



**Dağıtık-Belirsiz Üretim ve Tüketim Koşullarının Güç Sistemlerinin Kararlılığı
Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi**

Program Kodu: 1002

Proje No: 118E863

Proje Yürütücüsü:

Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Bursiyer(ler):

Ayşe ACAR

Özge TUTTOKMAĞI

KASIM 2020

MALATYA



ÖNSÖZ

Günümüzde elektrik enerjinin çevre dostu, güvenilir ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi noktasında rüzgâr ve güneş gibi yenilebilir enerji kaynakları ön plana çıkmaktadır. Bu tip kaynakların teknik, ekonomik ve çevresel açıdan birçok avantaja sahip olmasına rağmen aralıklı ve öngörülemeyen yapıda olmaları güç sistem kararlılığı noktasında risk oluşturmaktadır. Düşük oranlı yenilenebilir dağıtık üretim içeren elektrik sistemleri için bu risk az olsa da büyük oranlı yenilenebilir dağıtık üretim içeren elektrik sistemleri için bu risk oldukça fazladır. TÜBİTAK tarafında desteklenen bu projede, IEEE 9, 14, 30 ve 39 baralı güç sistemleri üzerinden belirsiz üretim ve tüketimin koşulları dâhil edilerek oluşturulan senaryolar üzerinden sistem kararlılığı incelenmiştir.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iii
TABLolar LİSTESİ	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Dağıtık Enerji Üretiminin Avantajları.....	2
1.2 Dağıtık Üretimin Şebekeye Entegrasyonu Ve Kararlılığı Üzerindeki Etkisi	4
1.3 Literatür Taraması.....	8
2. GEREÇ VE YÖNTEM	13
2.1 Gereç.....	13
2.1.1. Kararlılık Analizinde Kullanılan Test Sistemlerinin ve Sistemlere Ait Profillerin Tanıtılması	13
2.2 Yöntem	19
2.2.1 Kararlılık Analizi	19
3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	24
3.1 9 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	24
3.2 14 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	41
3.3 30 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	48
3.4 39 Baralı Güç Sistemi Çalışması.....	61
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	69
5. KAYNAKLAR	72
6. EKLER.....	77
EK 1. Elektrik kesinti kronolojisi (Tuttokmağı, 2019)	77



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Dağıtık üretim çeşitleri	2
Şekil 2. Dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ile birlikte enerji akışı (Akdeniz, 2015).....	5
Şekil 3. Dağıtık üretimin şebeke entegrasyonunda kullanılan bağlantı araçları	7
Şekil 4.(a) 9 baralı sistem ait, (b) 14 baralı sistem ait, (c) 30 baralı sistem ait, (d) 39 baralı sistem ait mevcut durum diyagramları	16
Şekil 5. (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.....	18
Şekil 6. (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	19
Şekil 7. Çok makineli sistem diyagramı	20
Şekil 8. 9 baralı test sistemleri	26
Şekil 9. Mevcut sisteme ait 24 saatlik güç değişimi.....	28
Şekil 10. 24 saatlik bara gerilim değişimi	30
Şekil 11. 24 saatlik bara gerilim blok değişimi.....	31
Şekil 12. Jeneratör rotor açısı değişimleri.....	37
Şekil 13. 4 nolu baraya yakın 4-6 hattında meydana gelen bir arıza durumu için temizlenme süre değişimi (saniye)	38
Şekil 14. Frekans değişimi (7.saat dilimi).....	40
Şekil 15. 14 baralı test sistemleri	41
Şekil 16. 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi.....	42
Şekil 17. (a) Jeneratör rotor açısı değişimleri (b) Frekans değişimleri (12. Saat dilimi)	44
Şekil 18. Test sistemi	45
Şekil 19. 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi.....	45
Şekil 20. (a) 2-3 hattında 3 nolu baraya yakın bir arıza durumu (b) 13-14 hattında 13 nolu baraya yakın bir arıza durumu (16. Saat dilimi)	47
Şekil 21. Arıza durumu için temizlenme süre değişimi (saniye).....	48



Şekil 22. 30 baralı test sistemleri	50
Şekil 23. 24 saatlik güç değişimi	51
Şekil 24. 24 saatlik bara gerilim değişimi	53
Şekil 25. (a) Rotor açısı değişimleri (b) Frekans değişimleri (11.saat dilimi)	56
Şekil 26. 12 nolu baraya yakın 12-15 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süresi değişimi (saniye)	58
Şekil 27. (a) Rotor açısı değişimleri (b) Frekans değişimleri (20.saat dilimi)	60
Şekil 28. 39 baralı test sistemleri	63
Şekil 29. (a) 24 saatlik bara güç değişimi	64
Şekil 30. Senkron makine arızası için 13. saat dilimindeki (a) Jeneratör rotor açısı değişimleri	66
Şekil 31. İletim hattı arızası için 13. saat dilimindeki (a) Jeneratör rotor açısı değişimleri	68



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1. 9 baralı test sistemi karakteristikleri	26
Tablo 2. 30 baralı test sistemi karakteristikleri	49
Tablo 3. 39 baralı test sistemi karakteristikleri	61



ÖZET

Günümüzde kullanılan elektrik güç sistemleri, genellikle merkezi üretimli sistemlerdir. Bu sistemlerde büyük güçteki santrallerde üretilen elektrik enerjisi, kilometrelerce uzunluktaki iletim hatları vasıtasıyla radyal yapıdaki dağıtım sistemleri üzerinden son kullanıcı dağıtım noktasına iletilmektedir. Bu sistemlerde üretimin önemli bir rol oynamasından dolayı elektrik üretim santralleri petrol, kömür ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarının yoğun olduğu bölgelerde kurulmaya devam etmektedir. Dünyadaki artan nüfus ve teknolojiye gelişmelerle birlikte enerjiye olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Artan enerji talebinin karşılanması esnasında mevcut elektrik sistemlerinden ve üretim kaynaklarından kaynaklı bazı sıkıntılarla karşılaşılması olasıdır. Bu sıkıntıları en az düzeye indirmek ve özellikle de fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi tehlikesinin önüne geçebilmek için yenilenebilir enerji kaynakları ve dağıtık üretim kavramları ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim birimleri teknik, ekonomik ve çevresel açıdan birçok avantajının yanı sıra aralıklı ve öngörülemez yapıya sahiptirler. Bu kaynakların elektrik üretiminde payını artırması ek olarak değişken ve belirsiz yapıdaki üretimin artması güç sistem kararlılığı noktasında risk oluşturabileceği öngörülmektedir. Düşük oranlı yenilenebilir dağıtık üretim içeren elektrik sistemleri için bu risk az olsa da büyük oranlı yenilenebilir dağıtık üretim içeren elektrik sistemleri için bu risk oldukça fazla olabilir.

Bu projede, 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 oluşturularak IEEE 9, 14, 30 ve 39 baralı sistemler üzerinden test sistemleri oluşturulmuştur. Dağıtık-belirsiz üretim ve tüketim yapısındaki değişimler kullanılarak gerilim kararlılığı incelenirken her sistem için oluşturulan arıza senaryoları üzerinden rotor açığı ve frekans kararlılığı incelenmiştir.

Analiz çalışmaları sonucunda dağıtık-belirsiz üretim ve tüketimin, üretim-tüketim profillerine, sisteme entegrasyon noktasına, arıza yerine vb. faktörlere de bağlı olarak her sistemde farklı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmekle birlikte oluşturulan analiz prosedürüne göre sistem kararlılığında iyileşmelerin yanı sıra bozulmaların da meydana geldiği görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Dağıtık üretim, değişken tüketim, güç sistemi kararlılığı.



ABSTRACT

Today, electric power systems used are generally centrally generated systems. In these systems, the electrical energy generated in large power plants is transmitted to the end-user distribution point via radial distribution systems through transmission lines of kilometers length. Since generation plays an important role in these systems, electricity generation plants continue to be established in regions where energy resources such as oil, coal, and natural gas are intense. With the increasing population in the world and the developments in technology, the need for energy is constantly increasing. It is possible to encounter some problems arising from the existing electrical systems and generation resources while meeting the increasing energy demand. To minimize these problems and especially to prevent the danger of depletion of fossil fuel resources, the concepts of renewable energy resources and distributed generation come to the fore. Distributed generation units based on renewable energy resources have an intermittent and unpredictable structure besides many advantages in technical, economic, and environmental terms. In addition to increasing the share of these resources in electricity generation, it is predicted that the increase in variable and uncertain production may pose a risk at the point of difficult system stability. While this risk is low for electrical systems with low-scale renewable distributed generation, this risk can be quite high for electrical systems with large-scale renewable distributed generation.

In this project, the effects of uncertain and variable distributed generation, which are preferred as an alternative to meet the increase in energy demand, and variable consumption units on system stability are examined. First of all, hypothetical generation and consumption profiles were created to reflect the uncertainties in generation and consumption, and test systems were created on IEEE 9, 14, 30, and 39 bus systems. Rotor angle and frequency stability were examined over the fault scenarios created for each system while analyzing the voltage stability by using the changes in the distributed-indeterminate production and consumption structure.

As a result of the analysis studies, it is observed that it has a different effect on each system depending on the factors (the determination of distributed-uncertain generation and consumption according to production-consumption profiles, system integration point, fault location, etc.) and it has been observed that the system stability improves as well as deterioration according to the analysis procedure established.

KEYWORDS: Distributed generation, variable consumption, power system stability.



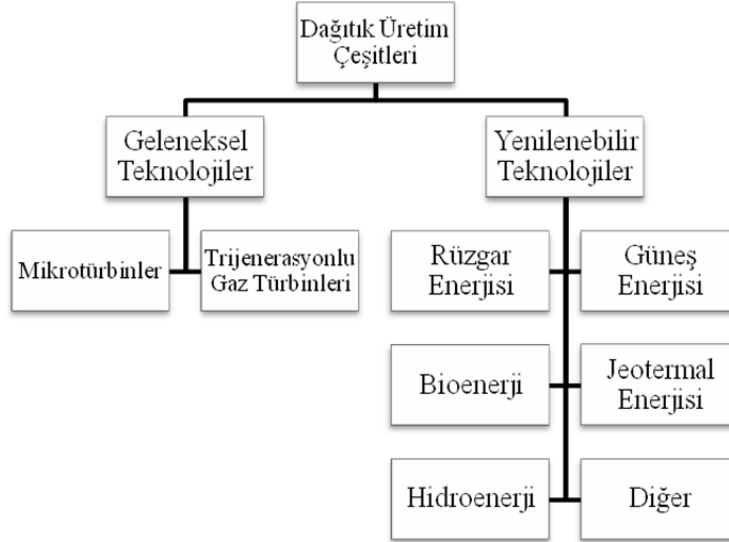
1. GİRİŞ

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 kurulacağı yerlerin seçilmesinde ekonomik, coğrafi, politik, tıbbi ve güvenliğe dayalı endişelerden kaynaklanan etmenler dikkate alınmalıdır. Bir hidroelektrik santralini 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 kullanılmayan enerji kaynaklarının akıllı şebeke teknolojisi sayesinde daha fazla entegrasyonunun sağlanması fikri üzerinde yoğunlaşmıştır (Turan, 2014).

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 (Ackermann vd., 2001). 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 CIREN raporunda ifade edilmiştir. Bugün gelinen noktada 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 (Lopes vd., 2007). Şekil 1’de dağıtık üretim çeşitleri görülmektedir.



Şekil 1. Dağıtık üretim çeşitleri

İlk bakışta geleneksel teknolojiler kapsamındaki trijenerasyonlu gaz türbinleri sayesinde ısıtma ve soğutma ile birlikte elektriğin beraber kullanılmasına imkân verdiği için ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık bazılarının güç değerlerinin çok büyük olması bu yapıların özellikle de dağıtım hatlarına entegre edilmesi yaşanabilecek 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 teknolojilerinde 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 kompanze etme süreleri kısalmaktadır. Böylece güneş ve rüzgâr kaynaklı dağıtık üretimin daha fazla yaygınlaşacağı beklenmektedir.

1.1 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, yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren dağıtık üretim tesislerinin elektrik şebekelerine daha fazla entegrasyonunun 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 sahiptir. 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 karşılaşmaz.
- 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



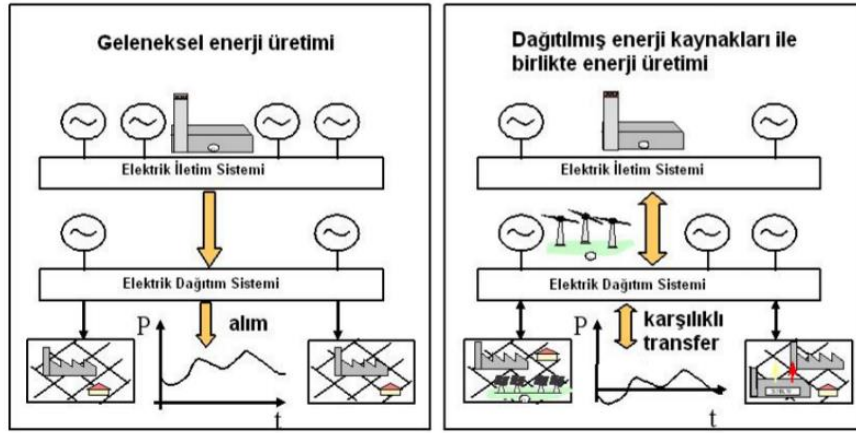
yaşlanmış merkezi sistemlerin altyapılardan dolayı oluşabilecek güvenilirlik ve arz kalitesi problemlerinin üstesinden gelinebileceği düşünülmektedir.

- 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 doğmasını sağlar. Böylelikle 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 Tesisi 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 sayısı 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 (Karatepe & Urganlı, 2011), (Wanik vd., 2010),(Sharma vd., 2014).

1.2 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’de dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ile birlikte enerji akışı görülmektedir.



Şekil 2. Dağıtık üretimin şebekeye entegrasyonu ile birlikte enerji akışı (Akdeniz, 2015)

Dağıtık üretim kavramını genel olarak üretim teknolojisi olarak görülse de aynı zamanda 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 sistemi 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 (Karatepe & Urganlı, 2011).

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 (Yu vd., 2016). 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 (Yang vd., 2013).

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,

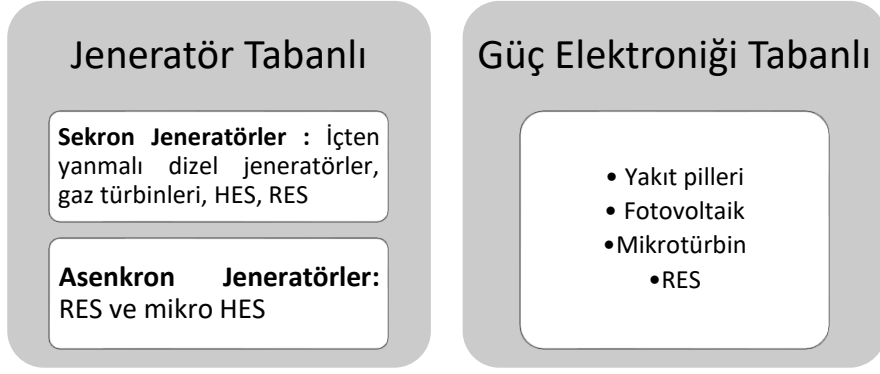


- Transformatör bağlantı gruplarına göre kısa devre akımlarının etkilerinin artması ve röle seçimlerinin sürekli değişmesi,
- Şebeke elemanlarının kısa devre akım limitleri ile ısı dayanım kapasiteleri zorlanması,
- Harmonik ve fliker üretiminin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olmaması,
- Anlık devreye girme ve anahtarlama olaylarının sistemin nominal çalışması için gerekli limit değerleri içerisinde olmaması

şeklinde sıralanabilir. Dahası hem yaşanılması 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 sönümlenme 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 getirebilir. 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 (Foote vd., 2005).



Şekil 3. 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 3'te 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 sönmüleme momenti sadece senkron jeneratörlerden sağlanmaya çalışılacağı için, senkron jeneratörlerin hızlanmasına, sistemde meydana gelecek olan frekans ve gerilim salınımları karşısında senkron jeneratörlerin aşırı yüklenmesine 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 (Wang vd., 2018).

Rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren dağıtık üretimlerin aralıklı ve öngörülemeyen yapılarından dolayı her zaman faydalanamayabilmeleri. Ancak bu yapılardan enerji üretimlerinin yoğun olarak yapıldığı zaman dilimlerinde şebekeye bağlayarak faydalanılabilmeleri. 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. 2016 yılında Güney Avusturalya'da yaşanan sistem çökmesi bu durumun önemi açıklayan en güzel örnektir. Ek 1'deki dünyadaki en büyük sistem çökmesi listesi incelendiğinde Güney Avusturalya'da yaşanan sistem çökmesi yüksek yenilenebilir enerji entegrasyonu nedeniyle açılabilir kararsızlığın oluşması sonucu meydana gelen ilk sistem çökmesi olarak kayıtlara geçmiştir.

1.3 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 büyüyen karmaşık hale gelmiştir. Güç sistemlerinde yaşanan bu değişim bir takım problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu problemlerden biri de kararlılık problemi.

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 analiz programı geliştirilmiştir (Keleş, 2012). 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 çalışmalarından 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 (Slootweg & Kling, 2002).

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 (Reza et al., 2004).

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 (Azmy & Erlich, 2005).

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 (Chen vd., 2006).

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 seviyedeysen %31 ve üzeri kullanımlarda sistemde kararsızlık gözlemlenmiştir (Khosravi vd., 2010).

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 (Wanik vd., 2010).

2011 yılında Tamimi 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 (Tamimi vd., 2011).

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 hesaplama sistemleri oluşturularak şebeke güvenilirliğine katkıda bulunacağına inanılmaktadır (Venayagamoorthy, 2011).



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 (Tsado vd., 2012).

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 (Sofla & King, 2012).

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 (Yang vd., 2013).

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 (Xu vd., 2013).

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 (Bhumkittipich & Jan-Ngurn, 2013).

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 yüzdelerle yapılmıştır. Gerçekleştirilen rotor hızı ve açısı analizleri sonucunda dağıtık üretim sistemlerinin %40'ın üzerine çıkmadığı sonucu elde edilmiştir (Sharma vd., 2014).

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

2014 yılında Dierkes vd.; Alman enerji sistemindeki yenilenebilir elektrik üretimi ve akıllı şebekeye geçiş sürecindeki değişiklikler üzerine çalışmışlardır. Meydana gelen ve gelmesi



olası değişikliklerinden birbirine bağlı güç sistemlerinin kararlılığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Dierkes vd., 2014).

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 (Gopakumar vd., 2014).

2015 yılında Fnaiech 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 (Fnaiech vd., 2015).

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 (W. Wang & Huang, 2016).

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 (Yu et al., 2016).

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 (Pollock & Hill, 2016).

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 (Rath et al., 2016).

2016 yılında Angelim ve Affonso; Brezilya elektrik sistemini temsil eden 33 ve 65 baralı test sistemlerine belirli yüzdelerle 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 (Angelim & Affonso, 2016).

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 (Samanta & Chanda, 2017).

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 incelemiştir. 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 (Eleschová vd., 2018).

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



2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1 Gereç

2.1.1. 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.

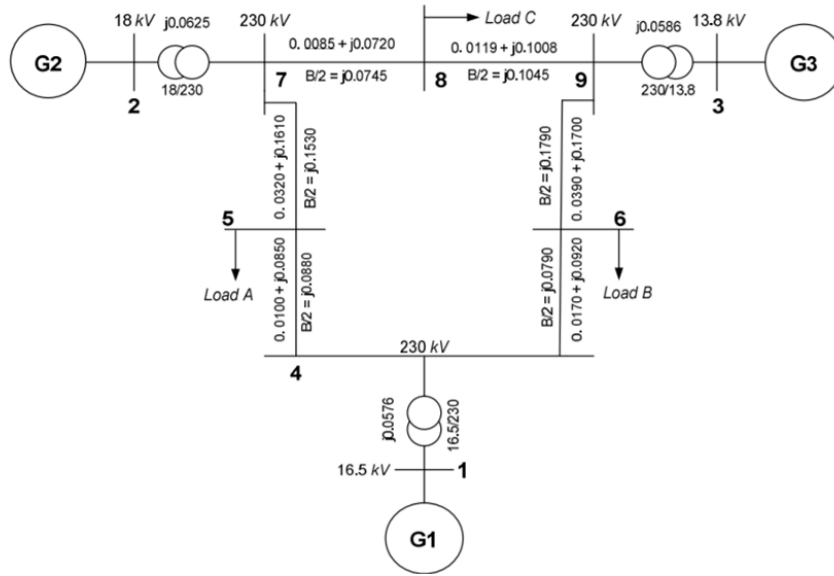
Kullanılan test sistemlerinin modellenmesinde gerekli olan gerilim, güç, empedans vb. parametreler literatürden elde edilmiştir. Bu sistemlerin merkezi yapıdaki üretimlerini temsil eden mevcut durumlarına ait genel bilgiler şu şekildedir:

- *9 baralı güç sistemi:* 3 makine, 3 yük, 3 transformatör ve 6 iletim hattından oluşan 9 baralı güç sistemine ait mevcut durum Şekil 4.(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 4.(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 4.(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 4.(d)'de verilmiştir.

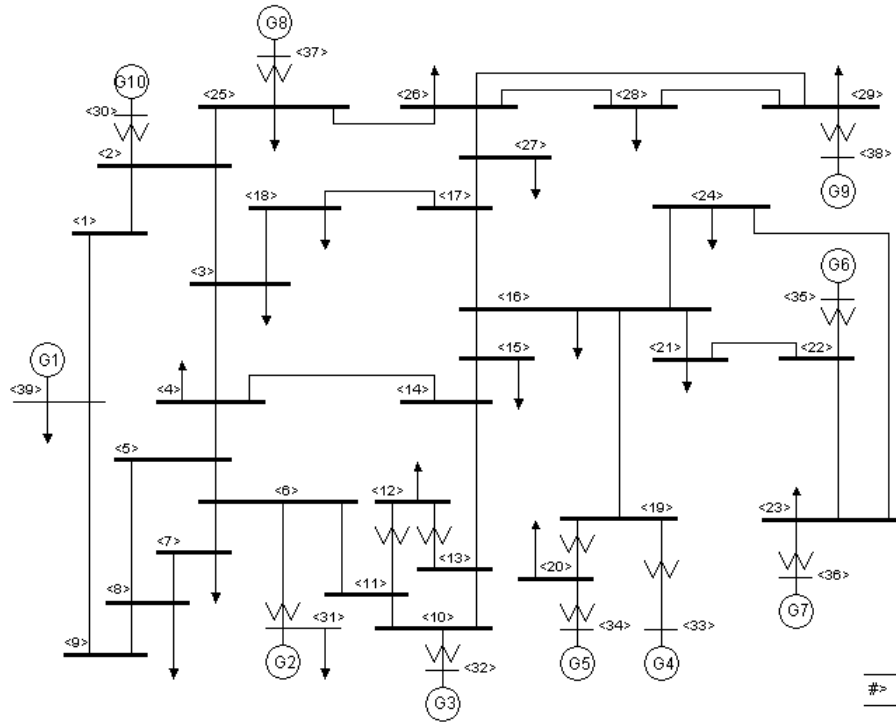
Test sistemlerinin kararlılık analizinde kullanılan bazı parametreler (gerilim, güç gibi) çok yüksek değerlere sahip olduğundan 100 MVA'lık güç değeri ve 60 Hz frekans değeri referans kabul edilmiştir. Diğer tüm değişkenler bu referans değere göre düzenlenerek işlem kolaylığı

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 4'te verilen farklı karakteristiğe sahip test sistemlerinin kullanılması, kararlılık analizlerinde farklı güç sistemlerinin değişen tepkilerinin görülebilmesi açısından tercih edilmiştir.



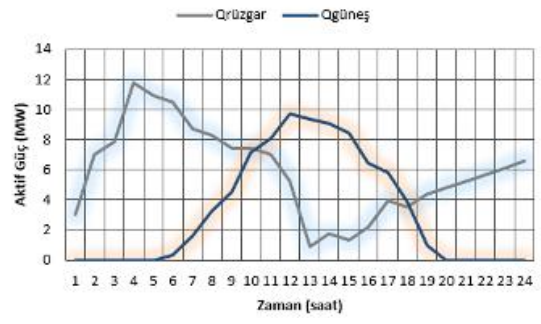
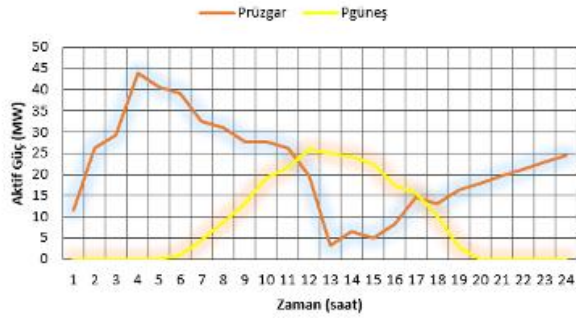
(a)



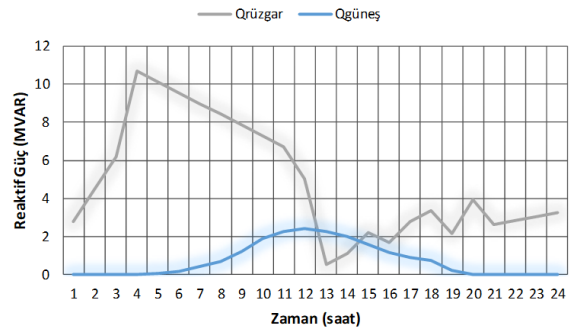
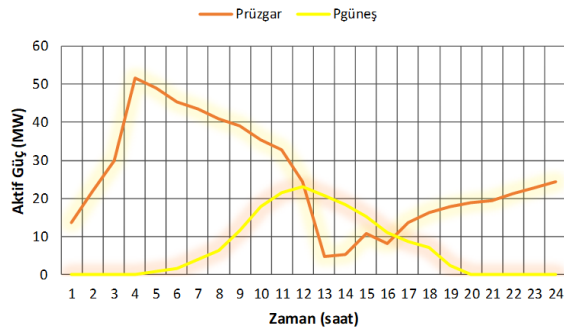
(d)

Şekil 4.(a) 9 baralı sistem ait, (b) 14 baralı sistem ait, (c) 30 baralı sistem ait, (d) 39 baralı sistem ait mevcut durum diyagramları

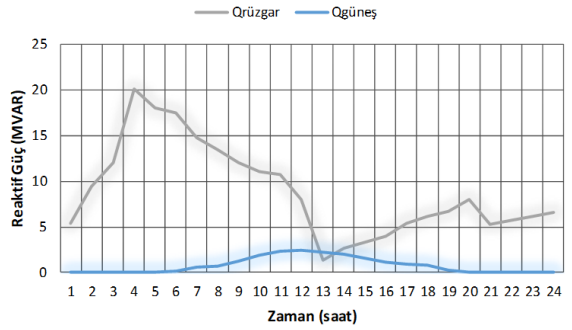
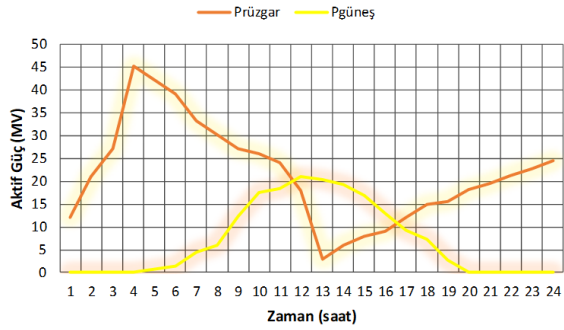
Akıllı şebeke ve güç sistemi kararlılığı arasındaki etkileşimi analiz edebilmek amacıyla test sistemleri, dağıtık üretim ve değişken yük birimleri ile yeniden modellenerek modifiye edilmiştir. Modelleme esnasında yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimleri temsilen rüzgâr ve güneş enerjisi tercih edilmiştir. Günlük ve aylık profil araştırmaları sonucunda özellikle de güneş ve rüzgârdaki belirsizlikleri yansıtabilecek 24 saatlik ortalama üretim profilleri belirlenmiştir. Yine günlük ve aylık profil araştırmaları sonucunda 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 5'te ve tüketim profilleri Şekil 6'da verilmiştir.



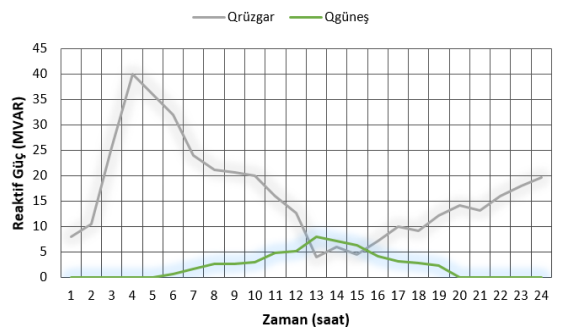
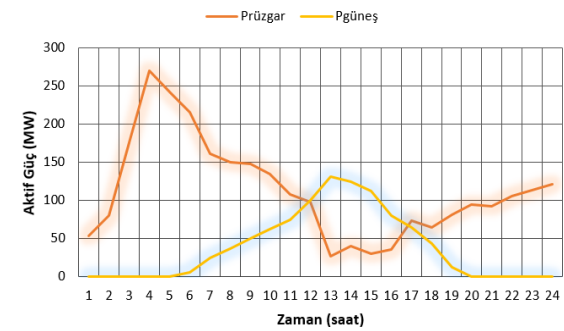
(a)



(b)



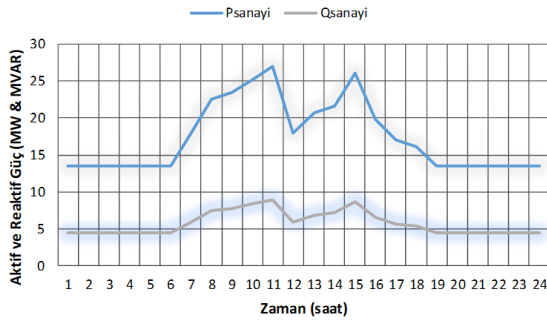
(c)



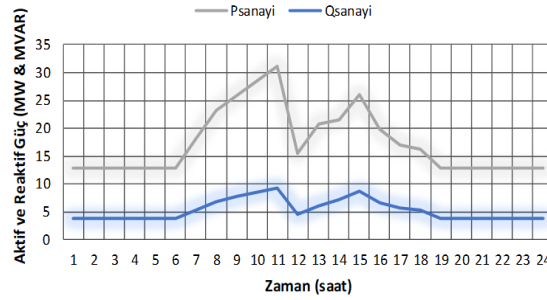
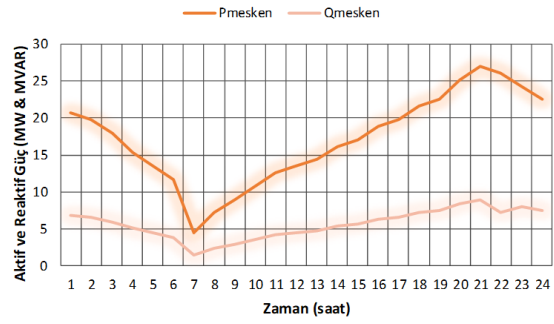
(d)

Şekil 5. (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

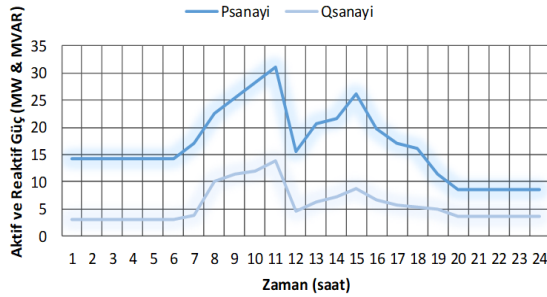
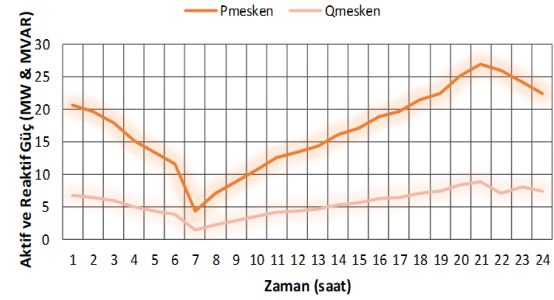
Varsayımsal olarak oluşturulan üretim profilleri üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar, termik ve hidroelektrik santralleri temsilen sürekli enerji sağlayan sabit üretim kaynakları (Psabit/Qsabit) ile olası saatlik değişimler göz önüne alınarak aralıklı ve değişken yapıya sahip rüzgâr (Prüzgar/QRüzgar) ve güneş (Pgüneş/Qgüneş) enerji üretim kaynaklarıdır.



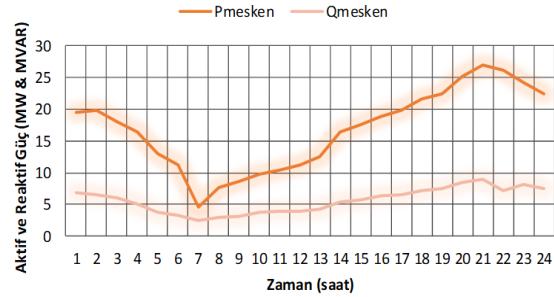
(a)

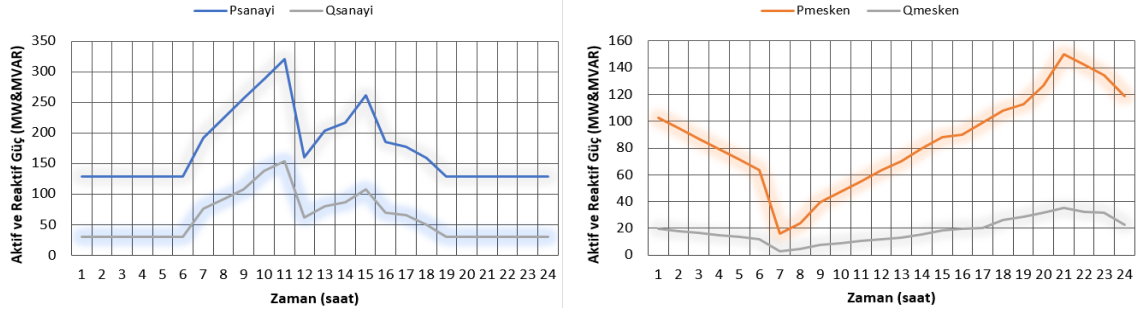


(b)



(c)





(d)

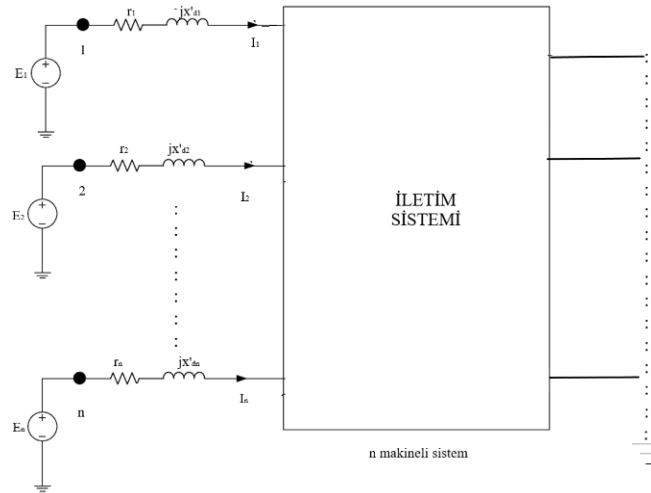
Şekil 6. (a) 9 baralı sistem için kullanılan, (b) 14 baralı sistem için kullanılan, c) 30 baralı sistem için kullanılan, (d) 39 baralı sistem için kullanılan 24 saatlik ortalama tüketim profilleri

Yine varsayımsal olarak oluşturulan tüketim profilleri iki gruba ayrılmaktadır. Bunlar, tüketim değişkenliği daha az olan sanayi bölgelerini temsil eden sanayi tipi yükler (Psanayi/Qsanayi) ile tüketim değişkenliği nispeten daha fazla olan mesken bölgelerini temsil eden mesken tipi yüklerdir (Pmesken/Qmesken).

2.2 Yöntem

2.2.1 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 7’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 7. Çok makineli sistem diyagramı

n makineli güç sisteminde, lineer olmayan denklem çözümünde daha yaygın bir şekilde kullanılan Newton-Raphson yineleme metodu tercih edilmiştir. Bu metod sayesinde geliştirilmiş 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 Kirchoff Akım Kanun'u her baraya uygulanarak güç denklemlerinin elde edilmesi gerekir. Sistemdeki bir i barası ve bağlantılı olduğu iletim hatları göz önüne alınarak Kirchoff Akım Kanun'u uygulandığında;

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

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 tekrarlama 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, gerçek 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.

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

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

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

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 edilen 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×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.

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

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Güç sistemlerinin planlanma ve çalışmasında kararlılık kavramı hayati öneme sahiptir. Zamanla 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, test sistemleri üzerinden değişken-belirsiz üretim ve tüketim teknolojilerinin sistem kararlılığında meydana getireceği etkiler gözlemlenmiştir.

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

1. Değişken-belirsiz üretim ve/veya tüketim profilleri kullanılarak test sistem modelleri oluşturacak şekilde mevcut sistemler modifiye edilmiştir.
2. Modifiye edilerek oluşturulan test sistemlerinin 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 test sistemleri için yapıldığından pozitif ve negatif değişimlerin gözlemlenmesi açısından daha verimli sonuçlar elde edilmiştir.

3.1 9 Baralı Güç Sistemi Çalışması

Bu adımda Şekil 4.(a)'da tanıtımı yapılan 9 baralı güç sistemi, Şekil 5.(a)'daki dağıtık üretim ve Şekil 6.(a)'daki değişken tüketim birimleri kullanılarak Şekil 8'de gösterildiği gibi modifiye edilmiştir.

Şekillerde



rüzgar üretim birimini



güneş üretim birimini

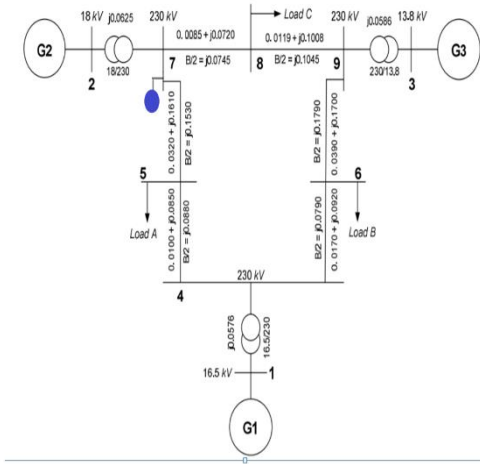


sanayi tipi tüketim birimini

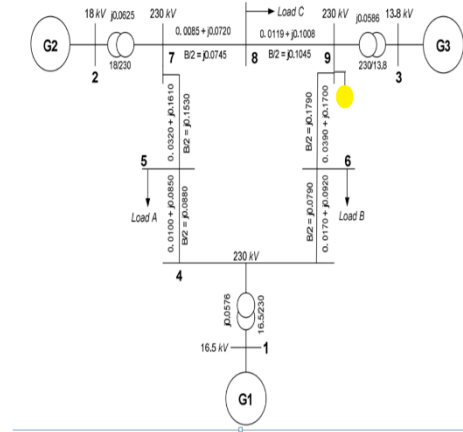


mesken tipi tüketim birimini

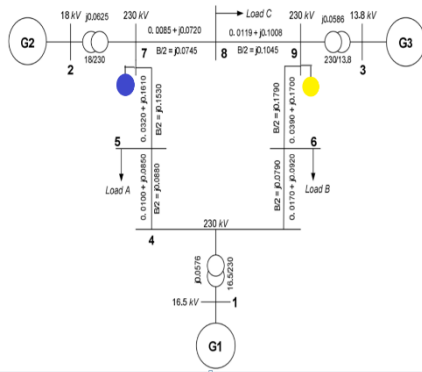
temsil etmektedir.



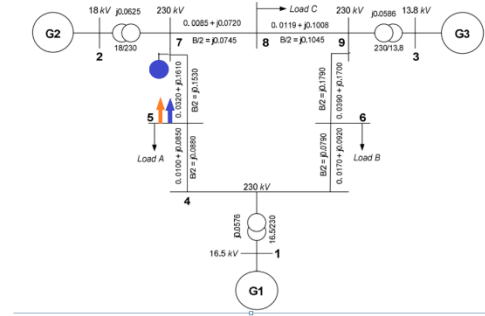
(a) Dağıtık üretimli test sistem 1



(b) Dağıtık üretimli test sistem 2

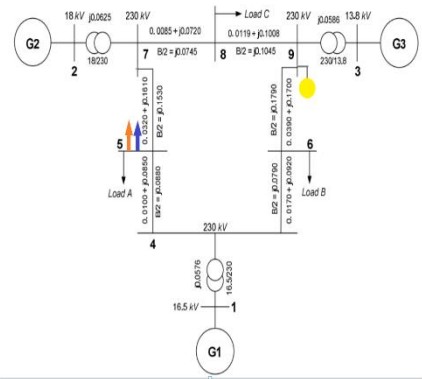


(c) Dağıtık üretimli test sistem 3

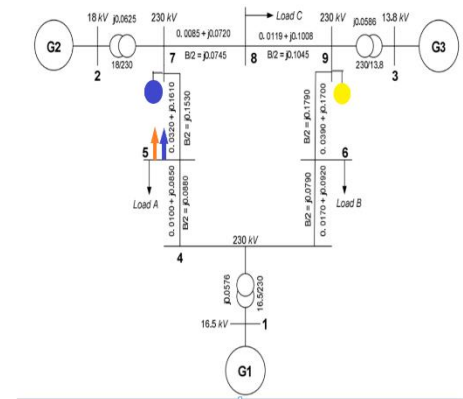


(d) Dağıtık-belirsiz üretimli ve tüketimli test sistem

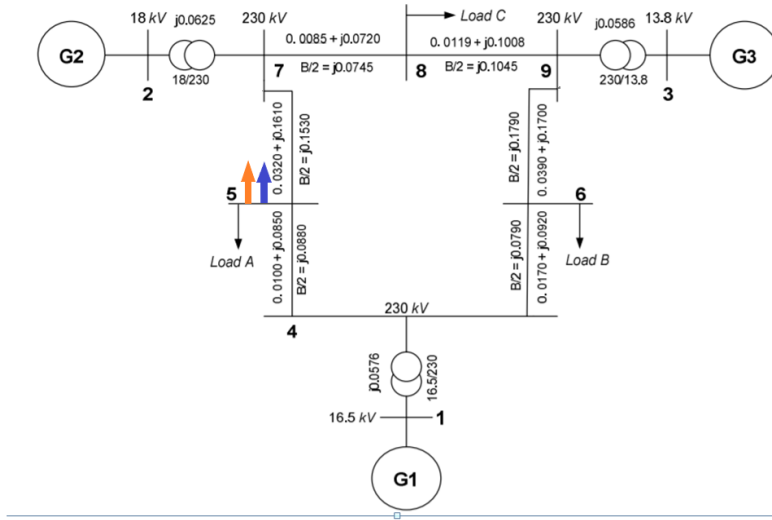
4



(e) Dağıtık-belirsiz üretimli ve tüketimli test sistem 5



(f) Dağıtık-belirsiz üretimli ve tüketimli test sistem 6



(g) Dağıtık-belirsiz tüketimli test sistem 7

Şekil 8. 9 baralı test sistemleri

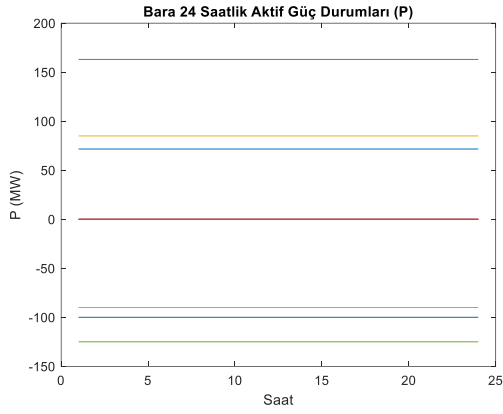
Mevcut duruma ek olarak referans bara, yük veya geçiş barası (PQ) ve üretim barası (PV) bilgilerini içeren test sistemlerine ait bara bilgileri de Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. 9 baralı test sistemi karakteristikleri

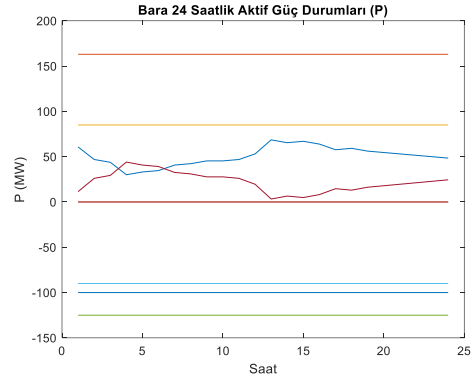
Bara No	Mevcut Sistem Bara Türü	Test Sistemi 1 Bara Türü	Test Sistemi 2 Bara Türü	Test Sistemi 3 Bara Türü	Test Sistemi 4 Bara Türü	Test Sistemi 5 Bara Türü	Test Sistemi 6 Bara Türü	Test Sistemi 7 Bara Türü
1	Referans (Slack)	Referans (Slack)	Referans (Slack)	Referans (Slack)	Referans (Slack)	Referans (Slack)	Referans (Slack)	Referans (Slack)
2	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
3	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
5	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ+PQ(mesken tipi+ sanayi tipi)	PQ+PQ(mesken tipi+ sanayi tipi)	PQ+PQ(mesken tipi+ sanayi tipi)	PQ+PQ(mesken tipi+ sanayi tipi)
6	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ
7	PQ	PQ+PV(rüzgâr)	PQ	PQ+PV(rüzgâr)	PQ+PV(rüzgâr)	PQ	PQ+PV(rüzgâr)	PQ+PV(rüzgâr)
9	PQ	PQ	PQ+PV(güneş)	PQ+PV(güneş)	PQ	PQ+PV(güneş)	PQ+PV(güneş)	PQ

Ayrıca dağıtık üretim birimlerinin rotor açısı kararlılığı üzerindeki etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla rüzgâr ve güneş birimleri için sırasıyla 2.3 ve 1.5 gibi sifıra yakın değerlerde olacak şekilde küçük eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılmıştır.

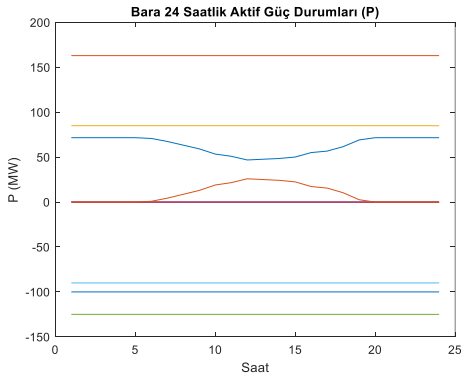
Kararlılık analizi için mevcut sistemin yanı sıra dağıtık-belirsiz üretim ve tüketim birimleri vasıtasıyla modifiye edilerek oluşturulan test sistemleri kullanılmıştır. Simülasyon analiz prosedürüne göre modifikasyondan sonra ikinci olarak yük akış çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişimleri Şekil 9, Şekil 10 Ve Şekil 11’de verilmiştir. Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.



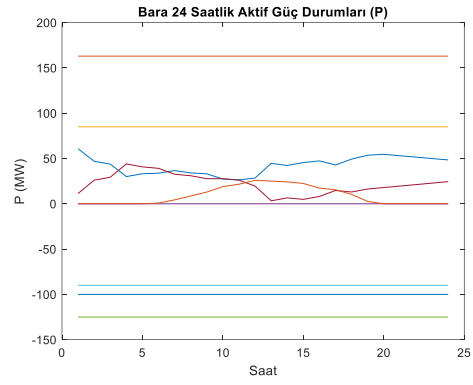
(a) Mevcut durum



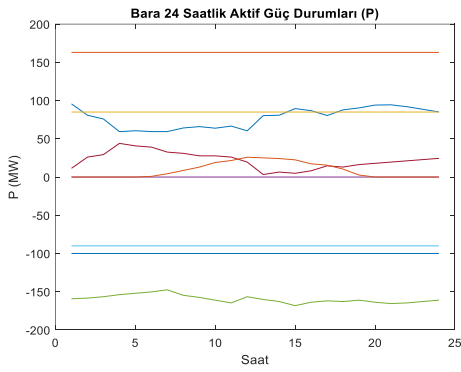
(b) Test sistemi 1



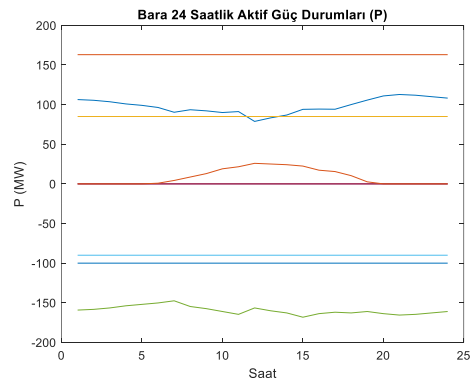
(c) Test sistemi 2



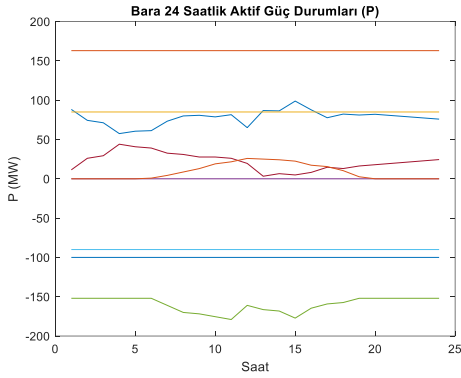
(d) Test sistemi 3



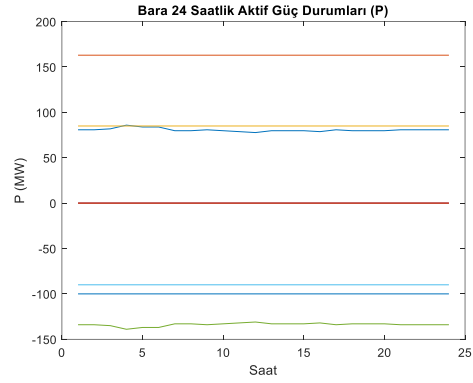
(e) Test sistemi 4



(f) Test sistemi 5



(g) Test sistemi 6



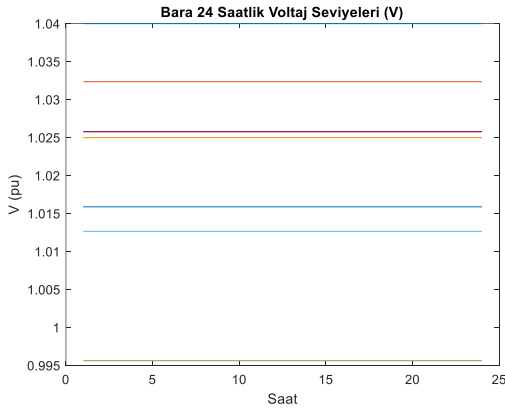
(h) Test sistemi 7

Şekil 9. Mevcut sisteme ait 24 saatlik güç değişimi

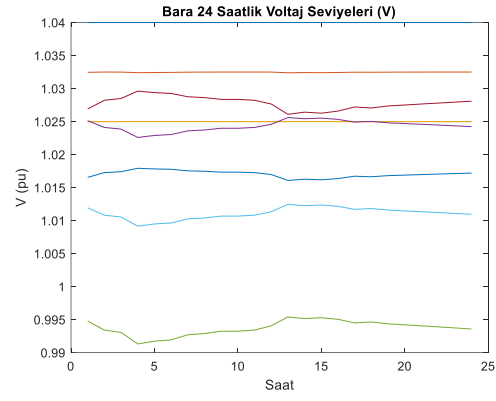
Şekil 9.(a) incelendiğinde aralıklı ve belirsiz yapıya sahip üretim ve tüketim birimleri olmadığından mevcut duruma ait güç grafiğinde sabit bir değişim gözlemlenmektedir. Bu durumun aksine Şekil 9.(b-h)'da verilen dağıtık-belirsiz üretim ve\veya tüketime ait grafiklerde üretim ve tüketim birimlerinin aralıklı ve belirsiz yapılarından kaynaklı değişimler söz konusudur. Diğer grafikler sırasıyla incelendiğinde;

- Şekil 9.(b)'de 7 nolu baraya bağlı rüzgar dağıtık birimi tarafından bordo renkle temsil edilen rüzgarın etkin olduğu 2-10 saatleri arasında sisteme ekstra güç sağlandığı,
- Şekil 9.(c)'de 9 nolu baraya bağlı güneş dağıtık birimi tarafından turuncu renkle temsil edilen güneşin etkin olduğu 10-16 saatleri arasında sisteme ekstra güç sağlandığı,
- Şekil 9.(d)'de 7 nolu baraya bağlı rüzgar dağıtık birimi tarafından 2-10 saatleri arasında ile 9 nolu baraya bağlı güneş dağıtık birimi tarafından güneşin etkin olduğu 10-16 saatleri arasında sisteme ekstra güç sağlandığı,
- Şekil 9.(e)'de 7 nolu baraya bağlı rüzgar dağıtık birimi tarafından 2-10 saatleri arasında sisteme ekstra güç sağlarken 5 nolu baradaki yeşil renkle temsil edilen değişken yüklerden kaynaklı güç talebinin arttığı,
- Şekil 9.(f)'de 9 nolu baraya bağlı güneş dağıtık birimi tarafından güneşin etkin olduğu 10-16 saatleri arasında sisteme ekstra güç sağlarken 5 nolu baradaki değişken yüklerden kaynaklı güç talebinin arttığı,

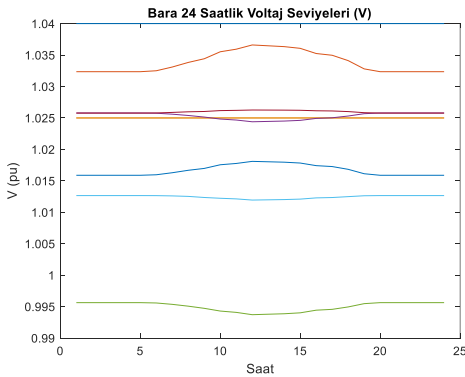
- Şekil 9.(g)'de 7 nolu baraya bağlı rüzgar dağıtık birimi tarafından 2-10 saatleri arasında ile 9 nolu baraya bağlı güneş dağıtık birimi tarafından güneşin etkin olduğu 10-16 saatleri arasında sisteme ekstra güç sağlarken 5 nolu baradaki değişken yüklerden kaynaklı güç talebinin arttığı,
- Şekil 9.(h)'de 5 nolu baradaki değişken yüklerden kaynaklı güç talebinin arttığı görülmektedir. Bu sonuçlar yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerinin değişken ve belirsiz bir yapıya sahip olmalarına rağmen sistem açısından olumsuz bir etkiyle karşılaşılmamıştır. Aksine yük yoğunluğunun fazla olduğu geçiş baralarına eklenmesiyle dağıtık üretimin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerindeki yük yoğunluğunu azalması dolayısıyla sistemdeki kayıpları azalmasını da beraberinde getirmektedir. Sisteme sonradan eklenen ekstra yüklerin ise mevcut sistem için az da olsa yoğunluğu arttırırken bu yoğunluğun dağıtık üretim birimlerinin sisteme eklenmesiyle göz ardı edilebileceği ifade edilebilir. Böylece dağıtık üretim birimlerinin güç yoğunluğu üzerindeki iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.



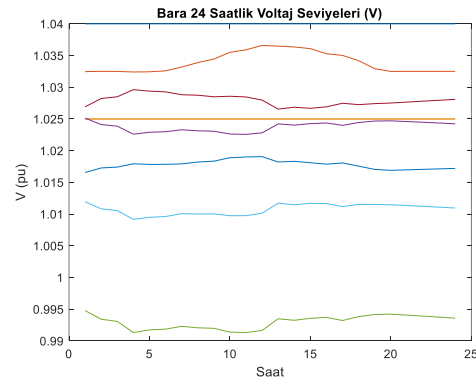
(a) Mevcut durum



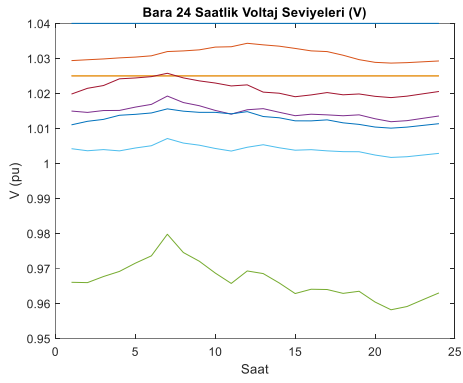
(b) Test sistemi 1



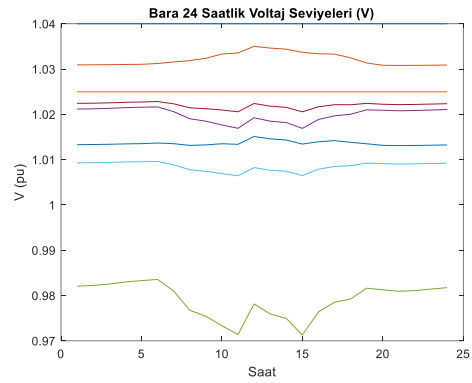
(c) Test sistemi 2



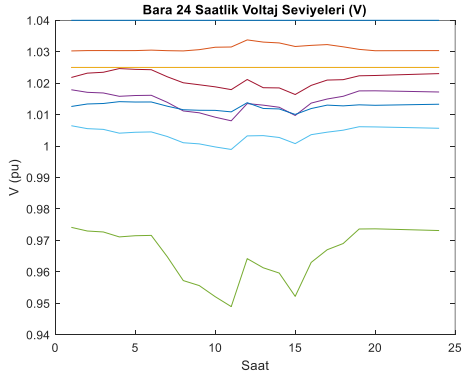
(d) Test sistemi 3



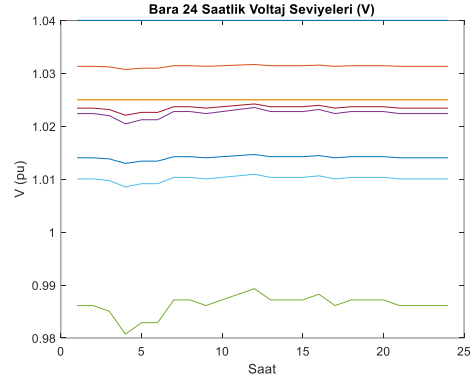
(e) Test sistemi 4



(f) Test sistemi 5

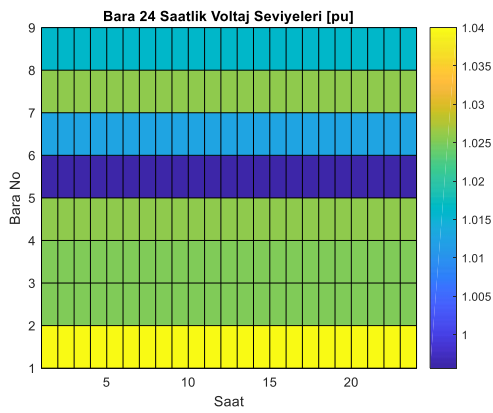


(g) Test sistemi 6

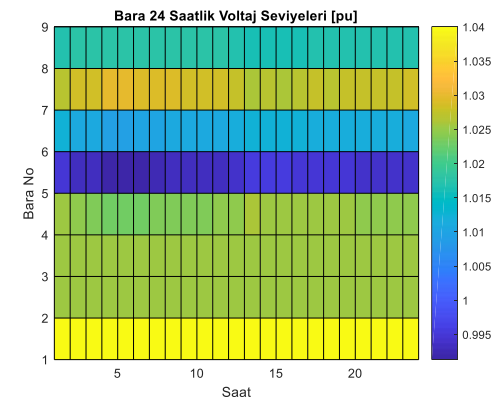


(h) Test sistemi 7

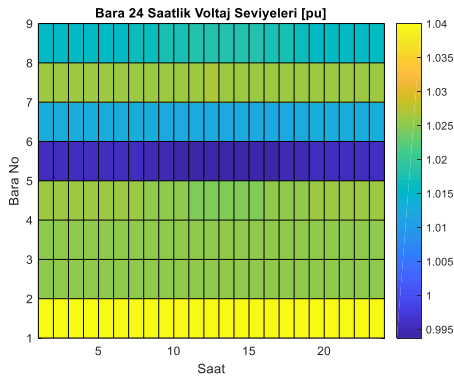
Şekil 10. 24 saatlik bara gerilim değişimi



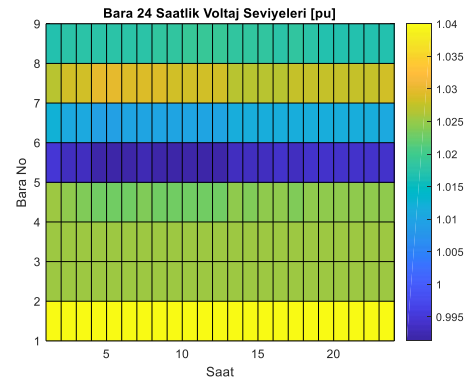
(a) Mevcut durum



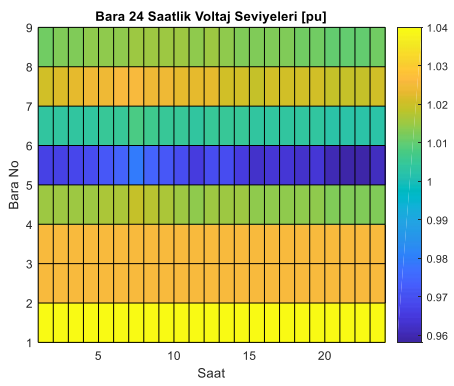
(b) Test sistemi 1



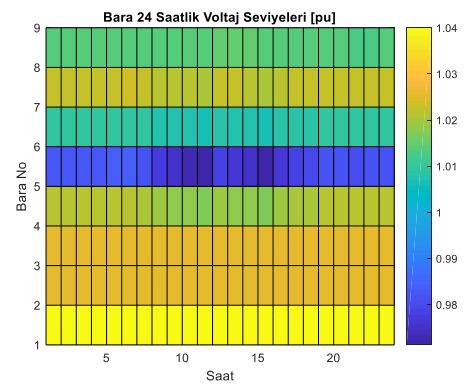
(c) Test sistemi 2



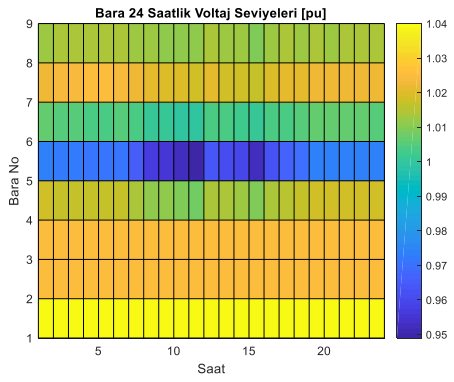
(d) Test sistemi 3



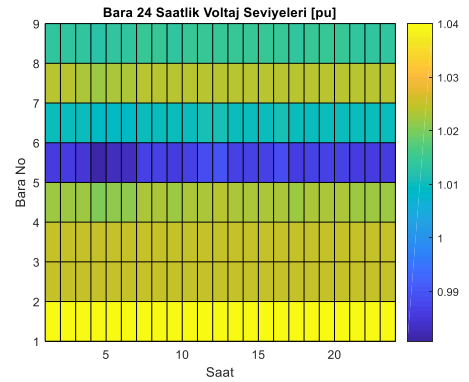
(e) Test sistemi 4



(f) Test sistemi 5



(g) Test sistemi 6



(h) Test sistemi 7

Şekil 11. 24 saatlik bara gerilim blok değişimi

Şekil 10 ve 11'de ise sistemlerin gerilim değişimlerine ait grafikler verilmiştir. Şekil 10.(a) ve 11.(a) incelendiğinde yine aralıklı ve belirsiz yapıya sahip üretim ve tüketim birimleri



olmadığından mevcut duruma ait güç grafiğinde olması istenilen sınırlar içerisinde ve sabit bir değişim gözlemlenmektedir. Diğer grafikler sırasıyla incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

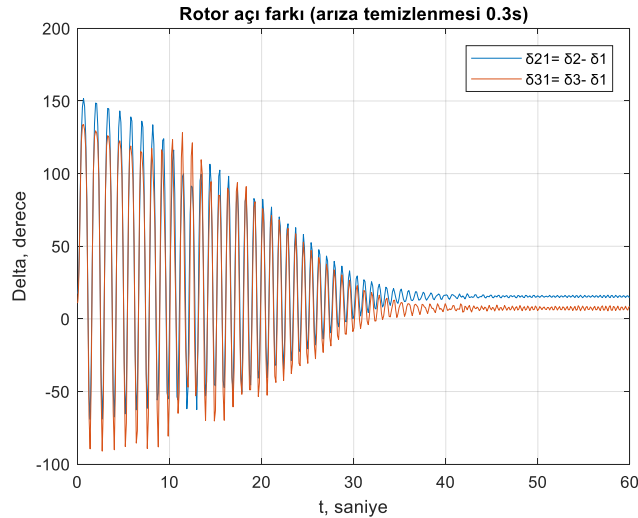
- Şekil 10.(b) ve Şekil 11.(b)'de mevcut sistemle kıyaslandığında rüzgar dağıtık birimin doğasından kaynaklı olarak 4, 5, 6 ve 7 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 0.41 seviyesinde olan 5 nolu baradır.
- Şekil 10.(c) ve Şekil 11.(c)'de mevcut sistemle kıyaslandığında güneş dağıtık birimin doğasından kaynaklı olarak 4, 5, 7 ve 9 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 0.5 seviyesinde olan 9 nolu baradır.
- Şekil 10.(d) ve Şekil 11.(d)'de mevcut sistemle kıyaslandığında rüzgar ve güneş dağıtık birimin doğasından kaynaklı olarak 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte yine sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 0.5 seviyesinde olan 9 nolu baradır.
- Şekil 10.(e) ve Şekil 11.(e)'de mevcut sistemle kıyaslandığında rüzgar ve güneş dağıtık birimin doğasından kaynaklı olarak 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte yine sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 0.5 seviyesinde olan 9 nolu baradır.
- Şekil 10.(f) ve Şekil 11.(f)'de mevcut sistemle kıyaslandığında güneş dağıtık birimin doğasından ve ekstra yüklerden kaynaklı olarak 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte yine sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 1,22 seviyesinde olan 5 nolu baradır.
- Şekil 10.(g) ve Şekil 11.(g)'de mevcut sistemle kıyaslandığında rüzgar ve güneş dağıtık birimin doğasından ve ekstra yüklerden kaynaklı olarak 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte yine sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 2,52 seviyesinde olan 5 nolu baradır.
- Şekil 10.(h) ve Şekil 11.(h)'de mevcut sistemle ekstra yüklerden kaynaklı olarak 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu baraların gerilim seviyelerinde değişimler gözlenmektedir. Bununla birlikte yine sistem içerisindeki en büyük gerilim değişikliği % 2,19 seviyesinde olan 5 nolu baradır.

Genel olarak değişken-belirsiz dağıtık üretim ile tüketimin gerilim bakımından nominal sınırlar içerisinde bir değişim meydana getirmesi ve dağıtık üretimden kaynaklı güç yoğunluğunun azalması bu sistem için dağıtık üretimler ve değişken tüketim birimlerinin gerilim kararlılığı üzerinde az da olsa pozitif bir etkiye sahip oldukları söylenebilir.

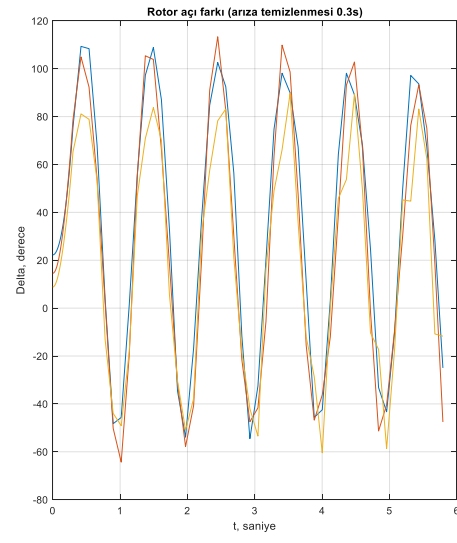
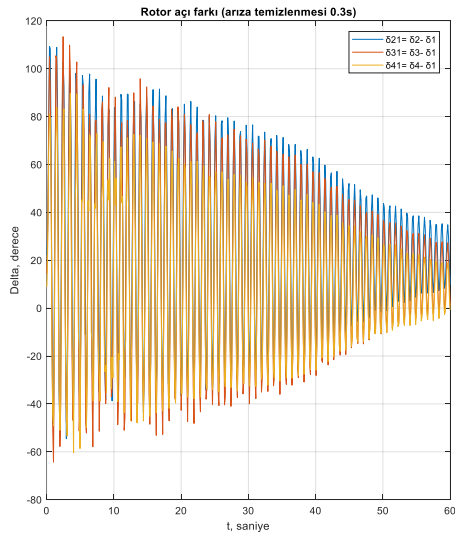
Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açısı ve frekans kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu temsilen oluşturulan arıza hem mevcut sisteme hem de test sistemlerine uygulanmıştır. Tüm sistemlere bozucu bir etkiye sahip 4-6 hattında 4 nolu baraya yakın bir üç faz arızası uygulanmıştır. Bu arızanın sistemler için 0.3 saniyede 4-6 hattı açılacak şekilde temizlendiği düşünülerek simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonucunda, bozucu etki altındaki sistemlerin cevabı Şekil 12’de gösterildiği gibidir. Bu cevaplar;

- Şekil 12.(a) mevcut duruma ait sürekli ve merkezi yapıdaki jeneratör açısı farklarını
- Şekil 12.(b) rüzgar dağıtık üretim birimi ile modifiye edilmiş test sistem 1’in
- Şekil 12.(c) güneş dağıtık üretim birimi ile modifiye edilmiş test sistem 2’nin
- Şekil 12.(d) rüzgar ve güneş dağıtık üretim birimleri ile modifiye edilmiş test sistem 3’ün
- Şekil 12.(e) rüzgar dağıtık üretim ve değişken tüketim birimleri ile modifiye edilmiş test sistem 4’ün
- Şekil 12.(f) güneş dağıtık üretim ve değişken tüketim birimleri ile modifiye edilmiş test sistem 5’in
- Şekil 12.(g) rüzgar ve güneş dağıtık üretim ve değişken tüketim birimleri ile modifiye edilmiş test sistem 6’nın
- Şekil 12.(h) değişken tüketim birimleri ile modifiye edilmiş test sistem 7’nin

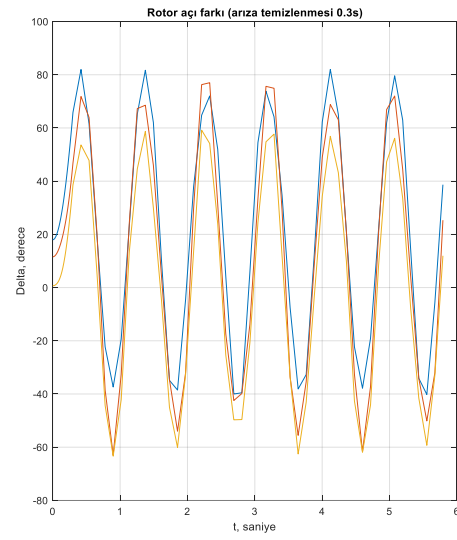
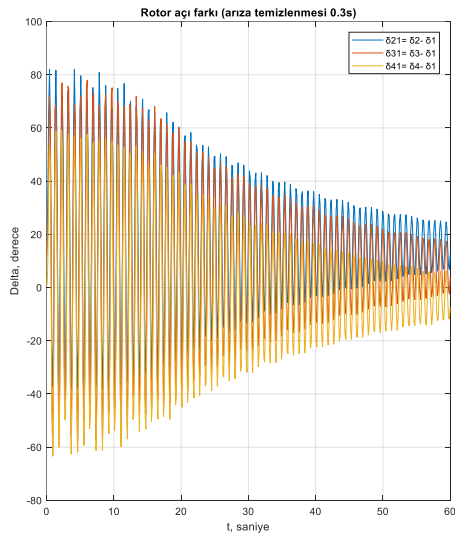
7. saat dilimindeki jeneratör açısı farklarını göstermektedir. Ayrıca simülasyon gerçekleştirilirken çoklu makinelerde daha etkili ve kolay analiz yapabilmek için rotor açısı farklarının zamanla değişimi metodolojisi tercih edilmiştir.



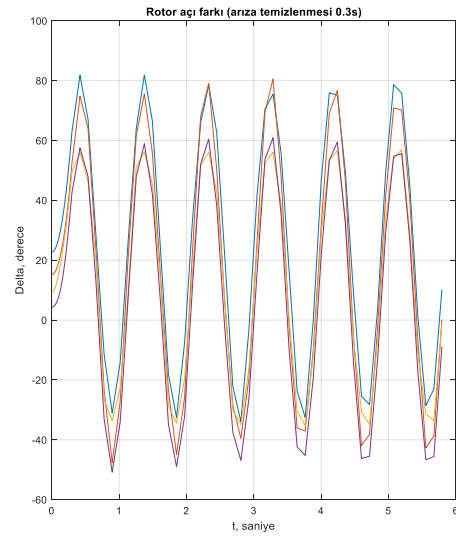
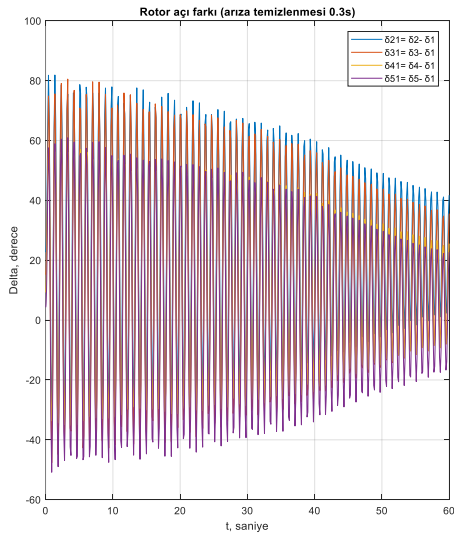
(a) Mevcut sistem



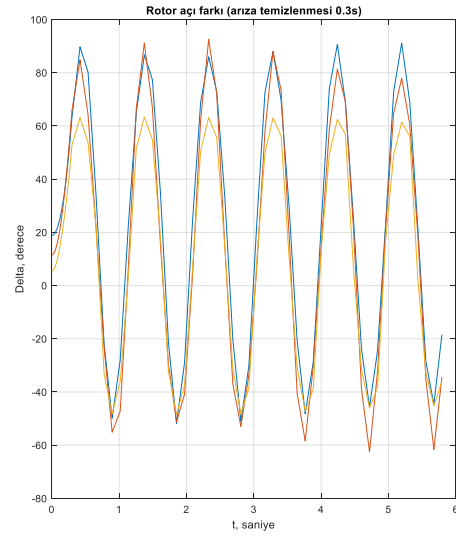
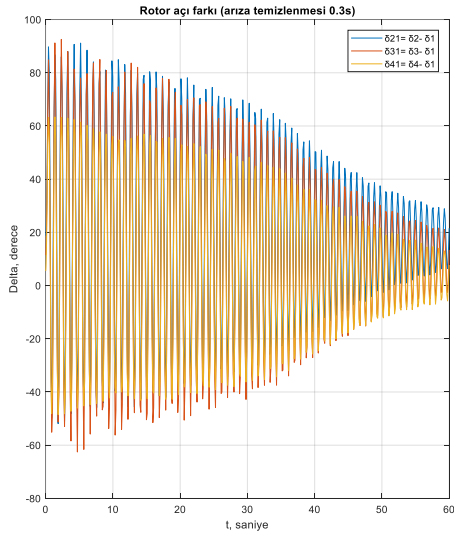
(b) Test sistemi 1 (7. saat dilimi)



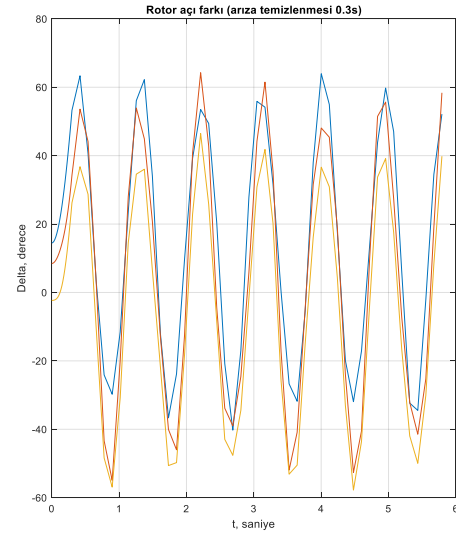
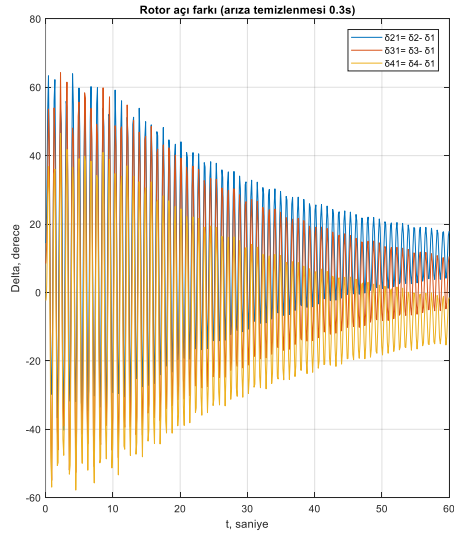
(c) Test sistemi 2 (7. saat dilimi)



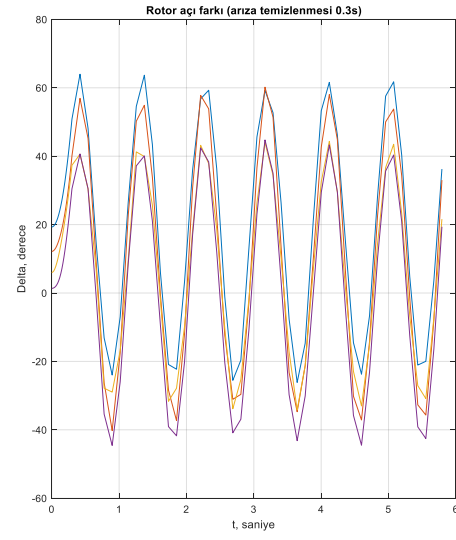
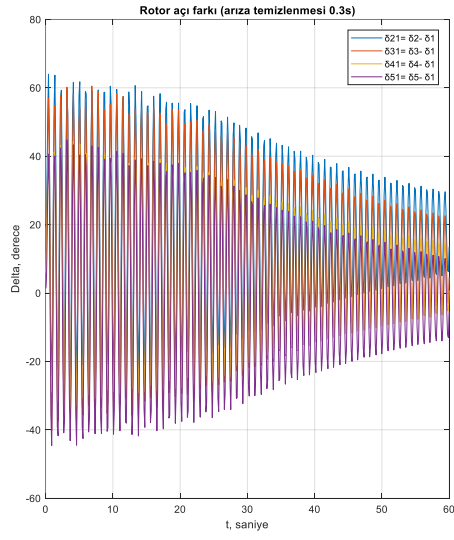
(d) Test sistemi 3 (7. saat dilimi)



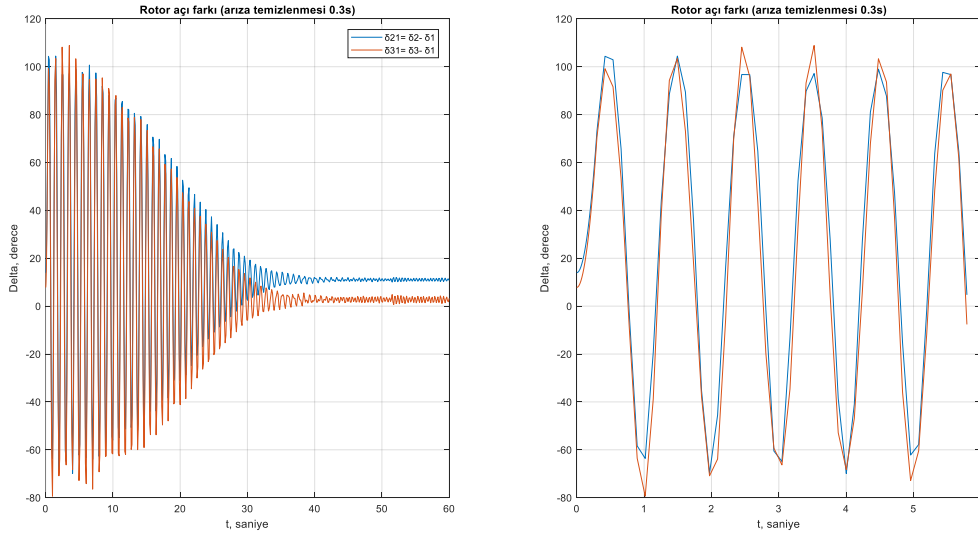
(e) Test sistemi 4 (7. saat dilimi)



(f) Test sistemi 5 (7. saat dilimi)



(g) Test sistemi 6 (7. saat dilimi)



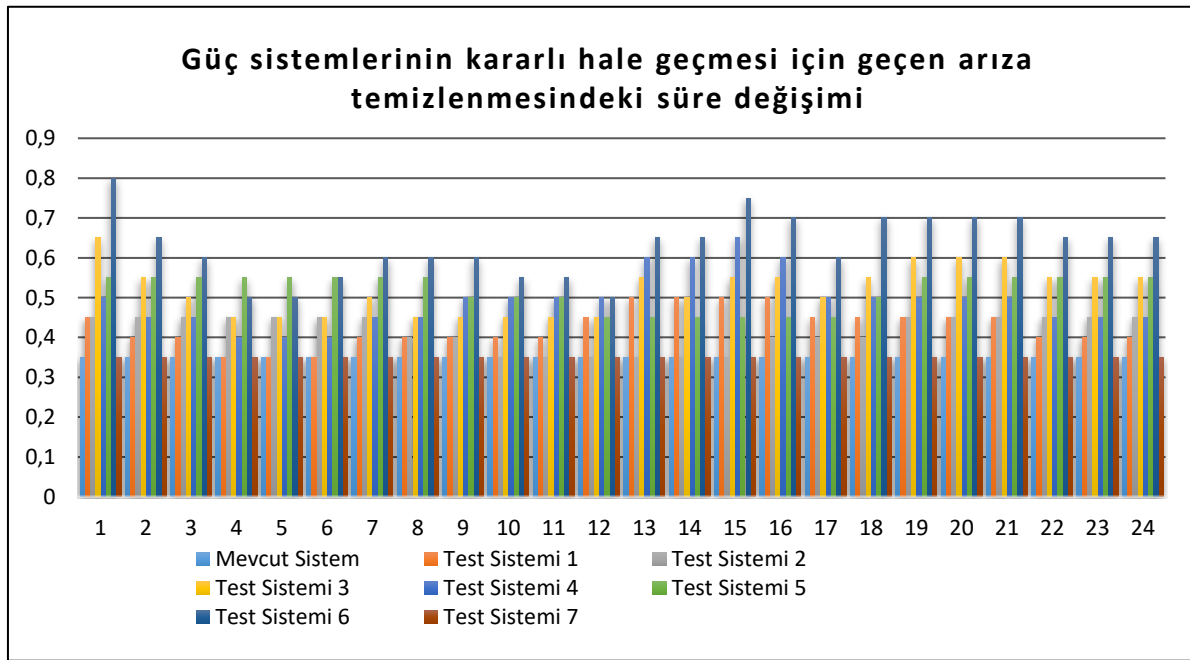
(g) Test sistemi 6 (7.saat dilimi)

Şekil 12. Jeneratör rotor açı değişimleri

Simülasyon sonucu elde edilen, referans jeneratöre göre rotor açı farklarının salınımları incelendiğinde hem dağıtık üretimli ve değişken tüketimli test sistemlerin 7. saatteki üretim-tüketim durumu hem de mevcut sistem durumu için arıza esnasında sistemler sonsuz yönlü artış veya azalışlar gözlemlenmemektedir. Bu durum sistemin yeterli senkronizma momenti üretebildiğini göstermektedir. Özellikle ilk salınım genliklerine bakıldığında mevcut duruma kıyasla rotor açı kararlılığında bir iyileşme söz konusudur. Buna karşılık dağıtık üretimden kaynaklı toplam sistem eylemsizlik sabitindeki azalma ilk salınımlarda elde edilen iyileşmenin etkinliğini azaltmaktadır. Bu yüzden, dağıtık üretim birimleri arıza noktasına uzak olmasına rağmen test sistemi 2, 3, 4, 5 ve 6'da sistem yeterli sönümlenme momentini üretememiştir. Rüzgar ve güneşin dağıtık üretim birimlerinin bir arada olduğu test sistemi 3 ve 6'da rüzgar enerjisine ait δ_{41} ve güneş enerjisine ait δ_{51} salınımlarının varlığı sistemi kararlılığını etkileyerek sistemlerin marjinal kararlı olmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu sistemlere kıyasla test sistemi 7 değişken yük birimiyle gelen ekstra yüke karşın sistem yeterli senkronizma ve sönümlenme momentinin üretebilmiştir.

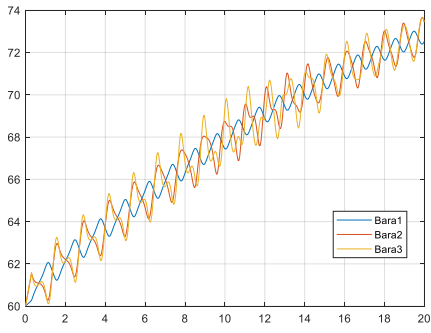
Önceki adımda dağıtık üretim ve değişken tüketimlerin 7. saati için yapılan simülasyon, üç sistemde 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi için tekrar edilmiştir. Şekil 13'te verilen grafik, simülasyon sonucu elde edilen ve sistemlerin kararlı olduğu temizleme sürelerinin değişimini göstermektedir. Mevcut durumla sadece değişken tüketim biriminin yer aldığı test sistem 7 arıza temizlenme süresi bakımından benzerlik göstermektedir. Güneş ve rüzgâr üretiminin birimlerinin aynı anda yer aldığı sistemlerdeki (3 ve 6) üretimlerinin fazla

olduğu zaman dilimlerinde sistem temizlenme süresindeki artışa karşın sistem çalışmaya devam etmektedir. Eylemsizlik sabitlerinin düşük olmasına rağmen mevcut durumla kıyaslandığında yenilenebilir kaynaklarının eklendiği durumlarda ve bu kaynaklardaki üretimin fazla olduğu saat dilimlerinde, temizlenme süresindeki artışlara karşın sistem marjinal kararlılığını sürdürmüştür. Dağıtık üretim ve değişken tüketimlerin varlığına karşın 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.

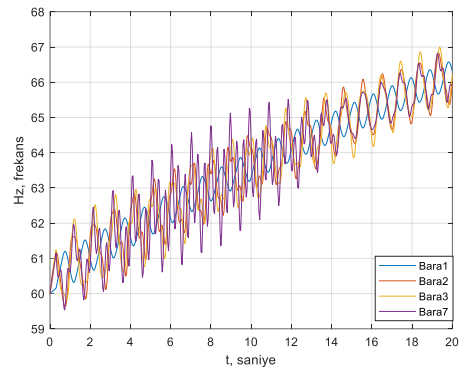


Şekil 13. 4 nolu baraya yakın 4-6 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)

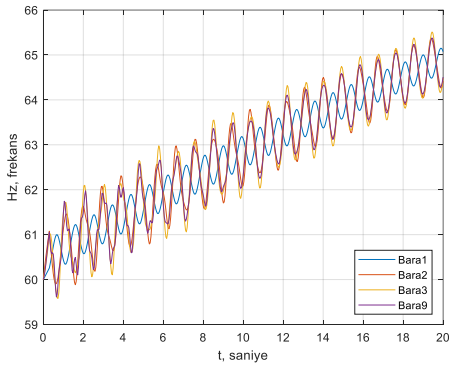
Simülasyon analiz prosedürüne göre bir diğer üçüncü aşama ise frekans kararlılığı çalışmasıdır. Frekans kararlılığındaki değişimi gözlemlemek amacıyla yine rotor açılı çalışmasındaki gibi 4-6 hattında 4 nolu baraya yakın bir üç faz arızası uygulanmıştır. Her üç durum içinde temizlenme süreleri $t_c=0.3$ saniye olup 20 saniyede biten bir simülasyon gerçekleştirildiğinde Şekil 14'deki sonuçlar elde edilmiştir.



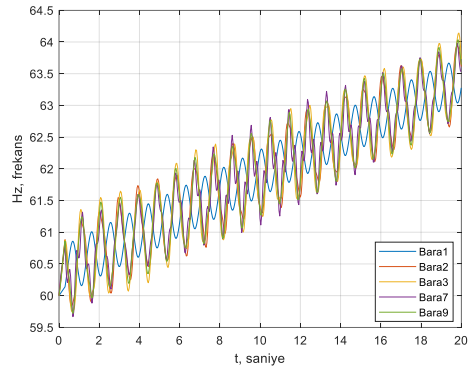
(a) Mevcut durum



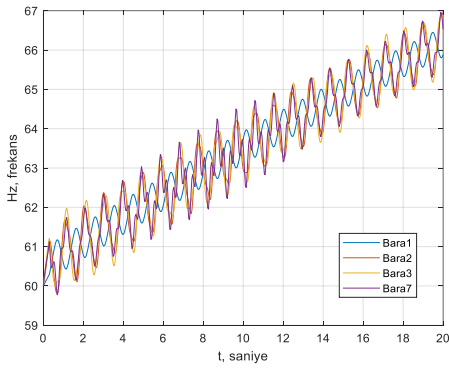
(b) Test sistemi 1



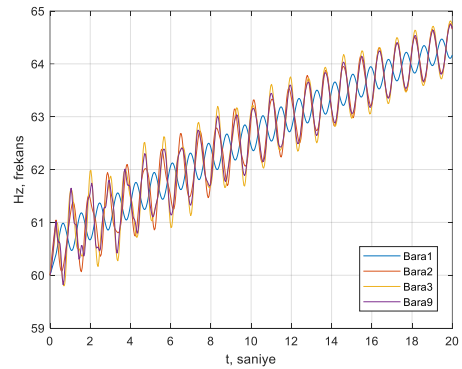
(c) Test sistemi 2



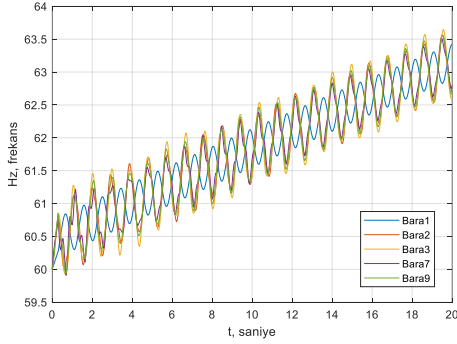
(d) Test sistemi 3



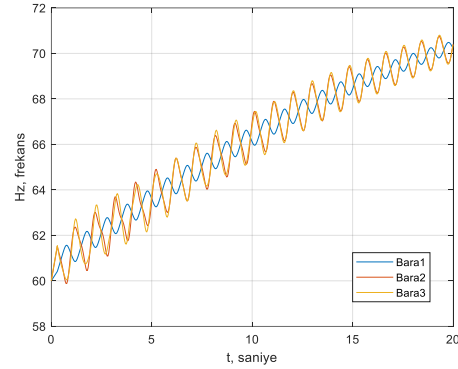
(e) Test sistemi 4



(f) Test sistemi 5



(g) Test sistemi 6



(h) Test sistemi 7

Şekil 14. Frekans değişimi (7.saat dilimi)

Şekil 14'deki frekans değişim grafikleri incelendiğinde mevcut sistem frekansı arıza sonrasında 72-74 Hz seviyelerinde salınımlar yapmaya devam ettiği görülmektedir. Bu seviyedeki salınımlar, frekans tolerans sınırının üzerinde olduğu için frekans açısından sistemi kararsızlığa götürmektedir. Diğer sistemlerde mevcut duruma kıyasla daha düşük bir seviyede

- Test sistemi 1 için 65-67,
- Test sistemi 2 için 64-65.5,
- Test sistemi 3 için 63-64,
- Test sistemi 4 için 65-67,
- Test sistemi 5 için 64-65,
- Test sistemi 6 için 62.5-63.5,
- Test sistemi 7 için 69-70.5

Hz'lerde salınımlar gözlemlenmiştir. Buna test sistemi 3 haricindeki sistemler tolerans sınırının üzerine çıktığı için frekans bakımından kararsızdır. Test sistemi 3 ise sınır değerindeki salınım nedeniyle frekans kararlılığı maksimum seviyesine ulaşmış olup ekstra bir bozulma durumunda kararsızlık gözlemlenebilir. Ayrıca modifiye edilen her 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.

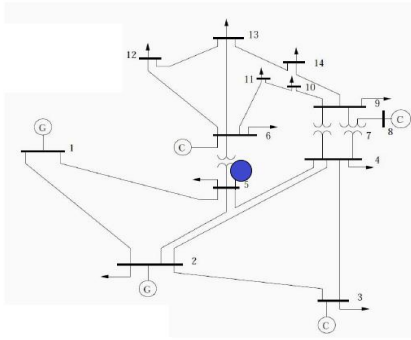
Genel olarak 9 baralı güç sisteminin bu tarz modifikasyonları için dağıtık üretimlerin varlığı güç-gerilim dengesinde iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık rotor açısı ve frekans kararsızlığının meydana geldiği küçük nitelikli bozulma şartlarında, sistemde

kararsızlık yerel bir sorunken sistemin çökmesi neden olan genel bir olguya dönüşmesi olasıdır.

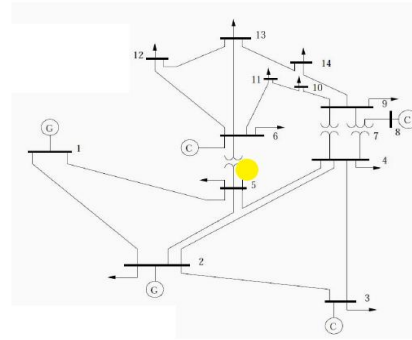
3.2 14 Baralı Güç Sistemi Çalışması

14 baralı güç sisteminde, Şekil 5.(b)'deki dağıtık üretim ve Şekil 6.(b)'deki değişken tüketim birimleri kullanılarak modifiye edilen test sistemleri üzerinden 3 farklı senaryo çalışması yapılarak farklı şartlarda sistemin kararlılık tepkileri gözlemlenmiştir.

Senaryo 1: Mevcut durumda 5 nolu baraya sırasıyla 2.5 ve 0.2 gibi küçük eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılan rüzgar ve güneş üretim birimleri eklenerek Şekil 15'deki tek hat şeması gösterilen test sistemleri elde edilmiştir.



(a) Test Sistemi 1

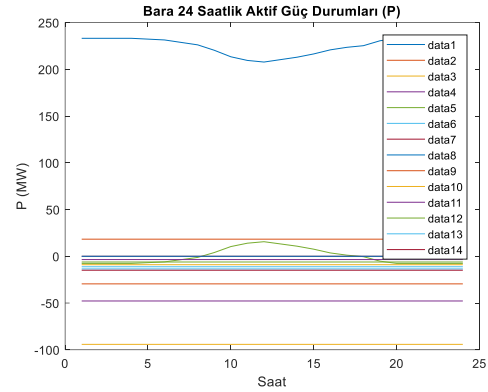
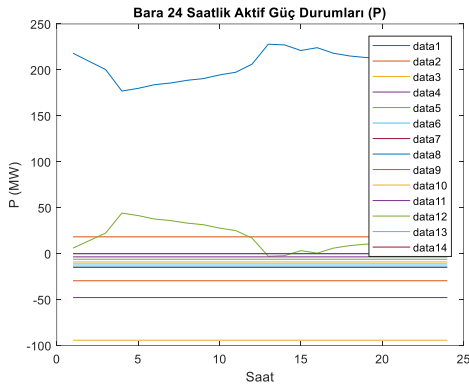


(b) Test Sistemi 2

Şekil 15. 14 baralı test sistemleri

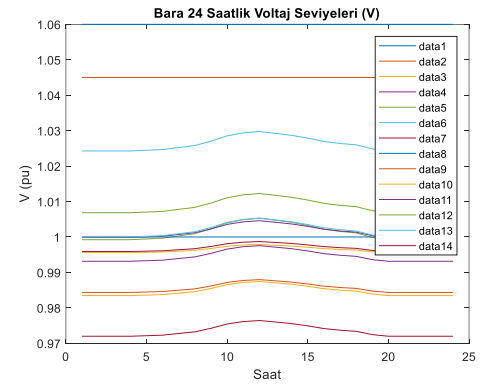
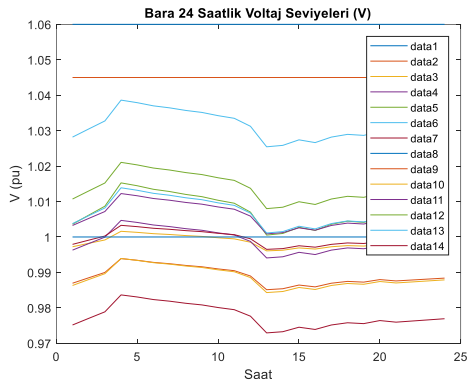
Senaryo 1'de farklı karakteristik özelliğe sahip üretim biriminin kararlılık üzerindeki etkileri değerlendirmek hedeflenmiştir.

Simülasyon analiz prosedürüne göre ikinci aşama olan yük akış çalışması sonucu her iki sisteme ait gerilim ve güç değişimleri Şekil 16'daki gibi elde edilmiştir. Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.



(a) Test sistemi 1

(a) Test sistemi 2



(b) Test sistemi 1

(b) Test sistemi 2

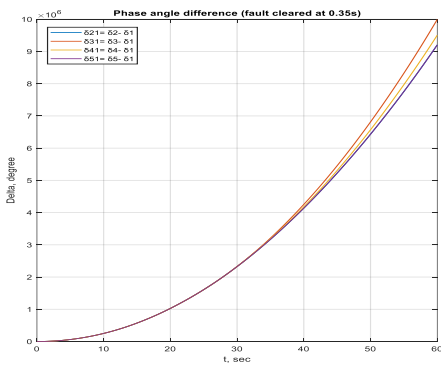
Şekil 16. 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi

Yapılan ön çalışmalarda mevcut sistemdeki geleneksel yapıya sahip üretim ve tüketim birimlerinden kaynaklı olarak 24 saatlik güç ve gerilim değişimleri sabit olduğu bilinmekte olup değişken-belirsiz üretimin sistem üzerindeki etki analiz edilmek istenmiştir. Şekil 16 mevcut durumdan farklı bir karakteristiğe sahip dağıtık üretimli test sistemlerine ait güç ve gerilim değişimleri verilmiştir. Test sistemi 1 ve 2 bünyesindeki rüzgâra ve güneşe (güç eğrisinde yeşil 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. Her iki sistem karşılaştırıldığında yük yoğunluğunun %76 seviyelerine ulaştığı güç sisteminde, rüzgar enerjisinin yüksek güç arzından dolayı yoğunluğun azaltılmasında ön plana çıkmaktadır. 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

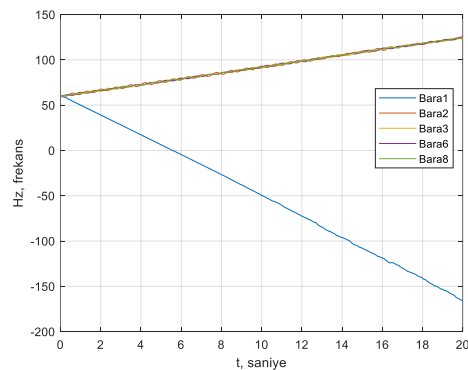
daha fazla entegrasyonunun artırılması ile üretken tüketici kavramının gerçekleşmesinin sağlanabilir.

Gerilim değişimlerine bakıldığında ise 14 baralı mevcut sistemin kendi yapısına bağlı olarak en küçük değişimin tüm sisteme yansması rüzgar ve güneş üretim birimlerinin eklenmesiyle de görülmektedir. Test sistemi 1’de rüzgar enerjisinin sisteme eklemesi ve özellikle de üretimin yoğun olduğu zaman dilimlerinde 1, 2 ve 8 nolu bara dışındaki tüm baraların gerilimlerinde bir artış meydana getirmiştir. Sistemde gün içerisinde en büyük gerilim değişimi olan bara, % 1.4 seviyesinde olan rüzgâr enerjisinin bağlı olduğu 5 nolu baradır. Test sistemi 2’de ise 5 nolu baraya güneş enerjisi bağlandığında test sistemi 1’e kıyasla daha az olmakla birlikte üretimin fazla olduğu zaman dilimlerinde 1, 2 ve 8 nolu bara dışındaki tüm bara gerilimlerinde artışlar görülmüştür. Yine dağıtık üretim biriminin bağlı olduğu 5 nolu bara %0,13 seviyesindeki değişimle sistemdeki en büyük değişimin gözlemlendiği baradır. Her iki sistem için güç ve gerilim değişimleri, dağıtık üretimin doğal bir sonucu olan artış ve azalışlar nominal sınırlar içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durum ise gerilim kararlılığı açısından her iki sistemde de olumsuz bir etki meydana getirmemektedir. Ayrıca hem yapı hem de güç değişiminden kaynaklı olarak az da olsa iyileştirici etki bakımından rüzgar enerjisini daha etkin olduğu ifade edilebilir.

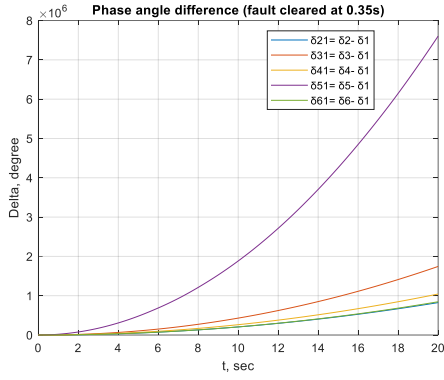
Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açığı ve frekans kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durum olarak yük yoğunluğunun fazla olduğu ve dağıtık üretim birimlerine yakın olduğu bölgeyi temsilen oluşturulan arıza, hem mevcut durum hem de test sistemlerine uygulanmıştır. Her üç sistem için 4-5 hattında 5 nolu baraya yakın bir arıza oluşturulmuştur. Oluşturulan bu arıza 0.35 saniyede temizlenecek şekilde 20 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arızaya üç sistemde cevabı şekil 17’de gösterildiği gibidir.



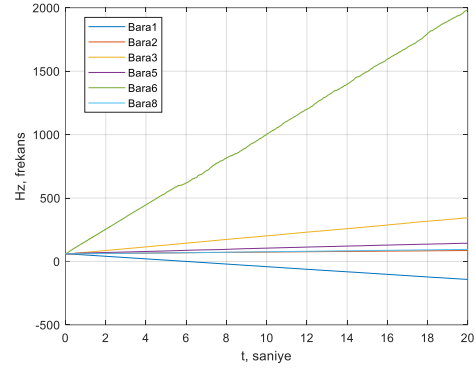
(a) Mevcut durum



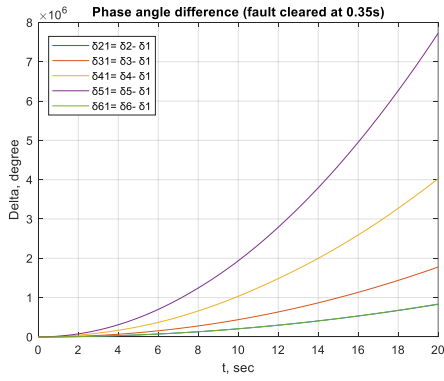
(b) Mevcut durum



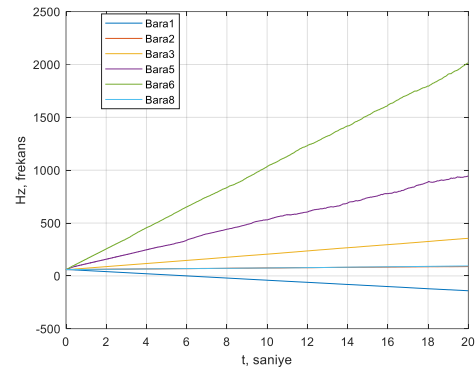
(a) Test sistemi 1



(b) Test sistemi 2



(a) Test sistemi 1



(b) Test sistemi 2

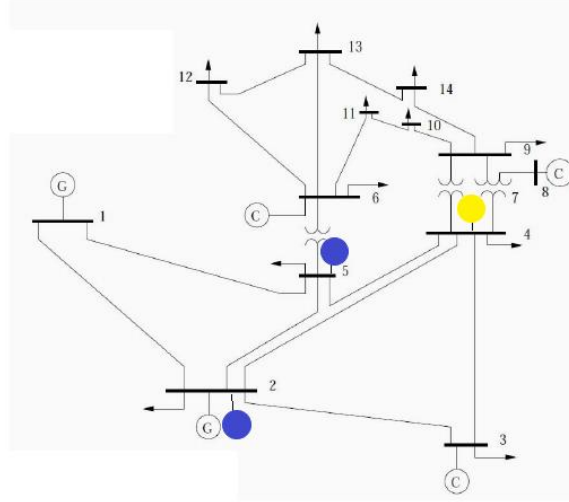
Şekil 17. (a) Jeneratör rotor açısı değişimleri (b) Frekans değişimleri (12. Saat dilimi)

Simülasyon sonuçları incelendiğinde aynı arıza koşulları altında 12. saat dilimi için her üç sistemin de kararsız olduğu gözlemlenmiştir. 12. saat dilimi için Test sistemi 1'deki rüzgar enerjisi üretimi, Test sistemi 2 güneş enerjisi üretimine kıyasla fazla olmasına rağmen herhangi bir üstünlük oluşturmamıştır. Dahası 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi göz önünde bulundurularak arıza tekrarlandığında ise yeni üretim birimlerine rağmen toplam eylemsizlik sabiti azaldığı için sistem yeterli senkronizma ve sönümlenme momenti üretmediğinden kararsız hale geçmiştir.

Şekil 17.(b)'deki her üç sisteme ait frekans değişim grafikleri incelendiğinde frekanslarda ilk saniyeden itibaren sonsuz yönlü artış ve azalışlar meydana geldiği görülmüştür. Sonsuz yönlü değişimler, bu sistemlerin rotor açısı kararsızlığının yanında frekans bakımından da kararsız olduğunu göstermektedir. Sistemlerde görülen kararsızlık durumunda seçilen arızanın hem yük yoğunluğunun fazla olduğu hem de dağıtık üretime yakın bir nokta olmasının yanı

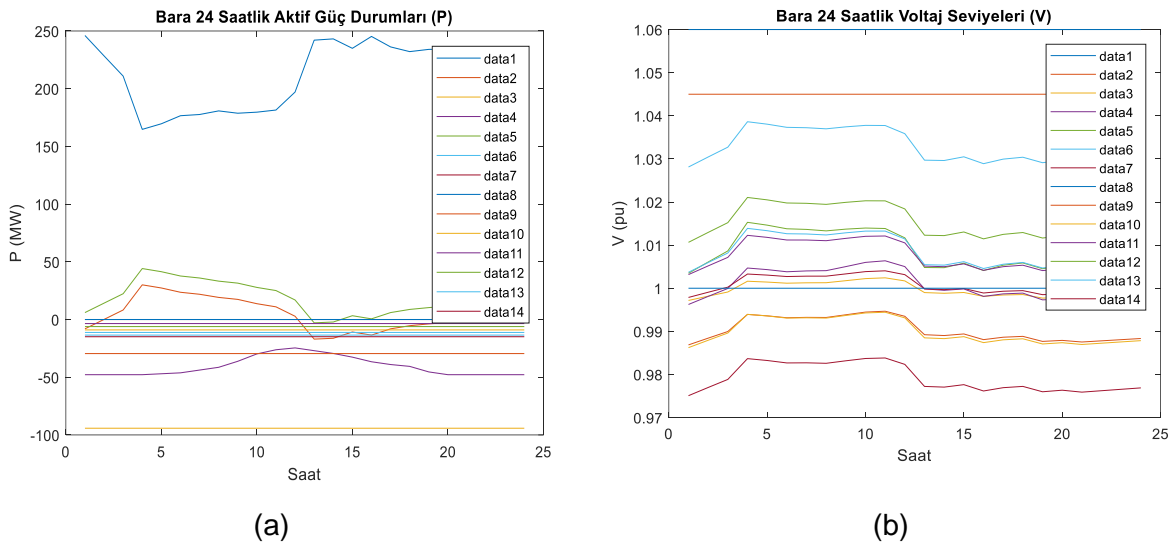
sıra sistem genelinde bu tip arıza karşısında arızayı tolere edebilecek yeterli düzeyde depolanmış enerjinin olmaması etkili olmuştur.

Senaryo 2: Mevcut durumda 2 ve 5 nolu baraya 2.5 eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılan rüzgar ile 4 nolu baraya 0.2 eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılan güneş üretim birimleri eklenerek Şekil 18'deki test sistemleri elde edilmiştir.



Şekil 18. Test sistemi

Senaryo 1'den farklı olarak değişken-belirsiz dağıtık üretim sayısının artırıldığı Şekil 18'deki test sisteminin yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişimleri Şekil 19'daki gibi elde edilmiştir. Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.

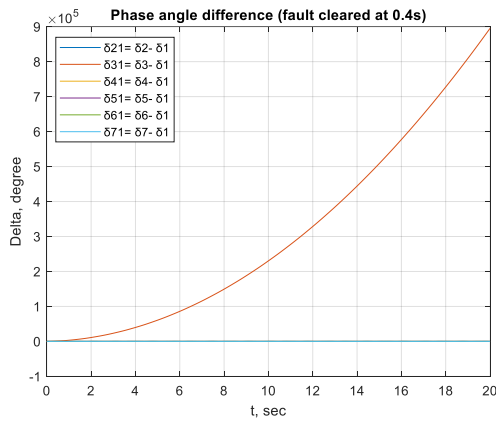


Şekil 19. 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi

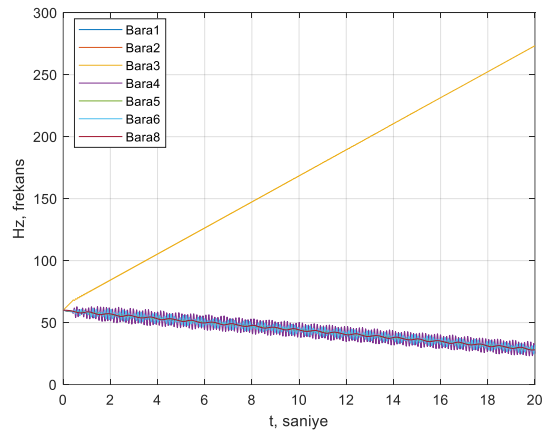
Şekil 19.(a)'da farklı karakteristiğe sahip rüzgâr (güç eğrisinde yeşil ve kırmızı ile ifade edilen) ve güneş (güç eğrisinde mor ile ifade edilen) dağıtık üretim birimlerinin aynı anda sistem bünyesindeki varlığı, sisteme sağlamış olduğu ekstra güç ile referans jeneratörü (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) aşırı yüklenmesinin önüne geçtiği gibi sistem genelindeki iletim kayıplarının azalmasında da etkili olmuştur. Şekil 19.(b)'deki test sistemine ait bara gerilim değişimlerinde 1, 2 ve 8 nolu bara dışındaki tüm baraların gerilimlerinde 24 saatlik ortalama dağıtık üretim profilleriyle paralel bir ilişki içerisinde bir artış meydana gelmektedir. Özele indirgediğimizde ise en büyük değişim %1,2 seviyesindeki değişimle 5 nolu barada görülmekte olup bunu 4, 12 ve 13 nolu baralar takip etmektedir. Bununla birlikte sistem genelinde sistem güç ve gerilim değişimleri nominal sınırlar içerisinde meydana gelmiştir. Senaryo 1'i de göz önünde bulundurduğumuzda mevcut sisteme daha fazla dağıtık üretimi birimi entegre etmenin ekstra güç bakımından büyük avantaj sağlarken gerilimde de daha küçük değişim yaratması bu sistemi gerilim karalılığı üzerinde iyileştirici etkinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açısı ve frekans kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu olarak referans baraya yakın olacak şekilde 2-3 hattında 3 nolu baraya yakın bir arıza ile referans baradan uzak olacak şekilde 13-14 hattında 13 nolu baraya yakın bir arıza oluşturulmuştur. Dağıtık üretim birimleri dâhil iken arıza noktasının ana üretim merkezine yakınlığı ve uzaklığının kararlılık üzerindeki etkisini gözlemlemek amaçlanmıştır.

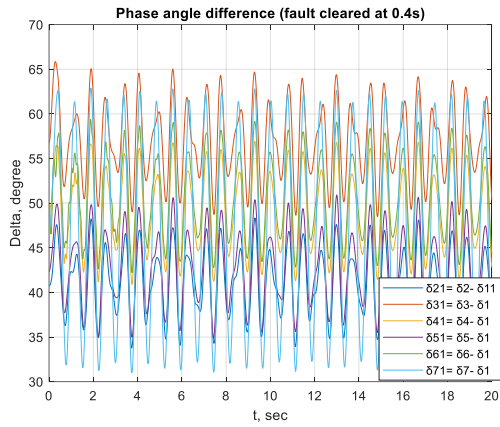
Oluşturulan bu arızalar 0.4 saniyede temizlenecek şekilde 20 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arızalara sistemin cevabı şekil 17'de gösterildiği gibidir.



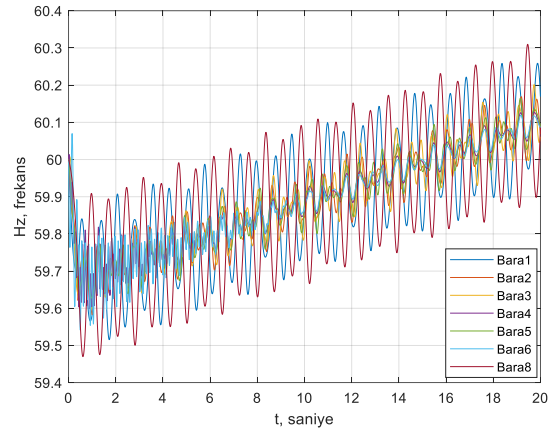
(a) Jeneratör rotor açısı değişimleri



(a) Frekans değişimleri



(b) Jeneratör rotor açığı değişimleri



(b) Frekans değişimleri

Şekil 20. (a) 2-3 hattında 3 nolu baraya yakın bir arıza durumu (b) 13-14 hattında 13 nolu baraya yakın bir arıza durumu (16. Saat dilimi)

Simülasyon sonuçları incelendiğinde yapılan ön çalışmalar neticesinde 2-3 hattında 3 nolu baraya yakın bir arıza karşısında kararsız olan Şekil 20.(a)'da gösterildiği gibi rüzgar ve güneş enerjisiyle modifiye edilen test sisteminin, mevcut durum için yapılan çalışmalarda olduğu gibi 0.4 saniyelik temizlenme süresi boyunca kararsızlığını devam ettirmektedir. Kararsızlığın oluşmasında ve dağıtık üretim birimlerinin sisteme entegre edilmesinde sonra da devam etmesinde üç etken ön plana çıkmaktadır. Bu etkenler

- Arıza yerinin sistemin ana üretim merkezine yakın olması,
- Dağıtık üretim birimlerinden kaynaklı toplam eylemsizlik sabitinin azalması,
- Dağıtık üretim birimlerinin 16.saat dilimindeki üretim değerlerinin düşük seviyede olması,

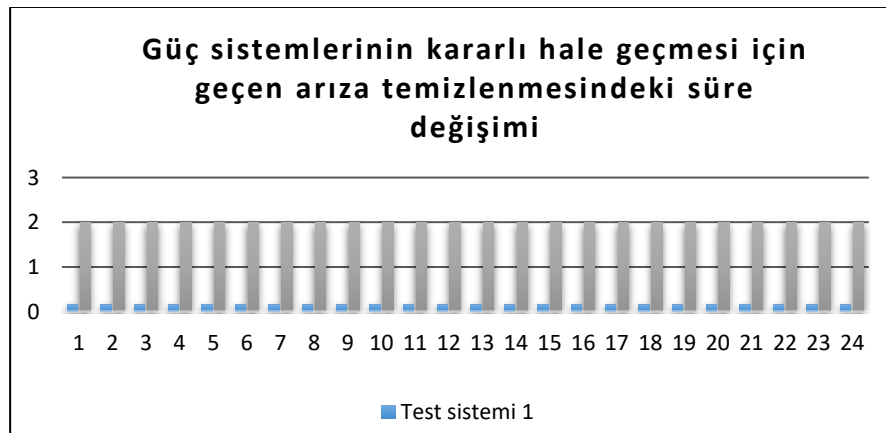
şeklinde ifade edilebilir. Tüm bu etkenler yüzünden sistemde rotor açığı kararsızlığı meydana gelmiştir. Frekans kararlılığı açısından Şekil 20.(a)'daki frekans değişimi incelendiğinde ise sistemin frekansında sonsuz yönlü değişimler meydana gelmesinden kaynaklı ilk andan itibaren sistemin kararsız olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu tip ciddi arızalar karşısında sistemin yeterli senkronizma ve sönmüleme momenti üretememesine, yeterli seviyede enerji üretiminin veya depolanmış enerjinin olmamasına ek olarak enerji talebinin sürekli devam etmesi karşısında sistem daha fazla dayanamayarak rotor açığı ve frekans kararsızlığından dolayı sistemin çökmesi olaya kaçınılmazdır.

Ana üretim merkezinden uzakta yük yoğunluğunun olduğu 13-14 hattında 13 nolu baraya yakın oluşturulan arıza karşısında test sisteminin cevabı Şekil 20. (b)'da görüldüğü gibi marjinal kararlıdır. Bu tip bir kararlılığın görülmesinde 2 ve 5 nolu baraya bağlı rüzgâr enerjisine ait δ_{51} ve δ_{71} değişimi ile 4 nolu baraya bağlı güneş enerjisine ait δ_{61} değişiminin senkronizmanın sağlanmasında her hangi bir sorun oluşturmazken sönmüleme momentinin

üretiminden sistemin yetersiz kalmasına neden olmuştur. Bu durum sistem içerinse çok ciddi bir arıza olmaması durumunda maksimum kararlılık seviyesinde çalışmaya devam edeceği için rotor açısı bakımından kararlıdır. Frekans değişimlerine baktığımızda ise 59,52 ile 60,3 Hz bandında salınım yapmaya devam eden sistem, $\pm 5\%$ 'lik frekans değişimi toleransı göz önünde bulundurulduğunda rotor açısı kararlılığında ifade edildiği gibi ciddi bir arıza ile karşılaşılımadıkça kararlılık durumunu korumaktadır.

Senaryo 3: Bu senaryoda Senaryo 2'deki farklı olarak 4 nolu baraya bağlı güneş üretim biriminin eylemsizlik sabiti (H) 2,5 yapıldığında toplam sistem eylemsizliğindeki artışın kararlılık durumu üzerinde meydana getirdiği etki analiz edilmek istenmiştir.

Yük akışı çalışması sonucu sisteme ait gerilim ve güç değişimlerinde Senaryo 2'ye ait Şekil 19'daki değişimlerle aynı olduğu görülmüştür. Senaryo 2'de olduğu gibi her iki arıza da tekrarlandığında ise Şekil 20'de 16. Saat için kararlılık cevaplarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 21'de ise 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi göz önünde bulundurularak yapılan arıza analizlerinin toplu sonucu verilmiştir. Teorik olarak H sabitindeki artışın toplam sistem ataletini artırdığı için arızalar karşısında daha iyileştirici bir etki oluşturması beklenirken 14 baralı sistemin yapısından kaynaklı olarak iyileştirici etki gözlemlenmemiştir.



Şekil 21. Arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)

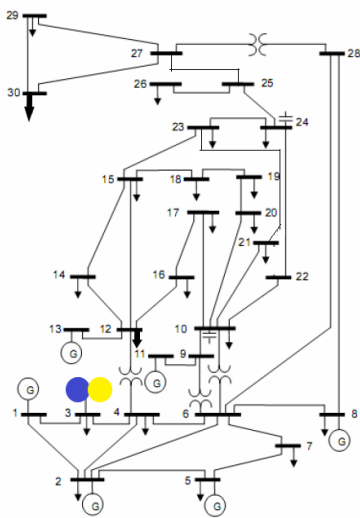
3.3 30 Baralı Güç Sistemi Çalışması

30 baralı güç sistemi, Şekil 5.(c)'deki dağıtık üretim ve Şekil 6.(c)'deki değişken tüketim birimleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilen test sistemlere ait tek hat şeması Şekil 22'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 1.4 ve 1

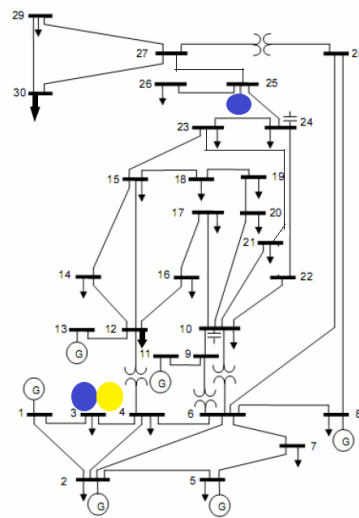
gibi sifıra yakın değerlerde olacak şekilde küçük eylemsizlik sabiti (H) kabulü yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında 2 senaryo oluşturularak kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. 30 baralı test sistemi karakteristikleri

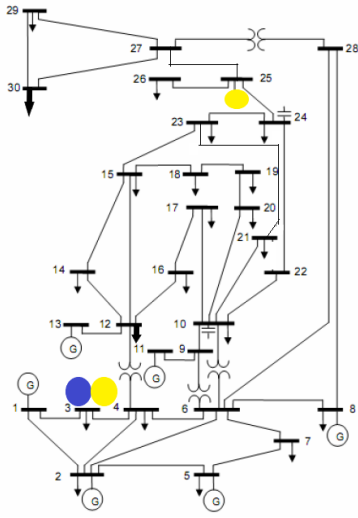
Bara Numarası	Mevcut Sistem Bara Türü	Test Sistemi 1 Bara Türü	Test Sistemi 2 Bara Türü	Test Sistemi 3 Bara Türü	Test Sistemi 4 Bara Türü	Test Sistemi 5 Bara Türü
1	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)
2	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
3	PQ	PQ+PV(rüzgâr güneş)	PQ+PV(rüzgâr güneş)	PQ+PV(rüzgâr güneş)	PQ+PV(rüzgâr güneş)	PQ+PV(rüzgâr güneş)
5	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
7	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
8	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PQ (sanayi tipi)
10	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
11	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
13	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)	PV(senkron)
15	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
21	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)
25	PQ	PQ	PQ+PV(rüzgâr)	PQ+PV(güneş)	PQ+PV(rüzgâr güneş)	PQ+PV(rüzgâr güneş)
29	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
30	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ (sanayi tipi)



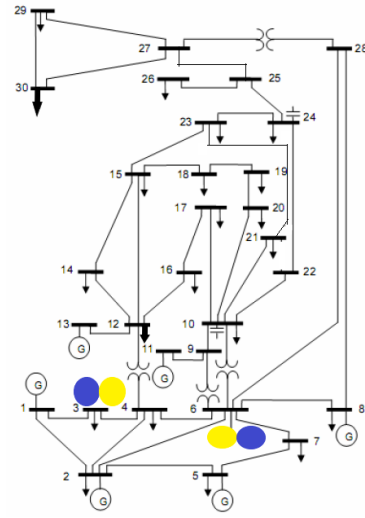
(a) Test sistem 1



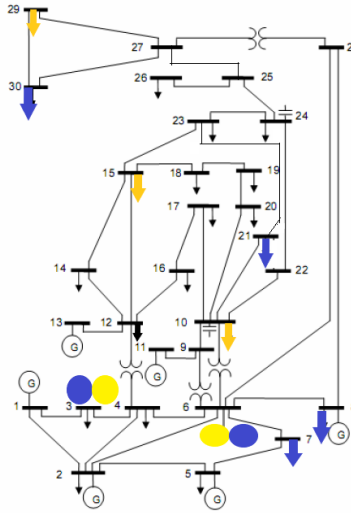
(b) Test sistem 2



(c) Test sistem 3



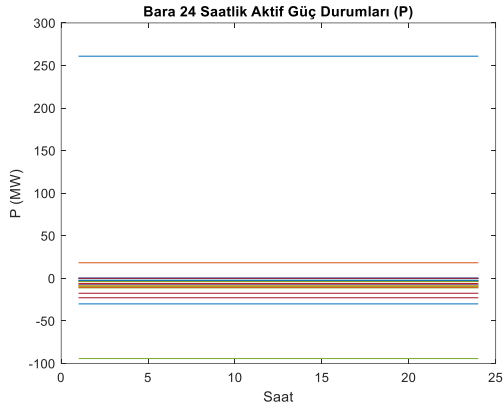
(d) Test sistem 4



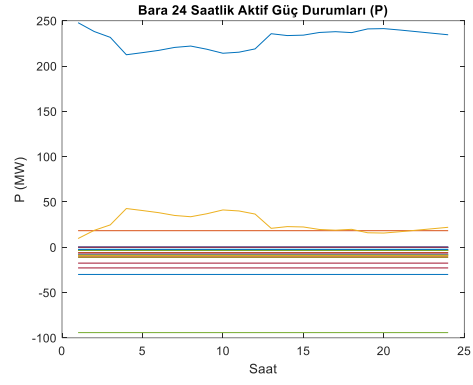
(e) Test sistem 5

Şekil 22. 30 baralı test sistemleri

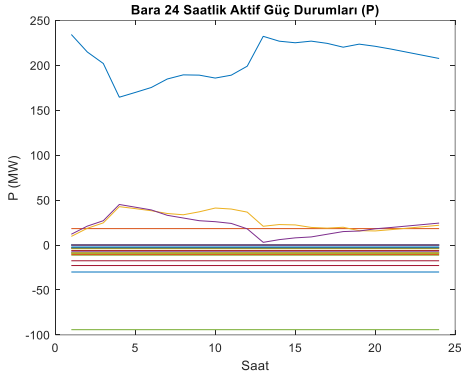
Simülasyon analiz prosedürüne göre sistem modifikasyonundan sonra ikinci olarak yük akış çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişim grafikleri Şekil 23 ve Şekil 24'te verilmiştir. Mevcut durum ve beş adet test sistemine ait grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.



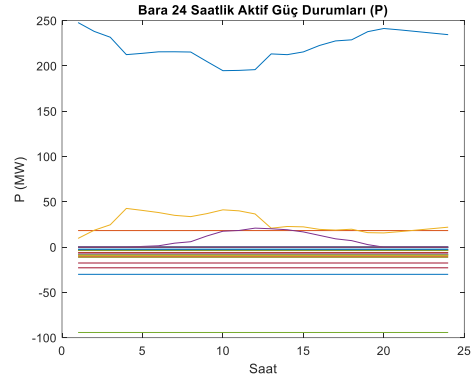
(a) Mevcut durum



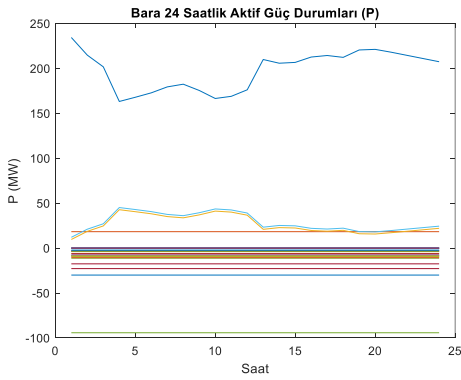
(b) Test sistemi 1



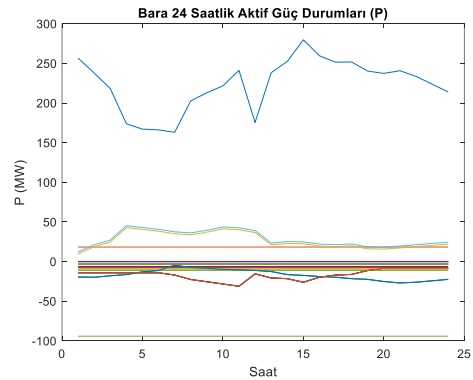
(c) Test sistemi 2



(d) Test sistemi 3



(e) Test sistemi 4



(f) Test sistemi 5

Şekil 23. 24 saatlik güç değişimi

Simülasyon sonucu elde edilen Şekil 23.(a) incelendiğinde mevcut sistemde değişken yapıya sahip üretim ve tüketim birimleri bulunmadığından güç değişimlerinin sabit olduğu görülmüştür.

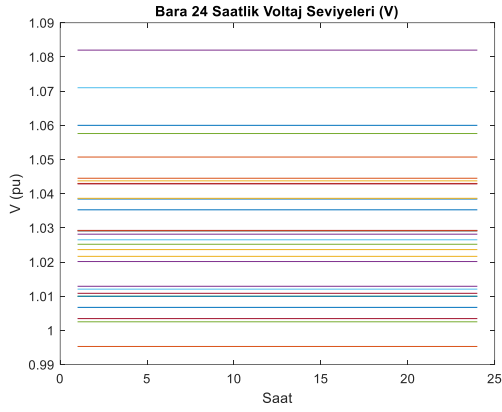
Öte yandan değişken-belirsiz dağıtık üretim ve tüketim birimleriyle modifiye sistemlere ait güç ve gerilim değerlerinde, üretim ve tüketim birimlerinin doğal sonucu olan değişimler söz konusudur. Bu güç değişimleri incelendiğinde;

- Şekil 23.(b) 3 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık biriminin (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen)
- Şekil 23.(c) 3 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık birimi (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen) ile 25 nolu baraya bağlı rüzgar dağıtık biriminin (güç eğrisinde mor ile ifade edilen) Şekil 23.(d) 3 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık birimi (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen) ile 25 nolu baraya bağlı güneş dağıtık biriminin (güç eğrisinde mor ile ifade edilen)
- Şekil 23.(e) 3 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık birimi (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen) ile 6 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık birimi (güç eğrisinde yeşil ile ifade edilen)

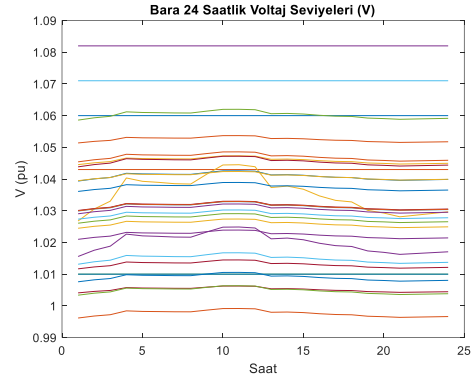
güç sistemi üzerinde ekstra bir güç sağladığı,

- Şekil 23.(f) 3 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık birimi (güç eğrisinde sarı ile ifade edilen) ile 6 nolu baraya bağlı rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit dağıtık birimi (güç eğrisinde yeşil ile ifade edilen) güç sistemi üzerinde ekstra bir güç sağlarken sırasıyla 7, 8, 21 ve 30 nolu baraya bağlı sanayi tipi ile 10, 15 ve 29 nolu baraya bağlı mesken tipi değişken yük ekstra bir güç ihtiyacına neden olduğu görülmektedir.

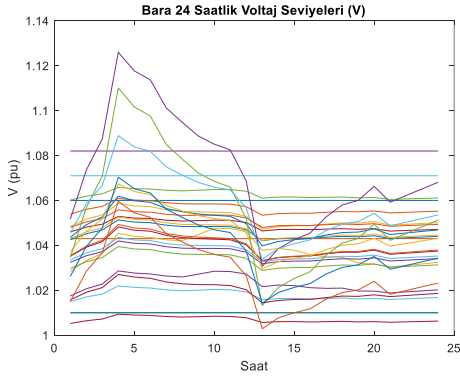
Özellikle rüzgar ve güneş enerjisiyle modifiye edilen sistemlerde, mevcut sistemin aksine enerji üretimi, merkezi ve dağıtık yapıdaki birimler arasında paylaşılmıştır. Bu paylaşım özellikle dağıtık üretimin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerindeki büyük oranda yük yoğunluğunu azaltarak sistemdeki kayıpları azaltmasını sağlamaktadır. Böylece dağıtık üretim birimlerinin güç yoğunluğu üzerindeki iyileştirici bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Test sistemi 5'te ise diğer modifiye sistemlerde olduğu gibi 4. ile 14. saat dilimleri arasında yüksek oranlı güç üretiminden kaynaklı ekstra yüklerin beraberinde getirmiş olduğu yük talebini karşılamakla birlikte referans jeneratörü de rahatlattığı görülmektedir. Buna karşın 15. saat diliminde sanayi ile mesken tipi yükün aynı zaman ve değerdeki güç talebinin varlığı, sistemi mevcut durumundakinden fazla güç ihtiyacının olmasına neden olmuştur.



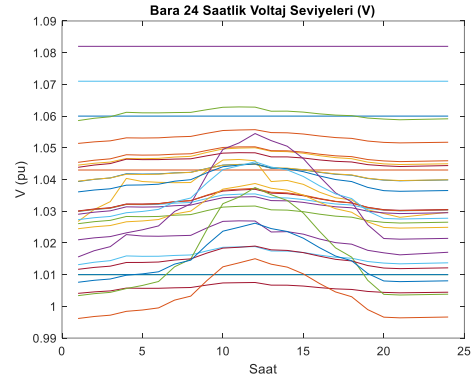
(a) Mevcut durum



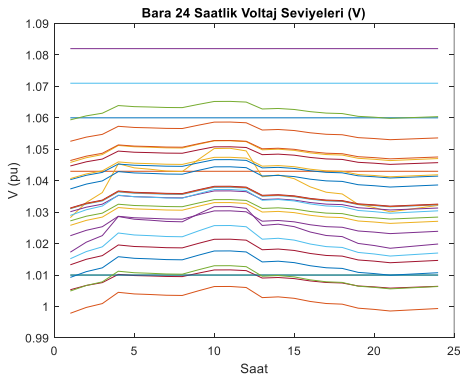
(b) Test sistemi 1



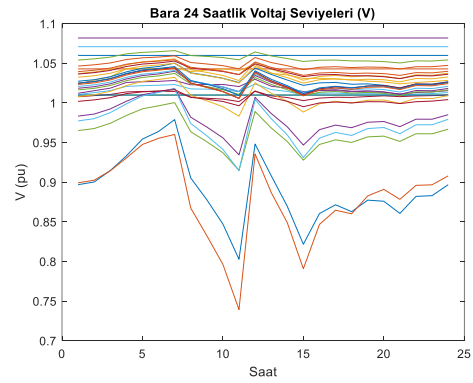
(c) Test sistemi 2



(d) Test sistemi 3



(e) Test sistemi 4



(f) Test sistemi 5

Şekil 24. 24 saatlik bara gerilim değişimi

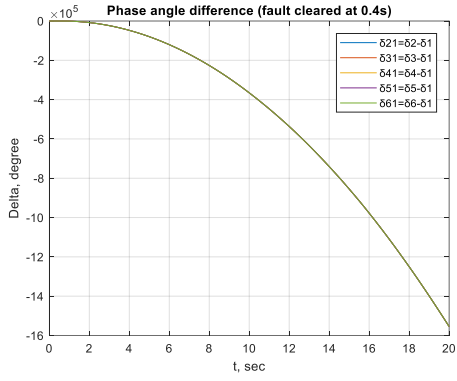
Güç değişimlerinde olduğu gibi Şekil 24.(a) incelendiğinde mevcut sistemde değişken yapıya sahip üretim ve tüketim birimleri bulunmadığından gerilim değişimlerinin sabit olduğu

görülmüştür. Buna karşılık dağıtık-belirsiz üretim ve tüketim birimleriyle modifiye edilen test sistemlerinde yeni birimlerden kaynaklı değişimler meydana gelmiştir. Öncelikle 30 baralı sistem özelinde dağıtık-belirsiz yapıdaki üretim birimlerinin beraberinde getirmiş oldukları dezavantajları minimize etmek amacıyla rüzgar ve güneş biriminden oluşan hibrit bir yapıyı temsilen aynı baraya bağlanması sonucunda elde edilen test sistemi 1'in gerilim değişimi Şekil 24.(b)'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde mevcut sisteme kıyasla dağıtık üretim birimlerinin etkisiyle sistem genelinde az da olsa bir artış söz konusu olup bu artışlar nominal sınırlar içerisinde gerçekleşmektedir. Bununla birlikte en fazla değişiklik %1,8 seviyesindeki değişim ile hibrit yapının bağlandığı 3 nolu barada görülmektedir. Şekil 24.(c) ve Şekil 24.(d)'de hibrit yapıya ek olarak 25 nolu baraya sırasıyla rüzgar ve güneş dağıtık üretim birimleri bağlandığındaki değişimler incelendiğinde rüzgarın ve güneş enerjisinin fazla olduğu zaman dilimlerine paralel bir artış gözlemlenmiştir. Şekil 24.(c)'de %9,5 seviyesinde değişimle en büyük gerilim değişikliğinin meydana geldiği 26 nolu bara 4. saat diliminde nominal gerilim seviyesinin üzerine çıkmıştır. Bu durum sistem kararlılığını etkileyebilecek yapıda bir değişimdir. Şekil 24.(d) ise daha düşük üretim seviyelerinden kaynaklı olarak yine 26 nolu barada en büyük değişim meydana gelirken bu oran %3,4 seviyesindedir. Şekil 24.(e)'de hem 3 hem de 25 nolu barada hibrit yapının temsil edildiği test sistemi 4'e ait gerilim değişimi incelendiğinde dağıtık üretim birimlerinin etkisiyle nominal sınırlar içerisinde artışlar gözlemlenmekle birlikte en büyük değişim %2,2 seviyesindeki 3 nolu barada meydana gelmiştir. Test sistemi 4'e değişken tüketim birimlerinin eklenmesiyle oluşan test sistemi 5'de mesken ve sanayi tipi yüklerin ekstra güç talebi hem merkezi hem de dağıtık üretim birimleri tarafından karşılanamadığından sistem gerilimlerinde ciddi azalışlar meydana gelmiştir. En büyük gerilim değişikliği %22,1 ile sanayi tipi yükün bağlı olduğu 30 nolu barada meydana gelmiştir. Özellikle 9.-11. Ve 14.-16. saat dilimleri arasında nominal gerilim seviyelerinin çok altında olduğu gözlemlenmiştir. 30 nolu baradaki ciddi değişimi mesken tipi yükün bağlı olduğu 29 nolu bara gerilimi takip etmektedir.

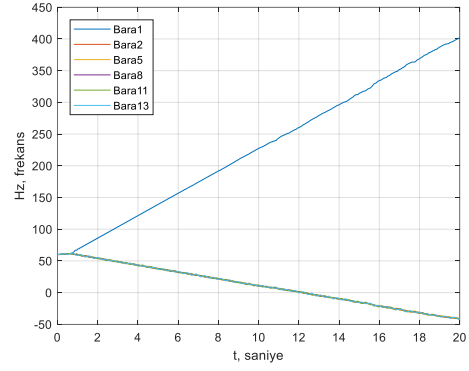
Genel olarak sistem gerilimlerine bakıldığında dağıtık ve belirsiz üretim birimlerinin çoğunlukla sisteme ekstra güç katması ve gerilim değişimlerinin nominal seviyelerde olmasından kaynaklı iyileştirici bir etki söz konusu olmakla birlikte sisteme dahil edilen ekstra yüklerin sisteme dahil edilmesiyle gerilim kararlılığı olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir.

Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açılı kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu olarak güç dağılımları göz önünde bulundurularak ana üretim birimlerine ve ana tüketim merkezine yakın olacak şekilde iletim hattı kaybını temsilen oluşturulan arızalar hem mevcut sisteme hem de test sistemlerine uygulanmıştır.

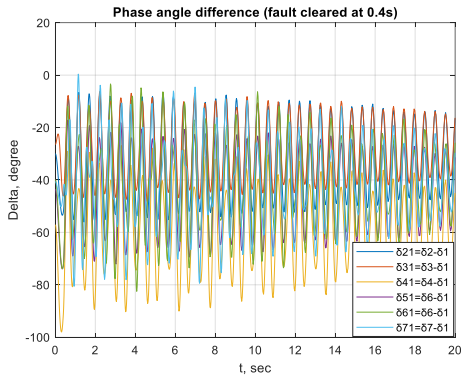
Senaryo 1: Tüm sistemler için ana üretim birimlerine yakın bir nokta olan 12-15 hattında 12 nolu baraya yakın bir üç faz arızası 0.4 saniyede temizlenecek şekilde oluşturulmuştur. Simülasyon sonucunda, oluşturulan arızaya altı sisteminde rotor açığı ve frekans cevabı Şekil 25'te verilmiştir.



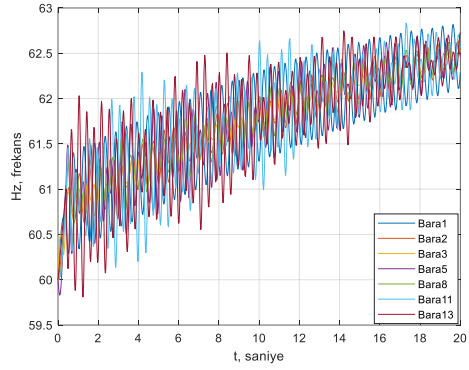
(a) Mevcut durum



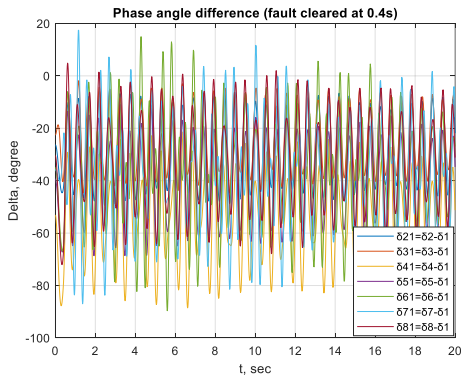
(b) Mevcut durum



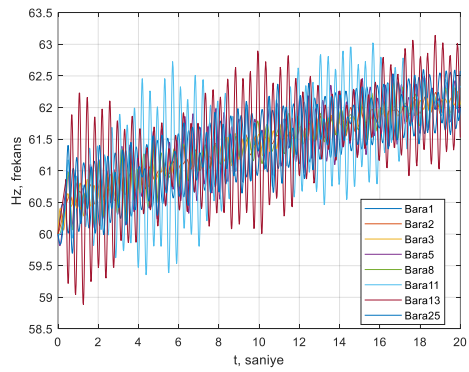
(a) Test sistemi 1



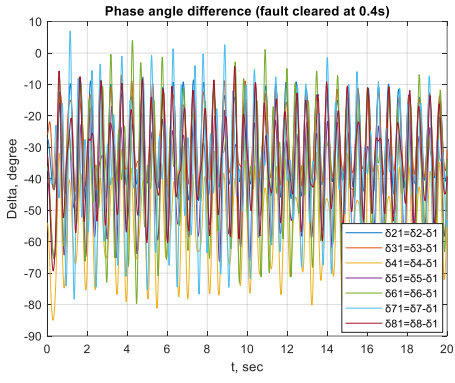
(b) Test sistemi 1



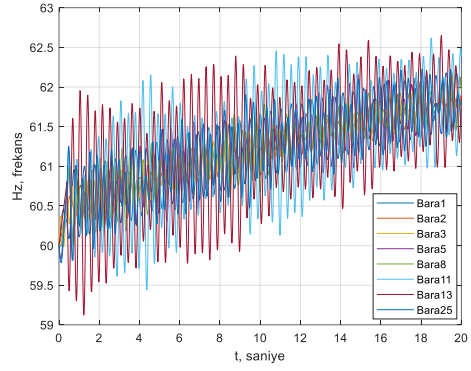
(a) Test sistemi 2



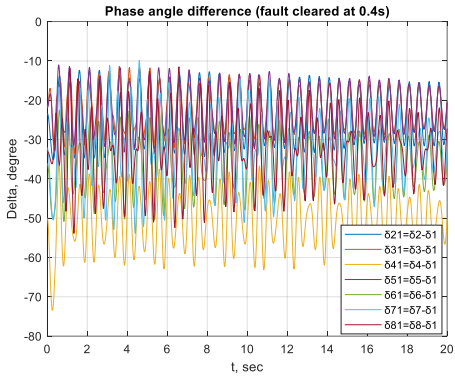
(b) Test sistemi 2



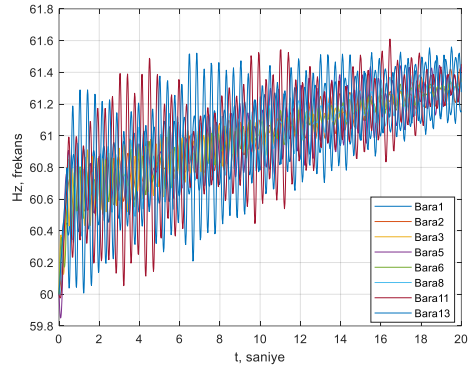
(a) Test sistemi 3



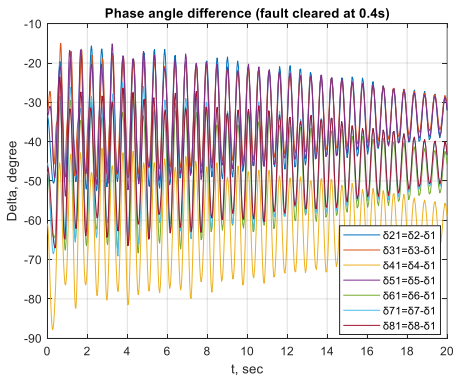
(b) Test sistemi 3



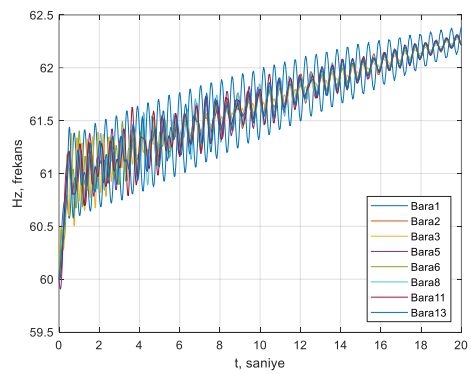
(a) Test sistemi 4



(b) Test sistemi 4



(a) Test sistemi 5



(b) Test sistemi 5

Şekil 25. (a) Rotor açısı değişimleri (b) Frekans değişimleri (11. saat dilimi)

Şekil 25 incelendiğinde ana üretim birimlerine yakın bir nokta meydana gelen arıza karşısında mevcut sistemin yeterli senkronlama ve sönümlleme momenti üretilmediğinden sistem rotor açısı bakımından kararsız hale geçtiği görülmektedir. Dağıtık-belirsiz üretim ve değişken tüketim birimleriyle modifiye edilen test sistemlerine ait rotor açısı değişimlerinde ise 11. saat dilimi için rüzgâr ve güneşin enerji üretimlerinin neredeyse birbirine yakın olacak düzeyde fazla olmasının etkisi görülmektedir. Arıza sonuçları özele indirildiğinde

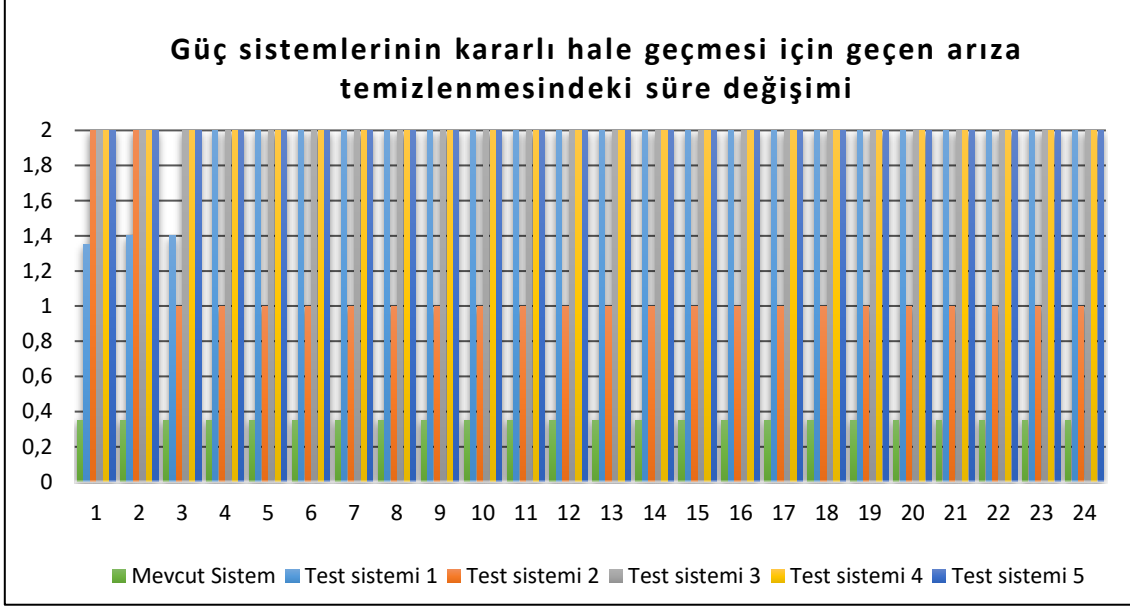
- Test sistemi 1’de δ_{41} ve hibrit yapının temsil eden δ_{71} rotor açısı değişimi büyük genlikli salınımlar yapmakla birlikte sistem marjinal kararlı,
- Test sistemi 2’de δ_{41} , hibrit yapının temsil eden δ_{71} ve rüzgar enerjisine ait δ_{81} rotor açısı değişimi büyük genlikli salınımlar yapmakla birlikte sistem marjinal kararlı,
- Test sistemi 3’te δ_{41} , hibrit yapının temsil eden δ_{71} ve güneş enerjisine ait δ_{81} rotor açısı değişimi büyük genlikli salınımlar yapmakla birlikte sistem marjinal kararlı,
- Test sistemi 4’te δ_{41} , hibrit yapıları temsil eden δ_{71} ve δ_{81} rotor açısı değişimi büyük genlikli salınımlar yapmakla birlikte sistem marjinal kararlı

olduğu görülmektedir. İlk dört sistemde, toplam sistem eylemsiz sabitinin azalması sistem tarafından bu arıza için tolere edilebilecek şekilde senkronizma momenti üretilerek sistem kararlılığı sürdürülmesine yardımcı olmaktadır. Test sistemi 5’te ise sistem senkronizma momenti diğer sistemlerde olduğu gibi üretilirken sönümlleme momenti diğerlerine kıyasla bu sistem özelinde nispeten daha iyi olduğundan rotor açısı salınımları azalma eğilimindedir.

Sistemler frekans kararlılığı bakımından incelendiğinde ise mevcut sistemde bu arızadan kaynaklı sonsuz yönlü artış ve azalışlar varlığı sistemi doğrudan kararsızlığa götürmektedir.

- Test sistem 1 için 60-62.5,
- Test sistem 2 için 59-63,
- Test sistem 3 için 59.3-62.56,
- Test sistem 4 için 59.8-61.58,
- Test sistem 5 için 59.8-62.5

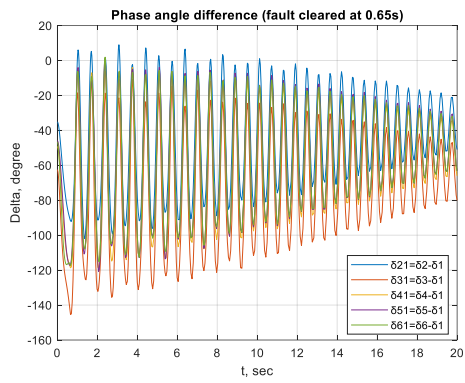
Hz’lerde salınımlar ile mevcut sisteme kıyasla frekansların tolerans sınırı (57-63) civarında olması dağıtık üretim birimlerinin iyileştirici bir etki oluşturarak marjinal kararlı olduğu ifade edilebilir. Frekans kararlılığının marjinal karar olmasında hem merkezi üretim hem de dağıtık üretim durumlarında depolanan kinetik enerjinin yetersiz olması etkili olmuştur.



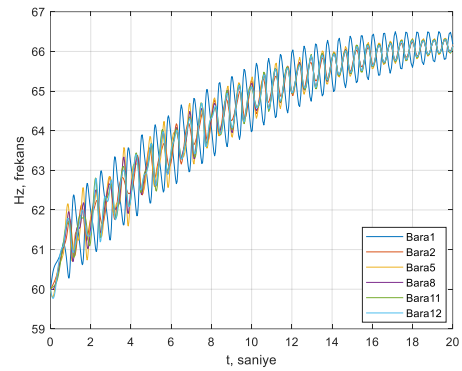
Şekil 26. 12 nolu baraya yakın 12-15 hattında meydana gelen bir arıza durum için temizlenme süre değişimi (saniye)

Şekil 26'da tüm sistemlerin 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. Temizlenme süresi arttığında ise sistem yeterli senkronizma ve sönmüleme momentini üretilmediği için kararsız hale geçmiştir. Toplam eylemsizlik sabitindeki azalmaya rağmen özellikle rüzgar ve güneş enerjisi üretiminin fazla olduğu zaman dilimlerinde sistem kararlılığının temizlenme süresindeki artışa rağmen korumuştur.

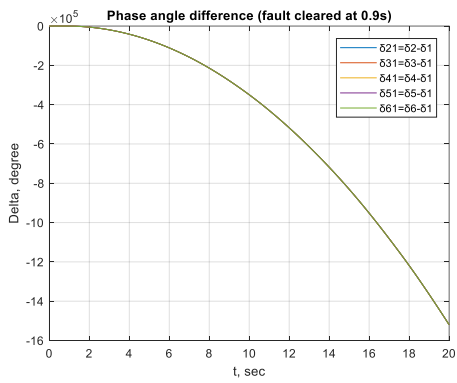
Senaryo 2: Bu senaryoda mevcut durum ve Test sistemi 5 için Şekil 22.(g)'de ana tüketim merkezine yakın bir nokta olan 21-23 hattında 21 nolu baraya yakın bir üç faz arızası oluşturulmuştur. Arızanın temizlenmesi 0.65 ile 0.9 saniyede hattı açılacak şekilde temizlendiği düşünülerek simülasyonu yapılmıştır. Farklı arıza temizlenme sürelerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkisi ile dağıtık-belirsiz üretim ve tüketimin etkinliğini incelemek amaçlanmıştır.



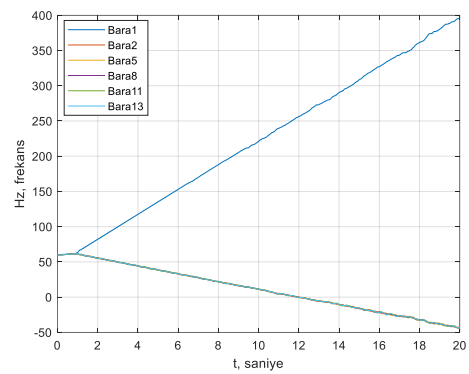
(a) Mevcut durum



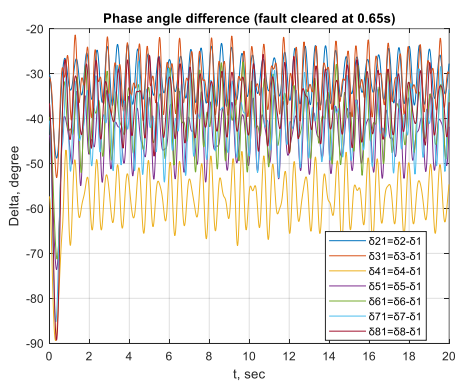
(b) Mevcut durum



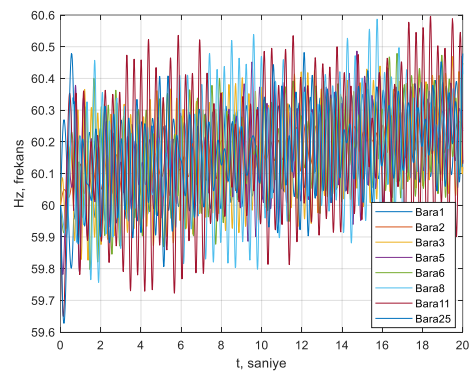
(a) Mevcut durum



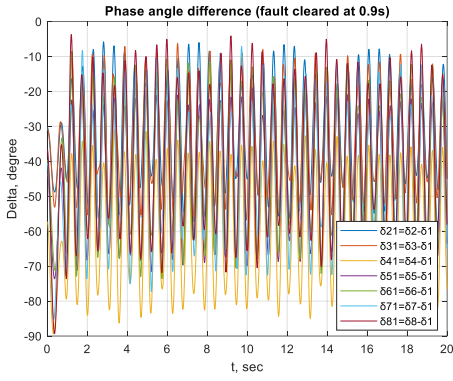
(b) Mevcut durum



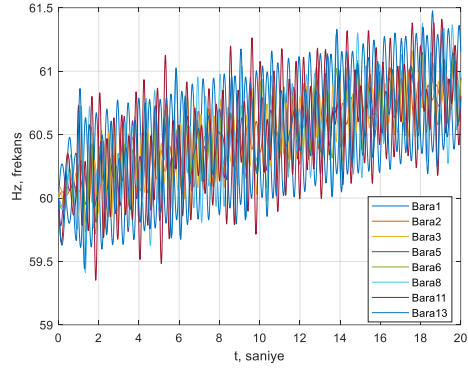
(a) Test sistemi 5



(b) Test sistemi 5



(a) Test sistemi 5



(b) Test sistemi 5

Şekil 27. (a) Rotor açılı değişimleri (b) Frekans değişimleri (20.saat dilimi)

Simülasyon sonucu elde edilen, referans jeneratöre göre rotor açılı farklarının salınımları incelendiğinde mevcut durumun 0.65 saniyelik temizlenme süresince marjinal kararlı olup salınım genlikleri azalma eğilimindedir. Temizlenme süresi artırılarak 0,9 saniyeye çıkartıldığında sistem kararsız hale geçmektedir. Buna karşın test sistemi 5'te 0.65 saniyelik temizlenme süresince mevcut duruma kıyasla daha düşük seviyeli genliklerle salınım yapılmaktadır. Özellikle ilk salınım genliğine bakıldığında rüzgar ve güneş üretim birimlerinin bağlı olduğu 6 nolu baradaki hibrit yapıya ait δ_{81} salınımı en büyük genliğe sahip olmasına rağmen yeterli senkronizma ve nispeten daha iyi sönümlenme momenti üretimi kararlılık üzerinde iyileştirici bir etki göstermektedir. Temizlenme süresi arttığında ise yeterli sönümlenme momenti üretilmediğinde ilk duruma kıyasla daha az iyileştirici bir etkiye sahip olduğu ifade edilebilir.

Frekans kararlılığı bakımından incelendiğinde ise mevcut durumun 0.9 sanaliyelik temizlenme süresinde daha kötü olmakla birlikte her iki temizlenme süresi için sistem kararsızdır. Test sistemi 5 ise

- 0.65 sanaliyelik temizlenme süresinde 59.8-60.6,
- 0.9 sanaliyelik temizlenme süresinde 59.4-61,4

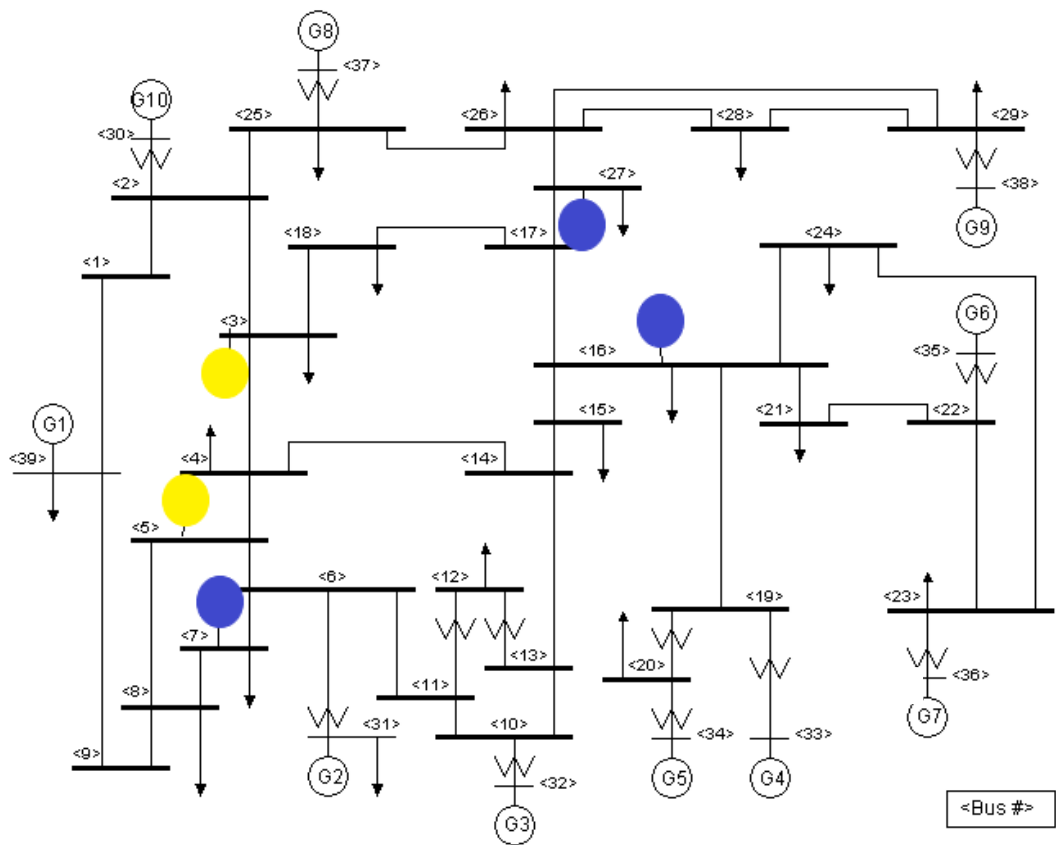
Hz'ler gibi tolerans aralığında salınım yapmasında dağıtık üretimlerin sağlamış olduğu ekstra güç katkısıyla sistemde depolanan kinetik enerjinin yeterli seviyede olması etkili olmuştur.

3.4 39 Baralı Güç Sistemi Çalışması

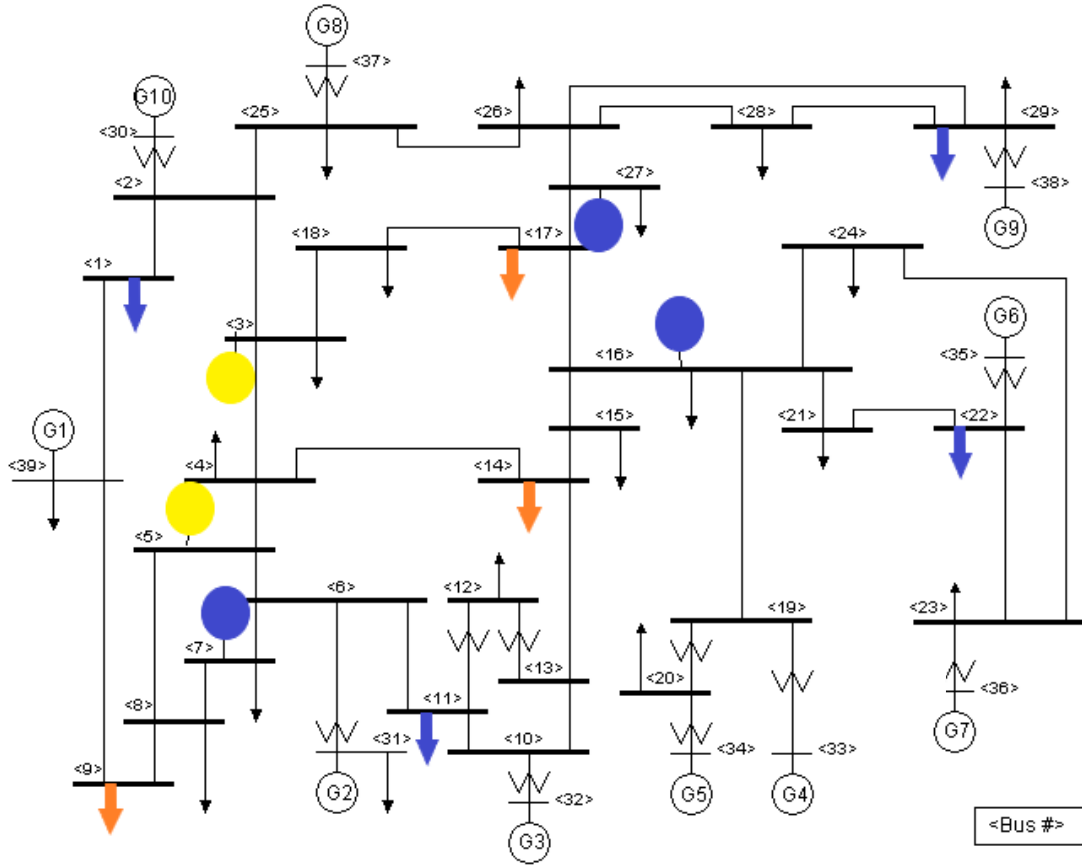
39 baralı güç sistemi, Şekil 5.(d)'deki dağıtık üretim ve Şekil 6.(d)'deki değişken tüketim birimleri kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilerek oluşturulan test sistemlerine ait tek hat şeması Şekil 28'de gösterildiği gibidir. Mevcut duruma ek olarak modifiye edilen sistemlere ait bilgiler Tablo 3'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.

Tablo 3. 39 baralı test sistemi karakteristikleri

Bara Numarası	Mevcut Sistem İçin Bara Türü	Test Sistemi 1 İçin Bara Türü	Test Sistem 2 İçin Bara Türü
1	PQ	PQ	PQ+PQ (sanayi tipi)
3	PQ	PQ+ PV(güneş)	PQ+ PV(rüzgâr)
5	PQ	PQ+ PV(güneş)	PQ+ PV(güneş)
6	PQ	PQ	PQ (mesken tipi)
7	PQ	PV(rüzgâr)	PV(rüzgâr)
8	PQ	PQ	PV(güneş)+PQ (mesken tipi+ sanayi tipi)
9	PQ	PQ	PQ+PQ (mesken tipi)
11	PQ	PQ	PQ+PQ (sanayi tipi)
14	PQ	PQ	PQ+PQ (mesken tipi)
16	PQ	PQ+ PV(rüzgâr)	PQ+ PV(rüzgâr)
17	PQ	PQ	PQ+PQ (mesken tipi)
20	PQ	PQ	PV(rüzgâr)
22	PQ	PQ	PQ+PQ (sanayi tipi)
23	PQ	PQ	PQ
28	PQ	PQ	PQ
27	PQ	PQ+ PV(rüzgâr)	PQ+ PV(rüzgâr)
29	PQ	PQ	PV(rüzgâr)
31	Referans(Slack)	Referans(Slack)	Referans(Slack)



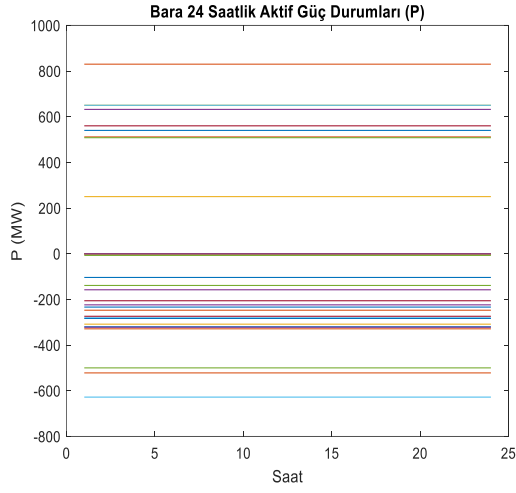
(a) Test sistemi 1



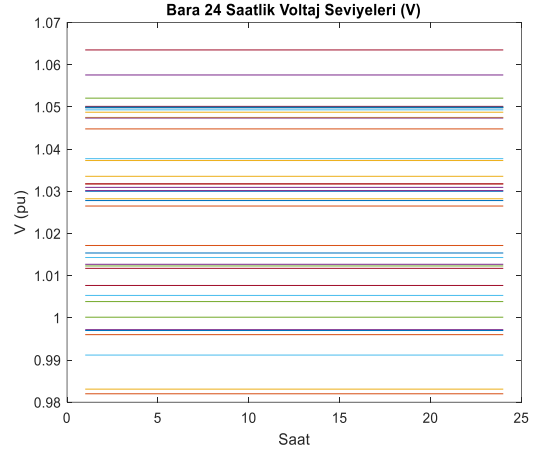
(b) Test sistemi 2

Şekil 28. 39 baralı test sistemleri

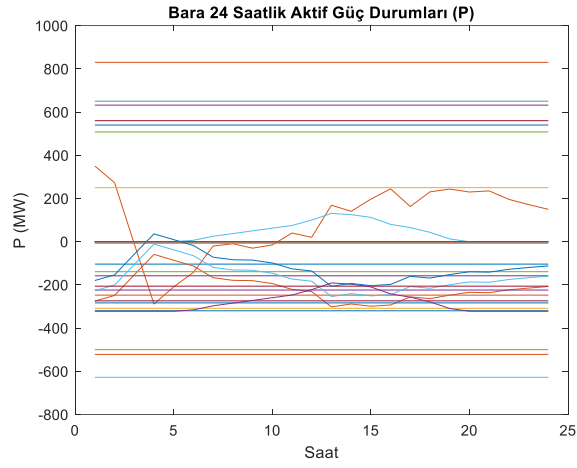
Kararlılık analizi için mevcut sistemin yanı sıra Şekil 28’de verilen dağıtık üretimli modifiye edilen test sistemi 1 ve dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye edilen test sistemi 2 kullanılmıştır. Simülasyon analiz prosedürüne göre sistem modifikasyonundan sonra ikinci olarak yük akış çalışması gerçekleştirilmiştir. Yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişim grafikleri Şekil 29’da verilmiştir.



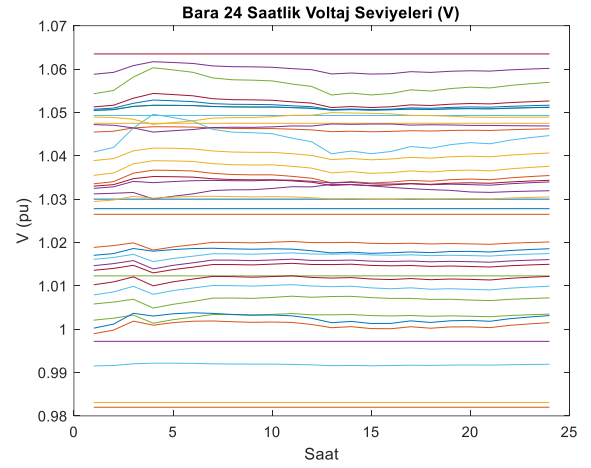
(a) Mevcut durum



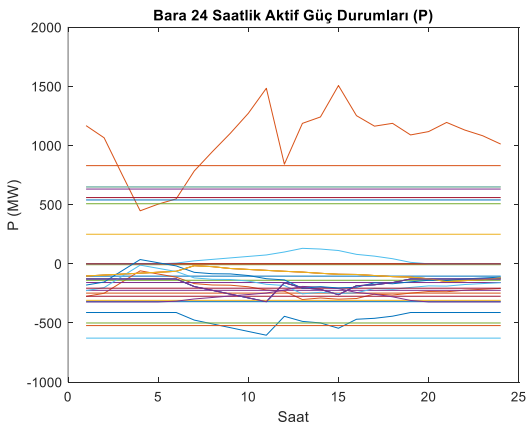
(b) Mevcut durum



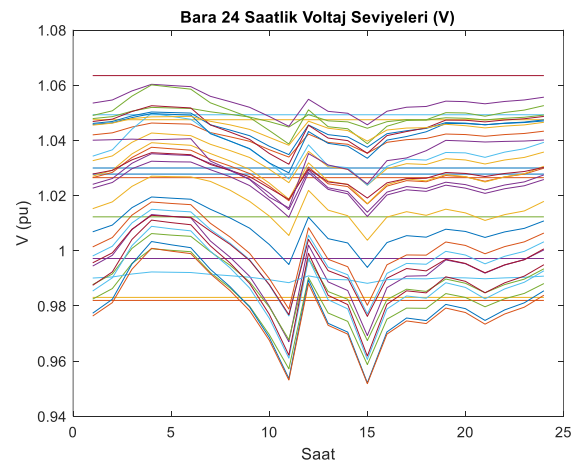
(a) Test sistemi 1



(b) Test sistemi 1



(a) Test sistemi 2



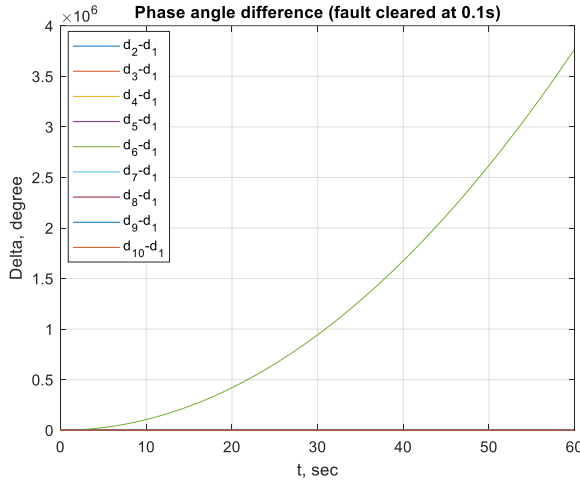
(b) Test sistemi 2

Şekil 29. (a) 24 saatlik bara güç değişimi (b) 24 saatlik bara gerilim değişimi

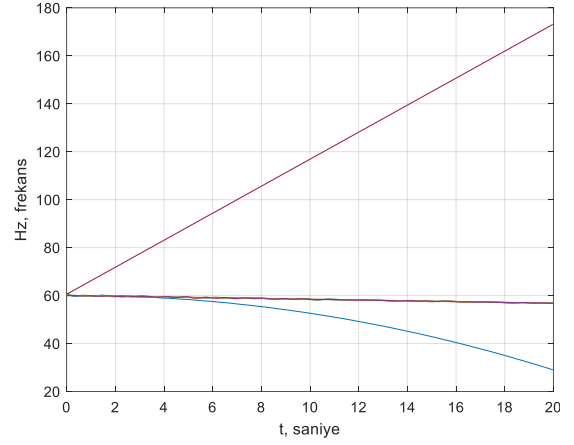
Simülasyon sonucu elde edilen Şekil 29'daki mevcut sisteme ait grafikler incelendiğinde, merkezi ve geleneksel karaktere sahip birimlerden dolayı güç ve gerilim değişimlerinin sabit olduğu görülmüştür. Şekil 29'daki dağıtık üretimli modifiye edilen test sistemi 1'e ait güç ve gerilim değerlerini gösteren grafikler 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. 3, 5, 7, 16 ve 27 nolu tüketim baralarında bulunan dağıtık üretim birimleri vasıtasıyla enerji ihtiyacının karşılanması güç dengesinde değişimlere sebep olmuştur. Özellikle dağıtık üretimin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde kırmızı ile ifade edilen) üzerindeki yük yoğunluğunda azalma gözlemlenmiştir. Dahası sistem kayıpları da azalmıştır. Bu durumun gözlemlenmesinde 4.-13.saat dilimleri arasında tüketim baralarındaki dağıtık üretim birimlerinin üretken tüketici gibi davranmasının etkili olduğu söylenebilir. Gerilim değişimlerine bakıldığında 30-39 nolu baraların gerilim değerlerinde herhangi bir değişim meydana gelmemekle birlikte sistem genelindeki en büyük değişim %1 seviyesindeki rüzgar enerjisinin bağlı olduğu 27 nolu baradır. Bunu dağıtık üretim birimlerinin olduğu veya doğrudan ilişkili olduğu baralardaki (26, 28, 7, 3 ve 17 gibi) gerilim yoğunluğunda küçüğe olsa azalma gözlemlenmektedir. Hem güç yoğunluğundaki azalma hem de gerilimlerin nominal sınırlar içerisinde değişim göstermesi dağıtık üretim birimlerinin, gerilim kararlılığında iyileştirici bir etkiye sahip olduğu şeklinde yorumlanabilir.

Şekil 29'daki dağıtık üretimli değişken tüketimli modifiye edilen test sistemi 2'ye ait güç ve gerilim değerlerini gösteren grafikler incelendiğinde ise değişken tüketimin varlığı 4. saat zaman dilimi haricindeki diğer zaman dilimlerinde enerji ihtiyacı diğer iki duruma kıyasla referans jeneratör üzerinde aşırı yüklenmenin oluşmasına neden olmaktadır. 4. saat diliminde ise rüzgar üretim birimlerinin bu zaman diliminde mevcut durumdaki yüklenmeye benzer bir etkinin oluşmasını sağlamaktadır. Gerilim grafikleri incelendiğinde en büyük değişim %5,09 ile 7 nolu barada meydana gelmektedir. 15.saat diliminde hem rüzgar hem de güneş üretiminin az olmasına karşın değişken yüklerin varlığı gerilim değerlerinin nominal sınırlarının dışına çıkacak şekilde bir düşüşe neden olmuştur.

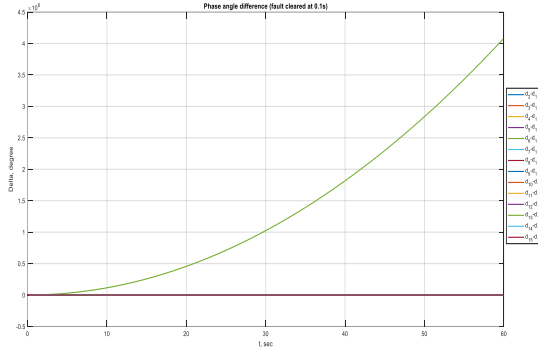
Simülasyon analiz prosedürüne göre üçüncü olarak geçici durum üzerinden rotor açılış kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumu olarak 2 adet arıza oluşturulmuştur. Bunlar, senkron makinenin devre dışı kalmasının temsilen 22-35 hattında 35 nolu baraya yakın bir üç faz arızası ve iletim hattı kaybını temsilen 15-16 hattında 16 nolu baraya yakın bir üç faz arızası olup hem mevcut sisteme hem de modifiye edilen test sistemlerine uygulanmıştır. Simülasyon sonucunda, oluşturulan arızaya üç sistemde cevabı Şekil 30 ve Şekil 31'de verilmiştir.



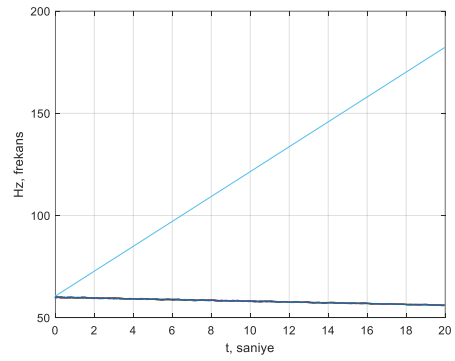
(a) Mevcut durum



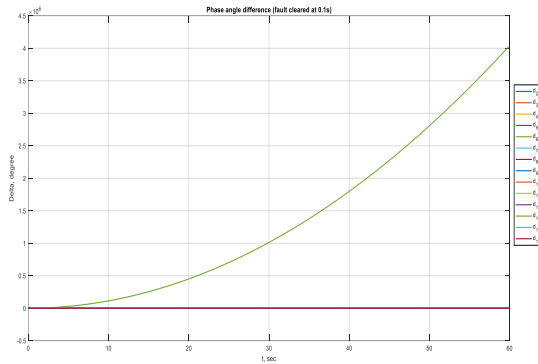
(b) Mevcut durum



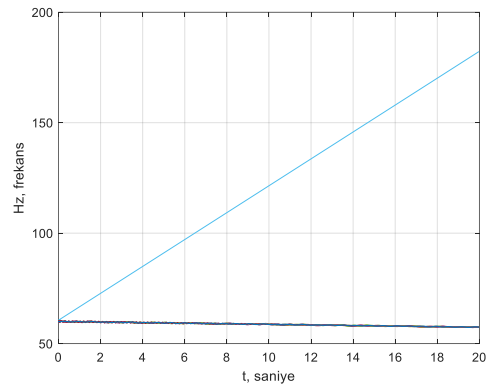
(a) Test sistemi 1



(b) Test sistemi 1



(a) Test sistemi 2



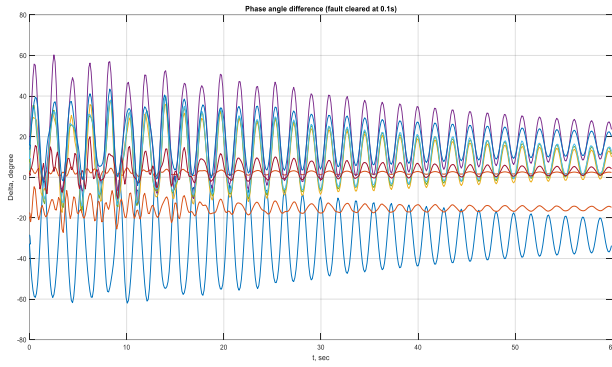
(b) Test sistemi 2

Şekil 30. Senkron makine arızası için 13. saat dilimindeki (a) Jeneratör rotor açı değişimleri

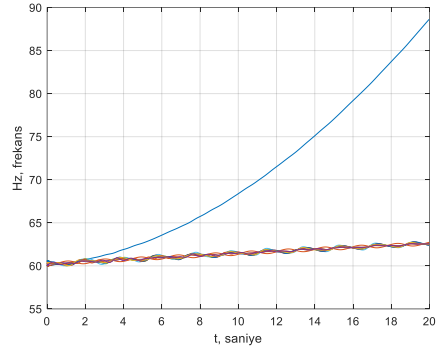
(b) Frekans değişimi

Şekil 30'daki senkron makine arızası durumunda tüm sistemlerin rotor açı ve frekans grafiklerinde sonsuz yönlü değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. Mevcut sistemdeki güç

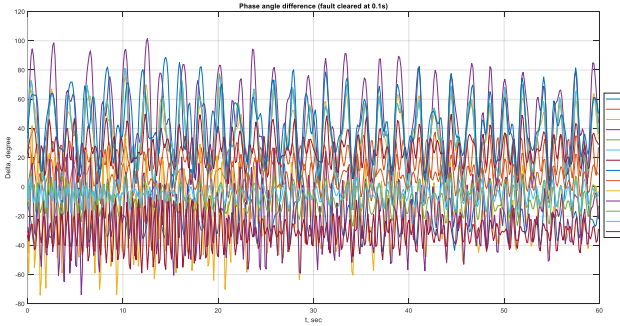
yoğunluğunu azaltmak için sisteme eklenen dağıtık üretim birimlerine rağmen bu arıza için sistem kararlı duruma geçemediği görülmektedir. Dahası sisteme değişken yüklerin eklenmesiyle durum daha da kötü bir noktaya gelmektedir. Modifiye edilen test sistemlerindeki rüzgar ve güneş enerjisine ait eylemsizlik sabitlerini küçük güçlü senkron makine seviyeleri olan 20-30 arasına kadar arttırdığımızda bile sistemlerin kararsızlığını devam ettirdiği gözlemlenmiştir. Hem rotor açısı hem de frekans bakımından sistemin kararsızlığını devam ettirme eğiliminde olmasında 650 MW gibi büyük bir gücün sistemden ayrılması ve dağıtık üretim birimlerinde 13.saat diliminde talep edilen güç etkili olmuştur.



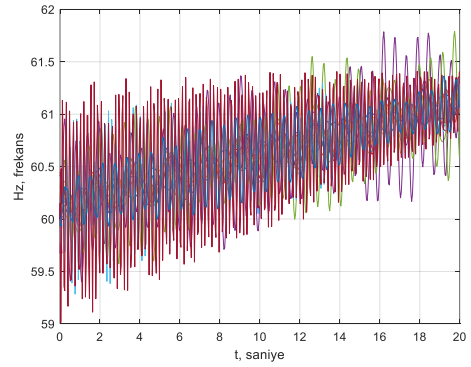
(a) Mevcut durum



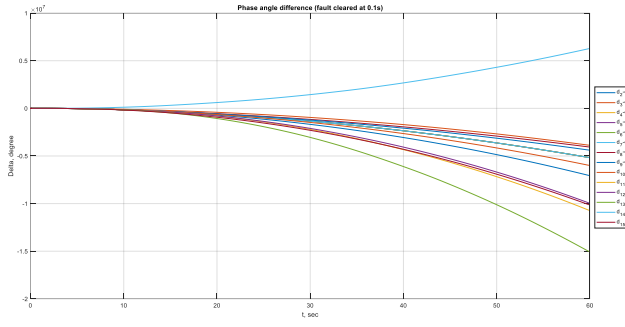
(b) Mevcut durum



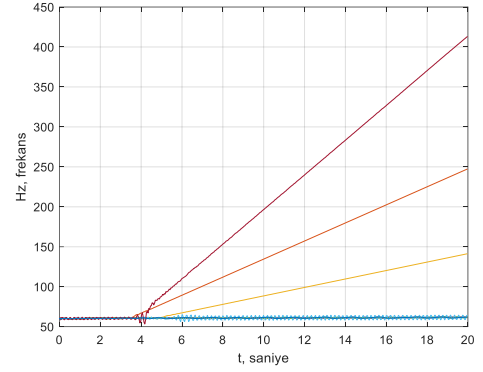
(a) Test sistemi 1



(b) Test sistemi 1



(a) Test sistemi 2



(b) Test sistemi 2

Şekil 31. İletim hattı arızası için 13. saat dilimindeki (a) Jeneratör rotor açı değişimleri

(b) Frekans değişimi

İletim hattı kaybı arızası için Şekil 31'deki grafikler incelendiğinde mevcut durumun bu arıza karşısında yeterli senkronizma ve sönümlenme momentini üretebilmesi sayesinde rotor açı değişimlerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Frekans değişimlerine bakıldığında ise rotor açı bakımından kararlı olan sistemin sistemde yeterli enerji olmadığından kararsız olduğu görülmektedir. Test sistemi 1'e ait rotor açı değişimlerinde mevcut duruma kıyasla kötüleşme gözlemlenmektedir. Yani sistemin kendisi yeterli senkronizma moment ürettiği halde sönümlenme momentini üretilmediğinden marjinal kararlı olarak çalışmaktadır. Bu durum devam ederken ekstra bir bozulmanın sistemi çökme olasılığını arttırmaktadır. Mevcut sistemin aksine frekans kararlılığı bakımından 59-60 Hz civarlarındaki değişimin tolerans sınırlarında olması sistemin kararlı hale geçtiğini göstermektedir. Bunda dağıtık üretimle sistemde ekstra gücün var olması etkili olmuştur.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 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 test sistemlerindeki yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerin varlığı gerilim ve rotor açısı kararlılığında olumlu bir etkiye sahipken frekans kararlılığında aynı olumlu durum gözlemlenmemiştir.
- 14 baralı güç sistemine ait test sistemleri için 9 baralı olduğu gibi yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerin varlığı gerilim kararlılığında olumlu bir etkiye sahipken arıza konumuna ve eylemsizlik sabitine bağlı olarak rotor açısı ve frekans kararlılığında farklı etkiler gözlemlenebilir.
- 30 baralı güç sistemine ait test sistemlerinin içerisinde test sistemi 5 haricindeki diğer sistemlerde dağıtık üretimlerin varlığı gerilim kararlılığı bakımından olumlu bir etkiye sahipken; rotor açısı ve frekans kararlılığında tüm sistemler marjinal kararlı olmakla birlikte az da olsa olumlu etki kendini burada da göstermektedir.
- 39 baralı güç sistemine ait test sistemlerinde dağıtık üretim birimlerinin uygun entegrasyonu sayesinde gerilim ve frekans kararlılığı bakımından olumlu bir değişim söz konusu olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun aksine rotor açısı kararlılığında olumsuz etkiler meydana gelmiştir.

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 dağıtık üretim 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,

ve bunlara ek olarak

- Tüketici taleplerinin sürekli ve ani değişkenli bir yapıda olması frekans ve gerilim kontrolünü zorlaştırarak sistem kararlılığında ciddi sorunlar oluşturması ihtimali

etkilidir. Bu ihtimallerin ortadan kalkması 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 etkisini 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 sorunlarının üstesinden gelmek için esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS), tristör kontrollü seri kompanzator (TSCS), Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) ve statik var kompanzator (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 çalışma, dağıtık üretim ve değişken tüketim entegrasyonu bakımından mevcut şebekelerle birlikte akıllı şebeke modellerinin de kararlılığı için ön çalışma niteliğindedir. Bu ön çalışmadan yola çıkılarak elde edilen tecrübeler ışığında, bir sonraki aşama için Türkiye elektrik şebekesi gibi daha büyük ve gerçek sistemlere yönelik elektrikli araç uygulamalarının da dahil edildiğı farklı senaryo çalışmaları ile akıllı şebekelere yönelik sanal atalet sabiti çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

5. KAYNAKLAR

Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: A definition1In addition to this paper, a working paper entitled 'Distributed power generation in a deregulated market environment', *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8)

Akdeniz, E. (2015). *Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi Ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi* [Tez, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/1422>

Angelim, J. H., & Affonso, C. M. (2016). Impact of distributed generation technology and location on power system voltage stability. *IEEE Latin America Transactions*, 14(4), 1758–1765. <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7483512>

Azmy, A. M., & Erlich, I. (2005). Impact of distributed generation on the stability of electrical power system. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 1056-1063 Vol. 2. <https://doi.org/10.1109/PES.2005.1489354>

Bhumkittipich, K., & Jan-Ngurn, C. (2013). Study of Voltage Stability for 22kV Power System Connected with Lamtakhong Wind Power Plant, Thailand. *Energy Procedia*, 34, 951–963. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.834>

Chen, H., Chen, J., Shi, D., & Duan, X. (2006). Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 8 pp.-. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709198>

Dierkes, S., Bennewitz, F., Maercks, M., Verheggen, L., & Moser, A. (2014). 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)*, 119–126. <https://doi.org/10.1109/PQ.2014.6866795>

Eleschová, Ž., Beláň, A., Cintula, B., Bendík, J., & Cenký, M. (2018). Smart Grids analysis—View of the transmission systems voltage stability. *2018 19th International Scientific*

Conference on Electric Power Engineering (EPE), 1–6.
<https://doi.org/10.1109/EPE.2018.8396023>

Fnaiech, N., Jendoubi, A., Zoghlami, M., & Bacha, F. (2015). Continuation power flow of voltage stability limits and a three dimensional visualization approach. *2015 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 163–168. <https://doi.org/10.1109/STA.2015.7505122>

Foote, C. E. T., Ault, G. W., Burt, G. M., McDonald, J. R., & Silvestro, F. (2005). Information requirements and methods for characterising distributed generation. *CIGRE 2005 - 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, 1–5.
<https://doi.org/10.1049/cp:20051214>

Gopakumar, P., Reddy, M. J. bharata, & Mohanta, D. kumar. (2014). Letter to the Editor: Stability Concerns in Smart Grid with Emerging Renewable Energy Technologies. *Electric Power Components and Systems*, 42(3–4), 418–425.
<https://doi.org/10.1080/15325008.2013.866182>

Karatepe, E., & Urganlı, F. (2011). *GÜÇ SİSTEMLERİNDE DAĞITILMIŞ ENERJİ ÜRETİMİNE GENEL BİR BAKIŞ*. II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi. <https://www.academia.edu/3052832>

Keleş, C. (2012). *Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Bölgeleri Arasındaki Salınımların Kontrolü* [Yüksek Lisans]. İnönü Üniversitesi.

Khosravi, A., Jazaeri, M., & Mousavi, S. A. (2010). Transient stability evaluation of power systems with large amounts of distributed generation. *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*, 1–5.

Lopes, J. A., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., & Jenkins, N. (2007). *Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities* (Vol. 77). <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.016>

Pollock, J., & Hill, D. (2016). Application of distributed generation reactive power control modes to increase system stability. *CIGRE Workshop 2016*, 1–4.
<https://doi.org/10.1049/cp.2016.0666>

Rath, A., Ghatak, S. R., & Goyal, P. (2016). 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)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NPSC.2016.7858877>

Reza, M., Schavemaker, P. H., Slootweg, J. G., Kling, W. L., & Sluis, L. van der. (2004). Impacts of distributed generation penetration levels on power systems transient stability. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, 2150-2155 Vol.2. <https://doi.org/10.1109/PES.2004.1373261>

Samanta, S. K., & Chanda, C. K. (2017). Investigate the impact of smart grid stability analysis on synchronous generator. *2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, 241–247. <https://doi.org/10.1109/CALCON.2017.8280732>

Sharma, R., Singh, M., & Jain, D. K. (2014). Power system stability analysis with large penetration of distributed generation. *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/POWERI.2014.7117685>

Slootweg, J. G., & Kling, W. L. (2002). Impacts of distributed generation on power system transient stability. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2*, 862–867 vol.2. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043465>

Sofla, M. A., & King, R. (2012). Control method for multi-microgrid systems in smart grid environment—Stability, optimization and smart demand participation. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2012.6175789>

Tamimi, B., Cañizares, C., & Bhattacharya, K. (2011). 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*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039797>

Tsado, J., Imoru, O., & Segun, O. D. (2012). Power System Stability Enhancement through Smart Grid Technologies with DRS. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 9.

Turan, M. T. (2014). *Akıllı şebekelerde arıza analizi ve koruma* [Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi]. <http://dspace.yildiz.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.11871/1912>

Tuttokmağı, Ö. (2019). *Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi* [Yüksek Lisans]. İnönü Üniversitesi.

Venayagamoorthy, G. K. (2011). Intelligent sense-making for smart grid stability. *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039876>

Wang, C., Yuan, K., Li, P., Jiao, B., & Song, G. (2018). A Projective Integration Method for Transient Stability Assessment of Power Systems With a High Penetration of Distributed Generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 386–395. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2553359>

Wang, W., & Huang, G. M. (2016). Impacts of smart grid topology control on power system stability with renewable integration. *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2016.7747889>

Wanik, M. Z. C., Erlich, I., Mohamed, A., & Salam, A. A. (2010). Influence of distributed generations and renewable energy resources power plant on power system transient stability. *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, 420–425. <https://doi.org/10.1109/PECON.2010.5697620>

Wu, W., Wang, K., Li, G., & Hu, Y. (2014). A stochastic model for power system transient stability with wind power. *2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6939022>

Xu, J., Li, B., Zou, Y., Li, C., Mao, X., Mao, X., Pan, S., & Zhou, N. (2013). 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)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2013.6837204>

Yang, J., Li, G., Wu, D., & Suo, Z. (2013). The impact of distributed wind power generation on voltage stability in distribution systems. *2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2013.6837205>

Yu, W., Xue, Y., Luo, J., Ni, M., Tong, H., & Huang, T. (2016). An UHV Grid Security and Stability Defense System: Considering the Risk of Power System Communication. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 491–500. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2392100>

Zhao, M., Wang, Z., & Xue, Y. (2018). An Overview on Application Analysis of Power Electronic Technology in Smart Grid. *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 5186–5189. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8408032>

6. EKLER

EK 1. Elektrik kesinti kronolojisi (Tuttokmağı, 2019)

Tarih	Meydana Geldiği Ülke	Meydana Gelme Nedeni
16 Haziran 2019	Arjantin Uruguay	Teknik bir arızadan dolayı Arjantin ve Uruguay'ın tamamı ile Brezilya, Şili ve Paraguay'ın bazı bölgelerinde meydana gelen elektrik kesintisi 48 milyon insanı etkilemiştir.
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 yenilenebilir 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 kötüleşmiştir. 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.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ASİM KAYGUSUZ
Proje No:	118E863
Proje Başlığı:	Dağıtık-Belirsiz Üretim Ve Tüketim Koşullarının Güç Sistemlerinin Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi
Proje Türü:	1002 - Hızlı Destek
Proje Süresi:	10
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İNÖNÜ Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2019 - 15/08/2020
Onaylanan Bütçe:	40995.0
Harcanan Bütçe:	31152.77
Öz:	<p>Günümüzde kullanılan elektrik güç sistemleri, genellikle merkezi üretimli sistemlerdir. Bu sistemlerde büyük güçteki santrallerde üretilen elektrik enerjisi, kilometrelerce uzunluktaki iletim hatları vasıtasıyla radyal yapıdaki dağıtım sistemleri üzerinden son kullanıcı dağıtım noktasına iletilmektedir. Bu sistemlerde üretimin önemli bir rol oynamasından dolayı elektrik üretim santralleri petrol, kömür ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarının yoğun olduğu bölgelerde kurulmaya devam etmektedir. Dünyadaki artan nüfus ve teknolojiye gelişmelerle birlikte enerjiye olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Artan enerji talebinin karşılanması esnasında mevcut elektrik sistemlerinden ve üretim kaynaklarından kaynaklı bazı sıkıntılarla karşılaşılması olasıdır. Bu sıkıntıları en az düzeye indirmek ve özellikle de fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi tehlikesinin önüne geçebilmek için yenilenebilir enerji kaynakları ve dağıtık üretim kavramları ön plana çıkmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim birimleri teknik, ekonomik ve çevresel açıdan birçok avantajının yanı sıra aralıklı ve öngörülemez yapıya sahiptirler. Bu kaynakların elektrik üretiminde payını arttırması ek olarak değişken ve belirsiz yapıdaki üretimin artması güç sistem kararlılığı noktasında risk oluşturabileceği öngörülmektedir. Düşük oranlı yenilenebilir dağıtık üretim içeren elektrik sistemleri için bu risk az olsa da büyük oranlı yenilenebilir dağıtık üretim içeren elektrik sistemleri için bu risk oldukça fazla olabilir.</p> <p>Bu projede, 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 oluşturularak IEEE 9, 14, 30 ve 39 baralı sistemler üzerinden test sistemleri oluşturulmuştur. Dağıtık-belirsiz üretim ve tüketim yapısındaki değişimler kullanılarak gerilim kararlılığı incelenirken her sistem için oluşturulan arıza senaryoları üzerinden rotor açığı ve frekans kararlılığı incelenmiştir.</p> <p>Analiz çalışmaları sonucunda dağıtık-belirsiz üretim ve tüketimin, üretim-tüketim profillerine, sisteme entegrasyon noktasına, arıza yerine vb. faktörlere de bağlı olarak her sistemde farklı bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmekle birlikte oluşturulan analiz prosedürüne göre sistem kararlılığında iyileşmelerin yanı sıra bozulmaların da meydana geldiği görülmüştür.</p>
Anahtar Kelimeler:	Dağıtık üretim, değişken tüketim, güç sistemi kararlılığı.
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır