyük güçlü santrallerden meydana gelen üretim kısmının, üretilen enerjinin taşınması için kullanılan kilometrelerce uzunluktaki iletim kısmının ve enerjinin en son noktadaki tüketiciye ulaşmasını sağlayan radyal yapıdaki dağıtım kısmının bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Bu sistemlerde, üretimin önemli bir rol oynamasından dolayı elektrik üretim santralleri petrol, kömür ve doğalgaz gibi birincil/geleneksel enerji kaynaklarının yoğun olduğu bölgelerde kurulmaya devam etmektedir. Bu santrallerde üretilen elektrik enerjisi, frekans, gerilim ve kayıplar dikkate alınarak yüksek gerilim seviyelerinde kısa veya uzun iletim hatları üzerinden tüketim bölgelerine taşınmaktadır [1]. Bugün hala elektrik enerjisi temini için vazgeçilemeyen bu yapılar, Nikola Tesla'nın tasarımları baz alınarak 1890'lı yıllarda kurulmaya başlanmıştır. İlk zamanlarda, elektrik şebekeleri belirli bir coğrafi alanı kapsayacak şekilde kurulmuştur. Zaman içerisinde bu şebekeler, gelişme kaydederek merkezi üretime, tek yönlü iletime ve talep kontrolüne dayalı bir yapı haline dönüşmüştür. 20. yüzyılın sonlarına kadar popüler olan bu yapı üzerinden tüketici talepleri karşılanmıştır [2], [3].

Dünya'daki hızlı nüfus artışı ve sanayileşme gibi modern toplum yapısını etkileyen değişikliklerle birlikte teknolojiye gelişmeler nedeniyle elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Sürekli artan bu talep, mevcut şebekelere yeni üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin eklenmesini de beraberinde getirmektedir. Böylece mevcut şebekeler kendi sınırlarını zorlayacak şekilde karmaşık hale gelmektedir. 2008 yılında yapılan uluslararası bir araştırmaya göre 2030 yılına kadar dünyadaki enerji tüketiminin %50 oranında artacağı ifadesinden

yola çıkarak gelecekte mevcut elektrik şebekelerinin daha da karmaşık hale gelmesi beklenmektedir [4].

Günümüzde artan enerji talebinin sürekli, kaliteli ve ekonomik bir şekilde karşılamak için geleneksel enerji kaynakları olarak ifade edilen fosil yakıt kaynakları kullanılmaktadır. Dünya'daki elektrik enerjisi üretiminde % 66,5 ile en büyük paya sahip olan kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıt kaynakları hızla azalmaktadır [5]. Bu kaynakların aşırı kullanımından dolayı yakın bir gelecekte tükenmesi tehlikesi varlık göstermektedir. Bu tehlikenin varlığı enerji fiyatlarında beklenmedik artış ve dalgalanmalara neden olmaktadır. Bunun yanı sıra fosil yakıt kaynaklarının en büyük tehlikesi bu kaynakların kullanımı sonucu ortaya çıkan gazların sera gazı etkisi oluşturmalarıdır. Bu ise küresel ısınmaya yol açarak insanlığı ve gezegenimizi tehdit etmektedir. Fosil yakıtlara alternatif olarak sunulan ve büyük kazançlar sağlayan nükleer enerjinin de her türlü önlemin alınmasına rağmen 2011 yılında meydana gelen Fukushima nükleer felaketi ile ne kadar tehlikeli olduğu tecrübe edilmiştir [6]. Ayrıca fosil ve nükleer yakıt kaynaklarının ham madde olarak kullanıldığı üretim tesisleri, üretim verileri açısından çok verimli gözükse de üretilen enerjinin mesken ve sanayi tüketicisine ulaştırılması için uzun iletim hatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan uzun iletim hatları beraberinde yüksek iletim kayıplarını ve ekstra iletim maliyetlerini getirmektedir. Bunların yanı sıra hâlihazırda kaynaklarımızın yetersiz olmasından dolayı ülke olarak elektrik enerjisi üretiminde ithal edilen fosil yakıt kaynaklarının ilk sırada yer alması da özele indirgendiğinde sorun oluşturmaktadır [5].

Bir yandan elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaya devam ederken bir yandan da fosil ve nükleer yakıt kaynaklarından dolayı yaşanan olumsuzluklar enerji sektörünün yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesine neden olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının

- Ekstra bir üretim süreci gerektirmeden temin edilmesi,
- Bu kaynakların yakıt maliyetlerinin olmaması (rüzgâr, güneş vb.) ve kendilerini yenileyebiliyor olması,
- Elektrik üretimi sırasında geleneksel kaynaklara kıyasla çevre kirliliği ve küresel ısınma üzerinde daha az olumsuz etkiye sahip olması,
- Dağıtık üretim sayesinde iletim ve dağıtım hatlarındaki kayıp ve maliyetleri azaltması,

- Kısa sürede işletmeye alınması ve sonrasında eklemeler yapılabilmesi

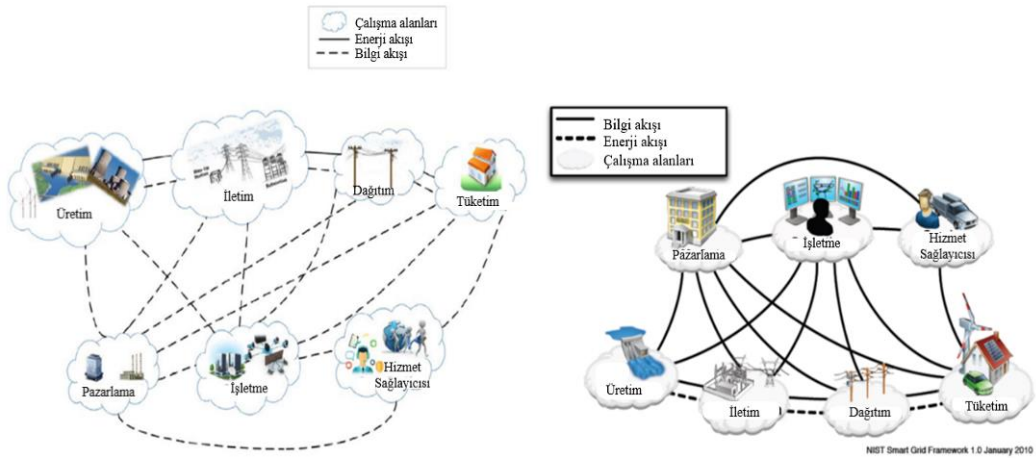
gibi hem üretici hem de tüketici açısından teknik, çevresel ve ekonomik birçok avantaja sahiptir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının da elektrik şebekelerine etkileri sınırlıdır. Başlarda düşük üretim kapasitelerinden dolayı göz ardı edilen yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmak için geniş alanları kapsayacak şekilde oluşturulan üretim tesislerinin kurulumu aşırı maliyetlidir. Güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki aralıklı ve öngörülemeyen yapıları da elektrik şebekesinde ani değişikliklere neden olmaktadır [7]. Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynaklarının dağınık ve ana tüketim merkezlerine uzak bir coğrafi yapıda olması üretilen enerjinin tüketim merkezlerine taşınması esnasında geleneksel kaynaklarda olduğu gibi iletim maliyeti ve kayıpların fazla olmasına yol açmaktadır. Bahsedilen bu faktörlerden dolayı yenilenebilir kaynakların mevcut elektrik şebekelerine entegrasyonunda bazı zorluklarla karşılaşılmasına neden olmaktadır.

Kısaca aşağıdaki nedenlerden dolayı enerji sektöründe yenilikçi çözümlerin ve modernizasyonun kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır [8], [9] :

- 21. yüzyılın başlangıcından beri fosil yakıt kaynaklarının miktarındaki azalma ve bu kaynakların kullanımı sonucu ortaya çıkan çevresel sorunların insan yaşamı için büyük tehdit oluşturması,
- Mevcut elektrik şebekelerinin yeterince esnek olamaması, sık kesinti ve sistem çökmelerine meyilli olması,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye dâhil edilmesinde zorlukların yaşanması,
- Kayıp/kaçak oranlarının fazla olması,
- Mevcut şebekeleri yapılandırmak için önemli yatırımların yapılması,
- Bilgisayar ve iletişim ağlarındaki teknolojik gelişmelerin mevcut elektrik şebeke yapılarına yeterince adapte edilememesi.

Yaşanılan zorluklar ve modernleşme isteği toplumu ve endüstriyi daha bilgilendirici, akıllı ve otomatik işlemlere imkân sunabilen modern güç sistemleri için motive etmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu akıllı şebekeler, modern ve gelişmiş elektrik şebekeleri olarak kabul edilmektedir [10], [11]. Gelecekteki şebeke yapısını oluşturmaya yönelik vizyon ve strateji geliştirme çalışmaları için kurulan Avrupa

Akıllı Şebekeler Teknolojisi Platformu'na (ETP) göre akıllı şebekeler, düşük kayıp oranlarıyla birlikte yüksek seviyeli güvenilirlik, kaliteli, ekonomik, verimli ve sürdürülebilir güç sistemini sağlamak için kendine bağlı tüm paydaşların (üretici, tüketici ve üretken tüketici) maliyet etkin olacak biçimde sisteme entegre edebilen ve anlık takip edilebilme teknolojisiyle güçlendirilmiş elektrik ağı olarak ifade edilmektedir [12]. Akıllı şebekelerin çalışma çerçevesi, BM Ticaret Departmanı bünyesinde kurulmuş olan NIST (Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü) tarafından, ICE (Uluslararası Elektrik Komisyonu) ve IEEE'nin (Elektrik elektronik Mühendisleri Enstitüsü) tavsiyeleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. NIST tarafından dünyaya ilan edilen akıllı şebekelerin kavramsal modeli şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1. Akıllı şebeke kavramsal modeli [13]

Bu model doğrultusunda akıllı şebekeler şu özelliklere sahiptir:

- Kendi kendini onarabilme,
- Tüketici dostu olma,
- Siber ve fiziksel saldırılara karşı dayanıklı olma,
- Kaynak kullanımını optimize etme,
- Güçlü iki yönlü iletişim, gelişmiş sensörler ve dağıtık bilgi teknolojisi kullanımına olanak sağlama,
- Enerji dağıtımı ve kullanımı bakımından daha kaliteli, etkili, güvenilirlikli ve güvenli olma,
- Bilgisayar ve veri iletişim ağları teknolojilerini kullanarak ölçme, uzaktan okuma ve izleme yapılabilme,

- Çevre dostu olma.

Bu özellikler sayesinde birçok kazanım elde edilmektedir. Bu kazanımlar, sistemin daha verimli çalışması, maliyetlerin azalması, enerji verimliliğinin artması, sera gazı etkisinin azalması, kesinti sayısı ile kesinti süresinin azalması, kayıp/kaçak oranlarının düşmesi, enerji kalitesinin artması, üretim ve depolama sistemlerinin daha iyi yönetilmesi, akıllı sayaç okuma ve yük yönetimi ile gerçek zamanlı arz-talep yönetimi şeklinde sıralanabilir.

Geleneksel şebekelerle karşılaştırıldığında akıllı şebekeler birçok üstünlüğe ve kazanıma sahiptir. Buna rağmen mevcut şebekelerde olduğu gibi şebeke çalışmasında önemli role sahip olan kararlılık problemleri, modern şebekeler olarak bahsedilen akıllı şebekelerde de rastlanılması olasıdır. Özellikle akıllı şebekelere geçiş sürecinde ve sonrasında geleneksel kaynaklara dayalı üretimin yerini aralıklı ve belirsiz yapıya sahip yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretime bırakması güç sistemlerinde yeni bir boyuta geçilmesine neden olacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretimin kullanımındaki artışa ek olarak, bilgi iletişim teknolojilerinin yoğun bir şekilde kullanılması sonucu güç sistemi bileşenlerinin etkileşimleri artıracığı ifade edilmektedir. Yaşanılması beklenen bu gelişmeler akıllı şebekelerde güvenilirlik açısından tehdit oluşturmaktadır. Bu yüzden akıllı şebekenin vaat ettiği esnek, kesintisiz ve ekonomik enerji temini için meydana gelebilecek kararlılık problemlerinin minimum seviyede tutulmasına yönelik stratejilerin oluşturulmasını gerekli kılmaktadır.

1.1. Literatür Taraması

Güç sistemleri, ilk kuruldukları dönemlerde merkezi üretime sahip basit bir yapıdayken nüfus ve sanayileşmedeki artışa bağlı olarak ortaya çıkan yüksek enerji talebini karşılayabilmek için yeni birimlerin eklenmesiyle büyüyerek karmaşık hale gelmiştir. Güç sistemlerinde yaşanan bu değişim bir takım problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu problemlerden biri de kararlılık problemidir.

Güç sistemi kararlılığı, sistem mühendisleri tarafından ilk olarak 1920’de önemli bir problem olarak görülmeye başlanmıştır. 1956 yılında ilk defa bilgisayar teknolojisi kullanılarak güç sistemi kararlılığını inceleyen bir analizi programı geliştirilmiştir [14]. 2000’li yıllara gelindiğinde ise gelişen teknolojiyle birlikte

yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğun bir şekilde kullanılmasına imkân veren akıllı şebekelerin ortaya konmasıyla güç sistemi kararlılığı konusu farklı bir boyuta taşınmıştır. Yaşanılan bu değişim güç sistemi kararlılığının, sistem araştırmalarında geleneksel ama her zaman popüler bir konu olmasını sağlamıştır. Yakın geçmişte yapılan güç sistemi kararlılık çalışmalardan bazıları ise şunlardır:

2002 yılında Slootweg ve Kling; maksimum rotor hızı sapmasını ve salınım süresini geçici kararlılık analizi için bir gösterge olarak kabul etmiştir. Çalışmada 39 baralı test sistemine sırasıyla %0, %9, %17, %23, %29 ve %33 oranında dağıtık üretim entegre edilerek geçici kararlılık analizi yapılmıştır [15].

2004 yılında Reza vd.; 39 baralı test sistemine toplam dağıtık üretimin toplam üretime oranı sonucu elde edilen değerler %0, %3.33, %6.67, %10, %13.33, %16.67, %20, %23.33, %26.67, %30 ve %33.33'ü şeklinde dağıtık üretim kullanım oranları uygulamıştır. Çalışmada dağıtık üretimin iletim hatları üzerindeki güç akışını doğal yoldan sınırlandırdığı ve geçici kararlılığı iyileştirici bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir [16].

2005 yılında Azmy ve Erlich; 110 ve 380 kV yüksek gerilim bölgesinde iki adet senkron jeneratör; 10 ve 0.4 kV orta gerilim seviyesinde ise sabit yükler, yakıt hücreleri ve mikro türbinlerin bulunduğu bir sistem üzerinden güç sistemi kararlılığını incelemiştir. Çalışmada dağıtık üretim sistemlerinin katılım oranları sırasıyla %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve % 28.3 şeklinde belirlenmiştir. Oluşturulan arızalar sonucu senkron jeneratörlerin rotor açıları üzerinden geçici kararlılık analizi, yüksek gerilim tarafına ekstra yük dahil edilerek gerilim ve frekans kararlılığı incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda dağıtık üretimin, oranlarına bağlı olarak sistem kararlılığını hem olumlu hem de olumsuz etkileyebileceği görülmüştür [17].

2006 yılında Chen vd.; dağıtık üretimli dağıtım sisteminin yük akışını hesaplamak için yeni bir duyarlılık matrisi elde etme yöntemi açıklamıştır. Bu yöntemden yola çıkarak mevcut yükün orijinal yüke oranı olan yük artan ölçeği adı verilen bir gerilim kararlık indeksi öne sürülmüştür. 90 baralı test sistemi üzerinden 3 MW güce sahip dağıtık üretim sistemleri entegre edilerek indeks değerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonucu dağıtık üretimin gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır [18].

2010 yılında Khosravi vd.; 39 baralı test sistemini kullanarak toplam dağıtık üretimin toplam yük oranı sonucu elde edilen katılım oranı üzerinden geçici kararlılık analizi yapmıştır. Sırasıyla %9, %10 ve %31 kullanım oranları sisteme uygulandığında %31' e kadarki kullanım oranlarında rotor açısı ve hızındaki salınımların kabul edilebilir bir seviyede iken %31 ve üzeri kullanımlarda sistemde kararsızlık gözlemlenmiştir [19].

2010 yılında Wanik vd.; yakıt hücreleri ve mikro türbinleri dağıtık üretim sistemi olarak kabul etmiş olup test sistemine sırasıyla %0, %40, %80 ve %110 seviyelerinde dağıtık üretimle birlikte 25 MW'lık rüzgar çiftliği de entegre edilerek oluşturulan arızalarla geçici kararlılık gözlemlenmiştir. Çalışma sonucu dağıtık üretimin toplam üretimdeki payına bağlı olarak sistem kararlılığını iyileştirdiği ifade edilmiştir [20].

2011 yılında Bhattacharya vd.; 14 baralı güç sistemi üzerinden oluşturulan PV ve PQ kontrol modu modelleri aracılığıyla güneş santralinin etkisini incelemiştir. PV kontrol modundaki güneş santralinin kararlılık açısından sistemi olumsuz etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır [21].

2011 yılında Venayagamoorthy; geleceğin güç sistemi olarak ifade edilen akıllı şebekelerin hem yenilenebilir enerji kaynaklarında hem de yük talebinde artışları göz önünde bulundurularak enerji hizmetlerinde sistem parametrelerinin hızlı ve dinamik yapıda gerçekleştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Ayrıca akıllı şebeke bünyesindeki çalışma ve kontrol sistemlerinin, sistemde var olan belirsizliklerin ve değişkenliğin üstesinden gelebilecek hesaplanma sistemleri oluşturularak şebeke güvenilirliğine katkıda bulunacağı inanılmaktadır [22].

2012 yılında Tsado vd.; akıllı şebeke teknolojileri ve gelecekte yaşanabilecek zorluklar hakkında bir değerlendirme yapmıştır. Sistem kararlılığının artırılmasına yönelik olarak talep taraf yönetimi üzerinde model çalışmaları yapılmıştır [23].

2012 yılında Sofla ve King; akıllı şebeke ortamında mikro şebekelerin sistem kararlılığını sağlamak için depolama cihazlarının, elektrikli araçların ve çeşitli dağıtık enerji kaynaklarının göz önünde bulundurulduğu bir kontrol stratejisi geliştirmiştir. Yapılan çalışmalarda akıllı şebekeye bağlı mikro şebekenin kararsızlığa neden olabileceği ifade edilmiştir [24].

2013 yılında Yang vd.; 33 baralı bir test sistemi için gerilim kararlılık indeksi geliştirmiştir. Sırasıyla 0, 100, 200, 300, 400, 500 ve 600 kW rüzgâr gücünün farklı

konumlara entegrasyonu ile elde edilen kararlılık indeksi sonuçları üzerinden gerilim kararlılığı değerlendirilmiştir [25].

2013 yılında Xu vd.; Thevenin eşdeğerini kullanarak 2 baralı sistemdeki yük gerilimi ve dağıtık üretim arasındaki analitik ilişkiyi açıklamıştır. Dağıtık üretim kullanım oranındaki % 50'ye kadarki artışın yük kapasitesi ve gerilim kararlılığı üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir [26].

2013 yılında Jan-Ngurn ve Bhumkittipich; Tayland enerji dağıtım sistemi üzerinden rüzgâr gücünün sisteme bağlanması önce ve sonrası durumları için gerilim kararlılığı analizini incelemiştir. Sürekli güç akış analizini kullanarak gerçekleştirilen çalışmada rüzgâr gücü ile sistemin maksimum yüklenme sınırının düştüğü sonucuna varılmıştır [27].

2014 yılında Sharma vd.; dağıtık üretimin bağlantı tipi ve boyutları göz önünde bulundurularak geçici kararlılık üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada P.M. Anderson 9 baralı sistemi hem dağıtık üretim birimleri hem de ekstra yüklerle modifiye edilmiştir. Dağıtık üretim birimlerinin sistem içerisinde dâhil edilmesi toplam dağıtık üretimin sistemdeki tüm üretime oranı üzerinden geliştirilen yüzdelere yapılmıştır. Gerçekleştirilen rotor hızı ve açısı analizleri sonucunda dağıtık üretim sistemlerinin %40'ın üzerindeki çıkamadığı sonucu elde edilmiştir [28].

2014 yılında Wu vd.; rüzgâr santrallerini içeren güç sisteminin geçici kararlılığını değerlendirmek için stokastik bir model geliştirerek IEEE 39 baralı güç sistemi aracılığıyla test etmişlerdir. Test sonucunda bazı senaryolarda güç sistemi dengeli iken bazı durumlarda bozulmalara bağlı kararsızlıklar yaşandığı gözlemlenmiştir [29].

2014 yılında Dierkes vd.; Alman enerji sistemindeki yenilenebilir elektrik üretimi ve akıllı şebekeye geçiş sürecindeki değişiklikler üzerine çalışmışlardır. Meydana gelen ve gelmesi olası değişikliklerinde birbirine bağlı güç sistemlerinin kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [30].

2014 yılında Gopakumar vd.; dağıtık üretim teknolojileri ile akıllı şebekedeki olası kararlılık problemleri tartışılmıştır. Yenilenebilir enerji tabanlı dağıtık üretim teknolojilerinin geleneksel enerji santrallerine göre farklı özellikleri, akıllı şebeke için birçok operasyonel kararlılık endişesine yol açabileceği vurgulanmıştır [7].

2015 yılında Zoghلامي vd.; sürekli güç akışı analizi yaparak 9 baralı güç sistemdeki gerilimlerini ve yüklenme değerlerini elde etmişlerdir. Sistem bünyesindeki yükler kademeli olarak değiştirilerek oluşturulan senaryolar için sistemde meydana gelen değişimler incelenmiştir [31].

2016 yılında Wang ve Huang; rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra geleneksel kaynakların yüksek penetrasyonunun neden olduğu potansiyel kararlılık sorunlarını incelemişlerdir. Çalışmada rüzgâr ve hidrolik güç entegrasyonlu akıllı bir şebeke olarak düşünülen 9 baralı sistem üzerinden akıllı şebekenin sağladığı üretim ve kontrol teknolojilerinin neden olabileceği olası salınımlar incelenmiştir. Sistemde meydana gelen kararsız salınımların rüzgâr enerjisinin en yüksek olan değerlerinde meydana geldiği ve bu salınımların tüm sisteme yayıldığı gözlemlenmiştir [32].

2016 yılında Yu vd.; Çin'in gelecekteki akıllı şebekesinin temelini oluşturulacağı düşünülen Ultra Yüksek Gerilimli (UHV) bağlantılar üzerinde çalışmışlardır. Ultra Yüksek Gerilimli bağlantılar, iletişim gereksinimlerini ve iletişim hatalarının sistem performansı üzerindeki etkisini analiz etmek için bir örnek olarak kullanılmıştır. İletişim gecikmesinin, güç sisteminin kararlılığı üzerindeki etkisi niceliksel ve niteliksel olarak analiz edilmiş ve iletişim gecikmesinin güç şebekesinin kararlılığını olumsuz yönde etkileyebileceği ifade edilmiştir [33].

2016 yılında Pollock ve Hill; Kuzey İrlanda elektrik sistemine bağlı 940 MW dağıtık üretim ile yaz dönemindeki talep edilen güçteki 505 MW ekstra artışın sistem kararlılığı üzerindeki etkisi ve reaktif güç kontrol modları üzerinde yoğunlaşmışlardır [34].

2016 yılında Rath, Ghatak ve Goyal; dağıtık üretim sistemlerinin rastgele yerleşmelerinden kaynaklı sistem kararlılığı ve kararlılık analizini etkilediği ifade etmişlerdir. Bunun önüne geçmek için gerilim profili iyileştirme ve hat kaybını azalma indeksleri önerilerek bu indeksler doğrultusunda 14 baralı test sistemi üzerinden dağıtık üretim entegrasyonu yapılmıştır. Bu entegrasyonun gerilim kararlılığı üzerinde iyileştirici etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir [35].

2016 yılında Angelim ve Affonso; Brezilya elektrik sistemini temsil eden 33 ve 65 baralı test sistemlerine belirli yüzdelere entegre edilmiş dağıtık üretimin gerilim kararlılığı üzerinde hem konumu hem de teknolojisi açısından iyileştirici etkiye sahip olabileceği gibi bozucu etkilere de sahip olabileceği ifade etmişlerdir [36].

2017 yılında Samanta ve Chanda; akıllı bir güç şebekesinin kritik çizgilerini belirlemek için oluşturdukları gerilim indeksinin dahil edildiği 9 baralı sistem üzerinden araştırma yapmışlardır. Dağıtılmış üretimin küçük veya büyük ölçekli entegrasyonun, rotor açısı, voltaj ve frekans kararlılığı ile ilgili değişiklikler bakımından güç sistemi kararlılığı üzerinde kayda değer bir etki sağlayabileceği ifade edilmiştir [37].

2018 yılında Eleschová vd.; akıllı şebekelerdeki kararlılık çalışmalarının, elektrik enerjisinin iki yönlü akışını sağlayan dağıtılmış enerji kaynağının artan nüfuzuna bağlı olarak önemli hale geldiği ifade edilen çalışmada güç sistemindeki değişimleri incelemişlerdir. Akıllı şebekelerdeki dağıtım sisteminin geliştirilmesi iletim sistemindeki kısa devre gücünün azalmasına dolayısıyla güç sisteminin gücünün azalmasına neden olacağı ifade edilerek bu durumda gerilim kararlılığı rezervi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olacağı sonucuna varılmıştır [38].

2018 yılında Zhao vd.; akıllı şebeke oluşturmak için önemli bir teknik araç olarak kabul görülen güç elektroniği teknolojisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada akıllı şebekedeki güç elektroniği teknolojisinin makul ve verimli kullanımı, güç şebekesinin güvenliğini, kararlılığını ve ekonomik çalışma seviyesini etkili bir şekilde artırabileceği ifade edilmiştir [39].

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Yapılan literatür çalışmalarına göre, belirli bir yüzde veya katsayı üzerinde güç sistemine dâhil edilen yenilebilir kaynaklar içerisinde sistem kararlılığı üzerinde daha baskın bir etkiye sahip olan rüzgâr ve güneş enerjisidir. Hem rüzgâr enerjisinin hem de güneş enerjisinin öngörülemeyen ve aralıklı bir yapıya sahip olmaları bu kaynaklardan üretilen gücün, iklimsel ve çevresel nedenli doğal etkilerle değişmesine ve buna bağlı olarak da şebekeye enjekte edilen gücün değişmesine yol açmaktadır. Bu durum ise bu tür kaynakların sistem kararlılığı üzerinde değişken ve belirsiz etkilere sahip olmasına neden olur [40].

Yenilenebilir enerji tabanlı dağıtık üretimden kaynaklı kararlılık problemlerinin oluşumunda, bu kaynakların şebeke içerisindeki entegrasyon oranı ve aralıklı yapısı etkili olmaktadır. Bunlara ek olarak temel bir etkiye sahip olan atalet/eylemsizlik (inertia) sabiti göz ardı edilmemelidir [7]. Özellikle dağıtık üretim sistemlerinin

şebekeye bağlantı durumları sistem kararlılığı bakımından incelendiğinde kalıcı durumlarda benzer etkiler göstermekle birlikte geçici durumlarda oldukça farklı etkiler gözlemlenebilir. Bu fark genel olarak dağıtık üretimin sistem kararlılığı için gerekli olan atalet miktarındaki farktan kaynaklanmaktadır. Güç sisteminde herhangi bir arıza meydana geldiğinde sistemin yeniden kararlı hale getirilebilmesi için gerekli olan atalet bazı dağıtık üretimlerde çok düşüktür. Bu durumda sistemde bir arızayla karşılaşıldığında sistemi kararlı hale getirmek için gerekli olan senkronlama ve sönümleme momenti sadece senkron jeneratörlerden sağlanmaya çalışılacağı için, senkron jeneratörlerin hızlanmasına, sistemde meydana gelecek olan frekans ve gerilim salınımları karşısında senkron jeneratörlerin aşırı yüklenilmesine ve sonrasında da tüm sistemin kararsız hale gelmesine neden olabilir.

Akıllı şebeke ve yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmeler üretim kaynağı çeşitliliğinin ve miktarının artmasına ek olarak üretken tüketici kavramının yaygınlaşmasına imkân sağlamaktadır. Geleneksel üretim kaynaklarının yerini hızla yenilenebilir enerji tabanlı üretken tüketici profiline bırakması sürekli, güvenilir ve ekonomik enerji hizmeti ile coğrafi sınırlamaları ortadan kaldırması gibi avantajlara sahip olmaktadır. Buna karşın tek yönlü enerji akışından çift yönlü enerji akışına doğru giden şebeke yapısı başta güç akış yönü olmak üzere güç kalitesi, koruma ve kararlılık açısından sistem içerisinde anlık etkilere neden olabilir [41]. Bununla birlikte akıllı şebekeler tarafından vaat edilen daha esnek yük talebi ile güç akışlarında planlanmış veya planlanmamış değişiklikler hem frekans hem de gerilim değerini etkilemektedir. Bu etki bazen sistemde kısa süreli kararsızlık problemlerine neden olabileceği gibi, bazen de sistem çökmesi gibi ciddi kararsızlık problemlerine de neden olmaktadır [42].

21. yüzyıldaki küresel iklim değişikliği sorunu ve enerji güvenliği açısından akıllı şebekenin son dönemde popüler bir kavram olmasıyla gelişen ve gelişmekte olan ülkelerde pilot uygulamalardan gerçek sistem uygulamalarına doğru dönüşümler yapılmaktadır. Bu gelişmelerin yanında, akıllı şebekelerin kararlılığa etkileri konusu önem kazanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 9 baralı, 14 baralı, 30 baralı ve 39 baralı güç sistemleri üzerinden çeşitli modifikasyonlar yapılarak güç sistemi kararlılık analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Özellikle akıllı şebekelerle birlikte enerji talebinin karşılanmasında alternatif olarak sunulan yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık

retimden kaynaklı aralıklı ve belirsiz yapı ile değişken talep yapısının güç sistemi akışında ve g sistemi kararlılığında meydana getireceği olası etkileri incelenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda ilk olarak oluşturulan programın doğruluğunu test etmek amacıyla örnek sistemlerin temel güç akış analizleri yapılmıştır. Daha sonrasında üretim ve tüketimdeki değişkenlikler ile belirsizlikleri yansıtacak şekilde varsayımsal günlük üretim ve tüketim profilleri oluşturulmuştur. Bu profiller seçilen IEEE g sistemleri üzerinde modifiye edilerek test sistemleri elde edilmiştir. Bu sistemler üzerinden çeşitli senaryolar oluşturularak dağıtık üretim ve tüketim yapılarındaki belirsiz değişimin yanı sıra sistemde meydana gelebilecek arızaların güç sistemi üzerindeki güç akışı başta olmak üzere rotor açısı, gerilim ve frekans kararlılığı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Son olarak meydana gelebilecek kararsızlık problemlerinin üstesinden gelinebilmesi için önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Akıllı Şebekelere Genel Bakış

Temelleri 1890'lara dayanan ve hâlihazırda kullanılmaya devam edilen elektrik şebekeleri, ilk olarak sınırlı bir coğrafi alanı besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Zamanla şebekeye bağlı paydaşların artması ve özellikle de son 10 yıldaki teknolojik gelişmelerle birlikte elektrik şebekeleri önemli bir gelişme kaydetmiştir. Yaşanılan bu gelişim beraberinde yüksek enerji tüketimini getirmesiyle birlikte elektrik şebekelerinin maksimum kapasite sınırına yakın çalışmaya zorlanmaktadır. Yapılan araştırmalara göre 2030 yılına gelindiğinde dünyadaki enerji tüketiminde %50 oranında bir artış yaşanacağı tahmin edilmektedir. Bu durum, şebeke kapasite sınırlarının daha çok zorlanmasına dolayısıyla birtakım arıza ve kesinti risklerine karşı sistemin daha savunmasız hale dönüşmesine neden olacağı ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra son dönemde çevresel farkındalığın artması ve buna bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekede daha fazla kullanılma isteği, modern şebeke olarak ifade edilen akıllı şebeke kavramının gelişimine zemin hazırlamıştır.

Yarı iletken teknolojilerinde, haberleşme ve kontrol alanlarındaki gelişmeler dinamik yapıya sahip olan elektrik şebekelerinin dijital bir yapıya dönüşmesine olanak sağlamıştır. Böylece elektrik enerjisinin üretiminden son kullanıcı dağıtım noktasına kadar elektrik şebekesinin her aşamasında teknolojinin yoğun bir şekilde kullanılmasıyla daha verimli, daha güvenilir, daha temiz ve daha yönetilebilir kılınması çabaları akıllı şebeke kavramını doğurmuştur [43].



Şekil 2.1. Akıllı şebeke teknolojileri [44]

21. yüzyılın şebekesi olarak ifade edilen akıllı şebekeler şekil 2.1’de gösterilen dört temel teknoloji katmanı üzerine kurulmuştur. Bilgi teknolojileri katmanı, optimizasyon ve yapay zeka benzeri bilgi teknolojilerine dayalı uygulamaları içeren katman; Haberleşme katmanı, güç ve kontrol katmanları arasındaki iletişim ile veri haberleşme uygulamalarını içeren katman; Kontrol katmanı, güç sistemlerinin kararlılığını koruyarak en iyi durumda çalışmasını sağlayan kontrol uygulamalarını içeren katman; Güç katmanı ise elektrik şebekelerini meydana getiren elektrik üretim, iletim ve dağıtım birimlerini içeren katmandır [44]. Bu katmanlar sayesinde elektrik enerjisinin üretiminde dağıtım sistemindeki son kullanıcıya kadar yazılımsal ve donanımsal teknolojileri içeren kompleks bir şebeke haline gelen akıllı şebekeler, yüksek seviyeli izleme, kontrol, gerçek zamanlı bilgi erişimi ve analizi ile meydana gelebilecek beklenmedik durumlara karşı her türlü stratejiyi geliştirebilecek yapıya sahip olması beklenilmektedir.

2.2. Akıllı Şebeke Özellikleri

Mevcut şebeke eksiklerinin üstesinden gelmek ve teknolojik gelişmelerden daha fazla faydalanabilmesi noktasından hareketle yapılan akıllı şebeke çalışmalarında araştırmacılar, akıllı şebekenin nasıl olması, hangi yapıları içermesi ve nasıl tasarlanması sorularına cevap aramaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu bahsi geçen sorulara cevap olacak şekilde akıllı şebekenin sahip olması gereken özellikler şu şekildedir [45], [46]:

- a) *Sayısal Yapıya Sahip Olma:* Güvenilir ve hızlı ölçüm yapabilmek, kontrol görevlerini gerçekleştirmek, şebekeyi korumak, iletişim sağlayabilmek ve bakım yapabilmek için bütün şebeke sayısal bir platform üzerine kurulması gerekir.
- b) *Gözlemlenebilir, Kontrol edilebilir ve Yönetilebilir Olma:* Mükemmel enerji hizmeti için optimum şebeke yönetimi yapılması gerekir. Optimum şebeke yönetimi için de şebekenin her noktasına erişebilecek şekilde haberleşme ve kontrol teknolojileri kullanılmalıdır. Böylece gerçek zamanlı veri analizleri ile beklenmedik durumların yaratacağı sorunların engellenebilmesi veya etkilerinin azaltılması sağlanır.

- c) *Kendi Kendini İyileştirme*: Şebeke bünyesinde meydana gelebilecek herhangi bir elektriksel bozulma durumunda sistemin hızlı bir şekilde bozulmaya müdahale ederek yaşanabilecek aksaklıklardan nihai kullanıcıların en az düzeyden etkilenmesi gerekir.
- d) *Güvenlik / Güvenilirlik*: Şebekenin, insan, doğal afet ve değişen iklim koşulları gibi dış etkenlerden etkilenmeden veya herhangi bir kesintiye maruz kalmadan çalışmasını sürdürebilmesi gerekir. Ayrıca siber ve fiziksel saldırılara en kısa sürede çözüm üretebilmelidir.
- e) *İletişim*: Akıllı şebekeyle birlikte popüler hale gelen en önemli kavramlardan biri de üretken tüketici kavramıdır. Bu kavramın varlığı şebekenin yapısı ve güvenliği bakımından çift yönlü enerji ve bilgi akışını gündeme getirmektedir. Böylece şebeke güvenilirliği açısından üretici, tüketici ve üretken tüketici arasından sürekli bir iletişim olmalıdır.
- f) *Esneklik*: Merkezi elektrik üretimi, dağıtık elektrik üretimi ve enerji depolama birimlerinden oluşan şebekenin uyumlu çalışabilmesi için değişen şebeke ve iklim koşullarına en kısa sürede adapte olmalıdır.
- g) *Çevreci Yapıda Olma*: Başta verimlilik ve düşük karbon salınımı için yenilenebilir enerji kaynaklarının ve geri dönüşümlü bileşenlerin daha fazla kullanılmasına olanak sağlar.

2.3. Akıllı Şebekenin Alt Yapısı

NIST tarafından oluşturulan akıllı şebekelerin kavramsal modelinde akıllı şebeke, tüm alanların birbirleri ile bağlı olduğu akıllı üretim, akıllı iletim, akıllı dağıtım, kullanıcılar, operasyon alanları, piyasa ve servis sağlayıcıları olmak üzere yedi çalışma alanına ayrılmaktadır [47].

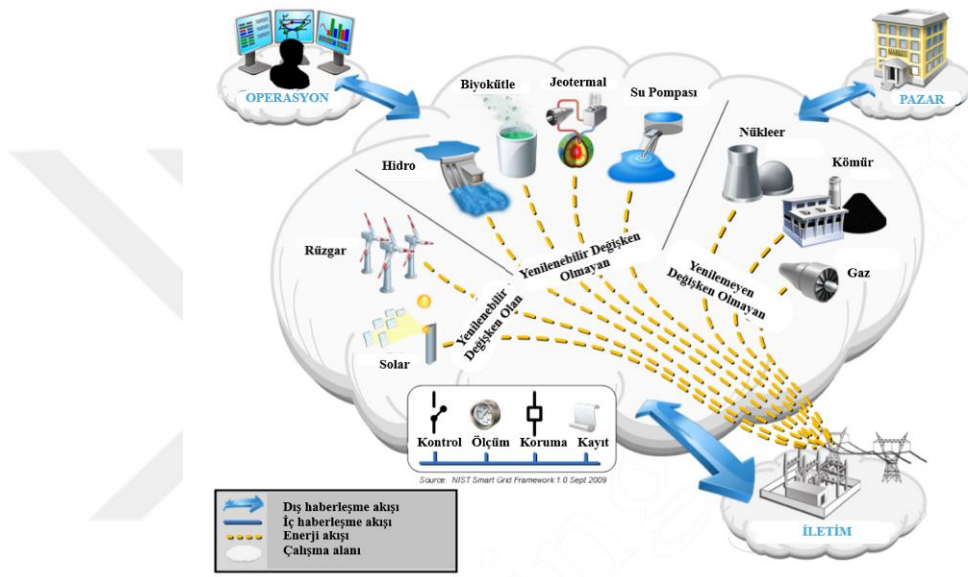
2.3.1. Akıllı Üretim

Akıllı şebeke ile planlanan elektrik üretimi, yenilenebilir ve geleneksel (yenilenemez) enerji kaynaklarının bir arada ve daha etkili bir şekilde kullanılmasıyla sağlanacaktır (Şekil 2.2). Başka bir ifadeyle akıllı şebekelerde elektrik üretimi,

- güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir-değişken kaynaklardan,

- hidrolik, jeotermal ve biokütle gibi yenilenebilir-sürekli kaynaklardan,
- kömür, doğalgaz ve nükleer gibi geleneksel kaynaklardan

en üst düzeyde yararlanarak elde edilecektir. Bu sayede fosil yakıtlardan kaynaklanan olumsuzların (karbon salınımı, kaynak azlığı, yüksek kayıp oranları vb.) önüne geçilebileceği gibi yenilenebilir enerji kaynakları şebekede daha fazla kullanılacaktır. Özellikle de akıllı şebekenin getirisi olan üretken tüketiciye dayalı dağıtık üretim, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırarak şebekedeki kullanım oranı artıracaktır.



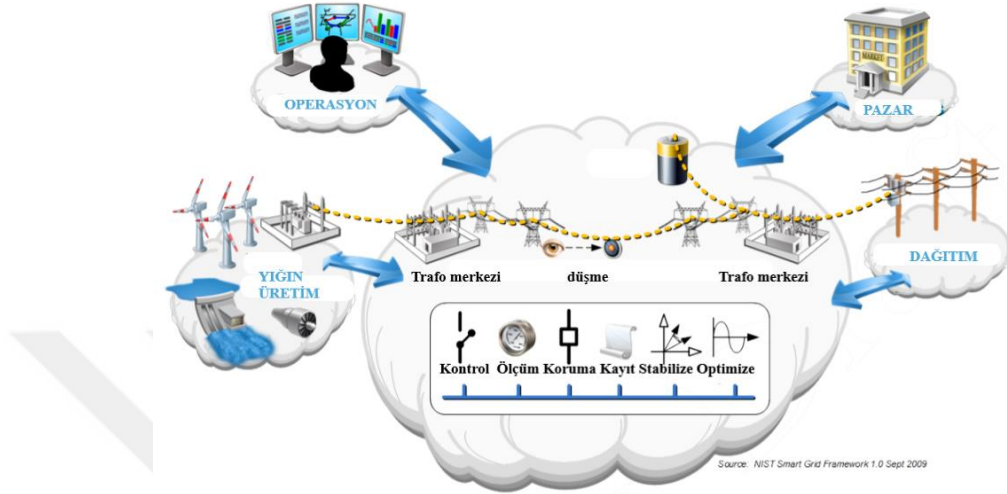
Şekil 2.2. Akıllı üretim [48]

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımıyla birlikte bu kaynaklardan elde edilen fazla enerjinin değerlendirilebilmesi aşamasında dağıtık depolama olarak adlandırılan elektrik depolama sistemlerinden akıllı şebeke ile daha fazla yararlanılması beklenilmektedir. Bu sistemler elektrik enerjisi üretiminin fazla olduğu anlarda enerjinin depolanmasını sağlayacaktır. Böylece olası kesinti, arıza veya enerji yetersizliği gibi durumlarda, dağıtık depolama belirli bir süreye kadar enerji talebini karşılayarak üretim sürekliliğinin sağlanmasına katkı sağlayacağı ifade edilmektedir [49].

2.3.2. Akıllı İletim

Mevcut sistemlerde üretilen elektrik trafolar üzerinden iletim hatları vasıtasıyla taşınmaktadır. Bu noktada eskiyen iletim hatları, artan güç talepleri gibi altyapı

sorunları ve gelişmiş güç elektroniği, iletişim birimleri gibi yenilikçi teknolojiler akıllı iletim sistemlerinin geliştirilmesinde ana etkenlerdir [50]. Geliştirilen akıllı iletim teknolojileri ile iletim hatlarının uzaktan yönetilebileceği gibi aynı zamanda arz-talep dengesini sağlanarak iletim hatlarının kararlılığı sağlanacaktır.



Şekil 2.3. Akıllı iletim [48]

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi akıllı iletim alanı, enerji üretimini ve depolanmasını desteklemesi beklenmektedir. Buna ek olarak getirmiş olduğu kolaylıkları gerçekleştirirken gelişmiş alan durum farkındalığı sayesinde trafo ile kontrol merkezi arasında iki yönlü haberleşmeyi sağlamaktadır.

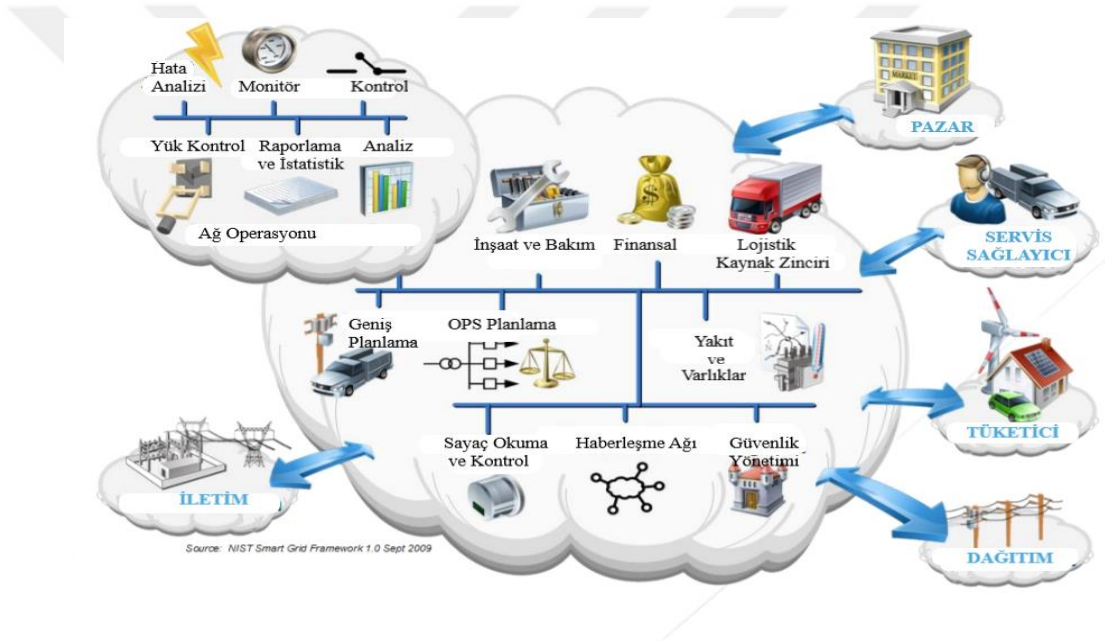
2.3.3. Akıllı Dağıtım

Akıllı şebeke dağıtım sistemleri, kullanıcılara daha iyi hizmet verebilmek için iletim ve kullanıcı alanlarını, elektrik ve haberleşme sistemleri aracılığıyla birbirine bağlamaktadır. Temelde dağıtım fiderleri ve trafolardan yararlanılarak elektrik hizmeti yapılmaktadır. Buna ek olarak akıllı şebekeye geçiş süreci ile sonrasındaki süreçte dağıtık enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların kullanımının daha fazla olacağı düşünülmektedir. Artan kullanım bir yandan elektrik temini için üretim esneklik sağlarken bir yandan da güç akış kontrolünü çok daha karmaşık hale getirecektir [51]. Bu noktada ise akıllı dağıtım sistemlerinde kullanılan izleme ve kontrol teknolojileri ile oluşabilecek sorunların üstesinden gelinebilecektir. Özellikle

de arz-talep dengesi göz önünde bulundurularak yapılan elektrik hizmeti sayesinde şebeke kararlılığı ve kalitesi korunabilecektir.

2.3.4. Operasyon Çalışma Alanı

Operasyon çalışma alanı, gerekli ölçüm ve analizleri yaparak tüm elektrik sisteminin uygun düzeyde çalışmasından sorumludur. Bu görev günümüzde dağıtım şirketleri tarafından yapılırken akıllı şebeke ile bu şirketlere dış kaynak hizmet sağlayıcısı olunacaktır. Ayrıca şekil 2.4'te görüldüğü gibi gelişmiş akıllı şebeke teknolojileri sayesinde iletim sistemlerinin güvenilirliği, dağıtık kaynakların yönetimi, dağıtım sistemlerinin analiz ve işletmesi daha kolay bir şekilde yapılabilecektir [48].



Şekil 2.4. Operasyonel çalışma alanı [48]

2.4. Dünya'daki ve Türkiye'deki Akıllı Şebeke Çalışmaları

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde;

- Kullanılan enerjinin asgari olarak belirli bir kısmının yenilenebilir enerji kaynaklarından temin edilebilecek şekilde bu kaynakların şebekede kullanımının arttırılması,
- Merkezi olmayan yapılara daha hızlı ve kolay adapte olunabilmesi,
- Şebeke bünyesindeki haberleşme alt yapısının geliştirilmesi,

- Dünya genelinde çok fazla yaşanan ve sosyo-ekonomik problemlere neden olan elektrik kesintilerinin en aza indirilmesi ve şebekenin güvenilirliğinin artırılması,
- Elektrikli araç gibi teknolojilerin şebeke ile uyum sağlayabilmesi,

elektrik şebekelerini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmaları teşvik eden nedenlerdir. Tüm bu nedenler göz önünde bulundurularak yapılan çalışmalar sonucunda, anlık bilgi ve enerji takibi yapabilen dinamik bir sistem olan akıllı şebeke teknolojileri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Dünya genelinde birbirinde farklı coğrafi bölgede yapılmasına karşın akıllı şebeke çalışmalarında, benzer sorunların üstesinden gelebilmek hedeflenmektedir. Temel olarak daha güvenilir, esnek ve ekonomik bir akıllı şebeke oluşturabilmek için öncelikle akıllı sayaçların mevcut şebekeye dâhil edilmesi, sonrasında yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekedeki entegrasyonunun artırılması ve son olarak da tamamen akıllı şebekeye geçilmesi gerekir.

Akıllı şebekeye geçiş sürecinde gelişmiş ülkelerde yapılan çalışmalar diğer ülkelere kıyasla daha ileri bir seviyededir. Özellikle ABD, Almanya, Çin, Japonya başta olmak üzere gelişmiş ülkeler 2020 ile 2030'u akıllı şebekeye tamamen geçiş yılı olarak hedeflemektedir [46]. Bu hedef doğrultusunda ABD, pilot olarak belirlediği bölgelerde 4.5 milyar doları akıllı şebeke uygulamalarına ve enerji depolama teknolojilerine, 7.25 milyar doları iletim altyapısına harcamıştır.

Çin, 2030 yılında akıllı şebekeye geçişin tamamlanması için uzun süreli ve maliyeti 96 milyar doları bulması beklenen yatırım sürecine girmiştir.

Almanya'da özellikle nükleer enerji kaynaklı elektrik üretimini sonlandırarak nükleer enerjinin yerine tamamen rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakların kullanılmasına yönelik yatırımlar yapılmaktadır.

Japonya'da 100 milyon dolarlık bir yatırım ile akıllı ölçüm cihazlarının ve güneş enerjisinin yoğun bir şekilde kullanıldığı akıllı şebeke altyapısı geliştirilmek istenmektedir.

Güney Kore'de ise 6000 evi içeren pilot bir akıllı şebeke tasarlanması için 65 milyon dolarlık yatırım yapılmıştır.

Doğu ve batı enerji koridorlarının tam ortasında bulunan Türkiye için akıllı şebeke teknolojileri, gelişmekte olan bir ülke olarak bir fırsattır. Artan nüfus ve sanayileşmeye bağlı olarak her geçen gün enerji talebi artmaktadır. Artan talebin

karşılanmasındaki maliyetler ise ülke ekonomisinde azımsanmayacak bir yeri kaplamaktadır. Şöyle ki elektrik üretiminde en çok kullanılan kaynakların başında gelen doğalgaz ve kömür rezervlerinin yeterli derecede olmamasından dolayı bu kaynaklar başka ülkelerden ithal edilmektedir. Bu durum da ekonomide cari açığı arttırmaktadır. Cari açığındaki artışın önüne geçebilmek, AB ülkelerinin şebekeleriyle uyum sağlamak ve şebekede yaşanan sorunların önüne geçebilmek için akıllı şebekede yaşanan gelişmelere hızlı bir şekilde adapte olmak gerekir. Ayrıca kamu ve özel sektörün de dâhil edildiği stratejik adımlar atılmalıdır. Bu doğrultuda hükümet tarafında açıklanan 2035 yılı Türkiye Akıllı Şebeke yol haritası sonucu;

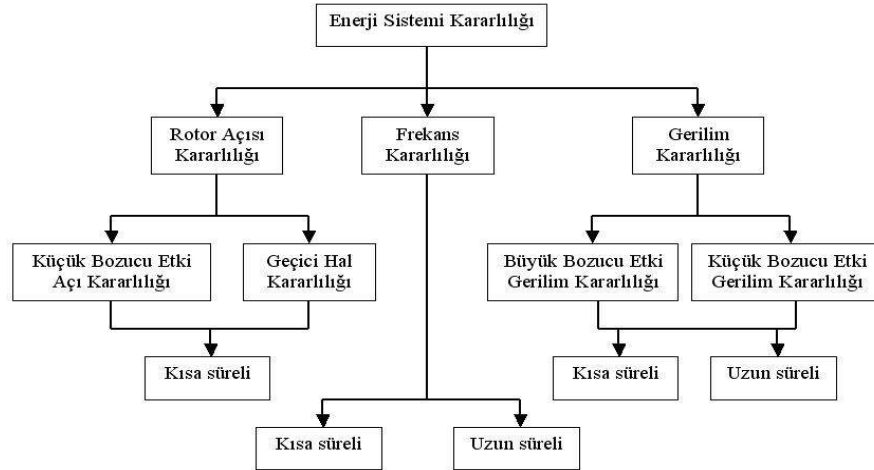
- Küçük ölçekli yenilenebilir dağıtık üretimin büyük oranlı kullanıldığı dağıtım şebeke altyapısının geliştirilmesi (çatı tipi güneş santralleri için 40 GW),
- Kullanıcıların en az %80'i için gelişmiş ölçüm altyapı tesisi (akıllı sayaç),
- Yerli ve ülke genelinde kullanılabilecek sayaç haberleşme altyapısının oluşturulması,
- Yaklaşık 10 GW büyüklüğünde talep taraf yönetimi yapabilecek kullanıcıların piyasa katılımına dâhil edilmesi,
- Şebeke altyapılarında izlenebilirlik, uzaktan kontrol edilebilirlik ve kendi kendine onarma görevlerinin yaygınlaştırılması,
- Mevcut şebeke varlıklarının kapasite kullanım oranlarının %20 oranında iyileştirilmesi,
- Üretim ve iletim dâhil olmak üzere şebeke kayıp kaçak oranının %8 seviyesine indirilmesi,
- Yaklaşık olarak 15 milyon elektrikli araç ve gerekli şarj istasyonunun şebeke entegrasyonu ve kapasite kullanım yönetimi için alt yapılarının oluşturulması,
- Elektrik şebekesine yapılabilecek saldırılar veya doğal afetler karşısında şebekenin dayanıklılığının sağlanması

gerçekleştirilmesi gereken hedeflerdir [52]. Belirlenen hedeflerin gerçekleştirilmesi amacıyla çeşitli projeler geliştirilmektedir. Bu projeler içerisinde en dikkat çekici olan ise 2000 hektarlık bir alanı kapsayacak şekilde Konya-Karapınar'da kurulacak olan 1 milyar dolarlık güneş enerjisi tesisidir. Bu tesise ek olarak aynı bölgede 300 milyon dolarlık güneş paneli ve güneş hücresi üretim tesisi kurulacaktır. Tamamlandığında 600 bine yakın evin enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde 500 bin

MW enerji üretimi yapılacağı ifade edilmektedir. Bunun yanında Paris Antlaşması gereği yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları ve çeşitliğinin artırılması kapsamında rüzgâr ve jeotermal enerjiye de yatırımlar yapılmaktadır.

2.5. Güç Sistemi Kararlılığı

Güç sistemi kararlılığı, elektrik şebekesini oluşturan elemanların normal çalışma koşulları altında dengede çalışması veya sistem içerisinde herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra yeni bir denge noktasında çalışmaya devam etmesi şeklinde tanımlanmaktadır [42]. Üretim sistemleri çeşitliliğinin artması, teknolojiye yaşanan gelişmeler ve talep artışına bağlı olarak sistemin aşırı yükte çalışması bir yandan güç sistemlerinin büyümesine diğer yandan da kararsızlık durumlarında çeşitliliğin artmasına neden olmaktadır. Durumun böyle olmasında mevcut elektrik şebekelerinde kararlılık olayının, farklı cevap süresi ve karakteristikleri olan çok geniş aralığa yayılmış elemanların oluşturduğu yüksek dereceden, çok değişkenli ve doğrusal olmayan bir süreç olması etkilidir. Genel olarak güç sistemi kararlılığı sistemin senkron çalışmayı sürdürmesi gibi tek bir olay olarak ifade edilse de bu ifade tam olarak doğru değildir. Çünkü kararsızlık durumuyla sistem senkronizmasında kayıp olmaksızın da karşılaşılması olasıdır.



Şekil 2.5. Güç sistemleri kararlılığının sınıflandırılması

Güç sistemlerinde farklı nedenlerden kaynaklanan kararlılık problemlerinin çözümü için sistemi yeterli detaya sahip olacak şekilde basitleştirmek, kararsızlığa yol açan etmenleri belirlemek ve sınıflandırmak gerekir. Bu noktadan hareketle güç sistemleri,

- Fiziksel etkinin türüne,
- Sisteminde oluşturduğu etkinin büyüklüğüne,
- Etkilediği elemanların türüne,
- Etkinlik süresine

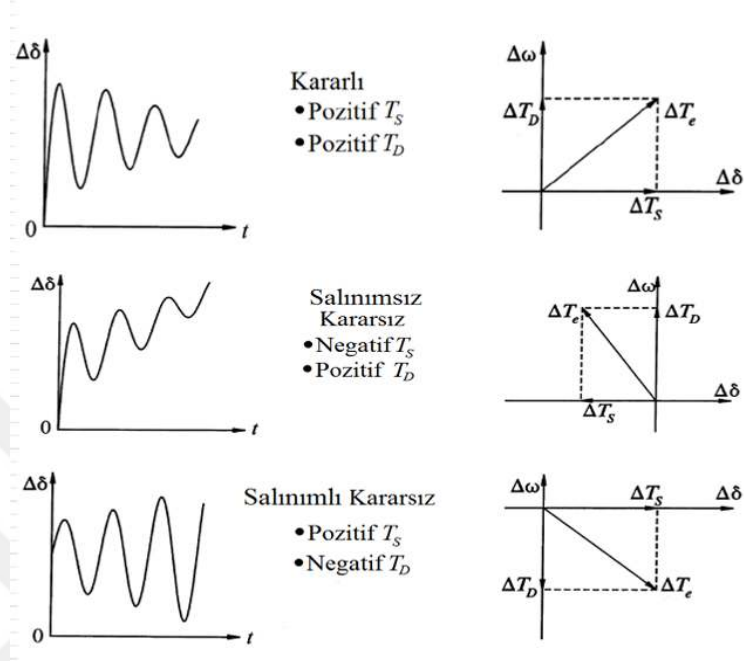
bağlı olarak şekil 2.5'te verildiği gibi sınıflandırılmaktadır [53].

Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması, değişik kararlılık durumlarının bilinmesine dolayısıyla güç sistemlerinin hem en uygun tasarımının yapılması hem de kolay çalışması açısından önemlidir. Ayrıca kararsızlık problemlerinin oluşmasında kararlılık türlerinin birbirini tetiklemesi etkili olacağından türlerin birbirleriyle bağlantısının bilinmesi açısından da önemlidir. Böylece bir kararlılık olayını incelerken geniş bir açıdan durum analizini yapabilmek dahası bunu gerçekleştirirken bir kararsızlık durumu için öne sürülen çözümünün bir başka probleme yol açmayacağına veya daha kötü hale getirmeyeceğine dikkat edilmelidir. Özellikle güç sistemleri kararlılık analizleri yapılırken sistem güvenilirliği ve güvenliği çok önemlidir.

2.5.1. Rotor açısı kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, güç sisteminde bulunan makinelerin bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra sistemdeki tüm makinelerin senkronizmada kalma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemlerinde normal çalışma şartlarında üretim yapan tüm makinelerin mekanik giriş momenti ile elektriksel çıkış momenti arasında bir denge noktası vardır ve bu denge noktası rotor hızının sabit kalmasını sağlamaktadır. Herhangi bir sebepten ötürü denge durumu bozulursa sistemdeki makinelerin rotorlarında hızlanma veya yavaşlama olayları gözlemlenebilir. Sistem içerisindeki generatörlerden birinin diğerlerine göre daha hızlı olması sistemdeki tüm generatör rotorlarının açısal konumlarında değişiklik meydana getirir. Bu noktada sistem güç-açı ilişkisine bağlı olarak oluşan açısal fark nedeniyle yükün belirli bir kısmını hızlı makineye aktarır. Sistemin gerçekleştirmiş olduğu otomatik yük dağılımı sayesinde rotor hızlarında ve açısal farklarında azalma yönünde bir etki yapacaktır. Bu etki ancak belirli bir sınıra kadar geçerlidir. Eğer o sınır aşılsa rotor açısal sapmalarında artışlar meydana getirir. Yaşanılan bu artışlar güç iletiminde azalmalara hatta sapmanın daha da artması durumunda güç sisteminin kararsız duruma geçmesine

neden olur. Meydana gelen bozulma sonucu sistemi kararlılığı, sistem bünyesinde yeterli seviyede düzeltme momenti üretilip üretilmemesine bağlıdır. Düzeltme momenti olarak da bilinen elektriksel momentteki değişim sistem kararlılığının doğrudan bağlantılı olduğu iki bileşene ayrılmaktadır:



Şekil 2.6. Senkronlama ve sönümleme momenti değişimi [53]

- Senkronlama Momenti
- Sönümleme Momenti

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

(T_s : Senkronlama Momenti T_d : Sönümleme Momenti)

(2,1)

Bu iki bileşenden birinin eksikliğinde kararsızlık durumu oluşabilir. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi senkronlama momenti yeterince üretilemezse aperiodyik yani salınımlı olmayan kararsızlık, sönümleme momenti yeterince üretilemezse salınımlı kararsızlık oluşmaktadır [42].

2.5.2. Gerilim kararlılığı

Sistemin normal çalışmada veya bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalma yeteneği, gerilim kararlılığı olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemlerinin güvenilirliği açısından önemli bir konu olan gerilim kararlılığı, genellikle enerji arz ve talep arasındaki reaktif

güçteki dengesizlikten kaynaklanmaktadır. Gerilim kararlılığını etkileme noktasında reaktif güç dengesizliğinin yanında;

- Yük karakteristikleri,
- Güç transfer seviyeleri,
- İletim hatlarının mukavemeti,
- Reaktif güç kompanzasyon cihazlarının veya kontrol cihazlarının özellikleri,
- Çeşitli kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyon zayıflığı,
- Yük altında kademe değiştiricili transformatör gibi voltaj kontrol cihazlarının hareketleri,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek orandaki entegrasyonu

da etkili olmaktadır [42].

Gerilim düşmesi, temel bir gerilim kararsızlığından daha karmaşıktır ve güç sisteminin önemli bir kısmında düşük gerilim nedeniyle gerilim kararsızlığına neden olan bir dizi olayların sonucudur. Buda gerilim kararsızlığını, temelde yerel bir olgu olarak kabul edilse de sonuçları genel bir etkiye sahip olabilir. Gerilim kararsızlığının genel bir etkiye sahip olduğunun en büyük göstergesi gerilim veya sistem çökmesidir. Genel olarak sistem çökmesi, bir bölgedeki elektrik üretimi, iletimi ve dağıtım sistemlerinin bir kısmının ya da tamamının kısa veya uzun süreli olarak kayba uğraması şeklinde ifade edilmektedir [54]. Güç sistemleri için yaşanabilecek en büyük zorluk olan sistem çökmesi, elektrik hizmetinin aksamasına dolayısıyla insan yaşamının hem sosyal hem de ekonomik olarak ciddi şekilde etkilenmesine neden olur. Bu etkinin sonuçlarını daha iyi anlayabilmek amacıyla son dönemde dünyada meydana gelen elektrik kesintileri çizelge 2.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1. Elektrik kesinti kronolojisi

Tarih	Meydana Geldiği Ülke	Meydana Gelme Nedeni
12 Nisan 2018	Porto Riko	İşçilerin bitki örtüsü temizlemesi esnasında bir ağacın Cayey kasabası yakınlarındaki büyük bir elektrik hattına düşmesiyle gerçekleşmiştir. 870.000 kullanıcı elektriksiz kalmıştır.

28 Eylül 2016	Güney Avustralya	Elektrik kesintisinde, bir dizi şebeke hatası meydana gelmesine rağmen sistem kararlı bir şekilde çalışmasını sürdürmüştür. Mevcut hataların temizlenememesinin yansira enerji talebinin %17,6'sı geleneksel kaynaklardan, %50'si rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilebilir enerji kaynaklarından kalan kısım ise ara bağlantılardan karşılanmasından dolayı kısa sürede bazı üretim birimleri devre dışı kalarak açısız kararsızlığın oluşmasına neden olmuştur. Yaşanan bu kararsızlığın tüm sisteme yansmasıyla gerçekleşen sistem çökmesi, yüksek yenilenebilir enerji entegrasyonu nedeniyle bilinen ilk sistem çökmesi olarak kayıtlara geçmiştir.
23 Aralık 2015	Ukrayna	Senkronize bir şekilde üç bölgesel dağıtım şirketine düzenlenen siber saldırı sonucunda elektrik kesintisi meydana gelmiştir. Yaklaşık olarak 225.000 insanın etkilendiği bu olay, dünyada siber saldırı nedeniyle meydana gelen ilk kesinti olarak kayıtlara geçmiştir.
31 Mart 2015	Türkiye	Osmanca-Kurşunlu iletim hattının devre dışı kalmasını takip eden 12 saniyede elektrik sistemi çökmüştür. Olayın başlangıcında açısız kararsızlığı etkili olurken devamında da frekans ve gerilim kararsızlığı meydana gelmiştir. 8 ila 10 saat süren kesinti sonucu ciddi maddi zarar söz konusudur.
1 Kasım 2014	Bangladeş	Ülke çapında gün boyu etkili olan elektrik kesintisine, bazı jeneratörlerin bakımda olması ve Hindistan'dan enerji (445 MW) ithal edilememesi sonucu mevcut gücün beslenememesinden dolayı güç sistemi çökmüştür. Olay süresince düşük frekansta planlanandan düşük yük atılması durumu daha da kötüleştirmiştir. Kesintiden toplamda 150 milyon insan etkilenmiştir
30-31 Temmuz 2012	Hindistan	670 milyon insanın enerjisiz kalmasına neden olan elektrik kesintisi dünya tarihinin en büyük kesintisi olarak ifade edilmektedir. Kesintiye, yüksek sıcaklık nedeniyle 132, 220 ve 400 kV'luk hatların aşırı yüklenmesi sonucu başlayan hat açmaları ile yüksek frekanstan dolayı jeneratörler servis dışı kalması neden olmuştur. Birkaç elektriksel bölgeye ayrılarak

		ayakta kalmaya çalışan sistem kısa bir süre sonra çökmüş ve 48.000MW'lık yük kaybedilmiştir. 2 ila 8 saat süren kesintilerde sosyal anlamda büyük bir felaket yaşanmıştır.
10-11 Kasım 2009	Brezilya-Paraguay	Kesintinin oluşumunda şiddetli yağmur ve rüzgâr nedeniyle meydana gelen kısa devre arızaları etkili olmuştur. Toplamda 87 milyon insanın etkilendiği kesintide güvenlik sorunları yaşanmıştır. Ayrıca sabit telefon hattı da çökmüştür
4 Kasım 2006	Almanya, Fransa, İtalya, İspanya	Aşırı yüklenme ve koordinasyon hataları sonucunda geniş çaplı elektrik kesintisi yaşanmıştır. 45 milyon insanın etkilendiği kesintide 14.500 MW'lık yük beslenememiştir. 2 saatlik kısa kesintinin ekonomik zararı 139 milyon dolardır.
18 Ağustos 2005	Java, Bali, Endonezya	8 adet elektrik üretim tesisinin arızalanması sonucu sistem çökmeleri meydana gelmiştir. Teknik arızalardan kaynaklanan arıza sonucu 100 milyon insana 7 saat boyunca enerji verilememiştir.
14-15 Ağustos 2003	ABD Kanada	Kanada'da toplam gücün %11'ine denk gelen 61.800MW'lık yükü besleyen sistem çökmüştür. Yaz ayları olması nedeniyle aşırı klima kullanımına bağlı olarak yetersiz reaktif güç kaynaklı gerilim kararsızlığının oluşması ve ağaç dalları kesiminin uygun olmaması olayın temel nedenleridir. ABD'de 16 ila 72 saat, Kanada ise 192 saate kadar enerji temin edilememiştir. 50 milyon insanın etkilendiği kesintinin ABD için maliyeti 10 milyon dolarken Kanada için 1 milyon kanada dolarıdır.
28 Eylül 2003	İtalya	Kesintinin oluşumunda aşırı yüklü hatları ısınmasıyla iletkenlerin sarkması etkili olmuştur. Sarkma sonucu iletkenlerden ağaç dalları üzerine atlamalar yaşanmıştır. Bu durum kısa devre arıza zinciri başlatarak UCTE (Elektrik İletim Koordinasyon Birliği) tarafından belirlenen kararlılık sınırlarını aşmasına neden olmuştur. Bu durum ise başta İsviçre olmak üzere Fransa, Avusturya ve Slovenya ile İtalya'nın şebeke bağlantılarını koparmıştır. Aralarında 4 kişinin de öldü yaklaşık olarak 57 milyon insanın etkilendiği

		elektrik kesintisi süresince 24.000 MW'lık yük kaybedilmiştir. 5 ila 9 saat elektrik verilemeyen sistem 13,5 saat sonra restorasyonunu tamamlamıştır.
18 Mart 1978	Tayland	Tek bir jeneratör arızasının başlattığı birbiri ardına gelişen olaylar sonucu Tayland elektrik sistemi çökmüştür. 9 saat süren kesinti boyunca 1.336 MW'lık yük enerjisiz kalması sonucu 40 milyon insan etkilenmiştir.
9 Kasım 1965	ABD	Resmi kayıtlara göre bildirilen ilk kitlesel elektrik kesintisi olan kesintiyi, ilk olarak Sir Adam Beck Hidroelektrik santralinin Ontario bölgesine bağlanan 5 adet 230 kV'luk iletim hatlarından birine ait olan kesici rölesinin geçici aşırı akım anında açmasını takiben normal şekilde çalışan hatların açılması olayı tetiklemiştir. Bu olayı takiben diğer hatlarında aşırı yüklenmeden dolayı açtığı gözlemlenmiştir. Açma olayları, zincirleme bir reaksiyona dönüşerek 12 dakika içerisinde ABD'deki 30 milyon insanın elektriksiz kalmasına neden olmuştur. Amerika'daki elektrik endüstrisinin yaşadığı en büyük tehlike olarak kayda geçen kesinti, bazı bölgelerde 13 saat kadar sürmüştür. 20.000 MW'lık bir yük kesintisi olmuştur. Olay esnasında tren ve uçak seferleri durmuş, 855 hastane enerjisiz kalmıştır. Toplamda 100 milyon dolarlık ekonomik kayıp olduğu tahmin edilmektedir.

2.5.3. Frekans kararlılığı

IEEE ve CIGRE kurumlarına göre, frekans kararlılığı, üretim ve yük arasında önemli bir dengesizlikle sonuçlanabilen ciddi bir sistem bozulmasından sonra güç sisteminin kararlı durum frekansını koruyabilmesi yeteneğidir. Güç sisteminin herhangi bir noktasında oluşan birkaç saniyelik bozucu etki veya normal çalışma durumunda meydana gelen küçük bozucu etkiden kaynaklanan değişimlere sistemin cevabı genel olarak frekans kararlılığı altında toplanılır. Frekansta oluşan herhangi bir kararsızlık jeneratör veya yüklerin servis dışı kalmasına sebep olan frekans salınımları şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu salınımlara neden olan bozulmalar, güç sisteminde frekans başta olmak üzere güç akışı, gerilim vb. sistem değişkenlerinde

büyük sapmalara neden olabilir. Özellikle gerilimde meydana gelen büyük sapmalar da ciddi sistem sorunlarına karşı sistemin güvenilirliğini azaltabilir. Enterkonnekte sistemlerde adalar şeklinde birbirinden ayrılma söz konusu ise bunda büyük çapta üretim veya yük kaybına yol açan herhangi bir bozulma sonucu meydana gelen frekans kararsızlığı etkilidir.

Güç sistemlerinde frekans kararlılığı, bir kısa dönem olabileceği gibi uzun bir dönem olayı şeklinde de olabilmektedir. Sistem üzerindeki bozulmaların etki süresi ne olursa olsun eğer güç sistem kararlı ise belirli bir süre geçtikten sonra sistem nominal şartlarında çalışmasını devam ettirmek zorundadır. Sistem bünyesindeki değişim bozulma öncesine kıyasla çok fazla değilse sistem başlangıç koşullarındaki çalışmasını devam ettiriyor olarak kabul edilebilir.

Uluslararası frekans standartlarına göre sistemin normal çalışma koşullarında frekanstaki değişim ± 100 mHz olarak ifade edilmiştir. Üretim ile tüketim dengesizliğine neden olan bozulmalar esnasında sistemdeki üretim birimlerinin primer kontrolörleri, üretilen güç ile tüketilen güç arasında yeniden dengenin kurulmasına yönelik manevralar yaparak sistem frekansının izin verilen limitler içerisinde kalmasını sağlayacaktır. Bu limitlerin aşılması durumunda ise otomatik yük atama gibi önlemlerin devreye girmesi gerekir.

2.6. Akıllı Şebekelerde Güç Sistemi Kararlılığı

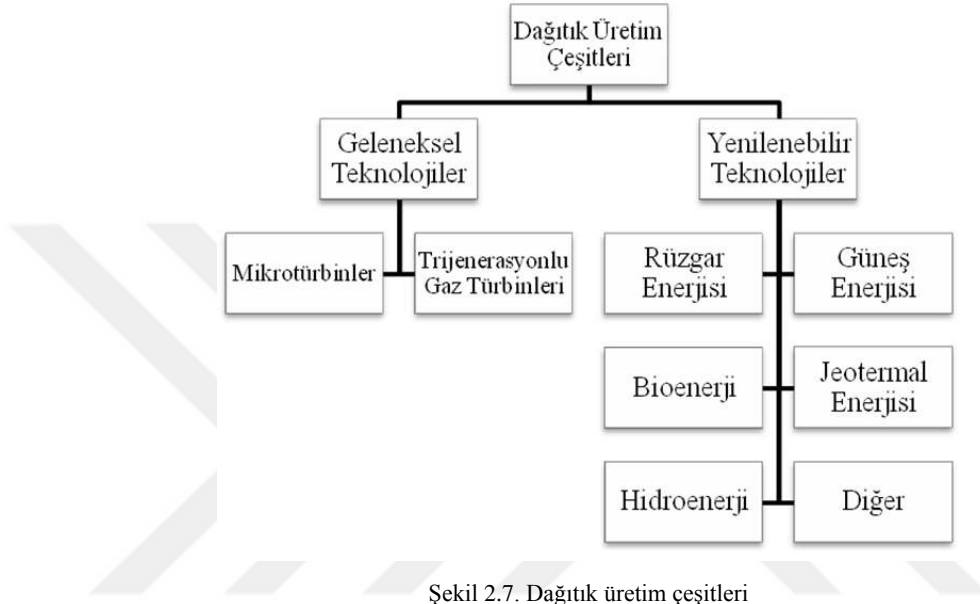
Akıllı şebeke teknolojilerinin temel uygulamaları olan dağıtık üretim ve talep taraflı yük yönetimi sayesinde belli başlı kazançlar sağlamaktadır. Bu kazançlardan en önemlileri üretim çeşitliliği ve şebekeye esnekliğidir. Buna karşın yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretimlerin geleneksel kaynakların yerini almasına ek olarak tüketici taleplerinin sürekli artan ve değişken yapıda olması, ne kadar güvenilir olsa da sistem için tehlike oluşturmaktadır. Özellikle farklı teknolojilere ve değişken yapıya sahip yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretimlerin varlığı güç sistemi kararlılığı üzerinde olumlu veya olumsuz etki meydana getirebilir. Dahası olumsuz etkiler, sistem geneline yayılabilen bozulmaları tetikleyebilir. Bu etkileri gözlemleyebilmek için dağıtık üretim uygulamalarını iyi anlamak gerekir.

2.6.1. Dağıtık üretim uygulamaları

Dünyadaki enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil ve nükleer yakıtların yanı sıra suyun potansiyel enerjisinden faydalanan büyük ölçekli merkezi üretim sistemleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu sistemler enerji verimliliği açısından büyük kazançlar sağlamakla birlikte bu sistemlerin kurulacakları yerlerin seçilmesinde ekonomik, coğrafi, politik, tıbbi ve güvenliğe dayalı endişelerden kaynaklanan etmenler dikkate alınmalıdır. Bir hidroelektrik santrali göz önüne aldığımızda bu yapıların doğaları gereği uygun bir akarsu üzerine kurulmaları gerekirken kurulduğu bölgenin ekolojik, jeolojik ve demografik yapısı üzerindeki etkilerde hesaba katılmalıdır. Bu ve benzeri yapıların etkilerinden kaynaklı olarak bir sınırlama söz konusudur. Ek olarak da geleneksel santrallerin enerji üretimi sırasında oluşan tehlikeli gazların atmosfer dolayısıyla küresel ısınma üzerindeki olumsuz etkileri çevresel kaygılar nedeniyle akıllarda soru işareti oluşturmaktadır. Bu noktada uzun süredir bilinmesine rağmen, düşük üretim kapasiteleri nedeniyle elektrik şebekesi içerisinde yeterince kullanılamayan enerji kaynaklarının akıllı şebeke teknolojisiyle sayesinde daha fazla entegrasyonunun sağlanması fikri üzerinde yoğunlaşmıştır [55].

Dağıtık üretim kavramının başlangıçta herkes tarafından kabul gören ortak bir tanımı olmamakla birlikte bölgeden bölgeye veya ülkeden ülkeye çok farklı tanımlamalarla ifade edilmeye çalışılmıştır. Yapılan bu tanımlamalarda güç kriteri üzerinden yola çıkılmıştır. Dağıtık üretim kavramı ilk olarak Ackermann vd. tarafından “Dağıtım şebekesine veya tüketicilerin yoğun olduğu bölgelere doğrudan bağlanabilen elektrik üretimi birimi” şeklinde belirgin bir tanımı yapılmıştır [56]. Bu tanım da dâhil olmak üzere o dönemde yapılan tanımlamalarda 50 MW ve altındaki üretim tesisleri olarak ifade edilmekteydi. Dağıtık üretimi içeren sistemlerde toplam yükteki ve kullanım amacındaki farklılıklardan dolayı güç değerlerinde daha esnek olunması gerektiği anlaşıldı. Oluşan bu belirsizliklerin ifade edildiği ve güç değerinin 100 MW ve altındaki değerlerde üretim yapan tesisler olarak CIRED raporunda ifade edilmiştir. Bugün geline nokta dağıtılmış, gömülü ya da katıştırılmış üretim olarak ifade edilen dağıtık üretim kavramı genel olarak tüketimin yoğun olduğu bölgelerdeki sadece dağıtım şebekelerine değil, aynı zamanda iletim şebekelerine de entegre edilebilen üretim tesisleri olarak kabul görmektedir.

Dağıtık üretim sistemleri bünyesinde çeşitli enerji üretim teknolojilerini bulundurmakla birlikte geleneksel ve yenilenebilir teknolojiler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Geleneksel teknolojileri mikro türbinler, trijenerasyonlu gaz türbinleri oluşturmaktayken yenilenebilir enerji teknolojilerini ise rüzgâr, güneş, biokütle, jeotermal gibi kaynaklar oluşturmaktadır [57] . Şekil 2.7’de dağıtık üretim çeşitleri görülmektedir.



İlk bakışta geleneksel teknolojiler kapsamındaki trijenerasyonlu gaz türbinleri sayesinde ısıtma ve soğutma ile birlikte elektriğin beraber kullanılmasına imkân verdiğinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık bazılarının güç değerlerinin çok büyük olması bu yapıların özellikle de dağıtım hatlarına entegre edilmesi yaşanılabilecek zorluklardan dolayı çok doğru olmayabilir. Dahası bu santrallerde kullanılan yakıta sahip bir coğrafi bölgede bulunulmuyorsa dağıtık üretimle elde edilen sosyo-ekonomik avantajlara da ters düşebilir.

Fosil yakıt kaynaklarının tükenme kaygısıyla birlikte yenilenebilir enerji teknolojilerini içeren dağıtık üretim sistemleri ön plana çıkmaktadır. Özellikle yarı iletken teknolojisinde meydana gelen gelişmeler sayesinde gün geçtikçe daha fazla ilgi çeken bir konu haline gelmiştir. İthal edilen güneş ve rüzgâr santrali kurulum girdilerinin azalması için, yerli üretimin teşvik edilmesi ile kendi kendini kompanse etme süreleri kısılacaktır. Böylece güneş ve rüzgâr kaynaklı dağıtık üretimin daha fazla yaygınlaşacağı beklenmektedir.

2.6.2. Dağıtık enerji üretiminin avantajları

Günümüzde kullanılmakta olan merkezi yapıdaki güç santralleri gelişmiş teknolojilere sahiptirler. Bu sayede arıza olasılıklarında azalma ve üretim verimliliklerinde yükselme gözlemlenmiştir. Geçmişte yaşanan olumsuzlukların önüne geçmek için, kurulmuş olan merkezi yapıdaki santraller bugün kendi başlarına büyük riskler oluşturmaktadır. Bugün tecrübe edinilen elektrik kesintilerinin çoğunluğu iletim hatlarından veya trafo merkezlerinden kaynaklanan arızaların sonuçlarıdır.

Fosil yakıt kaynaklarının yakın bir gelecekte tükenmesi ve küresel ısınmayı doğrudan etkilemesi gerçeğinin daha fazla ifade edilmeye başlanması ile alternatif olarak düşünülen nükleer enerjinin ne kadar tehlikeli olduğunun Fukuşima nükleer felaketi ile ortaya çıkması, yenilebilir enerji kaynaklarını içeren dağıtık üretim tesislerinin elektrik şebekelerine daha fazla entegrasyonunu yolunu açmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren dağıtık üretim, sistem üzerinde belirli fayda ve imkânlar sağlamaktadır. Sırasıyla bunlar;

- Dağıtık üretimde, geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla birim enerji başına ortaya çıkan karbon salınımı daha az olmasının yanı sıra güneş gibi bazı kaynaklarda karbon salınımı neredeyse sıfırdır. Bu sayede dağıtık üretim ile birlikte sera gazı salınım azalmakta ve bu üretim teknolojisinin küresel ısınma üzerindeki katkısı daha azdır.
- Dağıtık üretim tesisleri esnek bir yapıya sahiplerdir. Bu esneklik özelliği modüler yapılar şeklinde kurulmalarına imkân vermektedir. Bu ise dağıtık üretim tesislerinin herhangi bir yere entegre edilerek kısa sürede işletmeye alınmalarına ve gerekli görülmesi durumunda eklemelerle genişletilebilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca planlama ve kurulma süresinin 5 ile 10 sene arasında olan merkezi güç santrallerindeki ekstra riskler dağıtık üretim sistemlerinde karşılaşılmaz.
- Dağıtık üretimle birlikte elektrik enerjisi daha verimli bir şekilde kullanılacağı düşünülmektedir. Özellikle iletim ve dağıtım hatlarındaki kayıpların azaltılmasına imkân sağlaması ve puant güç talebinin olduğu

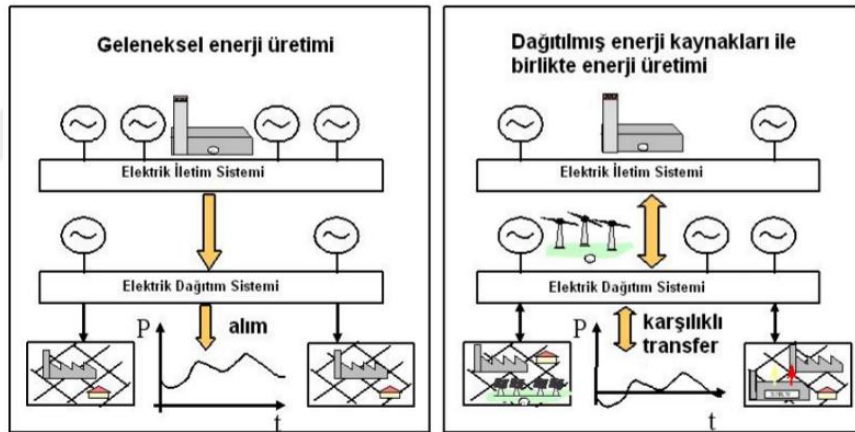
zamanlarda iletim ve dağıtım hatlarındaki aşırı yüklenmelerin önüne geçebilmesi enerjinin daha verimli kullanılabileceğinin göstergesidir.

- Fosil ve uranyum gibi yakıtlara bağımlı olan merkezi üretim sistemlerine kıyasla dağıtık üretim klasik yakıtların yanı sıra rüzgâr, güneş, jeotermal, tarımsal atıklar, evsel organik atıklar gibi kaynakları içermelerinden dolayı beraberinde yakıt çeşitliliğini de getirmektedir.
- Uluslararası Enerji Ajansına göre dağıtık üretimle birlikte iletim/dağıtım hatlarının iyileştirilmesinden ve yeni hatların yapılmasından kaynaklanan maliyetlerin yaklaşık olarak 130 milyar dolar azalacağı tahmin edilmektedir.
- Merkezi yapıdaki geleneksel sistemlerin arızalanma olasılıkları daha fazladır. Dahası bu sistemler çok sayıda talep noktasına karşılık az sayıda arz noktasının içermesinden dolayı arz-talep dengesizliğinin oluşmasına neden olmaktadır. Dağıtık üretimle birlikte yaşanmış merkezi sistemlerin altyapılardan dolayı oluşabilecek güvenilirlik ve arz kalitesi problemlerinin üstesinden gelinebileceği düşünülmektedir.
- Rüzgâr, güneş, jeotermal gibi doğal kaynakların coğrafi olarak daha çok olduğu bölgelerde enerji üretiminin bu kaynaklara dayalı dağıtık üretimlerle yapılması hem bu kaynaklardan gelir elde edilmesine hem elektrik birim maliyetlerinin azalmasına hem de yeni iş imkanlarının doğmasına sebep olur. Böylelikle daha sürdürülebilir bölgesel kalkınma sağlanır.
- Dağıtık üretimle birlikte üretken-tüketici konumuna gelen enerji kullanıcı sayısının artması beklenmektedir. Hatta Türkiye’de 18 Ocak 2018’de Resmi Gazetede yayımlanan “Elektrik Piyasasında Tüketim Tesisleri ile Aynı Ölçüm Noktasından Bağlı ve Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisleri İçin Lisanssız Üretim Başvurularına ve İhtiyaç Fazlası Enerjinin Değerlendirilmesine İlişkin Usul ve Esaslar” ile 10 kW’a kadar üretim yapan güneş enerjisinin satılmasının önünün açılmasıyla üretken tüketicilerin sayısının hızla artacaktır. Üretken tüketici sayısındaki artış ile birlikte, elektrik enerjisi kullanıcılarının serbest elektrik piyasasındaki enerji fiyat değişimlerden kaynaklanan risklerden daha az etkileneceği beklenmektedir.
- Ani ve acil elektrik enerjisi ihtiyaçlarına hızlı ve esnek bir şekilde çözüm sundukları için her zaman sıcak yedek hizmeti sağlamaktadır.

Tüm bu fayda ve imkânlar, güvenilir ve kaliteli enerji temini için bir fırsat sunmaktadır [20], [28], [58].

2.6.3. Dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ve kararlılığı üzerindeki etkisi

Genellikle güç sistemleri, sabit empedanslı veya indüktif yük gibi çeşitli yüklere hizmet eden büyük ve merkezi senkron jeneratörler temel alınarak oluşturulmaktadır. Güç sistemi içerisinde enerji akışı, iletim ve dağıtım hatları aracılığıyla yüksek gerilim iletim sisteminden son kullanıcıların bulunduğu dağıtım sistemine doğru tek yönlü olarak gerçekleşmektedir. Pasif bir yapıya sahip olan güç sistemlerindeki jeneratörlerin, hatların ve yüklerin davranışları elektromanyetik ve elektromekanik yasalara göre belirlenmektedir. Sosyal, ekonomik ve teknolojik gelişmeler mevcut güç sistemleri içerisinde dağıtık üretim entegrasyonunun gittikçe artan ivmeyle yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.8’de dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ile birlikte enerji akışı görülmektedir.



Şekil 2.8. Dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ile birlikte enerji akışı [59]

Dağıtık üretim kavramı genel olarak üretim teknolojisi olarak görülse de aynı zaman da elektrik şebekeleri açısından planlama, çalışma ve koruma kavramı olarak kabul etmek gerekir. Dağıtık üretim tesislerinin şebeke içerisinde yer almasıyla üretim ile tüketim merkezleri arasında çift yönlü bir akış söz konusu olur. Böylece güç sistem de pasif yapıdan aktif yapıya dönüşmüş olur. Yaşanılan bu dönüşüm elektrik şebekesinin kalıcı ve geçici hal durumlarını etkileyebileceği için şebeke planlaması, çalışması ve korumasında farklılıklara neden olmaktadır [58].

Dağıtık üretim kavramının ortaya çıktığı dönem üretim seviyelerindeki düşük oranlar nedeniyle dağıtım hatlarına bağlanmaktaydı. Günümüzde ise küçük güçteki

dağıtık üretim sistemleri dağıtım hatlarına bağlanırken büyük güçteki dağıtık üretim sistemleri iletim hatlarına bağlanmaktadır. Bu bağlantılar sonucunda dağıtım ve iletim hatlarındaki güç akışı değişmektedir [28]. Dağıtık üretim sistemlerinin oluşturduğu değişimin şebeke üzerindeki etkisi düşük oranlı üretim paylarından dolayı ihmal edilebilir. Buna karşılık gelecekte akıllı şebekelerle birlikte daha yüksek oranlara ulaşması beklenen dağıtık üretim sistemlerinin etkisi dağıtım hattıyla sınırlı kalmayıp iletim de dâhil tüm şebekeyi etkileyeceği için oluşturduğu etki ihmal edilemeyeceği düşünülmektedir [20].

Dağıtık üretimin yüksek oranda entegrasyonunun başta güç sistemi olmak üzere tüketici ve elektriksel ekipmanları etkileyebileceği gerçeğinden yola çıkarak dağıtık üretimin etkilerinin iyi analiz edilmemesi, yapısal ve bağlantısal özelliklerinin doğru dizayn edilmemesinden dolayı bazı problemler yaşanabilir. Yaşanabilecek olası problemler;

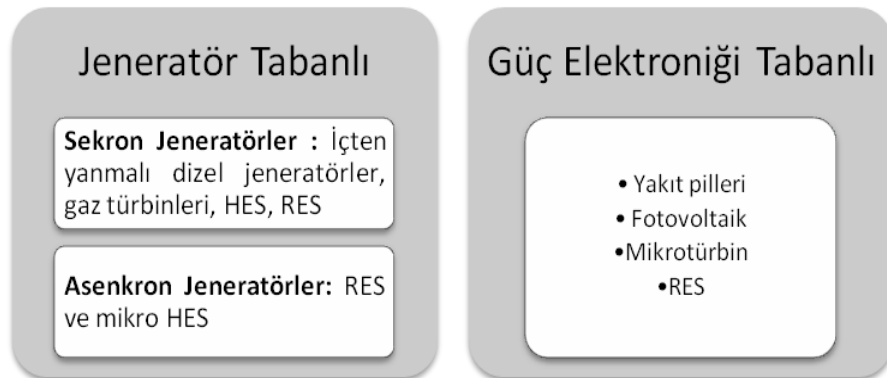
- Enerji akışının çift yönlü olmasından dolayı reaktif güç kontrolünün zorlaşması,
- Aktif ve reaktif güçteki sürekli değişimlerden dolayı istenmeyen gerilim değişimlerinin olması,
- Transformatör bağlantı gruplarına göre kısa devre akımlarının etkilerinin artması ve röle seçimlerinin sürekli değişmesi,
- Şebeke elemanlarının kısa devre akım limitleri ile ısıl dayanım kapasiteleri zorlanması,
- Harmonik ve fliker üretiminin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olmaması,
- Anlık devreye girme ve anahtarlama olaylarının sistemin nominal çalışması için gerekli limit değerleri içerisinde olmaması

şeklinde sıralanabilir. Dahası hem yaşanması olası problemler hem de dağıtık üretim birimleri içerisinde farklı üretim teknolojilerini bulundurmaları beraberinde sistem kararlılığı konusundaki endişeleri de getirmektedir.

Geleneksel sistemler senkron jeneratörler temel alınarak oluşturuldukları için sistem kararlılığının sağlanmasında önemli bir rol oynayan atalet ve sönümleme momenti bu jeneratörler tarafından karşılanmaktadır. Sistemde bir hata ile karşılaşıldığında senkron jeneratörlerin frekans ve terminal gerilim değerleri, hız regülatörleri ve gerilim düzenleyicileri tarafından ya hata öncesindeki kararlı çalışma noktasına ya da kabul edilebilir yeni bir kararlı çalışma noktasına getirilmeye

çalışılır. Böylece hem senkron jeneratörün hem de güç sisteminin kararlılığı korunmuş olur. Bununla birlikte senkron jeneratörlerin gücü ve bünyelerinde var olan kontrolörlerden dolayı senkron jeneratörlerin çalışma limitlerini sınırlanmaktadır. Dünyada enerji talebinin de sürekli artışta olması, ekonomik, çevresel, teknik ve yasal sınırlamaların da etkisiyle güç sisteminin daha sınırlanmasına ve maksimum kararlılık sınırında çalışmasına neden olmaktadır. Bu noktada dağıtık üretim güç akışı ve sistem kararlılığı açısından umut verici olsa da sahip oldukları yapı ve teknolojilerden dolayı şebekeye entegrasyonu yapılırken dikkat edilmelidir.

Dağıtık üretim tesislerinin uygun olmayan yerlerden şebekeye bağlanması gerilim yükselmeleri veya çökmelerine neden olabileceği gibi iletim hatlarının aşırı yüklenmesine ve kayıpların artmasına da neden olmaktadır. Bu durum dağıtık üretim tesislerinin elektrik şebekesi ile en uygun şekilde çalışabilmesi açısından şebeke entegrasyon ölçütlerinin iyi bir şekilde tanımlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Hem teknik hem de ekonomik değerlendirmeler sonucunda dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu olumlu sonuçlar doğursa da sistem kararlılığı ve kalitesi açısından olumsuzluklar da meydana gelebilir. Dağıtık üretimlerin büyüklüğü ve çıkış güçlerine bağlı olarak şebeke gerilimindeki değişim oranında artışlar meydana getirmektedir. Dağıtık üretim düşük oranlı olacak şekilde tüketiciye yakın noktada şebekeye entegrasyonu yapılmışsa iletim kayıplarını ve hat sonundaki gerilim seviyeleri düşümelerini azaltmaktadır. Fakat tüketiciden uzak üst gerilim seviyelerinde entegrasyonu yapılmışsa iletim hatlarının aşırı yüklenmesine dolayısıyla kayıpların artmasına neden olmaktadır [60].



Şekil 2.9. Dağıtık üretimin şebeke entegrasyonunda kullanılan bağlantı araçları

Dağıtık üretim bünyelerinde çeşitli teknolojiler içerdikleri için şebekeye entegrasyonları sırasında şebekeye doğrudan jeneratörler üzerinden bağlanabileceği

gibi güç elektroniği sistemleri üzerinden de bağlanabilmektedirler. Şekil 2.9’da dağıtık üretimin şebeke ile entegrasyonunda kullanılan bağlantı araçları görülmektedir.

Dağıtık üretim sistemlerinin şebekeye entegrasyonunun sistem kararlılığı üzerindeki etkisi araştırıldığında yük akışı gibi kalıcı durumlarda benzer etkiler gözlemlenirken arıza gibi geçici durumlarda ise farklı etkiler gözlemlenebilir. Durumun böyle olmasında sistem kararlılığı için kritik öneme sahip olan atalet miktarının farklı olması etkilidir. Güç sistemi içerisinde bir arıza oluştuğunda sistemin yeniden denge noktasına gelebilmesi için gerekli olan atalet bazı dağıtık üretim birimlerinde çok düşük seviyededir. Dahası inverter gibi güç elektroniği aracılığıyla bağlanan dağıtık üretim birimlerinin döner bir yapıya sahip olmamalarından dolayı sistem kararlılığı için gerekli ataletle sahip olmayabilirler. Bu durumda sistemde bir arızayla karşılaşıldığında sistemi kararlı hale getirmek için gerekli olan atalet ve sönümleme momenti sadece senkron jeneratörlerden sağlanmaya çalışılacağı için, sekron jeneratörlerin hızlanmasına, sistemde meydana gelecek olan frekans ve gerilim salınımları karşısında senkron jeneratörlerin aşırı yüklenilmesine ve sonrasında da tüm sistemin kararsız hale gelmesine neden olabilir. Özellikle güç elektroniği üzerinde şebekeye bağlı dağıtık üretimlerin neden olduğu kararsızlık durumlarının üstesinden gelebilmek için sanal senkron jeneratör (Virtual Synchronous Generator- VSG) kavramı önerilmektedir [61].

Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren dağıtık üretimlerin aralıklı ve öngörülemeyen yapılarından dolayı her zaman faydalanamayabilir. Ancak bu yapılardan enerji üretimlerinin yoğun olarak yapıldığı zaman dilimlerinde şebekeye bağlayarak faydalanılabilir. Bu seferde şebekeye bağlanan dağıtık üretimin devreye alma veya çıkarma gibi anahtarlama olayları sırasındaki yaşanabilecek akım, gerilim ve frekanstaki ani değişimler sistem kararlılığı üzerinde bozucu bir etkiye sahip olabilir.

Dağıtık üretimin, sistem kararlılığı üzerindeki etkisini belirleyici bir diğer önemli faktör ise şebekeye entegrasyon oranıdır. Bu oran şebekeye bağlanabilecek dağıtık üretim sistemlerinin kurulum gücünün belirlenmesinde ve sistem kararlılığını etkilemesi bakımından oldukça önemlidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kararlılık Analizinde Kullanılan Test Sistemlerinin ve Sistemlere Ait Profillerin Tanıtılması

Akıllı şebeke teknolojisiyle artmaya başlayan dağıtım üretim ve talep taraflı yük yönetimi kavramlarının sistem kararlılığıyla etkileşimi, akademik çalışmaların yoğunlaştığı bir konu haline gelmiştir. Bu konuların bir bütün olarak ele alınmasının yanı sıra üretim ve tüketimdeki belirsizlikleri test sistemlerine aktarabilmek ve gerçekçi bir simülasyon yapabilmek açısından çok önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, akıllı şebeke teknolojilerinin güç sistemi kararlılığı üzerindeki etkisini araştırmak ve güç sistemini temsil edilebilecek sonuçlara ulaşabilmek için belli bir ölçeğe sahip güç sistemi modelleri kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan test sistemlerinin belirlenmesinde hesaplama süreleri ve olası senaryoların sayısı göz önünde bulundurularak tercih yapılmıştır. Bu kriterler doğrultusunda literatürde sıkça tercih edilen 9, 14, 30 ve 39 baralı IEEE test sistemleri kullanılarak Matlab simülatörü üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Matlab’da güç akışı ve kararlılık için temel olarak kabul edilen Hadi Saadat tarafından ortaya konulan temel yazılım, dağıtık üretim ve değişken tüketim yapısına uygun olarak değiştirilerek geliştirilmiştir.

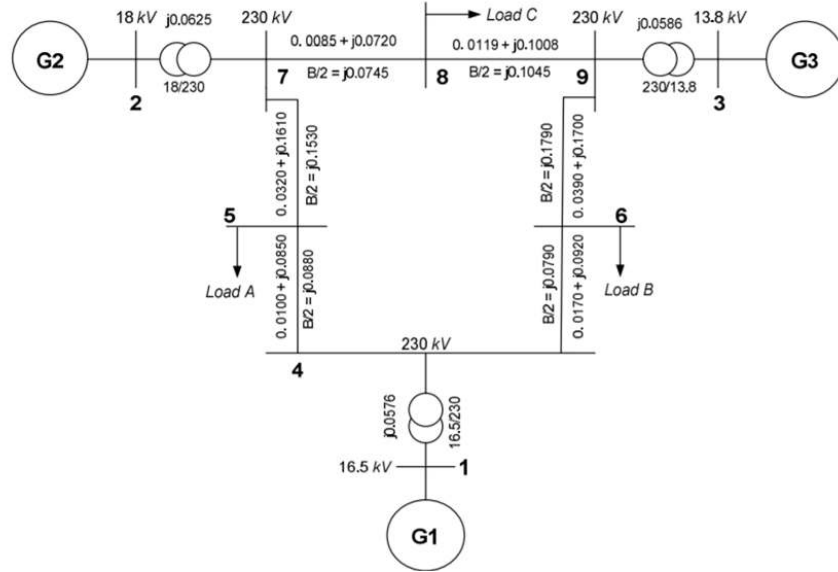
Kullanılan test sistemlerinin modellenmesinde gerekli olan gerilim, güç, empedans vb. parametreler literatürden elde edilmiştir. Bu sistemlerin merkezi yapıdaki üretimlerini temsil eden mevcut durumlarına ait genel bilgiler şu şekildedir:

- *9 baralı güç sistemi:* 3 makine, 3 yük, 3 transformatör ve 6 iletim hattından oluşan 9 baralı güç sistemine ait mevcut durum Şekil 3.1.(a)’da verilmiştir.
- *14 baralı güç sistemi:* 5 makine, 11 yük, 3 transformatör ve 15 iletim hattından oluşan 14 baralı güç sistemine ait mevcut durum Şekil 3.1.(b)’de verilmiştir.
- *30 baralı güç sistemi:* 6 makine, 21 yük, 4 transformatör ve 37 iletim hattından oluşan 30 baralı güç sistemine ait mevcut durum Şekil 3.1.(c)’de verilmiştir.

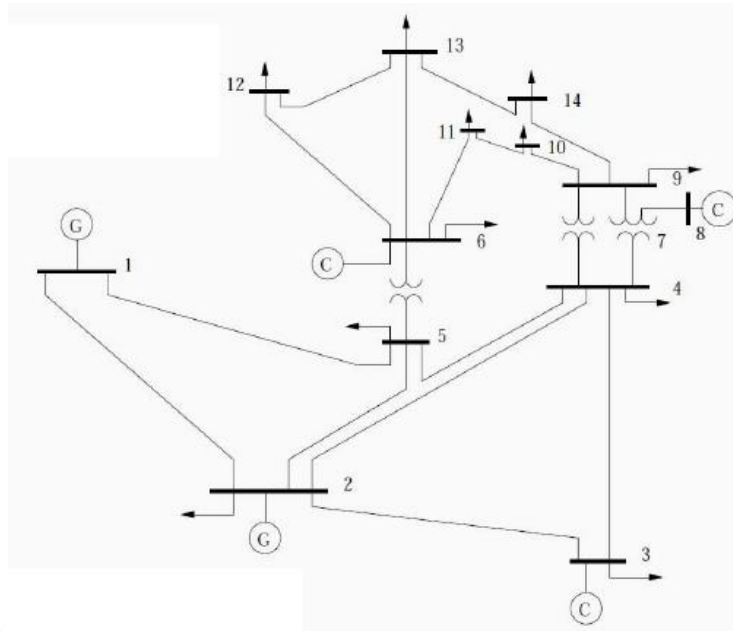
- 39 baralı güç sistemi: 10 makine, 19 yük, 12 transformatör ve 34 iletim hattından oluşan New England olarak da bilinen 39 baralı güç sistemine ait mevcut durum Şekil 3.1.(d)'de verilmiştir.

Test sistemlerinin kararlılık analizinde kullanılan bazı parametreler (gerilim, güç gibi) çok yüksek değerlere sahip olduğundan 100 MVA'lık güç değeri ve 60 Hz frekans değeri referans kabul edilmiştir. Diğer tüm değişkenler bu referans değere göre düzenlenerek işlem kolaylığı sağlanmıştır. Ayrıca çok makineli sistemlerde rotor açısı kararlılığının incelenmesinde bir generatöre ait açının referans açısı olarak alınması gerekir. Kullanılan test sistemlerinde referans açısı için eylemsizlik sabiti büyük olan makine seçilmiş olup bu makine, aksi belirtilmediği takdirde genel olarak 1 nolu generatördür.

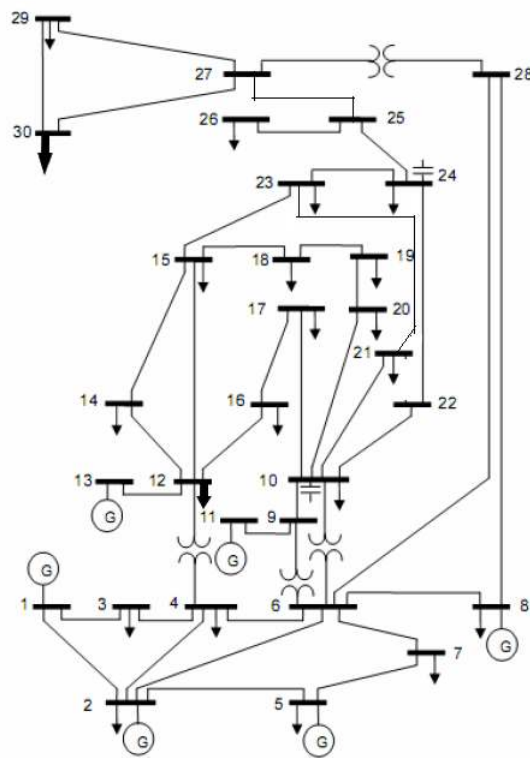
Ayrıca şekil 3.1'de verilen farklı karakteristiğe sahip test sistemlerinin kullanılması, kararlılık analizlerinde farklı güç sistemlerinin değişen tepkilerinin görülebilmesi açısından tercih edilmiştir.



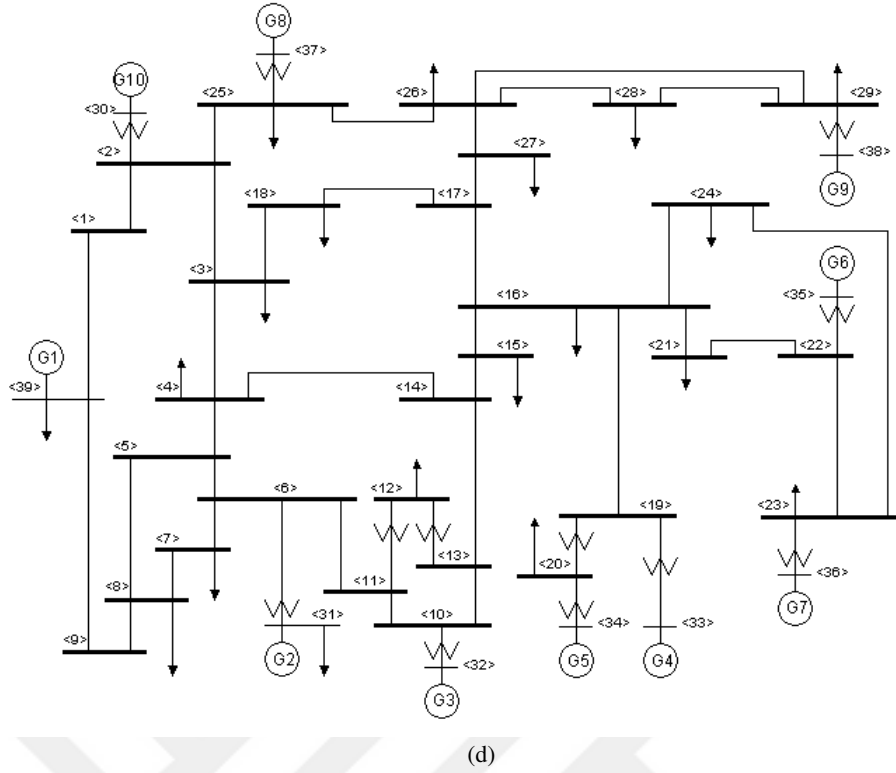
(a)



(b)

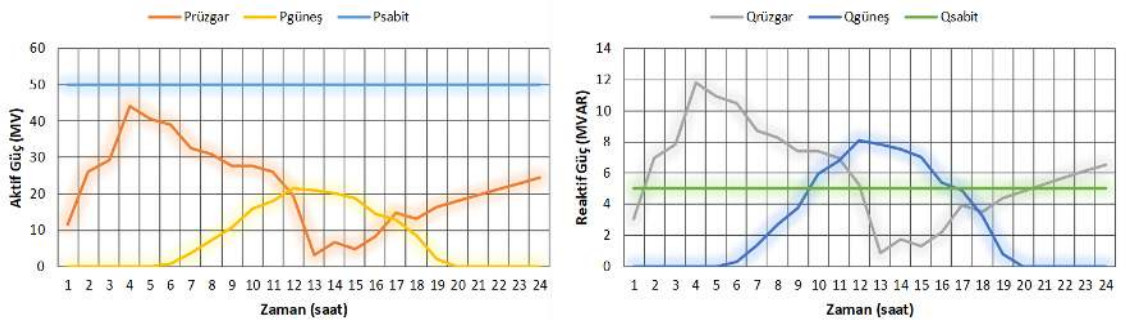


(c)

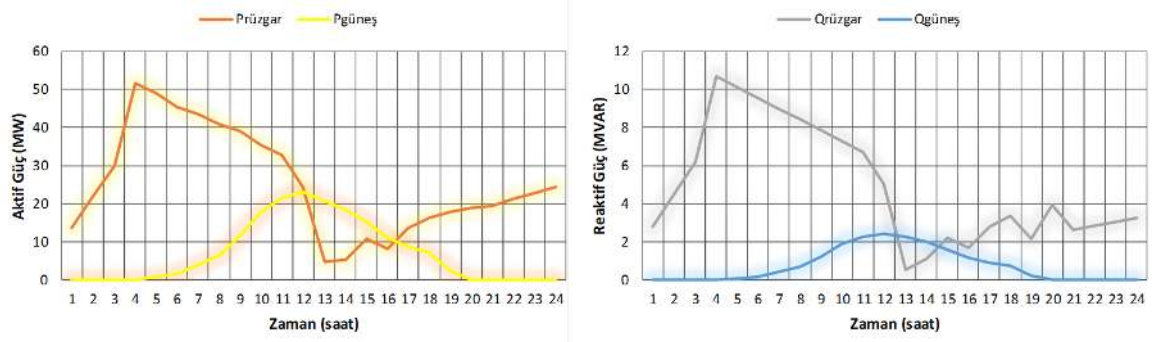


Şekil 3.1. (a) 9 baralı sistem ait, (b) 14 baralı sistem ait, (c) 30 baralı sistem ait, (d) 39 baralı sistem ait mevcut durum diyagramları

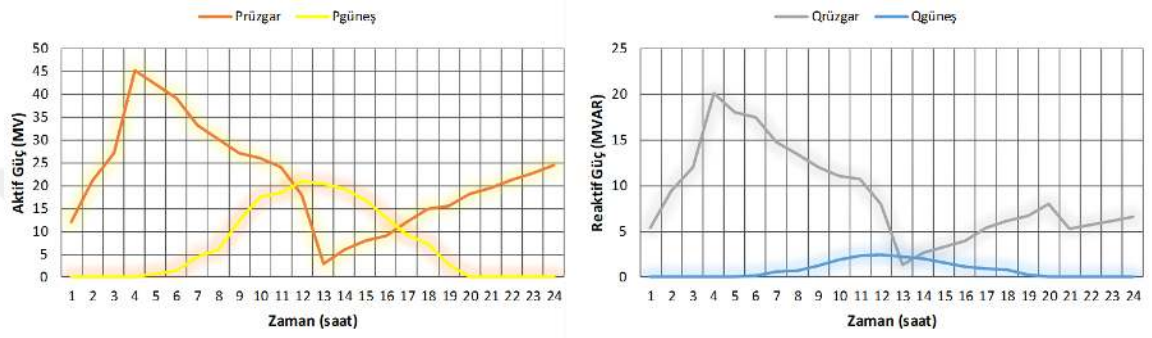
Akıllı şebeke ve güç sistemi kararlılığı arasındaki etkileşimi analiz edebilmek amacıyla test sistemleri, dağıtık üretim ve değişken yük birimleri ile yeniden modellenerek modifiye edilmiştir. Modelleme esnasında yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimleri temsilen rüzgâr ve güneş enerjisi tercih edilmiştir. Özellikle de güneş ve rüzgârdaki belirsizlikleri yansıtabilecek 24 saatlik ortalama üretim profilleri belirlenmiştir. Ayrıca sistemdeki değişken karakteristiğe sahip mesken ve sanayi tipi tüketicileri temsilen 24 saatlik ortalama tüketim profilleri belirlenmiştir. Kullanılan profiller kaynak ve tüketici davranışlarına uygun şekilde her sistem için ayrı olacak şekilde varsayımsal olarak belirlenmiştir. Her sisteme ait 24 saatlik üretim profilleri şekil 3.2’de ve tüketim profilleri şekil 3.3’te verilmiştir.



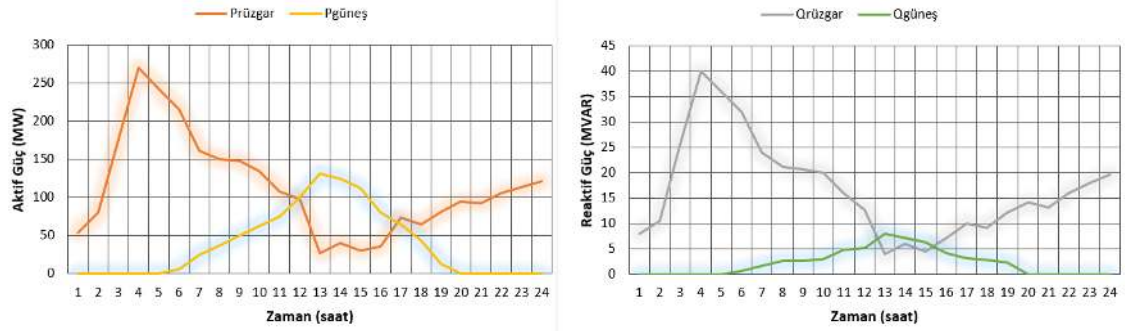
(a)



(b)



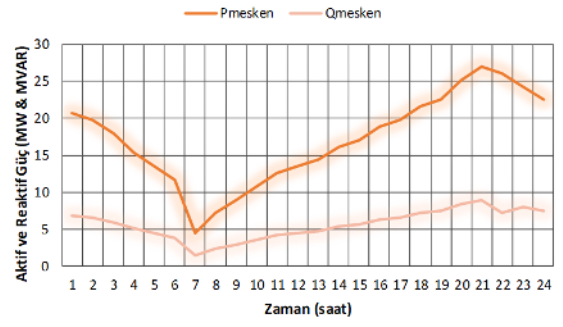
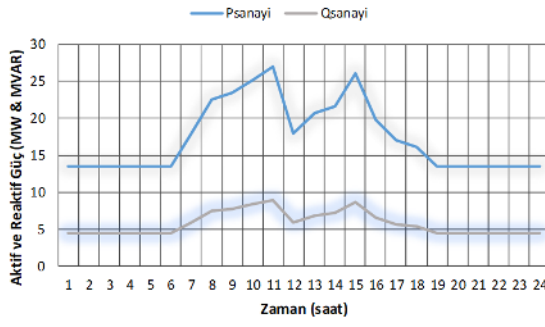
(c)



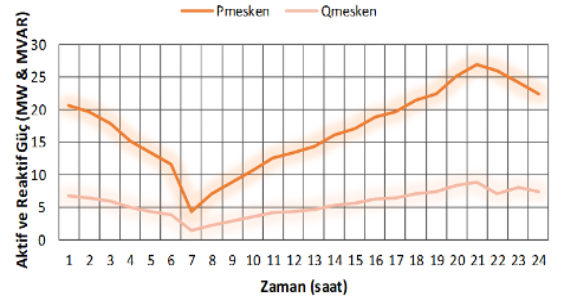
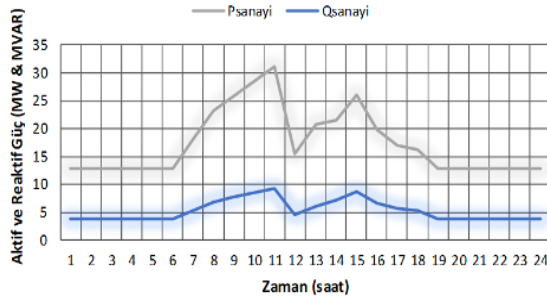
(d)

Şekil 3.2. (a) 9 baralı sistem için kullanılan, (b) 14 baralı sistem için kullanılan, (c) 30 baralı sistem için kullanılan, (d) 39 baralı sistem için kullanılan 24 saatlik ortalama üretim profilleri

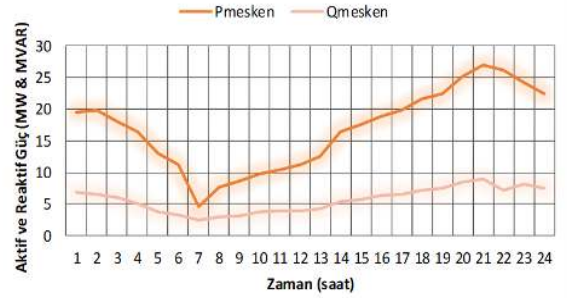
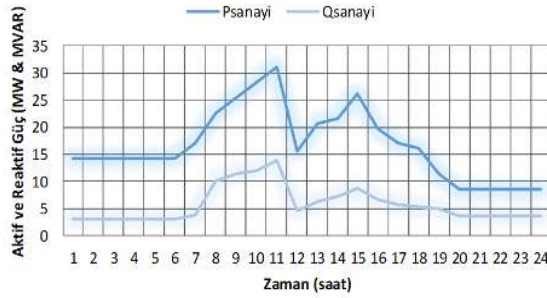
Varsayımsal olarak oluşturulan üretim profilleri üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar, termik ve hidroelektrik santralleri temsilen sürekli enerji sağlayan sabit üretim kaynakları ($P_{\text{sabit}}/Q_{\text{sabit}}$) ile olası saatlik değişimler göz önüne alınarak aralıklı ve değişken yapıya sahip rüzgâr ($P_{\text{rüzgar}}/Q_{\text{rüzgar}}$) ve güneş ($P_{\text{güneş}}/Q_{\text{güneş}}$) enerji üretim kaynaklarıdır.



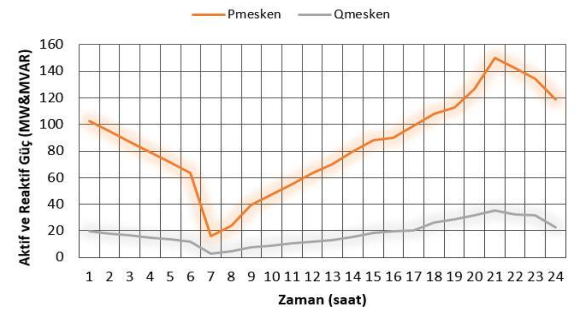
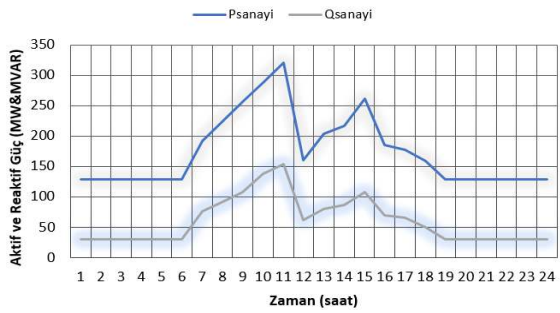
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.3. (a) 9 baralı sistem için kullanılan, (b) 14 baralı sistem için kullanılan, (c) 30 baralı sistem için kullanılan, (d) 39 baralı sistem için kullanılan 24 saatlik ortalama tüketim profilleri

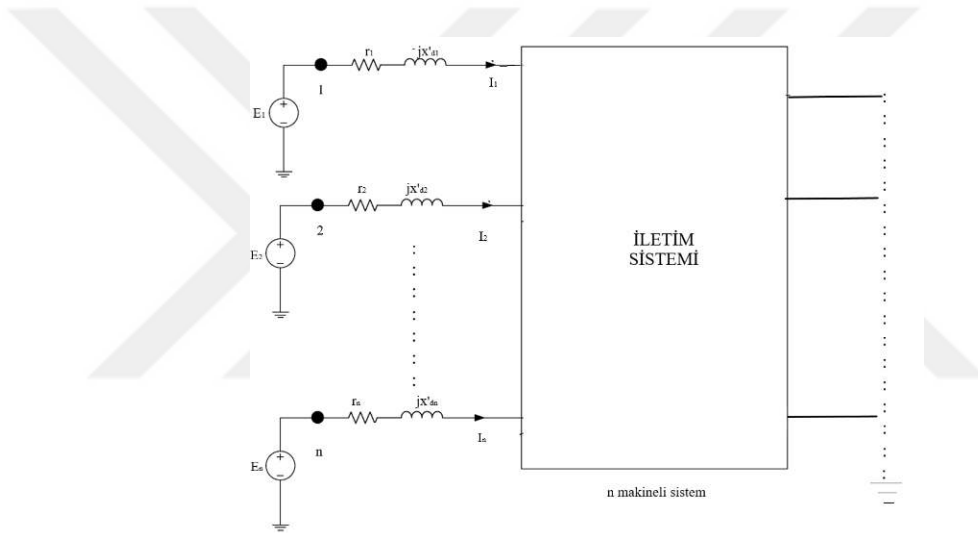
Yine varsayımsal olarak oluşturulan tüketim profilleri iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar, tüketim değişkenliği daha az olan sanayi bölgelerini temsil eden sanayi tipi

yükler ($P_{\text{sanayi}}/Q_{\text{sanayi}}$) ile tüketim değişkenliği nispeten daha fazla olan mesken bölgelerini temsil eden mesken tipi yüklerdir ($P_{\text{mesken}}/Q_{\text{mesken}}$).

3.2. Yöntem

3.2.1. Kararlılık Analizi

Bu bölümde, çok makineli güç sistemleri ve bu sistemlere ait klasik makine modelleri kullanılarak kararlılık analizi teorik olarak açıklanmıştır. Analizde çok makineli güç sistemlerini temsilen şekil 3.4’de verilen n makineli güç sistemi kullanılmıştır. Bu n makineli güç sisteminde, indüklenen gerilim baralarını göstermek amacıyla 1’den n ’e kadar numaralandırılmış düğümler kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Çok makineli sistem diyagramı

n makineli güç sisteminde, lineer olmayan denklem çözümünde daha yaygın bir şekilde kullanılan Newton-Raphson yineleme metodu tercih edilmiştir. Bu metot sayesinde genelleştirilmiş yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece gerekli veriler elde edilerek güç sistemi, kararlılık analizine hazır hale getirilmiş olur. Genel olarak analiz aşamaları şu şekildedir:

1. Aşama: Öncelikle yük akış analizlerinin yapılabilmesi için Kirchhoff Akım Kanun’u her baraya uygulanarak güç denklemlerinin elde edilmesi gerekir. Sistemdeki bir i barası ve bağlantılı olduğu iletim hatları göz önüne alınarak Kirchhoff Akım Kanun’u uygulandığında;

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \dots & \bar{Y}_{1n} \\ \bar{Y}_{21} & \ddots & \bar{Y}_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \dots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (3,1)$$

veya

$$\bar{I}_{bus} = \bar{Y}_{bus} \bar{V}_{bus} \quad (3,2)$$

düğüm-gerilim denklemleri matris formunda elde edilir. Burada $\bar{Y}_{bus}$ akım admitans matrisi, $\bar{V}_{bus}$ bara gerilim vektörü ve $\bar{I}_{bus}$ bara akım vektörü olarak temsil edilir.

Sırasıyla köşegen admitans ve köşegen olmayan admitans elemanları

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \quad (3,3)$$

$$Y_{ii} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (3,4)$$

şeklinde bulunur.

2. Aşama: Kuadratik yakınsamadan dolayı Newton metodu diğer tekrarlamalı metodlarından matematiksel olarak daha üstün olup güç sistemlerinde daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

n makineli güç sisteminin i barasındaki akım ifadesi kutupsal formda yazılabilir;

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \angle \alpha_{ij} + \theta_j \quad (3,5)$$

i barasına ait kompleks güç;

$$P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (3,6)$$

olup akım ifadesi (denklem(3,5)) yerine yazılırsa

$$P_i + jQ_i = (|V_i| \angle \alpha_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle -\alpha_{ij} - \theta_j \quad (3,7)$$

olarak ifade edilir. Kompleks güç denklemi, gerçekte ve sanal olarak şu şekilde yazılabilir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) \quad (3,8)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) \quad (3,9)$$

3. Aşama: Denklem (3,8) ve (3,9) bağımsız değişkenleri içeren denklem sistemini oluşturur. P_i ve Q_i denklemleri başlangıç değeri yakınında Taylor serisi açılımı yapılarak denklem (3,10)'da ifade edilen lineer denklem sistemi takımına dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \theta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (3,10)$$

Bu denklem sisteminde 1 nolu baranın slack bara olduğu kabul edilmiştir.

Aşağıdaki denklem ise aktif ve reaktif güç denklemlerinin açı ve genlik değişimlerine göre kısmi türevlerinden oluşan ve Jacobian matrisi olarak isimlendirilen J matrisi, aktif ve reaktif güçteki değişim oranıyla gerilim faz açısı ve gerilim genliğindeki değişim oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu sayede gerilim ve güç değişimleri üzerinden gerilim kararlılığı analizi yapılabilmektedir.

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3,11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3,12)$$

4. Aşama: Sistemdeki i . jeneratöre ait elektriksel çıkış gücü ifadesi;

$$P_{ei} = \text{Re}(\bar{E}_i \bar{I}_i^*) \quad (3,13)$$

veya

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3,14)$$

şeklinde ifade edilir.

5. Aşama Klasik makine modeline ait salınım denklemi ise;

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad (3,15)$$

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3,16)$$

olup birbirleri ile bağlantılı denklemlerdir.

Bozucu etki öncesi

$$P_{mi0} = P_{ei0} \quad (3,17)$$

olduğundan

$$P_{mi} = E_i^2 G_{ii0} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij0} \cos(\theta_{ij0} - \delta_{i0} + \delta_{j0}) \quad (3,18)$$

(3,16) denklemi başlangıç veya arıza öncesi çalışma durumlarını göstermektedir.

6. Aşama: Bu aşamada yük akışı analizi yardımıyla arıza anı ve arıza sonrası indirgenmiş Y bara matrisi hesaplanır. Sonrasında bozucu etki öncesi için yazılan denklemler arıza anı ve arıza sonrası içinde tekrarlanır.

7. Aşama: 4.ve 5.aşamalarda elde dilen birbirleri ile bağlantılı olan ikinci dereceden lineer olmayan denklemler,

$$x^T = [\delta_0 \quad \delta_1 \quad \dots \quad \delta_n \quad \omega_0 \quad \omega_1 \quad \dots \quad \omega_n] \quad (3,19)$$

($2n \times 1$) boyutlu vektörel büyüklüğe sahip bir fonksiyon olarak ifade edilmektedir.

8. Aşama: x matrisinde yer alan δ değerlerindeki değişim rotor açısı kararlılığı analizlerinde kullanılırken w değerleri ise (3,20) denklemi aracılığıyla frekans kararlılığı analizlerinde kullanılır.

$$f_n = f + \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (3,20)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Güç sistemlerinin planlanma ve çalışmasında kararlılık kavramı hayati öneme sahiptir. Akıllı şebeke ile yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim kullanımının artması, tüketici yapısının değişerek üretken tüketici konumuna geçmesi geleneksel güç sistemlerinin yeniden şekillenmesine neden olacaktır. Sistem yapısındaki bu şekillenme beraberinde güç sistemi kararlılığında değişimleri de getirmektedir. Olası arıza veya değişkenlik gibi bozulmaların sistem kararlılığı bünyesinde oluşabilecek etkilerinin önceden görülebilmesi, sistem sürdürülebilirliği açısından önemlidir. Bu noktadan hareketle, tez çalışmasında akıllı şebeke olarak düşünülen test sistemleri üzerinden akıllı şebekenin sağlamış olduğu değişken üretim ve tüketim teknolojilerinin sistem kararlılığında meydana getireceği etkiler gözlemlenmiştir.

Bu bölümde ise sistem kararlılığında meydana gelen değişimleri gözlemlemek amacıyla genel bir simülasyon analiz prosedürü uygulanmıştır. Bu prosedür aşağıdaki gibidir:

1. Dağıtık üretim ve/veya değişken tüketim profilleri kullanılarak akıllı şebeke modelleri oluşturacak şekilde mevcut sistemler modifiye edilmiştir.
2. Modifiye edilen sistemlerin yük akış analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucu gerilim kararlılık göstergeleri elde edilmiştir. Ayrıca rotor açısı ve frekans kararlılığı içinde ilk koşullar elde edilmiştir.
3. Geçici durumu temsilen bir arıza oluşturularak test sistemlerine uygulanmıştır. Sistemlerin cevabı rotor açısı ve frekans kararlılığı göstergesi olarak kabul edilmiş ve kararlılık gözlemlenmiştir.
4. Aynı işlemler 24 saatlik profillerin her saat dilimi için tekrarlanmıştır.

Kararlılık analizleri, hem mevcut hem de modifiye sistem için yapıldığından pozitif ve negatif değişimlerin gözlemlenmesi açısından daha verimli sonuçlar elde edilmiştir.

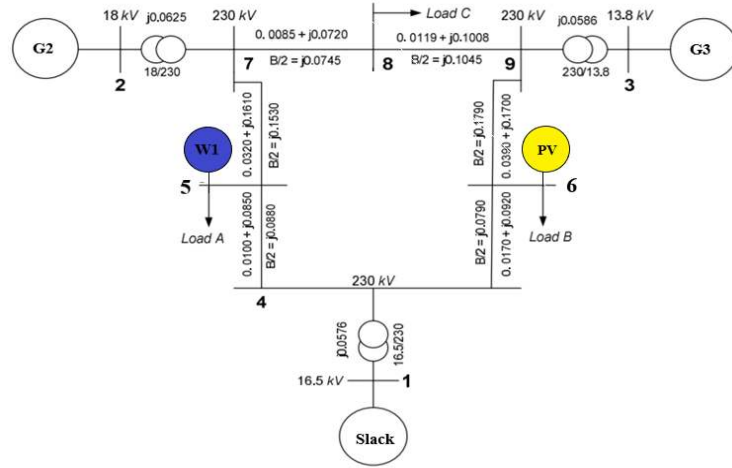
4.1. 9 Baralı Güç Sistemi Çalışması

Bölüm 3'te Şekil 3.1 (a)'da tanıtımı yapılan 9 baralı güç sistemi, şekil 3.2 (a)'daki dağıtık üretim ve şekil 3.3 (a)'daki değişken tüketim birimleri kullanılarak şekil 4.1'de gösterildiği gibi modifiye edilmiştir. Mevcut duruma ek olarak modifiye

1	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)
2	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
3	PV(senkron)	PV(sabit-senkron)	PV(sabit-senkron)
5	PQ	PQ+PV(rüzgâr)	PQ+PV(rüzgâr)
6	PQ	PQ	PQ+PV(rüzgâr)
8	PQ	PQ	PQ+PV(rüzgâr)

(a) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1

49



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 2

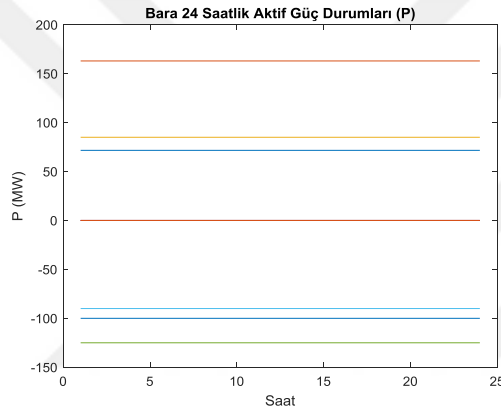
Şekil 4.1. 9 baralı modifiye güç sistemleri

Kararlılık analizi için mevcut sistemin yanı sıra şekil 4.1’de verilen dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ve dağıtık üretimli modifiye sistem 2 kullanılmıştır. Simülasyon analiz prosedürüne göre modifikasyondan sonra ikinci olarak yük akış çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişimleri şekil 4.2, şekil 4.3 ve şekil 4.4’de verilmiştir. Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.

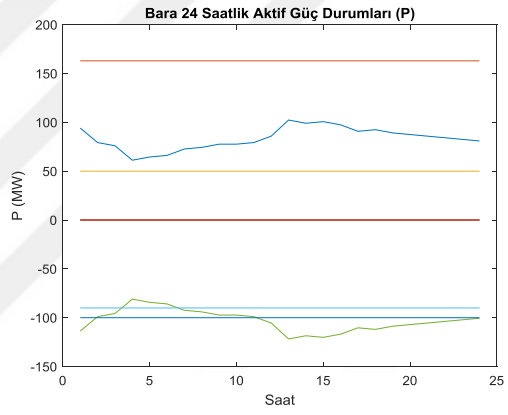
Şekil 4.2 incelendiğinde aralıklı ve belirsiz yapıya sahip üretim ve tüketim birimleri olmadığından mevcut duruma ait gerilim ve güç grafiklerinde sabit bir değişim gözlemlenmektedir. Bu durumun aksine dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ve 2’ye ait grafiklerde dağıtık üretimlerin aralıklı ve belirsiz yapılarından kaynaklı değişimler söz konusudur.

Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait şekil 4.3 için yapılan analizde mevcut duruma kıyasla dağıtık üretimin varlığı (güç eğrisinde yeşil ile ifade edilen) ve G3 jeneratörünün (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen) gücü azaltılarak 50 MW değerine sabitleşmiş olduğu görülmektedir. Geleneksel yapıya sahip güç değerindeki azalmaya bağlı referans jeneratörde yüklenme olmaktadır. Buna karşılık 5 nolu baraya bağlı olan yükün enerji ihtiyacını yine aynı baradaki dağıtık üretim üzerinden karşılaması özellikle de üretimin etkin olduğu zamanlarda referans (slack/ güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) jeneratör üzerindeki güç yoğunluğunu azaltmakta ve hat kayıplarının azalmasını sağlamaktadır. Bu durumu, dağıtık üretim birimlerinin

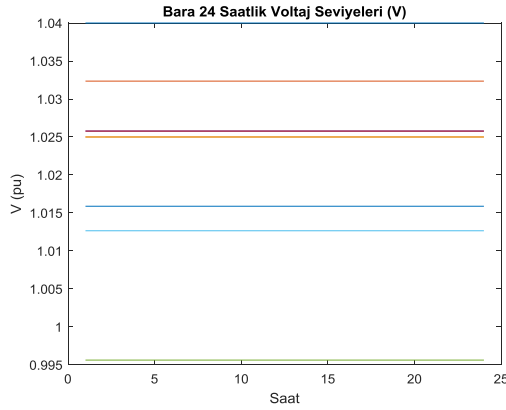
yüke yakın olmasına yani konumuna da bağlı olarak güç akışında iyileştirici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Gerilim değişimleri incelendiğinde ise sürekli ve merkezi yapıdaki üretim baralarında değişim olmamakla birlikte geçiş ve tüketim baralarında düşük seviyeli değişimler olmaktadır. Sistem içerisindeki en büyük gerilim değişimi olan % 0.4'lük artış, dağıtık üretimin olduğu 5 nolu barada gözlemlenmiştir. Meydana gelen bu değişimler dağıtık üretim entegrasyonunun doğal bir sonucudur. Güç seviyelerindeki iyileştirici etkinin yanı sıra bara gerilimlerinin nominal sınırlar içinde kalacak şekilde değişim göstermesi, gerilim kararlılığı bakımından sistem geneline etki edebilecek bir olumsuzluk oluşturmamaktadır. Dahası gerilim kararlılığı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.



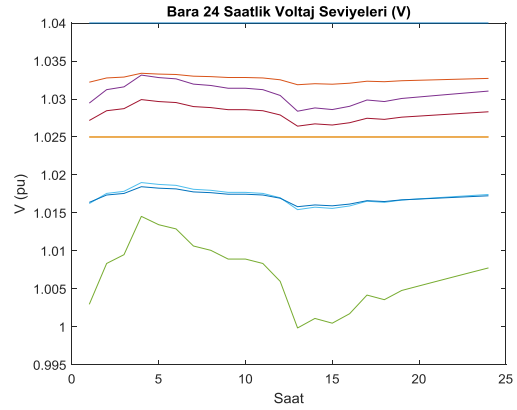
(a)



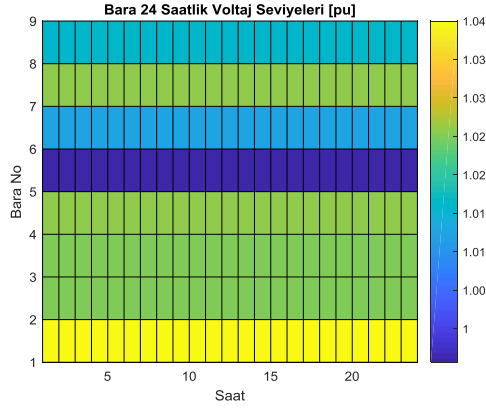
(a)



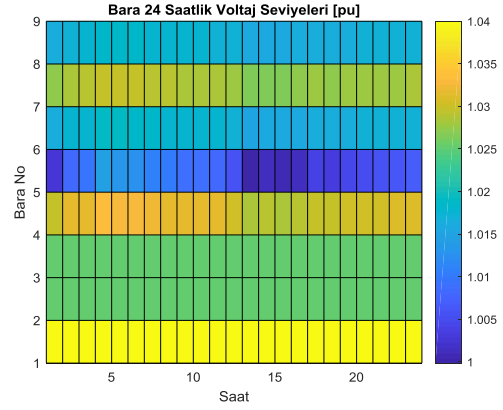
(b)



(b)



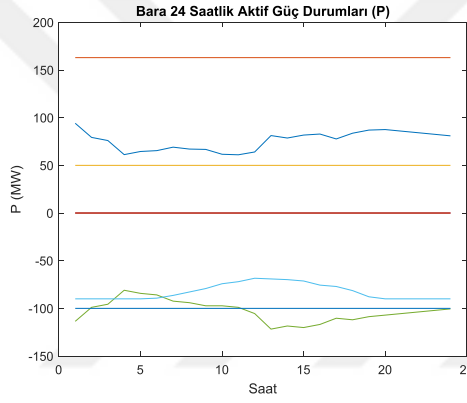
(c)



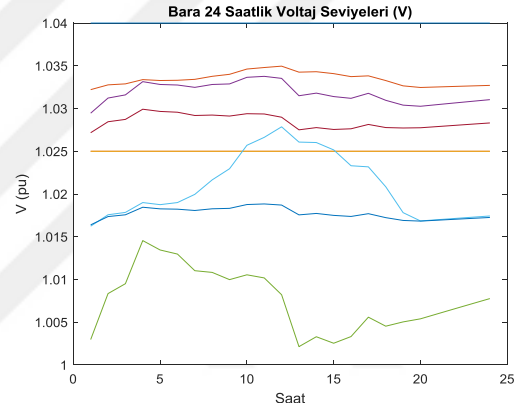
(c)

Şekil 4.2. Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

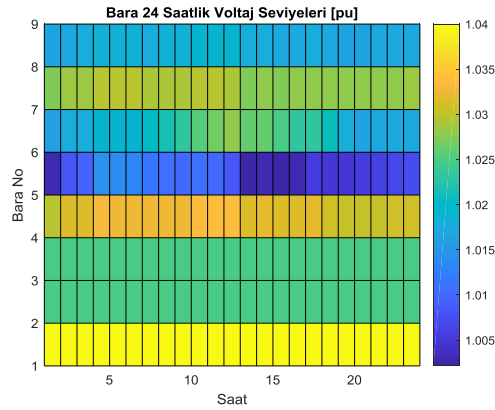
Şekil 4.3. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.4. Dağıtık üretimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

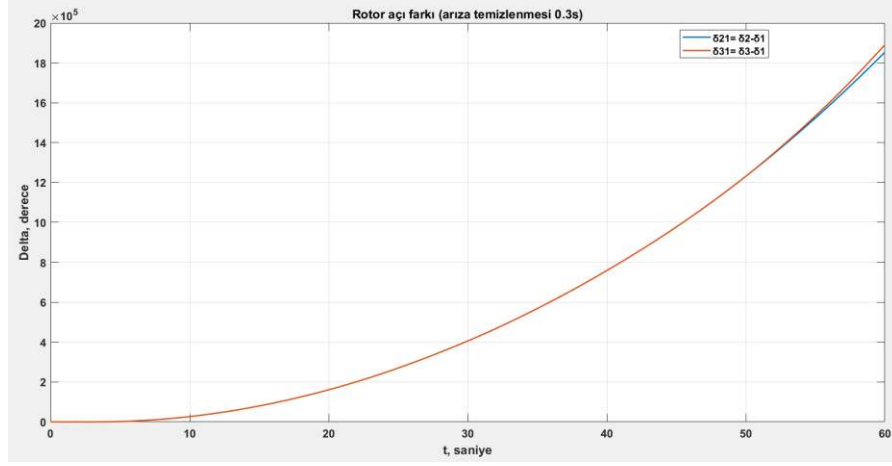
Dağıtık üretimli modifiye sistem 2 için yapılan simülasyon sonucu elde edilen şekil 4.4 analiz edildiğinde ise dağıtık üretimli modifiye sistem 1'den farklı olarak sisteme güneş enerjisinin (güç eğrisinde turkuvaz ile ifade edilen) de eklenmesiyle farklı bir etkileşim söz konusudur. Bununla birlikte dağıtık üretim birimlerine yakın

yüklerin enerji ihtiyacı yine bu birimler üzerinden karşılanmaktadır. Bu sayede dağıtık üretimli modifiye sistem 1'e kıyasla referans jeneratör üzerindeki güç yoğunluk daha da azaldığı gözlenmektedir. Doğal yollardan meydana gelen güç sınırlaması sistem üzerindeki iletim kayıplarının azalmasına katkı sağlamıştır. Gerilim değişimleri incelediğinde ise sistem içerisindeki en büyük gerilim değişimleri 5. ve 6. barada gözlenmektedir. Rüzgâr enerjisinin bağlı olduğu 5 nolu barada % 0.35 ve güneş enerjisinin bağlı olduğu 6 nolu barada % 0.36'lık artış meydana gelmiştir. Yine bu artışlarda nominal sınırlar içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durum ise gerilim kararlılığı bakımından sistem geneline etki edebilecek bir olumsuzluk oluşturmamaktadır.

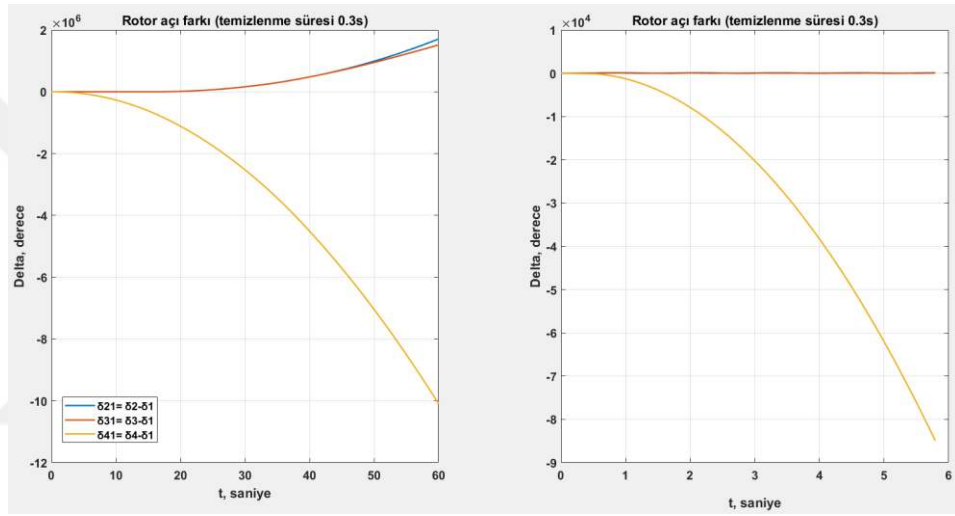
Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açısı ve frekans kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu temsilen oluşturulan arıza hem mevcut sisteme hem de modifiye sistemlere uygulanmıştır. Her üç sisteme de bozucu bir etkiye sahip 4-5 hattında 4 nolu baraya yakın bir üç faz arızası uygulanmıştır. Bu arızanın sistemler için 0.3 saniyede 4-5 hattı açılacak şekilde temizlendiği düşünülerek simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, bozucu etki altındaki sistemlerin cevabı şekil 4.5'teki gösterildiği gibidir. Bu cevaplar;

- Şekil 4.5.(a) mevcut duruma ait sürekli ve merkezi yapıdaki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.5.(b) dağıtık üretim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 1'in 12. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.5.(c) dağıtık üretim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 2'nin 12. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını

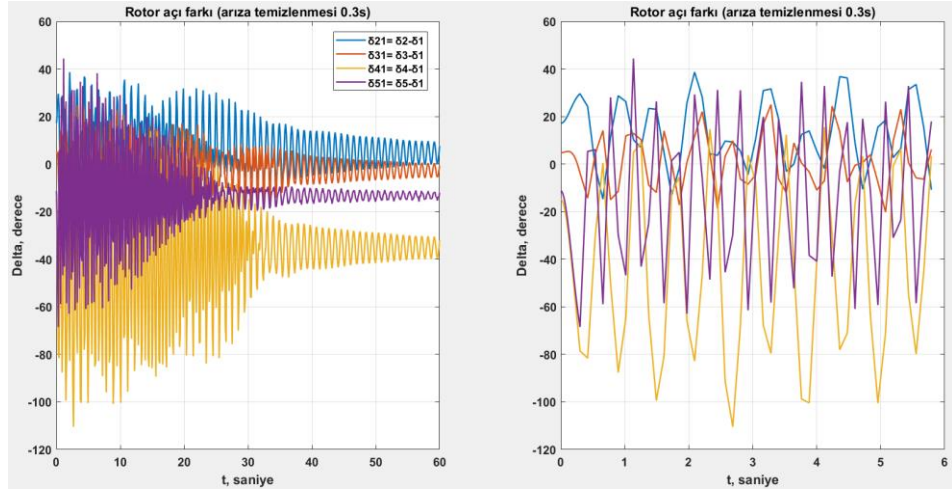
göstermektedir. Ayrıca simülasyon gerçekleştirilirken çoklu makinelerde daha etkili ve kolay analiz yapabilmek için rotor açısı farklarının zamanla değişimi metodolojisi tercih edilmiştir.



(a) Mevcut sistem



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 (12.saat dilimi)



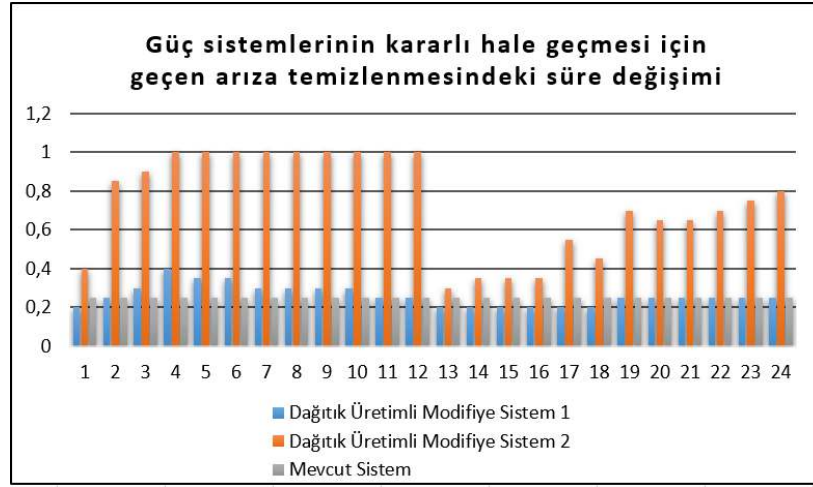
(c) Dağıtık üretimli modifiye sistem 2 (12.saat dilimi)

Şekil 4.5. Jeneratör rotor açı değişimleri

Simülasyon sonucu elde edilen, referans jeneratöre göre rotor aç ı farklarının salınımları incelendiğinde hem dağıtık üretimli modifiye sistem 1'in 12. saatteki üretim durumu hem de mevcut sistem durumu için arıza esnasında sistemler yeterli senkronizma momenti üretmemişlerdir. Bu da rotor aç ı farklarında sonsuz yönlü artış veya azalışlara neden olmuştur. Sonuç olarak, her iki sistem de bu sonsuz yönlü değişikliklerden dolayı kararsız hale gelmiştir. Bu sistem için, elektrik üretimindeki payların bir kısmı geleneksel üretimden rüzgâr enerjisine geçse bile sistemin kararsız kalmaya devam ettiğini göstermektedir. Durumun böyle olmasında, merkezi üretimin ve genel sistem ataletinin azalması karş ısında dağıtık üretim entegrasyonunun hem yeterli seviyede olmaması hem de arıza noktasına yakın olması etkili olmuştur. Dağıtık üretimli modifiye sistem 2'de ise, sistem yeterli senkronizma momenti üretebildiğ inden rotor aç ı farkları nispeten belli sınırlar arasında periyodik salınım ürettiğ i gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, sönümleme momentinin yetersizliğ inden ve arıza noktasından dolayı, şek il 4.5.(c)'de verilen rüzgar enerjisine ait δ_{41} değ işiminin maksimum düzeyli salınımlar yapmasına neden olmuştur. Buna rağmen sistem marjinal olarak kararlılığını korumuştur. Bu sistem için rüzgâr ve güneş kombinasyonlu dağıtık üretimlerin, geçici şartlar altında iyileştirici bir etkiye sahip olduğ u gözlemlenmiştir.

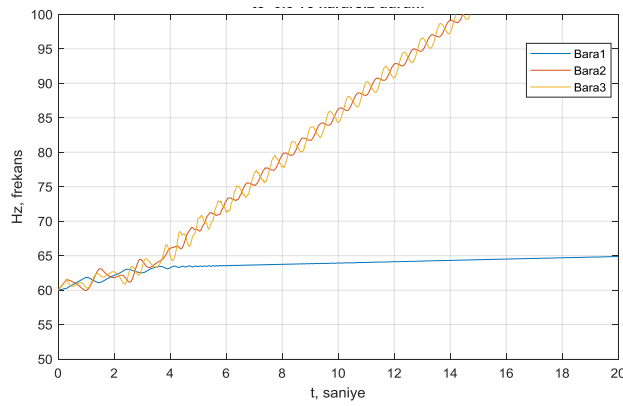
Önceki adımda dağıtık üretimlerin 12. saati için yapılan simülasyon, üç sisteminde 24 saatlik üretim profillerinin her saat dilimi için tekrar edilmiştir. Şek il 4.6'da verilen grafik, simülasyon sonucu elde edilen ve sistemlerin kararlı olduğ u temizleme sürelerinin değ işimini göstermektedir. Güneş ve rüzgâr üretiminin aynı anda fazla olduğ u zaman dilimlerinde sistem temizlenme süresindeki artışa rağmen kararlılıklarını koruduğ u görülmektedir. Her iki üretimin özellikle de rüzgârın düşük olduğ u dilimlerde ise sistemdeki diğ er kaynaklardan üretim fazla bile olsa, eylemsizlik sabitinin düşük olmasından dolayı daha küçük temizleme sürelerinde sistem kararsız hale geçmektedir. Buna rağmen mevcut durumla kıyaslandığında yenilenebilir kaynaklarının eklendiğ i durumlarda ve bu kaynaklardaki üretimin fazla olduğ u saat dilimlerinde, temizlenme süresindeki artışlara karş ın sistem kararlılığını sürdürmüştür. Dağıtık üretimlerin varlığına karş ın grafikte belirtilen sürelerin üzerindeki temizlenme süreleri için sistemler kararsız hale geçmektedir. Bu durum ise dağıtık üretimlerin belirli bir seviyenin üzerine çıksa dahi iletişim aksaklığı,

yanlış röle ayarı gibi teknik nedenlerden dolayı artan temizlenme süreleri karşısında iyileştirici özelliğini kaybedebileceğini göstermektedir.

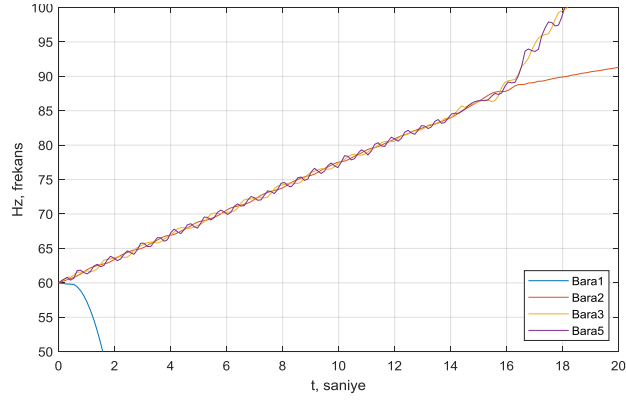


Şekil 4.6. 4 nolu baraya yakın 4-5 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)

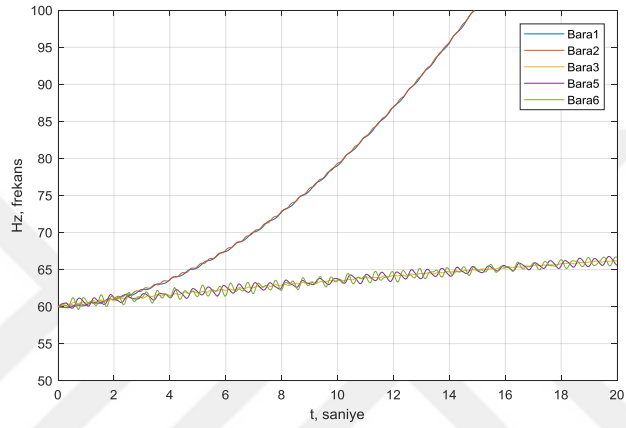
Simülasyon analiz prosedürüne göre bir diğer üçüncü aşama ise frekans kararlılığı çalışmasıdır. Frekans kararlılığındaki değişimi gözlemlemek amacıyla yine rotor açılı çalışmasındaki gibi 4-5 hattında 4 nolu baraya yakın bir üç faz arızası uygulanmıştır. Her üç durum içinde temizlenme süreleri $t_c=0.3$ saniye olup 20 saniyede biten bir simülasyon gerçekleştirildiğinde Şekil 4.7'deki sonuçlar elde edilmiştir.



(a) Mevcut sistem



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1(12.saat dilimi)



(c) Dağıtık üretimli modifiye sistem 2 (12.saat dilimi)

Şekil 4.7. Frekans değişimi

Şekil 4.7'deki frekans değişim grafikleri incelendiğinde mevcut durum ve dağıtık üretimli modifiye sistem 1 sonsuz yönlü değişimler yaparak rotor açısı kararlılığında olduğu gibi frekans kararlılığı bakımından da kararsız hale geçtiği görülmüştür. Buna karşılık dağıtık üretimli modifiye sistem 2 rotor açısı kararlılığında marjinal kararlı iken frekans kararlılığı bakımından da incelendiğinde kararsız hale geçtiği gözlemlenmiştir. Ayrıca modifiye edilen her iki sistemin bütün saat dilimleri için analizler tekrarlandığında sistemlerin frekans bakımından kararsız olduğu gözlemlenmiştir. Frekans kararsızlığının gözlemlenmesinde hem merkezi üretim hem de dağıtık üretim durumlarında depolanan kinetik enerjinin yetersiz olması etkili olmuştur.

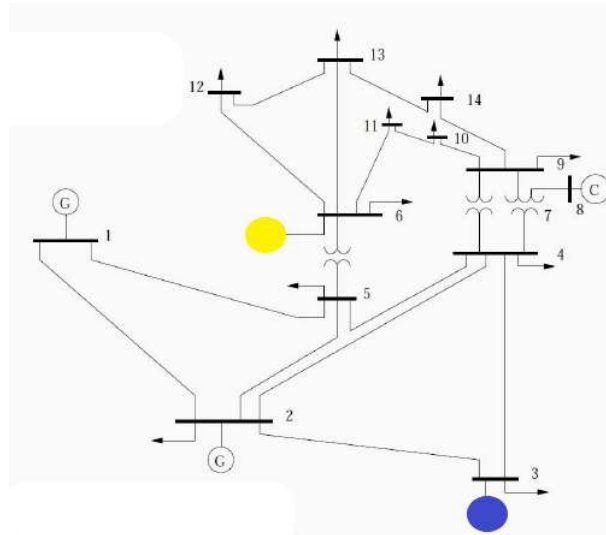
Genel olarak 9 baralı güç sisteminin bu tarz modifikasyonları için dağıtık üretimlerin varlığı güç-gerilim dengesinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık rotor açısı ve frekans kararsızlığının meydana geldiği küçük nitelikli bozulma şartlarında, sistemde kararsızlık yerel bir sorunken sistemin çökmesi neden olan genel bir olguya dönüşmesi olasıdır.

4.2. 14 Baralı Güç Sistemi Çalışması

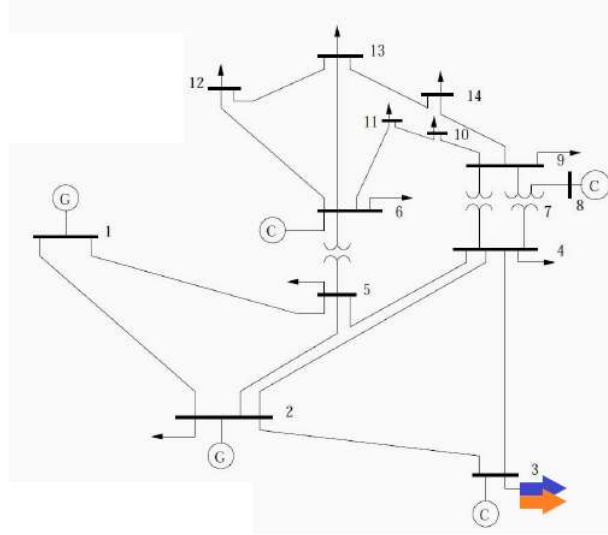
Bölüm 3’de tanıtımı yapılan 14 baralı güç sistemi, şekil 3.2 (b)’deki dağıtık üretim ve şekil 3.3 (b)’deki değişken tüketim birimleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye sistemlere ait tek hat şeması şekil 4.8’de gösterildiği gibidir. Mevcut duruma ek olarak modifiye edilen sistemlere ait bilgiler çizelge 4.2’de verilmiştir. Dağıtık üretim birimlerinin rotor açısı kararlılığı üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla rüzgâr ve güneş birimleri için sırasıyla 2.5 ve 0.2 gibi küçük eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılmıştır.

Çizelge 4.2. 14 baralı test sistemi karakteristikleri

Bara Numarası	Mevcut Sistem Bara Türü	Dağıtık Üretimli Modifiye Sistem 1 Bara Türü	Değişken Tüketimli Modifiye Sistem 2 Bara Türü
1	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)
2	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
3	PV(senkron)	PV(rüzgâr)	PV(senkron) PQ (sanayi tipi +mesken tipi)
6	PV(senkron)	PV(güneş)	PV(senkron)
8	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)



(a) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1



(b) Değişken tüketimli modifiye sistem 2

Şekil 4.8. 14 baralı modifiye güç sistemleri

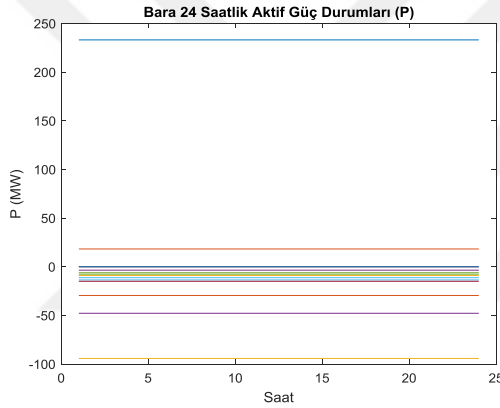
Kararlılık analizi için mevcut sistemin yanı sıra şekil 4.8’de verilen dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ve değişken tüketimli modifiye sistem 2 kullanılmıştır. Özellikle değişken tüketimli modifiye sistem 2 ile talep taraf yük yönetim modelini temsilen değişken yapıdaki tüketim birimlerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmek amaçlanmıştır.

Simülasyon analiz prosedürüne göre ikinci aşama olan yük akış çalışması sonucu gerilim ve güç değişimleri şekil 4.9, şekil 4.10 ve şekil 4.11’deki gibi elde edilmiştir. Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.

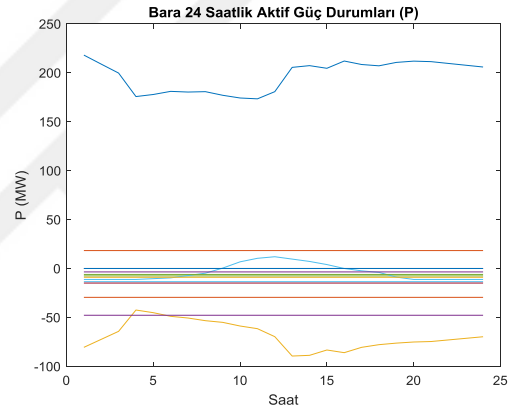
Şekil 4.9’da mevcut sisteme ait 24 saatlik güç ve gerilim değişimleri incelendiğinde geleneksel yapıya sahip üretim birimlerinden kaynaklı olarak ilgili değerlerin sabit olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.10’da ise mevcut durumdan farklı bir karakteristiğe sahip dağıtık üretimli modifiye sistem 1’in güç ve gerilim değişimleri verilmiştir. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 bünyesindeki güneş (güç eğrisinde turkuvaz ile ifade edilen) ve rüzgâra (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen) dayalı dağıtık üretimlerin varlığı, özellikle bu birimlerin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerindeki yük yoğunluğunun azaltılmasına yardımcı olmuştur. Böylece iletim hatları üzerinden yüklere enerji aktarımı sırasında meydana gelen kayıpların önüne geçilerek sistem gücünde pozitif bir etki oluşturmaktadır. Dahası dağıtık üretim kaynaklarının ilgili

baralarda daha fazla entegrasyonunun arttırılması ile üretken tüketici kavramının gerçekleşmesinin sağlanabilir.

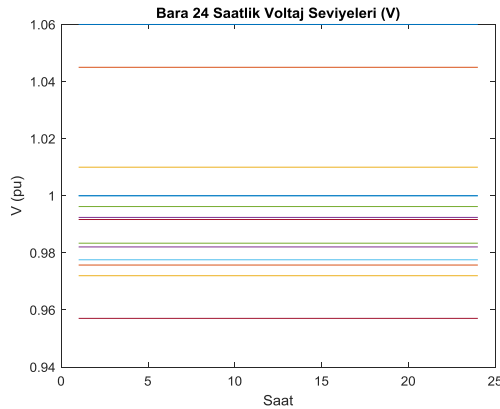
Sistemde gün içerisinde en büyük gerilim değişimi ise % 0.93'lük bir değerle rüzgâr enerjisinin bağlı olduğu 3 nolu barada gözlemlenmiştir. Gerilim bakımından yapılan analizlerde mevcut sistemde olduğu gibi 24 saat boyunca 1 nolu barada gerilim artışının önüne geçilememiştir. Dahası dağıtık üretim birimlerinin bağlı olduğu bara gerilimleri üzerinde küçükte olsa artışlar görülmektedir. Dağıtık üretimin doğal bir sonucu olan artış ve azalışlar nominal sınırlar içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durum ise güçte olan bariz pozitif etkinin gerilimde gözlemlenmediği sonucunu çıkarmaktadır. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 özelinde, gerilim kararlılığı bakımından kayda değer bir iyileşme veya bozulma söz konusu değildir.



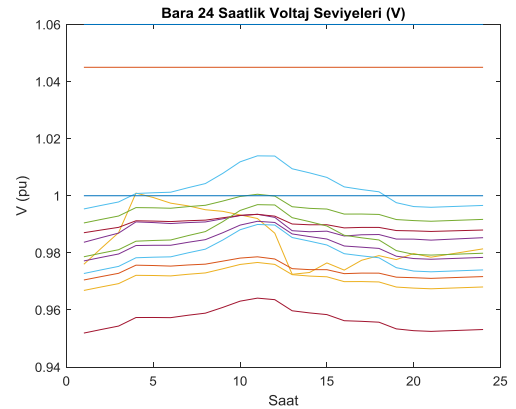
(a)



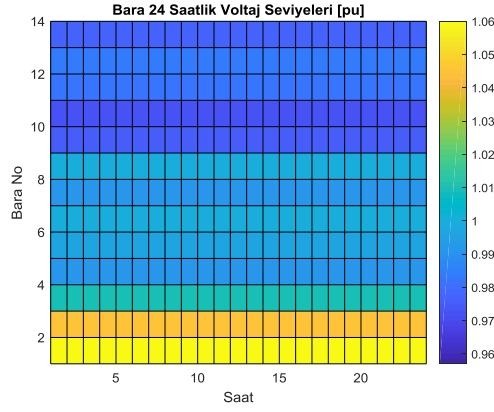
(a)



(b)

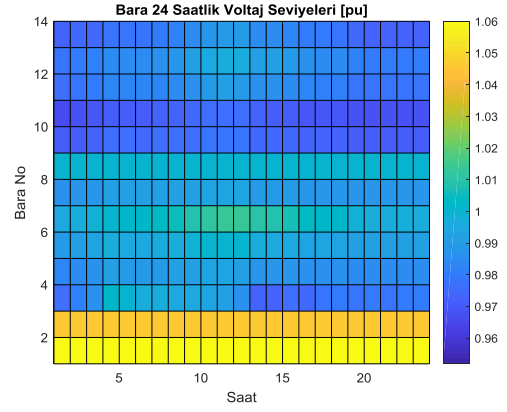


(b)



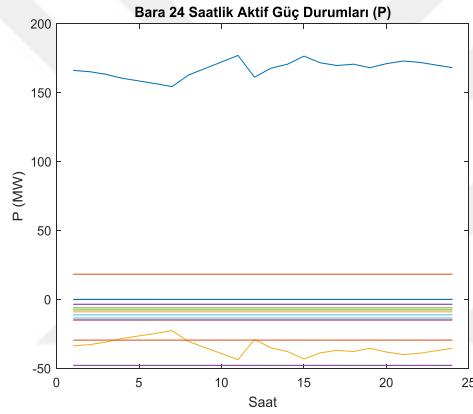
(c)

Şekil 4.9. Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

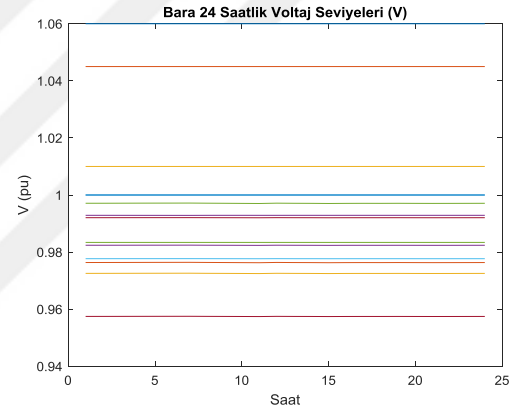


(c)

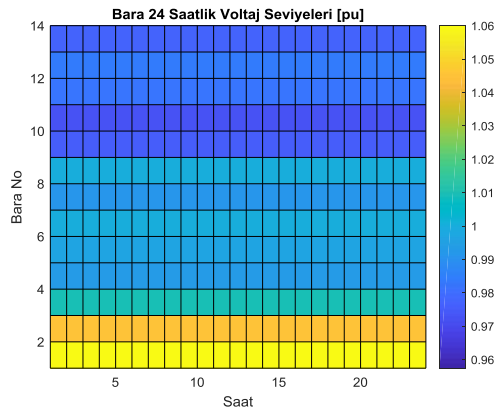
Şekil 4.10. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.11. Değişken tüketimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

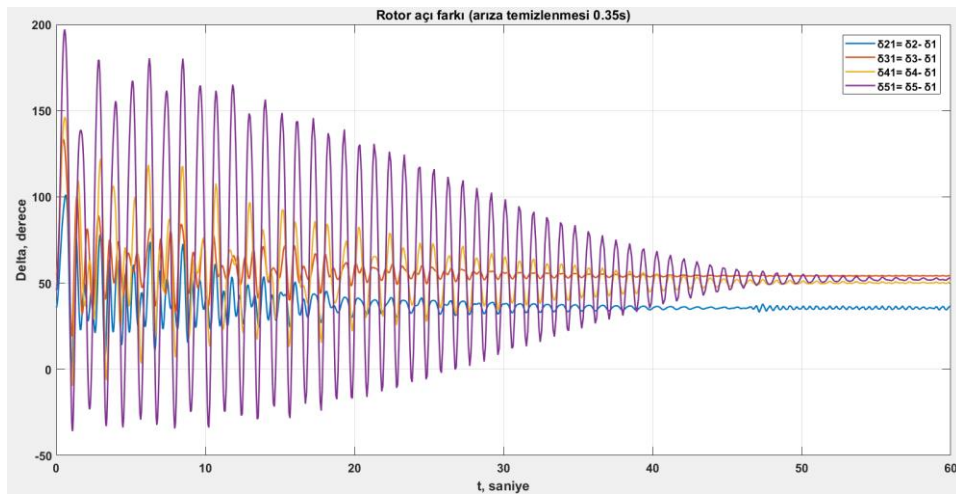
Değişken tüketimli modifiye sistem 2 için gerilim ve güç değişimleri Şekil 4.11'de verilmiş olup sistem çalışması mevcut sistemle benzerlik göstermektedir.

Ayrıca değişken yapıdaki tüketim birimlerinin(güç eğrisinde sarı ile ifade edilen), normal durumdaki yapıya kıyasla tüketilen güç açısından daha az olması sistem üzerindeki güç yoğunluğunu azaltmıştır. Kısaca, değişken tüketimin olumlu varlığı, referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerinde hissedilmektedir. Gerilim kararlılığı üzerinde ise herhangi bir değişimin yaşanmadığının gözlemlenmesiyle birlikte 1 nolu baranın gerilim seviyesinin nominal sınırları (1.05) aşarak yüksek olması sistem için sorun oluşturmaktadır.

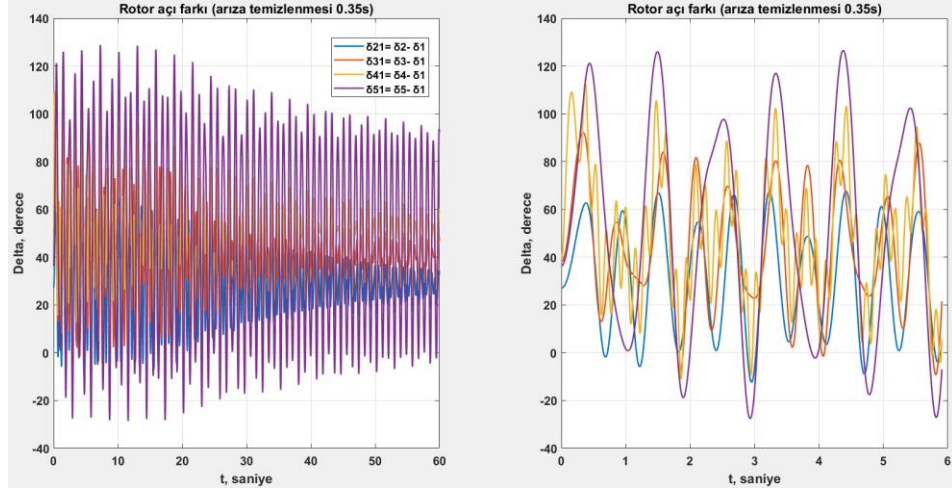
Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açısı ve frekans kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu olarak trafo bozulmasını temsilen oluşturulan arıza hem mevcut sisteme hem de modifiye sistemlere uygulanmıştır. Her üç sistem için 4-7 hattında 7 nolu baraya yakın bir arıza oluşturulmuştur. Oluşturulan bu arıza 0.35 saniyede temizlenecek şekilde 60 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arızaya üç sistemde cevabı şekil 4.12’de gösterildiğı gibidir. Bu cevaplar;

- Şekil 4.12.(a) mevcut duruma ait sürekli ve merkezi yapıdaki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.12.(b) dağıtık üretim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 1’in 5. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.12.(c) değişken yapıdaki tüketim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 2’nin 5. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını

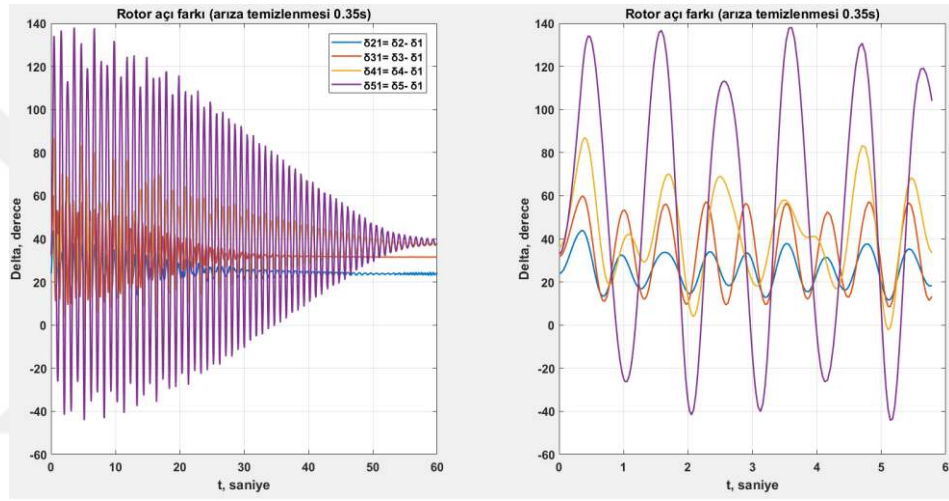
göstermektedir.



(a) Mevcut sistem



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 (5.saat)



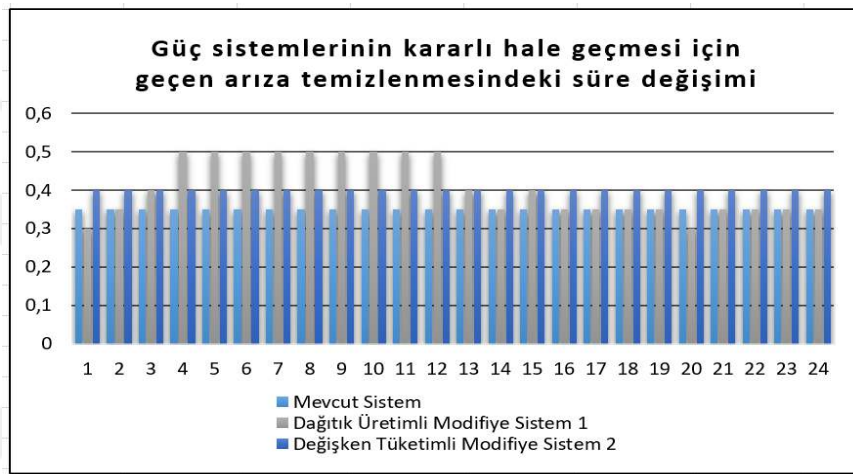
(c) Değişken tüketimli modifiye sistem 2 (5.saat)

Şekil 4.12. Jeneratör rotor açışimleri

Simülasyon sonuçları incelendiğinde her üç sistemin de kararlı olmakla birlikte farklı karakterde kararlılığa sahip olduğu görülmektedir. Mevcut sistemde ilk süreçte büyük genlikli salınımlar olmasına rağmen senkronlama ve sönümlleme momenti yeterli düzeyde üretilmiştir. Bu sayede sistem kararlılığını korumuştur. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1’de ise mevcut sisteme kıyasla ilk salınımların tepe değerlerinin daha küçük değerlere ulaşmasına karşın yeterli sönümlleme momenti üretilemediğinden sistem, marjinal kararlı hale geçmiştir. Ayrıca şekil 4.12.(b)’de görüldüğü gibi güneş enerjisine ait δ_{41} değişimi, rüzgâr enerjisine ait δ_{31} değişimine kıyasla daha büyük genlikli salınım yapmaktadır. Durumun böyle olmasında güneş enerjisinin daha düşük atalet ve enerji üretimine sahip olması etkili olmuştur. Özetle sistemde geleneksel üretimin yerini dağıtık üretim birimlerinin almasıyla maksimum

açı sapmasının büyüklüğünde azalma gözlenmesine rağmen sistemin maksimum kararlılık seviyesine ulaşmasına engel olunamamıştır.

Değişken tüketimli modifiye sistem 2’de ise mevcut sisteme kıyasla ilk salınımların tepe değerleri daha küçük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ile kıyaslandığında ise yeterli olmamakla birlikte daha iyi sönümleme momenti üretebildiğinden kararlılığını korumuştur. Buna rağmen değişken tüketimin varlığı 8 nolu baraya bağlı jeneratörün rotor açışını (δ_{51}) olumsuz olarak etkilemiştir. Dolayısıyla sistem yeterli sönümleme momenti üretemediğinden kararlı hale geçmiştir.

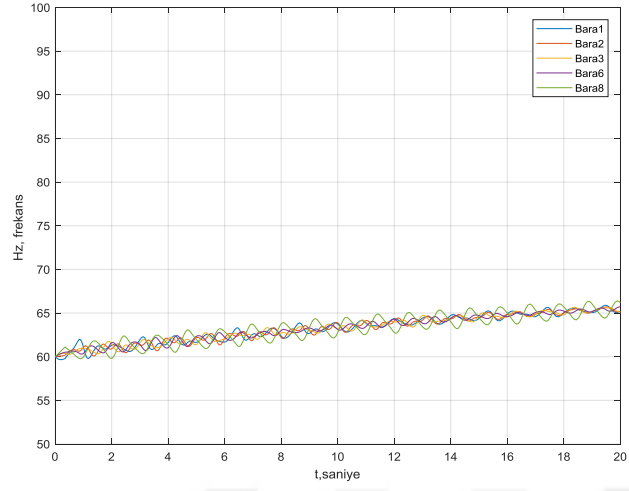


Şekil 4.13. 7 nolu baraya yakın 4-7 hattında meydana gelen bir arıza durum için için temizlenme süre değişimi (saniye)

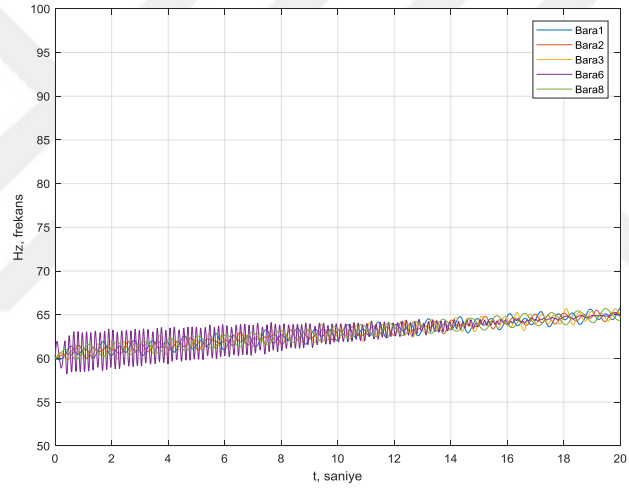
24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi göz önünde bulundurularak her üç sistem için arıza simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13’te de bu simülasyonlara ait sistemlerin kararlılığını koruduğu temizlenme sürelerindeki değişim verilmektedir. Mevcut sistem 0.35 saniyeye kadarki temizlenme süresileri için kararlılığını korumaktadır. Değişken tüketimli modifiye sistem 2’de mevcut sistemle karşılaştırıldığında biraz daha uzun süre arıza karşısında kararlılığını devam ettirmiştir. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1’de ise dağıtık üretim birimlerinin özellikle de rüzgâr enerjisinin etkin olduğu zaman dilimlerinde daha uzun temizlenme süreleri için kararlılığını korumuştur.

Simülasyon analiz prosedürüne göre bir diğer üçüncü aşama ise 14 baralı test sisteminin bozulmalar karşısındaki frekans kararlılığındaki değişimi gözlemleyebilmektir. Bunun için bir önceki aşamada yapılan 4-7 hattında 7 nolu baraya yakın arıza tekrarlanmıştır. Arızanın temizlenme süresi $t_c=0.35$ saniye olup

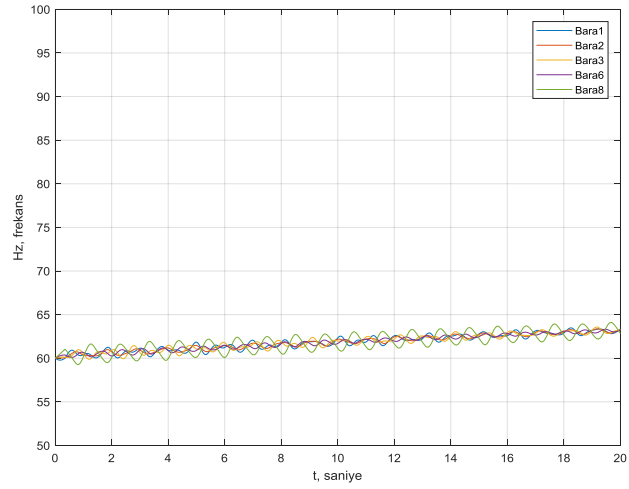
simülasyon 20 saniyede tamamlanmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen sistem frekans değişimleri Şekil 4.14’de verilmektedir.



(a) Mevcut sistem



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1



(c) Değişken tüketimli modifiye sistem 2

Şekil 4.14. Frekans değişimi

Şekil 4.14'deki her üç sisteme ait frekans değişim grafikleri incelendiğinde frekansların artış eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Özellikle dağıtık üretimli modifiye sistem 1'de güneş enerjisinin bağlı olduğu baranın frekans salınımı artışının diğer baralara ve mevcut sisteme kıyasla daha kötü olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemi frekans açısından kararsızlığa götürmektedir. Değişken tüketimli modifiye sistem 2'de ise frekanslar artış eğiliminde olmasına rağmen simülasyon süresi 60 saniyeye kadar uzatıldığında frekansların 64.87 Hz değerinde sabitlendiği gözlemlenmiştir. Buna rağmen diğer sistemlere göre iyi durumda olsa da %5'lik frekans değişimi toleransı göz önünde bulundurulduğunda bu sistemin frekans bakımından kararsız olduğu ifade edilebilir.

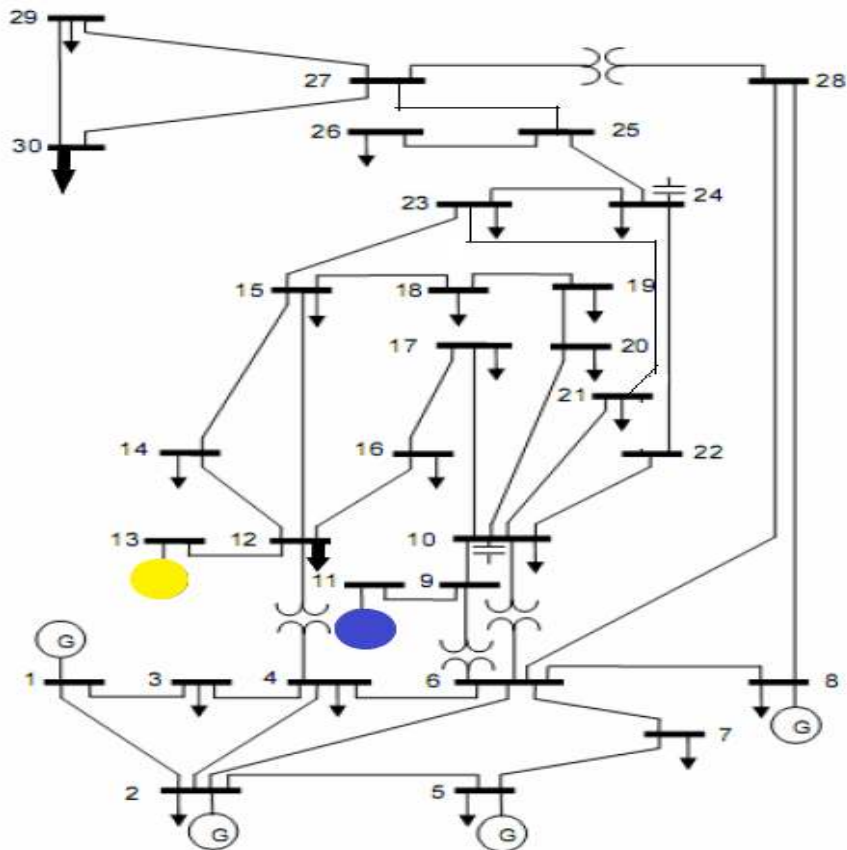
Genel olarak 14 baralı güç sisteminin bu modifikasyonları için dağıtık üretimlerin varlığı güç yoğunluğu üzerinde iyileştirici bir etkiye sahipken gerilim üzerinde herhangi bir etki gözlemlenmemiştir. Rotor açısı kararlılığında ise dağıtık üretim ve değişken tüketim, sistemi kararlı halden marjinal kararlı hale getirmiştir. Frekans kararlılığında ise bu tip arıza karşısında dağıtık üretim ve değişken tüketimin iyileştirici etkisi olmayıp 14 baralı sistem frekans kararsızlığının sürdürmüştür. Her üç kararlılık türü bakımından da yeterli iyileşmenin sağlamaması ve durumun daha da kötüleşmesi sistem kararlılığında ciddi sıkıntıların oluşumuna neden olabilir.

4.3. 30 Baralı Güç Sistemi Çalışması

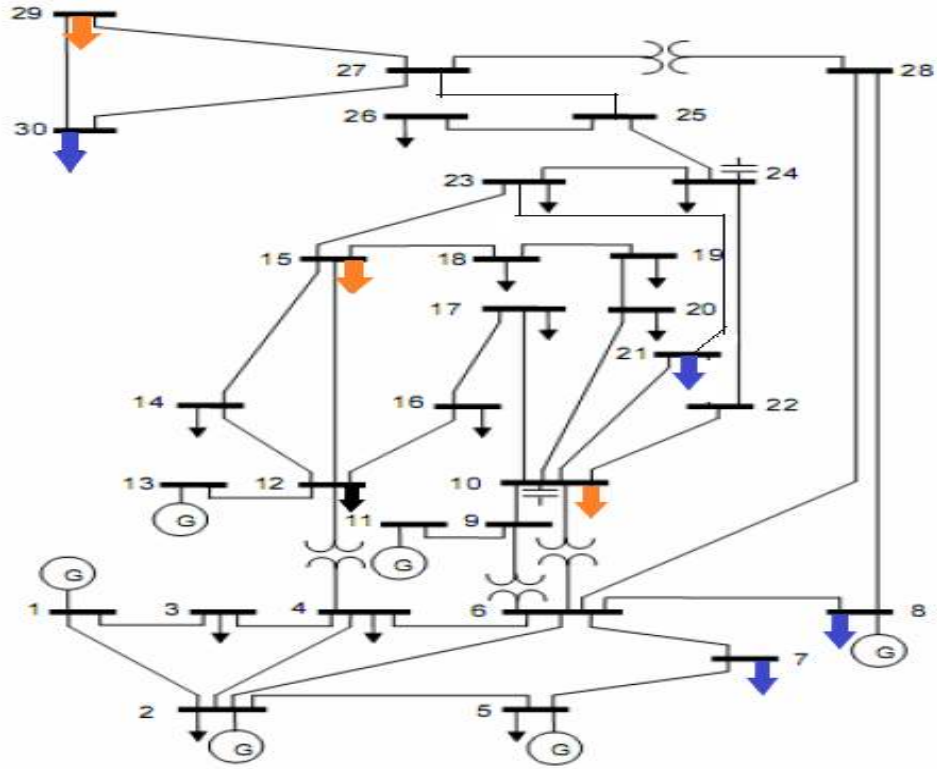
Bölüm 3'de tanıtımı yapılan 30 baralı güç sistemi, şekil 3.2 (c)'deki dağıtık üretim ve şekil 3.3 (c)'deki değişken tüketim birimleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye sistemlere ait tek hat şeması şekil 4.15'de gösterildiği gibidir. Mevcut duruma ek olarak modifiye edilen sistemlere ait bilgiler çizelge 4.3'te verilmiştir. Ayrıca dağıtık üretim birimlerinin rotor açısı kararlılığı üzerindeki etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla rüzgâr ve güneş birimleri için sırasıyla 1 ve 0.5 gibi sıfıra yakın değerlerde olacak şekilde küçük eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında çeşitli senaryolar oluşturularak kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. 30 baralı test sistemi karakteristikleri

Bara Numarası	Mevcut Sistem Bara Türü	Dağıtık Üretimli Modifiye Sistem 1 Bara Türü	Değişken Tüketimli Modifiye Sistem 2 Bara Türü
1	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)
2	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
5	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
7	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
8	PV(senkron)	PV(senkron)	PQ (sanayi tipi)
10	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
11	PV(senkron)	PV(rüzgâr)	PV(senkron)
13	PV(senkron)	PV(güneş)	PV(senkron)
15	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
21	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
29	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
30	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)

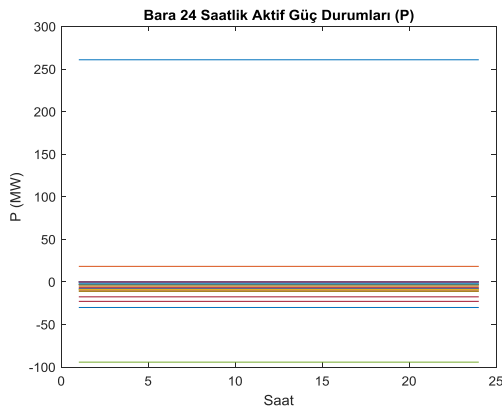


a) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1

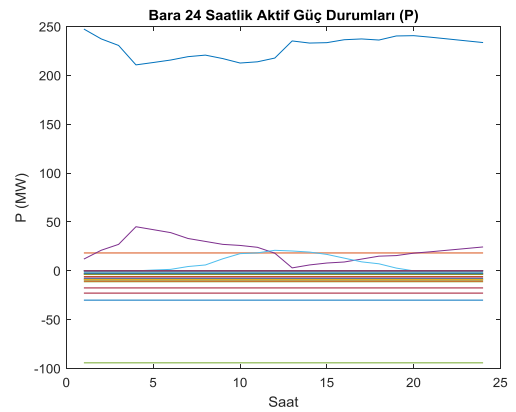


a) Değişken tüketimli modifiye sistem 2
Şekil 4.15. 30 baralı modifiye test sistemleri

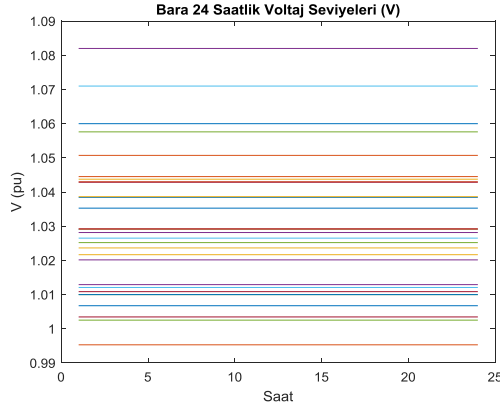
Kararlılık analizi için mevcut sistemin yanı sıra şekil 4.15'te verilen dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ve değişken tüketimli modifiye sistem 2 kullanılmıştır. Simülasyon analiz prosedürüne göre sistem modifikasyonundan sonra ikinci olarak yük akış çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişim grafikleri şekil 4.16, şekil 4.17 ve şekil 4.18'de verilmiştir.



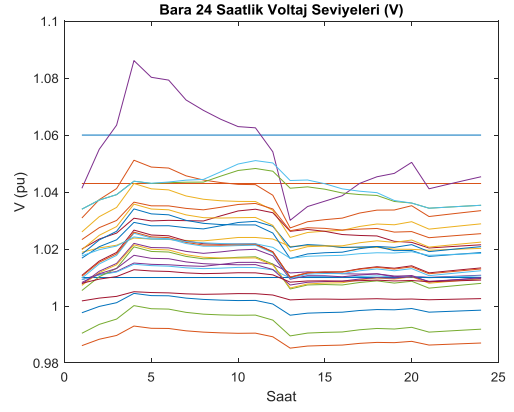
(a)



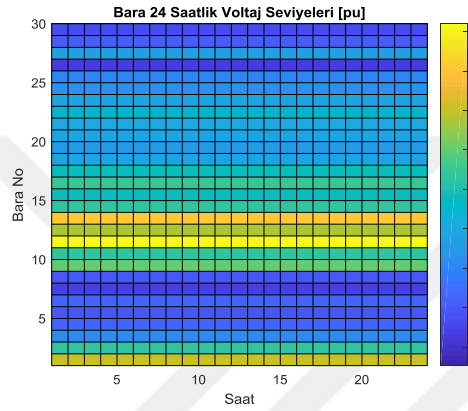
(a)



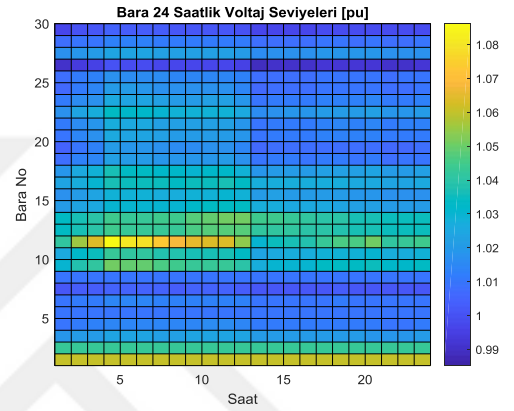
(b)



(b)



(c)



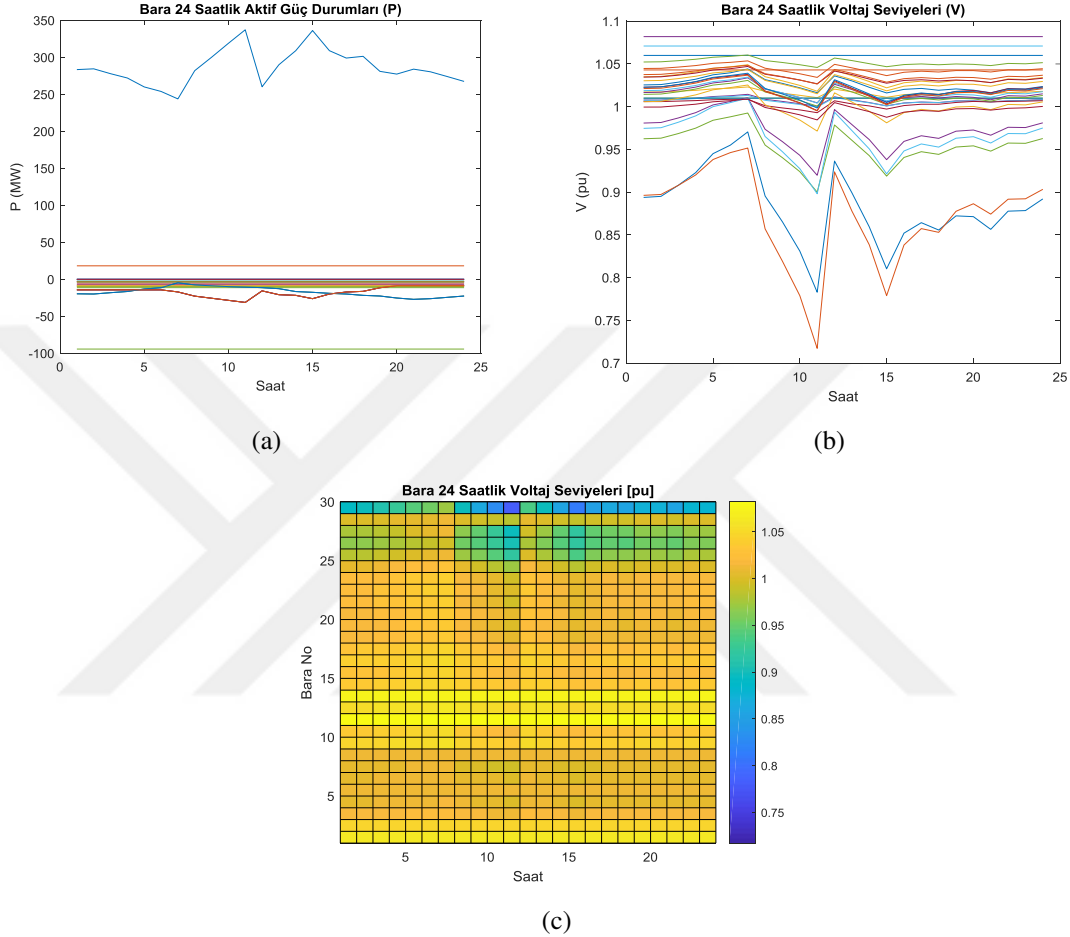
(c)

Şekil 4.16. Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

Şekil 4.17. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1'e ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

Simülasyon sonucu elde edilen Şekil 4.16 incelendiğinde mevcut sistemde değişken yapıya sahip üretim ve tüketim birimleri bulunmadığından güç ve gerilim değişimlerinin sabit olduğu görülmüştür. Öte yandan Şekil 4.17 incelendiğinde ise dağıtık üretimli modifiye sistem 1'e ait güç ve gerilim değerlerinde, dağıtık üretim birimlerinin doğal sonucu olan değişimler söz konusudur. Mevcut sistemin aksine bu sistemde enerji üretimi, merkezi ve dağıtık yapıdaki birimler arasında paylaşılmıştır. Bu paylaşım özellikle dağıtık üretimin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerindeki yük yoğunluğunu azaltarak sistemdeki kayıpları azaltmasını sağlamaktadır. Böylece dağıtık üretim birimlerinin güç yoğunluğu üzerindeki iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 1.5 seviyesinde olan rüzgâr enerjisinin bağlı olduğu 11 nolu baradır. Şekil 4.17.(c)'de elde edilen sonuçlar, mevcut sistemle kıyaslandığında dağıtık üretim birimlerinin hem kendi baralarındaki (11 nolu rüzgâr, 13 nolu güneş) hem de doğrudan ilişkili olduğu

baralardaki (9, 10, 12, 14 gibi) gerilim yoğunluğunu azaltmıştır. Ancak rüzgâr üretiminin fazla olduğu saat dilimlerinde bağlı bulunduğu barada gerilim yoğunluğu fazladır. Buna rağmen genel anlamda nominal sınırlar içerisinde bir değişim söz konusu olduğundan dağıtık üretimlerin, gerilim kararlılığı üzerinde pozitif bir etkiye sahip oldukları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. Değişken tüketimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

Değişken tüketimli modifiye sistem 2 için gerilim ve güç değişimleri şekil 4.18’de verilmiştir. Değişken tüketimin fazla olduğu zaman dilimlerinde (7. ve 12. saat haricinde) enerji ihtiyacı diğer iki duruma kıyasla referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerinde aşırı yüklenmenin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle 29 ve 30 nolu baradaki sırasıyla mesken ve sanayi tipi değişken yüklerden kaynaklı aşırı yüklenmeler gerilim düşüşlerine sebep olmuştur. Sistem içerisinde en büyük gerilim değişimi % 6.5’lik bir düşüşle sanayi tipi yükün bağlı olduğu 30 nolu barada gözlenmiştir. Ayrıca

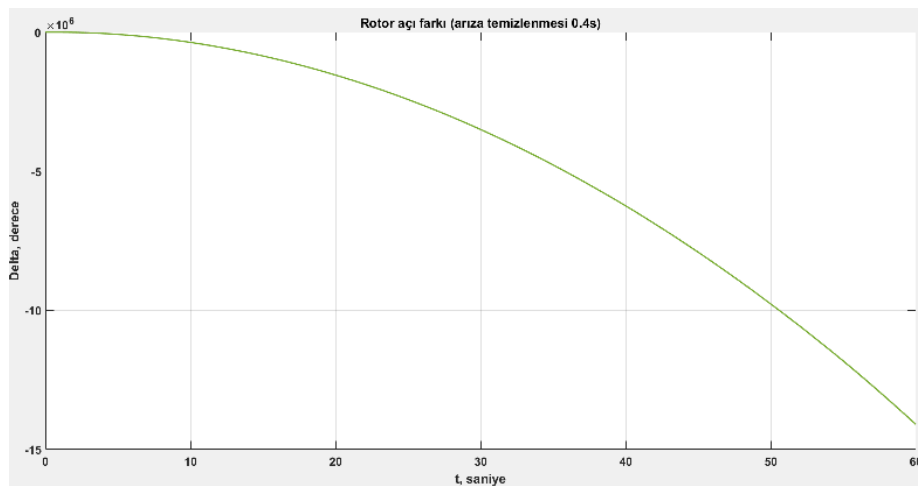
- 27 nolu bara >>> 11. saat diliminde

- 29 ve 30 nolu bara >>> 1., 2., 8., 9., 10., 11., 13.-24. saat dilimlerinde nominal gerilim sınırları dışına çıktığı gözlemlenmiştir. Gerilim kararlılığı açısından en büyük sorunlar 11. saat diliminde yaşanmaktadır. Talep taraf yönetim modelini temsilen değişken yapıdaki tüketim birimleriyle modifiye edilen sistem hem güç hem de gerilim dengesinde ciddi sorunlar oluşturarak sistemin kararsız olmasına neden olmuştur.

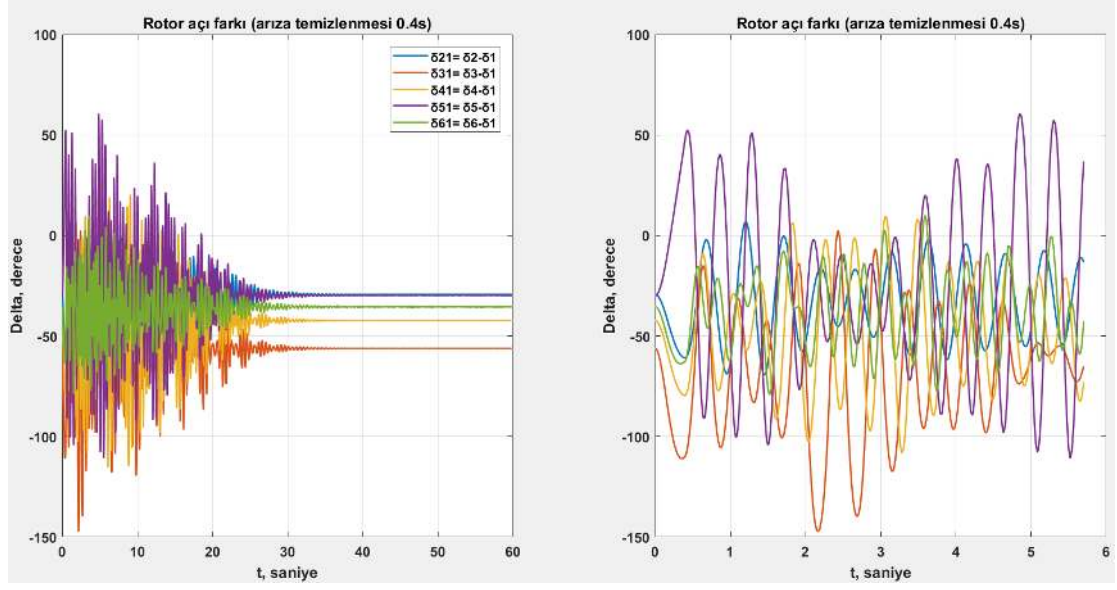
Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açısı kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu olarak iletim hattı kaybını temsilen oluşturulan arıza hem mevcut sisteme hem de modifiye sistemlere uygulanmıştır. Her üç sistem için 10-17 hattında 10 nolu baraya yakın bir üç faz arızası oluşturulmuştur. Arıza 0.4 saniyede temizlenecek şekilde 60 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda, oluşturulan arızaya üç sistemde cevabı şekil 4.19’da verilmiştir. Bu cevaplar;

- Şekil 4.19.(a) mevcut duruma ait sürekli ve merkezi yapıdaki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.19.(b) dağıtık üretim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 1’in 9. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.19.(c) değişken yapıdaki tüketim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 2’nin 9. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını

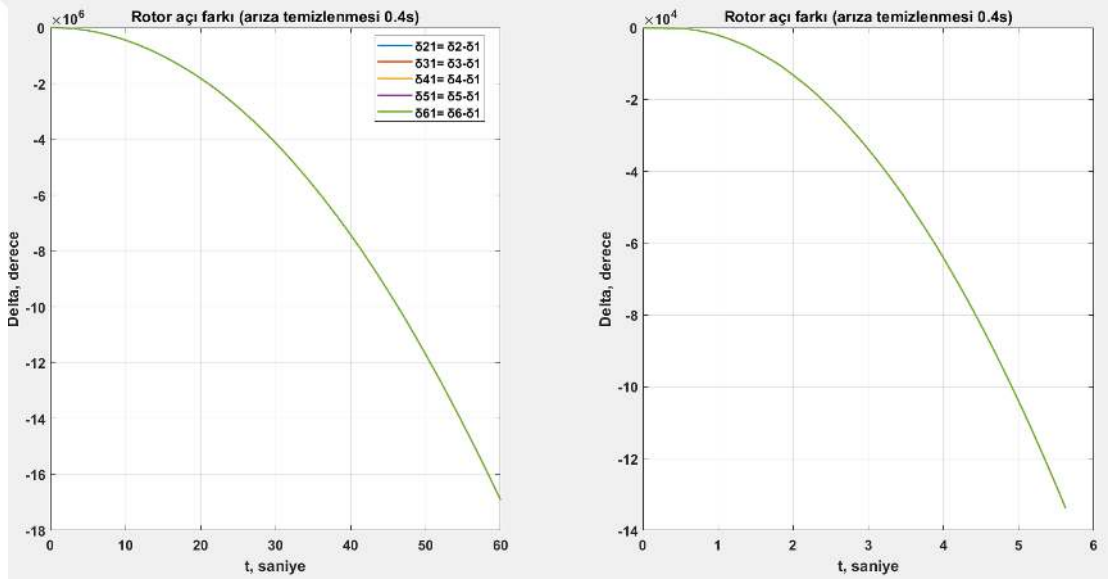
göstermektedir.



(a) Mevcut durum



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 (9.saat dilimi)



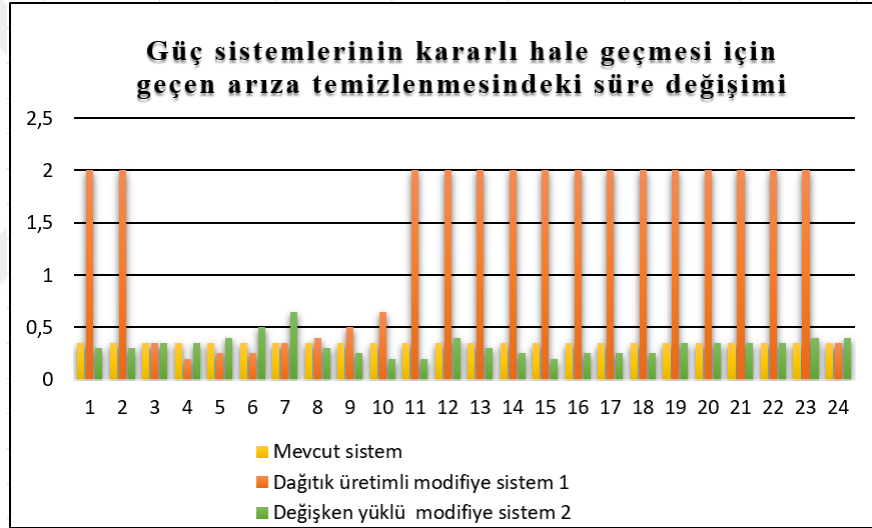
(c) Değişken tüketimli modifiye sistem 2 (9.saat dilimi)

Şekil 4.19. Jeneratör rotor aç değişimleri

Şekil 4.19.(a)'da mevcut sisteme ait rotor aç değişimleri incelendiğinde sistem kararsız hale geçtiği görülmektedir. Bu sonuca bakarak, mevcut sistem tarafından yeterli senkronlama ve sönümleme momenti üretilemediğini ifade edilebilir. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait değişimlerin verildiği şekil 4.19.(b) incelendiğinde 9. saat dilimi için rüzgâr ve güneşin enerji üretimlerinin neredeyse birbirine yakın olacak düzeyde fazla olmasının etkisi görülmektedir. Sistem içerisindeki dağıtık üretim payının artması ve bu birimlere yakın yüklerin enerji ihtiyacını karşılamaları referans jeneratör üzerindeki yoğunluğun azalmasını sağlamıştır. Bu ise meydana gelen bozulma sonrasında referans jeneratörün, yeterli senkronlama ve sönümleme

momenti üretimine imkân sağlarken sistemin kararlılığını sürdürmesine de yardımcı olmuştur. Şekil 4.19.(b)'deki rüzgâr enerjisine ait δ_{51} değişimi yüksek eylemsizlik sabitine rağmen, güneş enerjisine ait δ_{61} değişimine kıyasla daha büyük genlikli salınım yapmaktadır. Bunda rüzgâr biriminin arıza noktasına yakın olması etkili olmuştur. Genel olarak sistem cevabı incelendiğinde ise sistem bünyesinde yeterli düzeyde hem senkronizma hem de sönümleme momentinin üretilebilmesi sistemin kararlılığını devam etmesini sağlamıştır. Dahası mevcut sistemle kıyaslandığında ise rotor açısı kararlılığı bakımında büyük bir iyileşme söz konusudur.

Değişken tüketimli modifiye sistem 2'ye ait değişimlerin verildiği şekil 4.19.(c) incelendiğinde ise 9. saat dilimindeki değişken tüketim değerlerinin toplam 128.04 MW olması, bu arıza için sistemin bu yükü karşılamakta zorlanmasına ve sistemin kararsız hale gelmesinde etkili olmuştur.

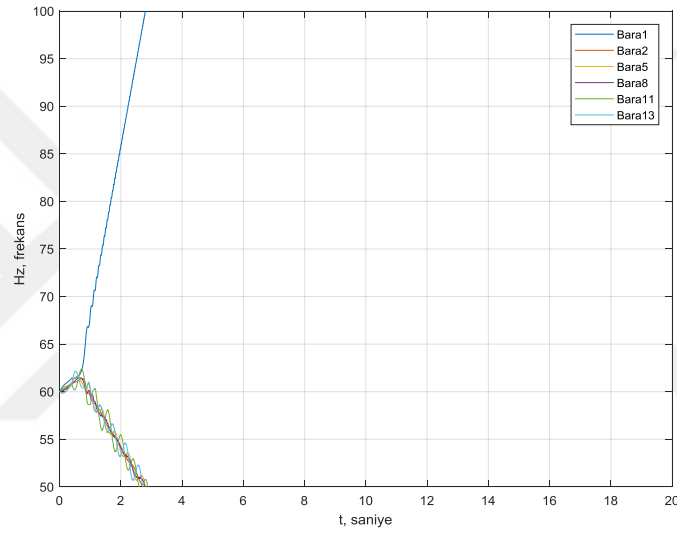


Şekil 4.20. 10 nolu baraya yakın 10-17 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)

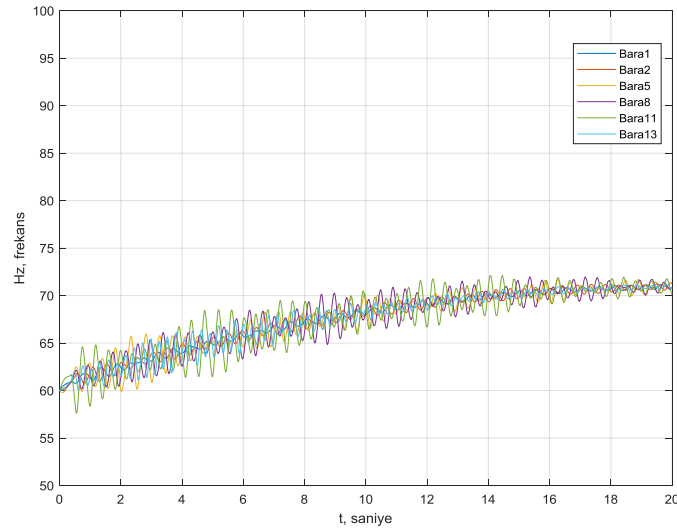
Şekil 4.20'de ise her üç sistem için 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi için tekrarlanan arıza durumunda sistemlerin kararlılığını sürdürdüğü 0.5 saniyelik artışlarla 2 saniyeye kadarki temizlenme sürelerindeki değişim verilmektedir. Mevcut sistem durumunda merkezi ve sürekli yapıda birimler olduğundan 0.35 saniyeye kadarki temizlenme sürelerinde sistem kararlılığını korumuştur. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1'de, güneş enerjisi üretiminin fazla ve rüzgâr enerjisinin de nispeten az (belirli bir seviyedeki üretime kadar / 24.08 MW'a kadar) olduğu zamanlarda sistem daha uzun temizlenme sürelerinde kararlılığını sürdürmüştür. Rüzgâr enerjisi üretimiyle temizlenme süresinin ters orantılı olmasında

arıza noktasına yakınlık ön plana çıkmaktadır. Değişken tüketimli modifiye sistem 2’de ise çoğu zaman (3., 19., 20., 21. ve 22. saat) mevcut durumla benzerlik göstermekle birlikte 7.saat dilimde değişken tüketimdeki azalmadan dolayı sistem 0.65 saniyeye kadarki temizlenme sürelerinde kararlılığı korumuştur.

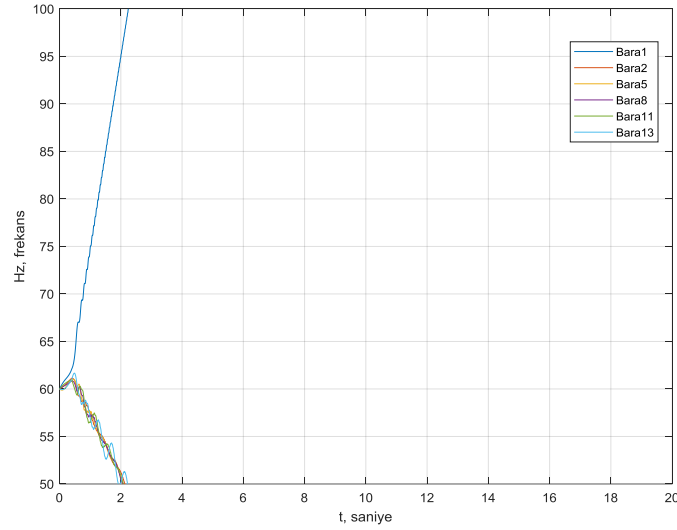
Simülasyon analiz prosedürüne göre bir diğer üçüncü aşama ise 30 baralı test sisteminin bozulmalar karşısındaki frekans kararlılığındaki değişimi gözlemleyebilmektir. Bu amaçla rotor aç kararlılık çalışmasında olduğu gibi 10-17 hattında 10 nolu baraya yakın üç faz arızası tekrarlanmıştır. Temizlenme süresi $t_c=0.4$ saniye olan arıza simülasyonu 20 saniyede tamamlanmıştır. Simülasyon sonucu her sisteme ait frekans değişimleri şekil 4.21’de verilmektedir.



(a) Mevcut sistem



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1



(c) Değişken tüketimli modifiye sistem 2

Şekil 4.21. Frekans değişimi

Şekil 4.21'deki frekans değişim grafikleri incelendiğinde hem mevcut sistem hem de değişken tüketimli modifiye sistem 2'ye ait frekanslarda ilk saniyeden itibaren sonsuz yönlü artış ve azalışlar meydana geldiğin görülmüştür. Sonsuz yönlü değişimler, bu sistemlerin rotor açısı kararsızlığının yanında frekans bakımından da kararsız olduğunu göstermektedir. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1'de ise frekans diğer iki duruma kıyasla daha iyi görünse de 71.16 Hz değerinde sabitlenmektedir. Bu değer, frekans sınırlarının üzerinde olduğundan sistemi frekans bakımından kararsızlığa götürmektedir. Sonuç olarak hem mevcut sistem hem de modifiye sistemlerde bu tip bir arıza karşısında sistem bünyesinde yeterli düzeyde depolanmış enerjinin olmaması ve enerji talebinin sürekli devam etmesi kararsızlığın görülmesinde etkili olmuştur.

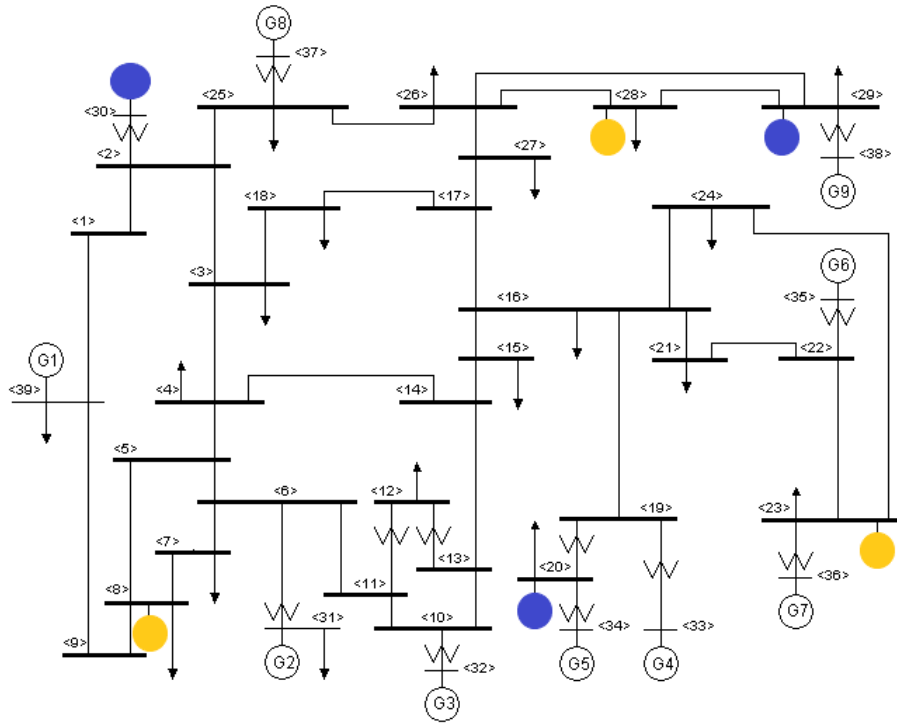
Genel olarak 30 baralı güç sisteminin bu modifikasyonları için dağıtık üretim birimlerinin varlığı güç ve gerilim dengesi ile rotor açısı kararlılığında iyileştirici bir etkiye sahiptir. Özellikle sağlamış olduğu enerji katkısı sayesinde mevcut sistemin aksine sistemi kararlı hale getirebilmiştir. Buna karşılık, rotor açısı ve gerilimdeki aynı iyileşme frekans kararlılığında gözlemlenememiştir. Değişken tüketim birimlerinin varlığı ise tüm kararlılık türleri bakımından mevcut sistemle aynı olmakla birlikte mevcut sistemden daha kötü bir durumdadır. Durumun böyle olmasında değişken ve sürekli devam eden enerji talebinin sistem tarafından karşılanamaması etkili olmuştur.

4.4. 39 Baralı Güç Sistemi Çalışması

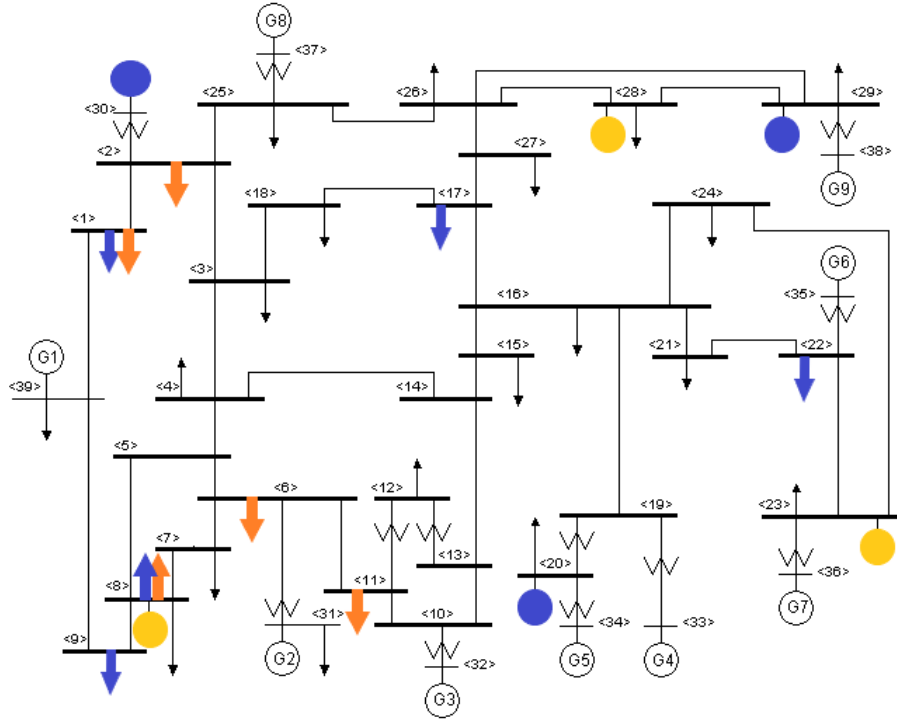
Bölüm 3’de tanıtımı yapılan 39 baralı güç sistemi, şekil 3.2 (d)’deki dağıtık üretim ve şekil 3.3 (d)’deki değişken tüketim birimleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye sistemlere ait tek hat şeması şekil 4.22’de gösterildiği gibidir. Mevcut duruma ek olarak modifiye edilen sistemlere ait bilgiler çizelge 4.4’te verilmiştir. Ayrıca dağıtık üretim birimlerinin rotor açısı kararlılığı üzerindeki etkileri daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla rüzgâr ve güneş birimleri için sırasıyla 5 ve 2.5 gibi küçük değerli eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında çeşitli senaryolar oluşturularak kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4. 39 baralı test sistemi karakteristikleri

Bara Numarası	Mevcut Sistem İçin Bara Türü	Dağıtık Üretimli Modifiye Sistem 1 Bara Türü	Dağıtık Üretimli ve Değişken Tüketimli Modifiye Sistem 2 Bara Türü
2	PQ(geçiş)	PQ(geçiş)	PQ (mesken tipi)
6	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
8	PQ	PV(güneş)	PV(güneş)+PQ (mesken tipi+ sanayi tipi)
9	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
11	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
17	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
20	PQ	PV(rüzgâr)	PV(rüzgâr)
22	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
23	PQ	PV(güneş)	PV(güneş)
28	PQ	PV(güneş)	PV(güneş)
29	PQ	PV(rüzgâr)	PV(rüzgâr)
30	PV(senkron)	PV(rüzgâr)	PV(rüzgâr)
31	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)



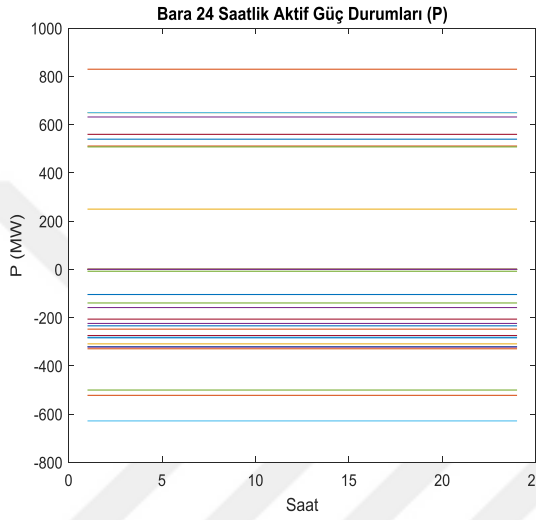
(a) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1



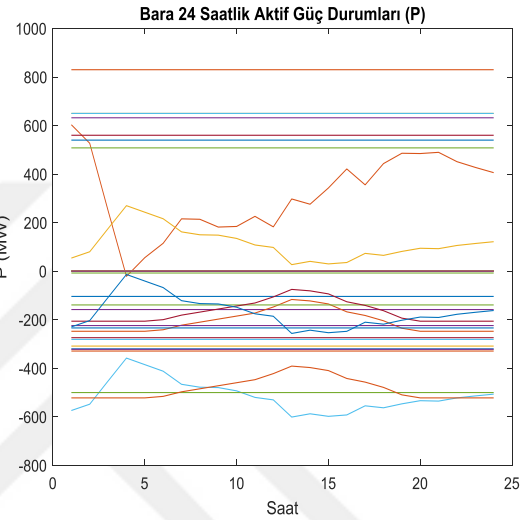
(b) Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2

Şekil 4.22. 39 baralı modifiye test sistemleri

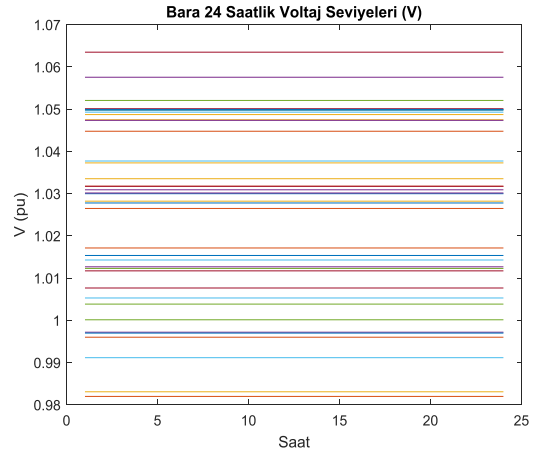
Kararlılık analizi için mevcut sistemin yanı sıra şekil 4.22’de verilen dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ve dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2 kullanılmıştır. Simülasyon analiz prosedürüne göre sistem modifikasyonundan sonra ikinci olarak yük akış çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişim grafikleri şekil 4.23, şekil 4.24 ve şekil 4.25’de verilmiştir.



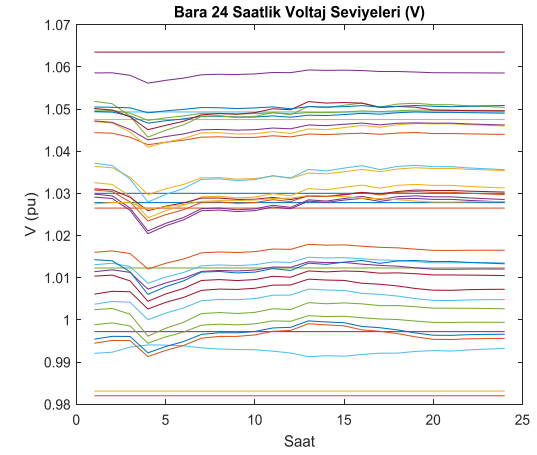
(a)



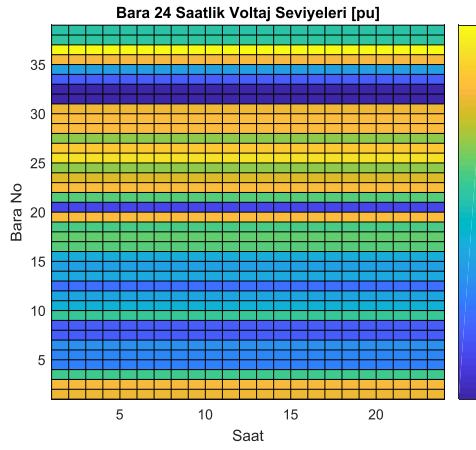
(a)



(b)

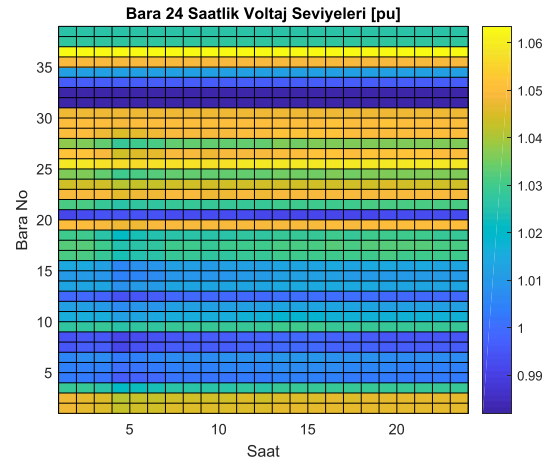


(b)



(c)

Şekil 4.23. Mevcut sisteme ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

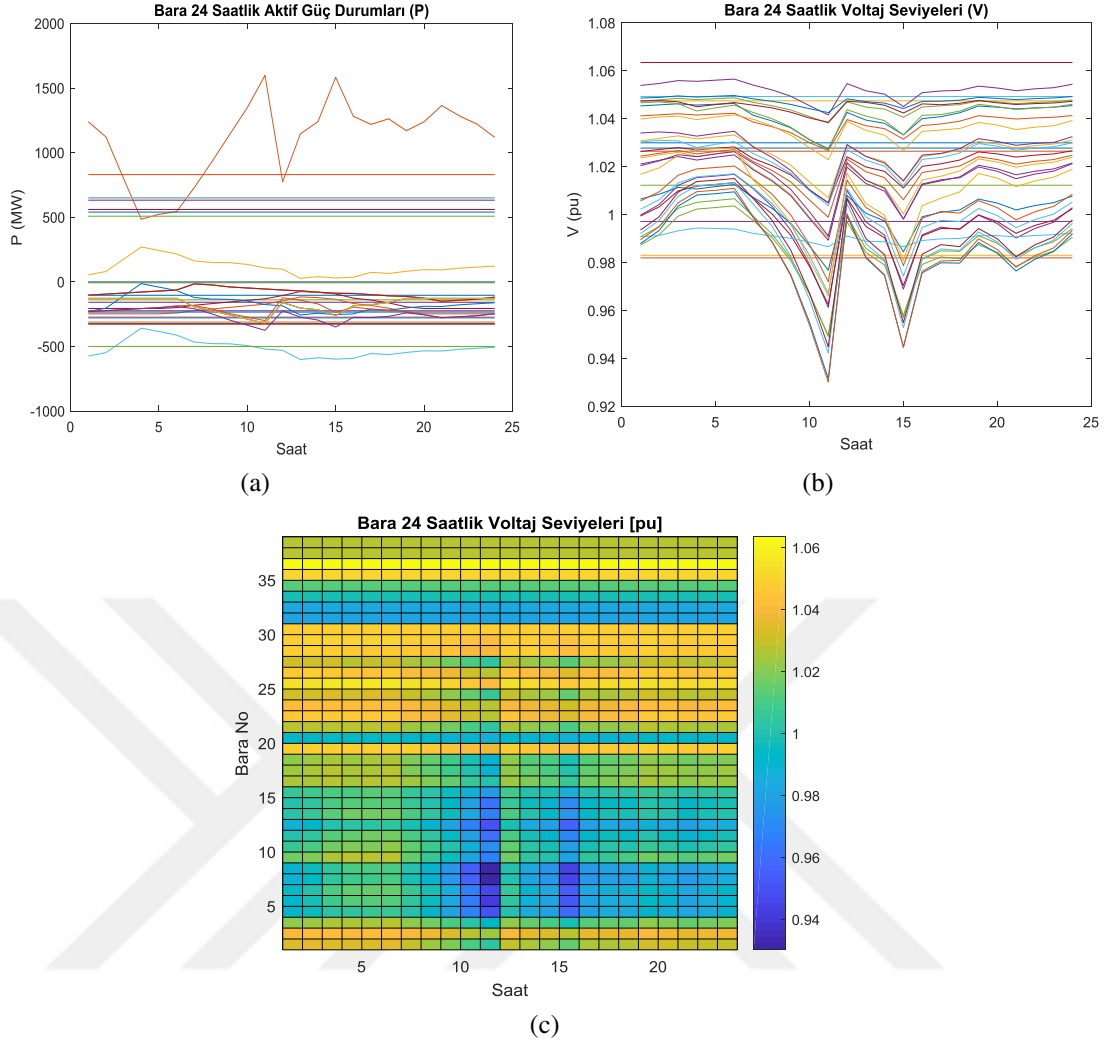


(c)

Şekil 4.24. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

Simülasyon sonucu elde edilen mevcut sisteme ait şekil 4.23 incelendiğinde, merkezi ve geleneksel karaktere sahip birimlerden dolayı güç ve gerilim değişimlerinin sabit olduğu görülmüştür. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1'e ait güç ve gerilim değerlerini gösteren şekil 4.24 incelendiğinde ise dağıtık üretim birimlerinin doğal sonucu olan değişimlerin söz konusu olduğu görülmektedir. Bu sistemde enerji üretimi için, merkezi üretimin yanında dağıtık üretim birimlerinden de faydalanılmıştır.

Yük baralarında bulunan dağıtık üretim birimleri vasıtasıyla enerji ihtiyacının karşılanması ve 30 nolu baradaki geleneksel üretimin yerine rüzgâr enerjisinin alması güç dengesinde değişimlere sebep olmuştur. Özellikle dağıtık üretimin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde kırmızı ile ifade edilen) üzerindeki yük yoğunluğunu azalması dolayısıyla sistemdeki kayıpları azalmasını da beraberinde getirmektedir. Böylece dağıtık üretim birimlerinin güç yoğunluğu üzerindeki iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 0.23 seviyesinde olan 27 nolu baradır. Mevcut sistemle kıyaslandığında dağıtık üretim birimlerinin doğrudan ilişkili olduğu baralardaki (15, 16, 17, 18, 26, 27 gibi) gerilim yoğunluğunda küçüğe olsa azalma gözlemlenmektedir. Genel anlamda nominal sınırlar içerisinde bir değişim söz konusu olduğundan bu sistem için dağıtık üretimlerin, gerilim kararlılığı üzerinde az da olsa pozitif bir etkiye sahip oldukları söylenebilir.

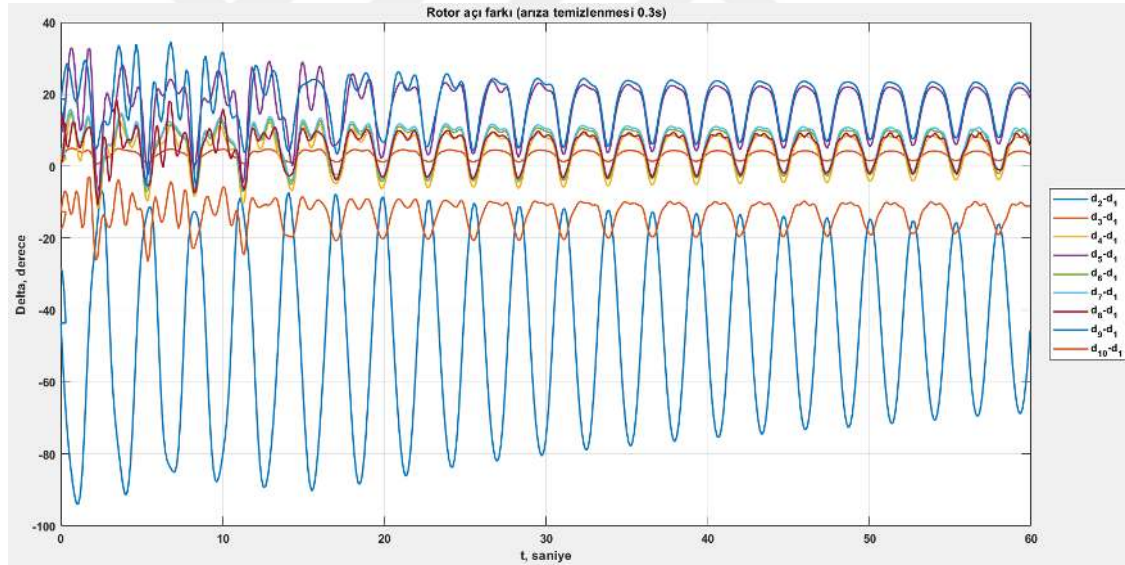


Şekil 4.25. Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2 ait 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi, (c) Bara gerilim blok değişimi

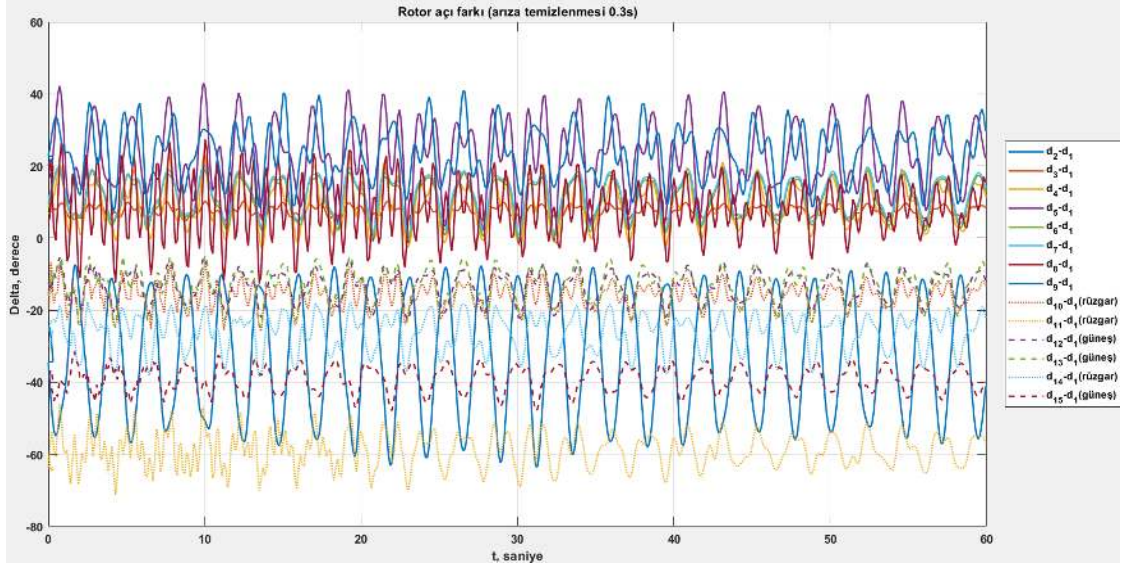
Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2 için gerilim ve güç değişimleri şekil 4.25'te verilmiştir. Değişken tüketimin fazla olduğu zaman dilimlerinde enerji ihtiyacı diğer iki duruma kıyasla referans jeneratör üzerinde aşırı yüklenmenin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle değişken yüklerden kaynaklı mesken ve sanayi tipi yük baralarında gerilim düşüşlerine meydana gelmiştir. Sistem içerisinde en büyük gerilim değişimi % 2'lik bir düşüşle güneş enerjisine rağmen hem sanayi hem de mesken tipi yükün bağlı olduğu 8 nolu barada gözlenmiştir. Bu sistem özelinde değişken yüklerin sistemi çok fazla etkilemesi ve dağıtık üretimlerin sistemin büyüklüğünden dolayı etkisiz kalması ciddi problemlerin oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Herhangi küçük bir bozulma güç dengesizliği ve gerilim kararsızlığı oluşturarak sistemin çökmesine sebebiyet verebilir.

Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açısı kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu olarak iletim hattı kaybını temsilen oluşturulan arıza hem mevcut sisteme hem de modifiye sistemlere uygulanmıştır. Her üç sistem için 1-2 hattında 1 nolu baraya yakın bir üç faz arızası oluşturulmuştur. Arıza 0.3 saniyede temizlenecek şekilde 60 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda, oluşturulan arızaya üç sisteminde cevabı şekil 4.26'da verilmiştir. Bu cevaplar;

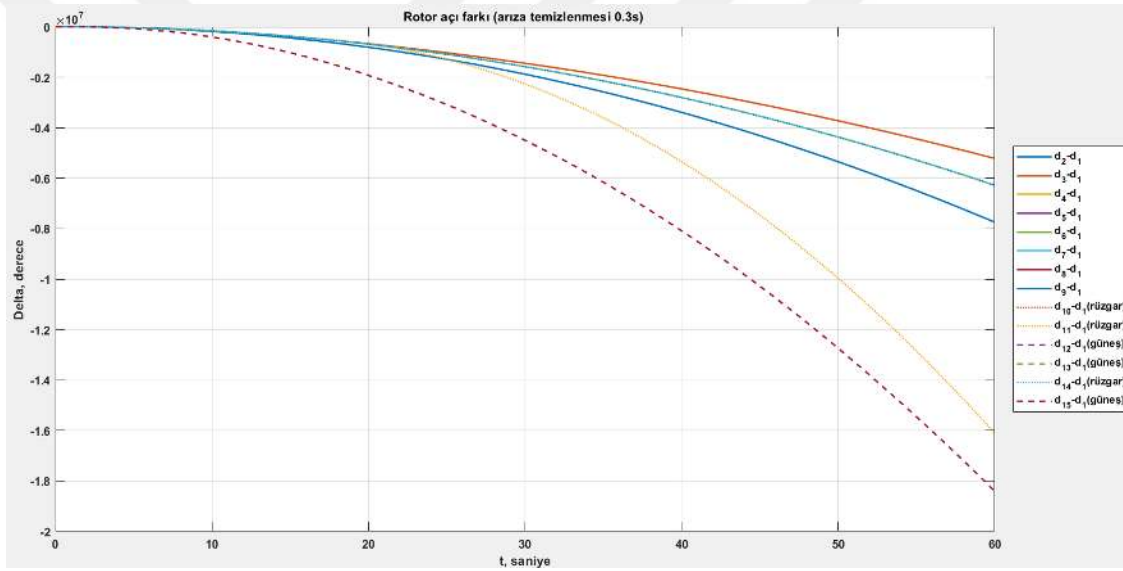
- Şekil 4.26.(a) mevcut duruma ait sürekli ve merkezi yapıdaki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.26.(b) dağıtık üretim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 1'in 16.saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 4.26.(c) dağıtık üretim ve değişken yapıdaki tüketim birimleri ile modifiye edilmiş sistem 2'nin 16.saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını göstermektedir.



(a) Mevcut durum



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1 (16.saat dilimi)



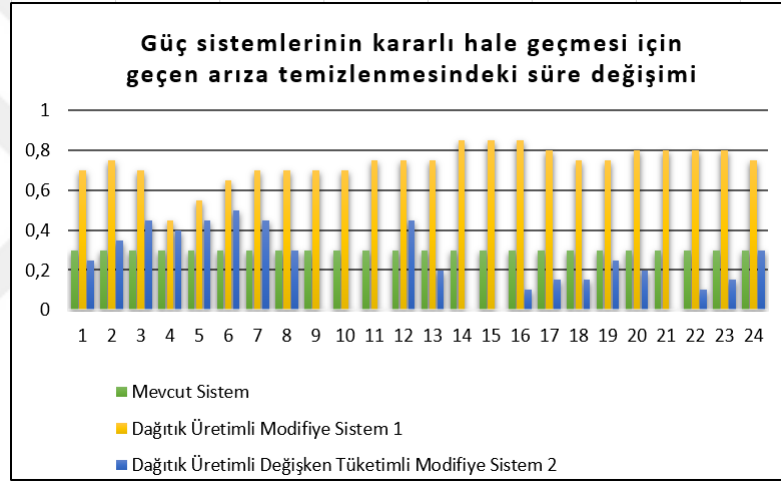
(c) Dağıtık üretimli değışken tüketimli modifiye sistem 2 (16.saat dilimi)

Şekil 4.26. Jeneratör rotor açf değışimleri

Şekil 4.26.(a)'da mevcut sisteme ait rotor açf değışimleri incelendiğinde herhangi bir dağıtık üretim olmamasına rağmen bu arıza için sistem kararlı durumunu koruduğı görölmektedir. Şekil 4.26.(b), dağıtık üretimli modifiye sistem 1'in 16. saat dilimi için güneş enerji üretiminin rüzgâra kıyasla daha fazla olduğı süreçteki değışimi temsil etmektedir. Rotor açf cevabı incelendiğinde, dağıtık üretimin sistem içerisindeki payının artması meydana gelen bozulmayı takiben referans jeneratörün, yeterli senkronlama momenti üretimine imkân sağlarken sistemin kararlılığını sürdürmesine de yardımcı olmuştur. Dahası bazı senkron jeneratörlerdeki yoğunluğı engelleyerek rotor açf farkı genliklerinde azalmalar sebep

olmuştur. Buna rağmen mevcut sistem durumundaki gibi sistem bünyesinde yeterli sönmleme momenti üretilemediğinden marjinal kararlı olarak çalışmaya devam etmektedir. Yapılan dağıtık üretimlerin 39 baralı güç sistemi üzerinde yeterli iyileştirici etki oluşturamadığına başka bir bozulmanın meydana gelmesi durumunda sistemin kararlılığını sürdüremeyeceği ifade edilebilir.

Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2'ye ait değişimlerin verildiği şekil 4.26.(c) incelendiğinde ise dağıtık üretimlerin yapmış olduğu enerji katkısına rağmen sonsuz yönlü artış ve azalışlar meydana gelmektedir. Rotor aç farkında yaşanan bu değişimler, sistemi kararsız hale getirmiştir. 16.saat dilimindeki değişken tüketim değerlerinin toplam 1375 MW olması ve bu arz talebinin sistem tarafından karşılanamaması kararsızlığın oluşumunda etkilidir.

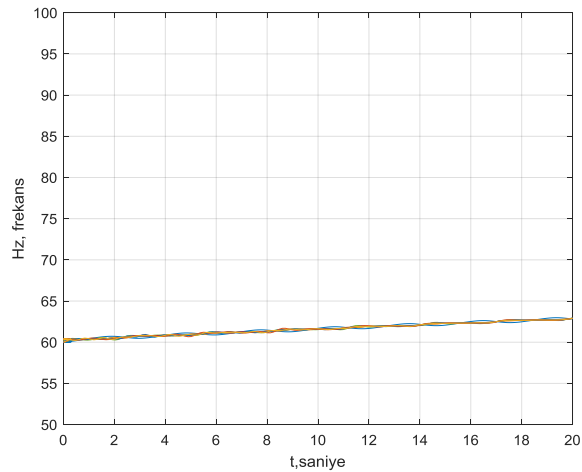


Şekil 4.27. 1 nolu baraya yakın 1-2 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)

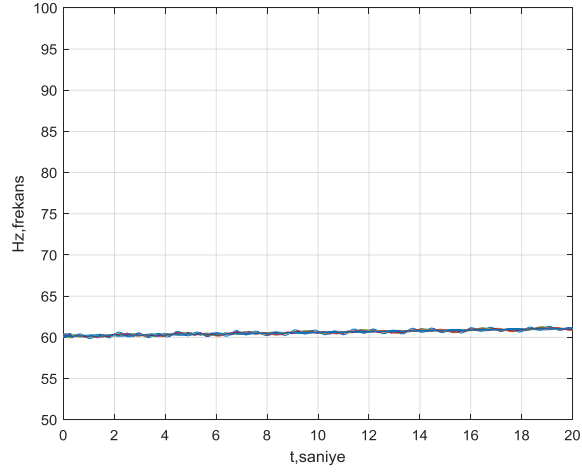
Şekil 4.27’de ise her üç sistem için 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi için tekrarlanan arıza durumunda sistemlerin kararlılığını sürdürdüğü temizlenme sürelerindeki değişim verilmektedir. Mevcut sistem merkezi ve sürekli yapıdaki birimlerden oluştuğundan 0.35 saniyeye kadarki temizlenme sürelerinde sistem kararlılığını korumuştur. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1’de, güneş ve rüzgâr enerjisinin birlikte üretim yapmış olduğu sürelerde temizlenme süresindeki artışa rağmen sistem kararlılığını belirli bir seviyeye kadar sürdürmüştür. Özellikle dağıtık üretim birimlerinin 14.-16. ve 20.-23.saat dilimleri arasındaki enerji katkısı, sistemin 0.8 ile 0.85 saniye gibi uzun temizlenme sürelerine dayanmasını sağlamıştır. Bahsi geçen saat dilimlerinde en fazla enerji katkısı 496.5 MW olup bu değer üzerindeki üretimler, sistemde ters bir etki oluşturmaktadır. Buna en güzel örnek ise

4.saat dilimdeki 810 MW'lık enerji katkısındaki gibi daha düşük arıza temizlenme sürelerinde sistem kararsız hale geçmesi durumudur. Bu ters orantının meydana gelmesinde böyle bir yüksek üretimin düşük atalet sahip rüzgâr enerjisi tarafından sağlanması etkilidir. Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2'de ise genel olarak modifiye sistem 1'deki dağıtık üretimle sağlanan avantaj ortadan kalmıştır. Yüksek enerji talebinin varlığı, sistemin çoğu zaman (2.-8.,12. ve 24. saat dilimleri haricinde) mevcut sistemden daha kötü bir hale dönüştüğü görülmektedir. Dahası 9.-11., 14.-15. ve 21. saat dilimlerinde arızayla sistem doğrudan kararsızlığa gitmektedir. Sistem bünyesindeki enerji üretimin yetersiz olması, düşük atalet, yüksek enerji talebi ve arıza noktasının konumu gibi birçok nedenden dolayı kararsızlık meydana gelmektedir.

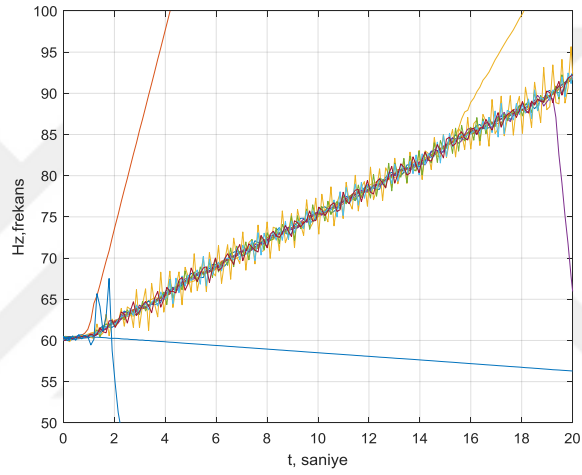
Simülasyon analiz prosedürüne göre bir diğer üçüncü aşama ise 39 baralı test sisteminin bozulmalar karşısındaki frekans kararlılığındaki değişimi gözlemleyebilmektir. Bu amaçla rotor açısı kararlılık çalışmasındakiyle aynı arıza tercih edilmiştir. Temizlenme süresi $t_c=0.4$ saniye olan 1-2 hattında 1 nolu baraya yakın bir üç faz arızası uygulanıp arıza simülasyonu 20 saniyede tamamlanmıştır. Simülasyon sonucu her sisteme ait frekans değişimleri şekil 4.28'de verilmektedir.



(a) Mevcut sistem



(b) Dağıtık üretimli modifiye sistem 1(16.saat dilimi)



(c) Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2 (16.saat dilimi)

Şekil 4.28. Frekans değişimi

Şekil 4.28'deki frekans değişim grafikleri incelendiğinde mevcut sistem frekansı arıza sonrasında 66.67 Hz seviyesinde salınımlar yapmaya devam ettiği görülmektedir. Bu seviyedeki salınımlar, frekans tolerans sınırının üzerinde olduğu için frekans açısından sistemi kararsızlığa götürmektedir. Dağıtık üretimli modifiye sistem 1, mevcut duruma kıyasla daha düşük bir seviye ve tolerans sınırında olan 62.99 Hz'de salınım gerçekleştirmektedir. Bu sınır değerindeki salınım nedeniyle frekans kararlılığı maksimum seviyesine ulaşmış olup ekstra bir bozulma durumunda kararsızlık gözlemlenebilir. Dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye sistem 2'de ise özellikle senkron jeneratörlerin frekansındaki ilk saniyeden itibaren sonsuz yönlü artış ve azalışlar sebebiyle frekans bakımından ciddi bir kararsızlığın meydana geldiği görülmektedir. Bu sistem özelinde, bu tip bir arıza karşısında sistem

bünyesinde yeterli düzeyde depolanmış enerjinin olmaması ve enerji talebinin sürekli devam etmesi kararsızlığın görülmesinde etkili olmuştur.

Genel olarak 39 baralı güç sisteminin bu modifikasyonları için dağıtık üretim birimlerinin varlığı güç ve gerilim dengesi, rotor açısı ve frekans kararlılığında sağlamış oldukları ekstra enerji sayesinde az da olsa iyileştirici bir etkiye sahiptir. Öte yandan sürekli ve değişken tüketimin de sisteme eklenmesiyle tüm kararlılık türlerinin bakımından daha kötü bir hale dönüştürerek sistemin çökmesini tetiklemektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, 4 farklı test sistemi üzerinden 24 saatlik dağıtık üretim ve değişken tüketim şartlarında güç sistemi kararlılığında meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Yenilenebilir enerjiye dayalı aralıklı ve değişken yapıdaki dağıtık üretim ve değişken yapıdaki tüketim birimleri ile modifiye edilen test sistemlerinin yük akışı gerçekleştirilerek sistem içerisindeki parametreler üzerinden gerilim kararlılığı analiz edilmiştir. Yük akışı sonucu elde edilen parametrelerden yararlanılarak oluşturulan arıza durumları vasıtasıyla rotor açısı ve frekans kararlılığı analiz edilmiştir.

Çalışmada, 4 farklı test sistemi ve bu test sistemlerine özgü entegrasyon koşullarının oluşturulması analiz sonuçlarında farklı durumların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu durum ise genel bir yargıya varmaktansa sistemlerin kendi özelinde değerlendirilmesinin daha doğru olacağı sonucuna varılmasını sağlamıştır. Bu değerlendirmeye göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 9 baralı güç sistemine ait iki modifiye sistemdeki yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerinin varlığı gerilim ve rotor açısı kararlılığında olumlu bir etkiye sahipken frekans kararlılığında aynı olumlu durum gözlemlenmemiştir.
- 14 baralı güç sistemine ait iki modifiye sistem için net bir ifade kullanmak doğru olmayabilir. Çünkü dağıtık üretim ve değişken tüketimdeki farklılıkların sistem üzerinde farklı durumlara sebep olduğu görülmüştür. Bununla birlikte dağıtık üretimin, birinci sistemin sadece gerilim kararlılığı üzerinde olumlu bir etkiye sahipken; değişken tüketimin ikinci sistemin sadece rotor açısı kararlılığında olumlu bir etkiye sahip olduğu ifade edilebilir. Buna karşın her iki sistemde frekans bakımından iyileşmenin aksine kararsızlığın devam ettiği gözlemlenmiştir.
- 30 baralı güç sistemine ait iki modifiye sistemden birincisinde dağıtık üretimlerin varlığı gerilim ve rotor açısı kararlılığı bakımından olumlu bir etkiye sahipken; ikincisinde ise değişken tüketimin etkisiyle gerilim ve rotor açısı kararlılığında olumsuz bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Diğer sistemlerde olduğu gibi bu sistemde de frekans bakımından kararsız devam etmiştir.

- 39 baralı güç sistemine ait iki modifiye sistemden birincisinde dağıtık üretim birimlerinin uygun entegrasyonu sayesinde hem gerilim hem rotor açısı hem de frekans kararlılığı bakımından olumlu bir değişim söz konusu olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun aksine ikinci sistemde ise değişken tüketimin etkisiyle dağıtık üretimin oluşturmuş olduğu olumlu hava ortadan kalkarak her üç kararlılık türü bakımından kararsızlık meydana geldiği görülmüştür.

Genel olarak olumlu etkilerin meydana geldiği sistemlere bakıldığında, yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim ve/veya değişken tüketimin uygun yerden entegrasyonu ile güç dengesinin sağlanarak iletim hattı kayıplarının azalmasını ve referans jeneratör üzerinde bulunan yük yoğunluğunun azalmasını sağlamıştır. Dağıtık üretimin enerji üretiminde artan payı, güç ve gerilim iyileşmesine katkı sağlarken meydana gelebilecek arıza veya bozulma durumlarında sisteme esneklik kazandırmıştır. Olumsuz etkilerin meydana geldiği sistemlere bakıldığında ise yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim ve/veya değişken tüketimin uygun olmayan yerden entegrasyonu, dağıtık üretim birimlerinin toplam sistem üretimindeki düşük payları, dağıtık üretim birimlerinin düşük atalet değerleri, uygun olmayan talep taraf yönetim modeli, arıza noktasının konumu vb. nedenler olumsuzluğun meydana gelmesinde etkili olmuştur. Gözlemlenen bu olumsuz etki yerel bir olgu olarak kalmayıp sistemin çökmesine neden olacak düzeye gelmiştir.

Mevcut sistemlerde yaşanan zorlukların üstesinden gelmek için ortaya çıkmış olan akıllı şebeke kavramının, sistem kararlılığıyla ilgili bazı sorunları da beraberinde getireceği düşünülmektedir. Bu düşüncenin oluşmasında;

- Geleneksel üretimin yerini düşük atalet sabitine sahip rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretimin almasına bağlı olarak rotor açısı kararlılığının bozulması ihtimali,
- Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretimin, sistem üretimindeki payının artmasına karşın aralıklı ve belirsiz yapısının tüm kararlılık türleri için problem oluşturması ihtimali,
- Tüketici taleplerinin sürekli ve ani değişkenli bir yapıda olması frekans ve gerilim kontrolünü zorlaştırarak sistem kararlılığını ciddi sorunlar oluşturması ihtimali

etkilidir. Bu ihtimallerin ortadan kalması amacıyla şebeke tasarımı başta olmak üzere her aşamada gelişmiş akıllı şebeke teknolojilerinden üst düzeyde faydalanılmalıdır.

Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yapılarından kaynaklanan düşük atalet sabitinin olumsuz etkisinin ortadan kaldırmak amacıyla sanal güç sabit çalışmaları üzerinde yoğunlaşılmalıdır. Ayrıca bu tarz kaynakların üretim değişkenliği göz önünde bulundurularak uygun enerji depolama sistemleri tercih edilmelidir. Bu sayede kararlılık problemlerinin önüne tamamen geçilebilir. Sistemlerin gerilim kararlılığındaki sorunların üstesinden gelmek için esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), tristör kontrollü seri kompanzatör (TSCS), Statik Senkron Kompansatör (STATCOM) ve statik var kompanzatör (SVC) gibi yapıların sistem bünyesinde yer alması tavsiye edilmektedir. Özellikle her sistemde karşılaşılan frekans kararsızlığının önüne geçebilmek amacıyla esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), değişken frekans transformatörü (VFT) vb. teknolojilerden faydalanılarak kontrol ve koruma sistemleri tercih edilmelidir.

Yapılan bu çalışma ile her sistem yapısının farklı tepkiler vermesi, gerçek şebeke yapılarının da farklı kararlılık tepkileri vereceği düşüncesini doğurmaktadır. Bu amaçla gerek dağıtık üretim birimlerinin gerek değişken tüketim birimlerinin entegrasyonunda akıllı teknolojiler de dahil edilerek en uygun koşulların sağlanmasına yönelik çalışmalar hız kesmeden devam ettirilmedi. Bu açıdan yapılan bu tez çalışması, dağıtık üretim ve değişken tüketim entegrasyonu bakımından akıllı şebeke modellerinin kararlılığı için ön çalışma niteliğindedir. Bu ön çalışmadan yola çıkılarak elde edilen tecrübeler ışığında, bir sonraki aşama için daha büyük ve gerçek sistemlere yönelik farklı senaryo çalışmaları ile akıllı şebekelere yönelik sanal atalet sabiti çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] N. Hadjsaid, J. Canard and F. Dumas, *Dispersed generation impact on distribution networks*, **IEEE Comput. Appl. Power**, 12:2 (1999) 22-28.
- [2] A. M. Borbely and J. Kreider, *Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*, CRC Press, (2001).
- [3] B. Şanlı ve A. Hınç, Smart Grid (Akıllı Şebekeler): Türkiye’de Neler Yapılabilir?, 11. Türkiye Enerji Kongresi, 2009.
- [4] K. Park, Y. Kim, S. Kim, K. Kim, W. Lee and H. Park, Building Energy Management System based on Smart Grid, IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), (2011) 1-4.
- [5] Anonim. (2016). <https://www.enerji.gov.tr/Resources/Sites/1/Pages> (Online Erişim: 25.10.2018).
- [6] Ö. Tuttokmağ and A. Kaygusuz, Investigation of system stability in power systems containing renewable energy sources, 8 th Internatioanal Advanced Technologies Symposium, Elazığ, (2017).
- [7] P. Gopakumar, M. J. Reddy and D. K. Mohanta, *Letter to the Editor: Stability Concerns in Smart Grid with Emerging Renewable Energy Technologies*, **Electr. Power Compon. Syst.**, 42:3-4 (2014) 418-425.
- [8] M. Uzunoğlu ve O. Erdiñç, *Akıllı şebekelere giriş*, Nobel Akademik Yayıncılık, 2013.
- [9] V. C. Gungor vd., *Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards*, **IEEE Trans. Ind. Inform.**, 7: 4 (2011) 529-539.
- [10] H. Gharavi and R. Ghafurian, *Smart Grid: The Electric Energy System of the Future*, **Proc. IEEE**, 99:6 (2011) 917-921.
- [11] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, *Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey*, **IEEE Commun. Surv. Tutor.**, 14:4 (2012) 944-980.
- [12] Anonim. (2010). <https://www.smartgrid.gov/files> (Online Erişim: 25.10.2018).
- [13] Anonim. (2010). <https://www.nist.gov/publications/nist-framework-and-roadmap-smart-grid-interoperability-standards-release-10> (Online Erişim: 30.10.2018)
- [14] Cemal Keleş. *Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Bölgeleri Arasındaki Salınımların Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, 2012.

- [15] J. G. Slootweg and W. L. Kling, Impacts of distributed generation on power system transient stability, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, (2002) 862-867.
- [16] M. Reza, P. H. Schavemaker, J. G. Slootweg, W. L. Kling and L. Sluis, Impacts of distributed generation penetration levels on power systems transient stability, IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2004) 2150-2155.
- [17] A. M. Azmy and I. Erlich, Impact of distributed generation on the stability of electrical power system, IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2005), 1056-1063.
- [18] H. Chen, J. Chen, D. Shi and X. Duan, Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation, 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2006).
- [19] A. Khosravi, M. Jazaeri, and S. A. Mousavi, Transient stability evaluation of power systems with large amounts of distributed generation, 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, (2010) 1-5.
- [20] M. Z. C. Wanik, I. Erlich, A. Mohamed and A. A. Salam, Influence of distributed generations and renewable energy resources power plant on power system transient stability, 2010 IEEE International Conference on Power and Energy, (2010) 420-425.
- [21] B. Tamimi, C. Cañizares and K. Bhattacharya, Modeling and performance analysis of large solar photo-voltaic generation on voltage stability and inter-area oscillations, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, (2011) 1-6.
- [22] G. K. Venayagamoorthy, Intelligent sense-making for smart grid stability, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, (2011) 1-3.
- [23] J. Tsado, O. Imoru, and O. D. Segun, *Power System Stability Enhancement through Smart Grid Technologies with DRS*, **Int. J. Eng. Technol.**, 2:4 (2012) 9.
- [24] M. A. Sofla and R. King, Control method for multi-microgrid systems in smart grid environment—Stability, optimization and smart demand participation, 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), (2012) 1-5.
- [25] J. Yang, G. Li, D. Wu, and Z. Suo, The impact of distributed wind power generation on voltage stability in distribution systems, 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), (2013) 1-5.
- [26] J. Xu *vd.*, Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis, 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), (2013) 1-6.

- [27] K. Bhumkittipich and C. Jan-Ngurn, *Study of voltage stability for 22kV power system connected with Lamtakhong Wind Power Plant, Thailand*, **Energy Procedia**, 34 (2013) 951-963.
- [28] R. Sharma, M. Singh and D. K. Jain, Power system stability analysis with large penetration of distributed generation, 6th IEEE Power India International Conference (PIICON), (2014) 1-6.
- [29] W. Wu, K. Wang, G. Li, and Y. Hu, A stochastic model for power system transient stability with wind power, 2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition, (2014) 1-5.
- [30] S. Dierkes, F. Bennewitz, M. Maercks, L. Verheggen and A. Moser, Impact of distributed reactive power control of renewable energy sources in smart grids on voltage stability of the power system, 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), (2014) 119-126.
- [31] N. Fnaiech, A. Jendoubi, M. Zoghlami and F. Bacha, Continuation power flow of voltage stability limits and a three dimensional visualization approach, 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), (2015) 163-168.
- [32] W. Wang and G. M. Huang, Impacts of smart grid topology control on power system stability with renewable integration, 2016 North American Power Symposium (NAPS), (2016) 1-6.
- [33] W. Yu, Y. Xue, J. Luo, M. Ni, H. Tong, and T. Huang, *An UHV grid security and stability defense system: Considering the risk of power system communication*, **IEEE Trans. Smart Grid**, 7:1 (2016) 491-500.
- [34] J. Pollock and D. Hill, Application of distributed generation reactive power control modes to increase system stability, CIRED Workshop 2016, (2016) 1-4.
- [35] A. Rath, S. R. Ghatak and P. Goyal, Optimal allocation of Distributed Generation (DGs) and static VAR compensator (SVC) in a power system using Revamp Voltage Stability Indicator, 2016 National Power Systems Conference (NPSC), (2016) 1-6.
- [36] J. H. Angelim and C. M. Affonso, *Impact of distributed generation technology and location on power system voltage stability*, **IEEE Lat. Am. Trans.**, 14:4 (2016) 1758-1765.
- [37] S. K. Samanta and C. K. Chanda, Investigate the impact of smart grid stability analysis on synchronous generator, IEEE Calcutta Conference (CALCON), (2017) 241-247.
- [38] Ž. Eleschová, A. Beláň, B. Cintula, J. Bendík and M. Cenký, Smart Grids analysis - View of the transmission systems voltage stability, 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), (2018) 1-6.

- [39] M. Zhao, Z. Wang, and Y. Xue, An overview on application analysis of power electronic technology in smart grid, Chinese Control And Decision Conference (CCDC), (2018) 5186-5189.
- [40] P. K. Olulope, K. A. Folly, and G. K. Venayagamoorthy, Modeling and simulation of hybrid distributed generation and its impact on transient stability of power system, IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), (2013) 1757-1762.
- [41] Nur Asyik Hidayatullah. *Impacts of distributed generation on Smart Grid*, Research Master Thesis, Victoria University, 2011.
- [42] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Education, New York, 1994.
- [43] M. Akçin, B. B. Alagöz, C. Keleş, A. Karabiber ve A. Kaygusuz, *Dağıtık Kontrol ile Akıllı Şebekelerde Geniş-Alan Yönetimi ve Geleceğe Dönük Projeksiyonlar*, **Sak. Univ. J. Sci.**, 17:3 (2013) 457-470.
- [44] Barış Baykant Alagöz. *Değişken Üretim Ve Değişken Talep Koşullarında Akıllı Şebekelerde Enerji Dengeleme*, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, 2015.
- [45] M. Hashmi, S. Hänninen and K. Mäki, Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide, IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGTLA), (2011) 1-7.
- [46] Ulaş Baran Baloğlu. *Akıllı Şebekelerde Hesapsal Yöntem Uygulamaları*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2017.
- [47] Mehmet Can. *Akıllı Şebekeler*, Tezsiz Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2012.
- [48] Tuba Sarıkaya. *Akıllı Şebekelerde Ev Enerji Yönetim Sistemi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2016.
- [49] D. D. Sharma, S. N. Singh, and J. Lin, *Multi-agent based distributed control of distributed energy storages using load data*, **J. Energy Storage**, 5 (2016) 134-145.
- [50] F. Li vd., *Smart Transmission Grid: Vision and Framework*, **IEEE Trans. Smart Grid**, 1:2 (2010) 168-177.
- [51] Ozan Gül. *Akıllı Elektrik Şebekeleri ile Dağılmış Enerji Üretim Sistemlerinin Etkileşimi*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, 2013.
- [52] Anonim. (2016). www.akillisebekelerturkiye.org (Online Erişim: 26.12.2018).
- [53] A. Demirören ve L. Zeynelgil, *Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması*, İstanbul, 2004.

- [54] N. C. Chakraborty, A. Banerji and S. K. Biswas, Survey on major blackouts analysis and prevention methodologies, Michael Faraday IET International Summit 2015, (2015) 297-302.
- [55] Mehmet Turan. *Akıllı şebekelerde arıza analizi ve koruma*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2014.
- [56] T. Ackermann, G. Andersson and L. Söder, *Distributed generation: a definition*, **Electr. Power Syst. Res.**, 57:3 (2001) 195-204.
- [57] J. A. Lopes, N. Hatziargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins, *Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities*, 2007.
- [58] E. Karatepe ve F. Urganlı, Güç Sistemlerinde Dağıtılmış Enerji Üretimine Genel Bir Bakış, II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, (2011).
- [59] Ersin Akdeniz. *Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2015.
- [60] C. E. T. Foote, G. W. Ault, G. M. Burt, J. R. McDonald and F. Silvestro, Information requirements and methods for characterising distributed generation, CIRED 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, (2005) 1-5.
- [61] C. Wang, K. Yuan, P. Li, B. Jiao and G. Song, *A projective integration method for transient stability assessment of power systems with a high penetration of distributed generation*, **IEEE Trans. Smart Grid**, 9:1 (2018) 386-395.

7. EKLER

EK 1. JENERATÖR DATA

% 30 Baralı Sistem Modifikasyonunda kullanılan jeneratör verileri

%	Gen.	Ra	Xd'	H
gendata=[	1	0	0.006	500.0
	2	0	0.0697	30.3
	3	0	0.0531	35.8
	4	0	0.0436	28.6
	5	0	0.132	26.0
	6	0	0.05	34.8
	7	0	0.049	26.4
	8	0	0.057	24.3
	9	0	0.057	34.5
	10	0	0.031	5.0
	20	0	0.15	5.0
	23	0	0.05	2.5
	28	0	0.05	2.5
	29	0	0.15	5.0
	37	0	0.05	2.5];

EK 2. ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyadı : Özge TUTTOKMAĞI
Doğum Yeri ve Tarihi : Malatya - 13.04.1992
Adres : İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
E-Posta : ozge4492@gmail.com
Lisans : Fırat Üniversitesi (2010-2014)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

- **Tuttokmağı Ö.**, Kaygusuz A., *Investigation of System Stability in Power Systems Containing Renewable Energy Sources*, 8 th Internatioanal Advanced Technologies Symposium, Elazığ, 2017.
- **Tuttokmağı Ö.**, Kaygusuz A., *Akıllı Şebekeler ve Endüstri 4.0*, International Artificial Intelligence Data Processing Symposium. Malatya, 2018.
- **Tuttokmağı Ö.**, Kaygusuz A., Keleş C., Alagöz B.B., *Possible Contributions of Smart Grids to Regional Development of Countries*, International Artificial Intelligence Data Processing Symposium. Malatya, 2018.
- **Tuttokmağı Ö.**, Kaygusuz A., *Transient Stability Analysis of a Power System with Distributed Generation Penetration*, 7.Uluslararası İstanbul Akıllı Şebekler ve Şehirler Kongresi (ICSG), İstanbul, 2019.
- **Tuttokmağı Ö.**, Kaygusuz A., *Büyük Ölçekli Elektrik Kesintilerinin İncelenmesi*, **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 2019 (Kabul edildi).
- **Tuttokmağı Ö.**, Kaygusuz A., *Dağıtık Üretimli Güç Sistemlerinin Geçici Kararlılık Analizi*, International Artificial Intelligence Data Processing Symposium. Malatya, 2019 (İncelemede).