



Investigation of the effects of distributed-uncertain production and consumption conditions on power system stability

Asım Kaygusuz*^{ID}, Özge Tuttokmağrı^{ID}, Ayşe Acar^{ID}

Department of Electric Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Inonu University, 44280 Malatya, Türkiye

Highlights:

- Investigation of the effects of renewable energy sources on stability
- Analyzes in terms of three types of stability
- Importance of total system inertia constant

Keywords:

- Distributed Generation
- Power System Stability
- Inertia Constant
- Renewable Source
- IEEE 14 Bus System

Article Info:

Research Article

Received: 27.05.2021

Accepted: 23.07.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.884439

Acknowledgement:

This study was completed with the support provided by TÜBİTAK within the scope of project number 118E863 with program code 1002. The authors would like to express their endless gratitude to TÜBİTAK, which always supports science and contributions to science.

Correspondence:

Author: Asım Kaygusuz
e-mail: asim.kaygusuz@
inonu.edu.tr
phone: +90 536 367 2021

Graphical/Tabular Abstract

In the world, fossil fuels decreases and the greenhouse gas effect increases while energy demand continuously increases. This situation causes more use of renewable energy sources such as wind and solar energy. Investigating the effect of these sources on power system stability is extremely important in terms of system reliability. Figure A shows the IEEE 14-bus test system and the active power values of this system.

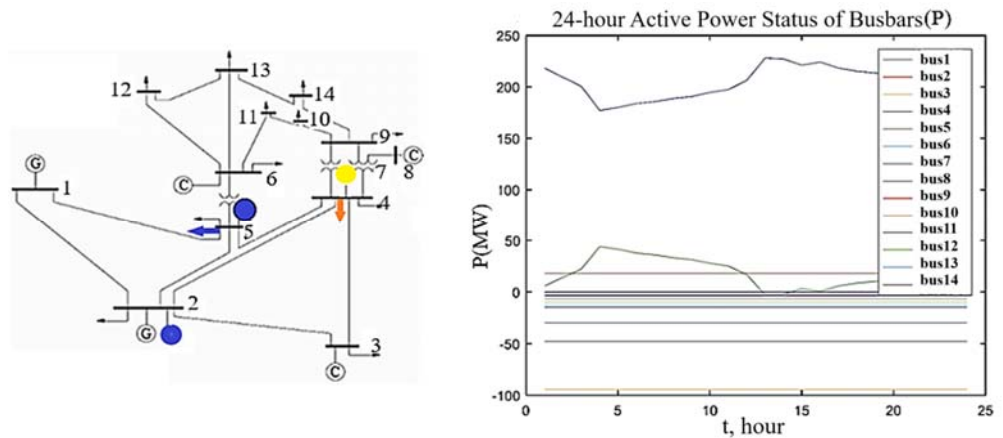


Figure A. IEEE14 bus test system and active power graph of the system

Purpose: This study aims to analyze the effects of distributed generation (wind and solar) and variable consumption (industrial and residential) on power system stability in terms of rotor angle, voltage and frequency.

Theory and Methods:

IEEE 14 bus power system modified to examine the effect of distributed generation based on renewable energy sources and variable consumption above power system stability. Generally, only one value of distributed generation and variable consumption is used in other studies. In contrast, 24-hour average generation and consumption profiles are used in this study for 3 test systems. By creating 4 scenarios, stability analysis was carried out over the changes of rotor angle, voltage, power and frequency.

Results:

In the study, 3 test systems and the creation of integration conditions specific to these test systems led to different situations in the analysis results. While improvements observe in system density in terms of power and voltage due to the extra power contribution, the expected improvement in rotor angle and frequency do not observe due to the decrease in the system inertia constant.

Conclusion:

In this study, each test system gives different stability responses leads us to think that it will cause different stability responses in real grids. For this purpose, studies must continue to ensure the most suitable conditions by including smart technologies in the integration of distributed generation units and variable consumption units in the system.



Dağıtık-belirsiz üretim ve tüketim koşullarının güç sistemi kararlılığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Asım Kaygusuz*^{ID}, Özge Tuttokmağrı^{ID}, Ayşe Acar^{ID}

İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44280 Malatya, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının kararlılık üzerindeki etkilerinin araştırılması
- Üç tür kararlılık açısından analiz
- Toplam sistem eylemsizlik sabitinin önemi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 27.05.2021

Kabul: 23.07.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.884439

Anahtar Kelimeler:

Dağıtık üretim,
yenilenebilir enerji,
güç sistemi kararlılığı,
atalet sabiti

ÖZ

Dünyada sürekli artan enerji talebinin karşılanmasında fosil yakıtlara dayalı büyük kapasiteli geleneksel kaynaklar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlara aşırı bağımlılık, bunun sonucunda oluşan sera gazı emisyonuyla birleştirildiğinde güç sistemi mühendislerini alternatif çözümler düşünmeye zorlamaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile kurulan dağıtık güç sistemleri ön plana çıkan çözümdür. Her ne kadar çözüm olarak görülse de bu kaynakların aralıklı ve değişken yapıları, güç sistemi çalışmasında önemli bir yere sahip olan sistem kararlılığı üzerinde göz ardı edilmeyecek bir etkiye sahip olabilir. Bu çalışmada rüzgâr, güneş ve yük birimlerindeki belirsizliği içerecek şekilde güç sistemi kararlılık analizi yapılmıştır. IEEE 14 baralı güç sistemi üzerinden çeşitli senaryolar oluşturularak gerçekleştirilen sistemin kararlılık cevapları incelenmiştir.

Investigation of the effects of distributed-uncertain production and consumption conditions on power system stability

H I G H L I G H T S

- Investigation of the effects of renewable energy sources on stability
- Analyzes in terms of three types of stability
- Importance of total system inertia constant

Article Info

Research Article

Received: 27.05.2021

Accepted: 23.07.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.884439

Keywords:

Distributed generation,
renewable source,
power system stability,
inertia constant

ABSTRACT

Large capacity traditional resources based on fossil fuels are used to meet the ever-increasing energy demand in the world. Over-reliance on fossil fuels, combined with the resulting greenhouse gas emissions, forces power system engineers to consider alternative solutions. Distributed power systems established with renewable energy sources such as wind and solar, along with developing technology, are the prominent solution. Although they are seen as a solution, the intermittent and variable nature of these sources can have a significant impact on system stability, which has an important place in power system operation. In this study, power system stability analysis was performed to include uncertainty in wind, solar and load units. Various scenarios were created over the IEEE 14-bar power system and the stability responses of the system were examined.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde rüzgâr, güneş, jeotermal vb. yenilenebilir enerji kaynaklarının, dağıtık üretim teknolojisiyle birlikte geleneksel güç sistemlerinde daha fazla yer almaya başlaması güç sistemlerinin yeniden şekillenmesine neden olmaktadır. Dağıtık üretimin (rüzgâr, güneş, vb.) yük merkezlerine yakın noktalarda şebekeye dâhil edilmeleri hem sistem güvenilirliğini artırır hem de iletim kayıplarını azaltmaktadır. Dahası gerilim profillerini iyileştirmektedir. Bununla birlikte arz/talep kalitesi, güç akışı, harmonik, reaktif güç kontrolü gibi teknik konulardaki sorunları da beraberinde getirebilmektedir. Küçük ölçekli dağıtık üretim birimlerinin dağıtım hattı seviyesinden güç sistemine bağlanmasıyla bu sorunların üstesinden gelinir. Buna karşın dağıtık üretim birimlerinin büyük ölçekli sistemlerde kullanımından veya iletim hattı seviyesindeki entegrasyonlarından kaynaklı güç sistemi kararlılığında büyük zorluklara neden olması olasıdır [1]. Bu olasılık geleneksel kaynakların yerini yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerinin almasıyla daha ciddi bir hale gelmektedir. 2016 yılında enerji arzının %50'sinin rüzgâr ve güneş enerjisiyle karşılandığı Güney Avustralya ile 14-15 Ağustos 2020 tarihinde elektrik enerjisinin %30'unun rüzgâr ve güneşten üretildiği Kaliforniya'da yaşanan büyük kesintilerden kaynaklı sosyal, ekonomik ve teknik sorunlar sistem kararsızlığının ne gibi sonuçlar yarattığının en güzel örneğidir [2, 3]. Sistemin çalışmasını dolayısıyla da insan hayatını doğrudan etkileyen kararlılık kavramı son yıllarda dikkatleri üzerine çekmektedir. Dolayısıyla sistem kararlılığı ve dağıtık üretim birimleri araştırılması gereken önemli bir konu hale gelmiştir. Yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretimin sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini araştırmak için birçok araştırma yapılmıştır. Üretim ve tüketim merkezlerinin farklı alanlarda toplanmasının [4], 2 baralı sistemdeki dağıtık üretimin % 50'ye kadarki artışının [5], test sistemlerine belirli yüzdelerle entegre edilmiş dağıtık üretimin [6], dağıtık üretimin çift yönlü enerji akışının gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir [7]. Oluşturulan gerilim indeksinin aracılığıyla küçük veya büyük ölçekli dağıtık üretim ile yüksek katılım oranlı yenilenebilir enerjinin frekans kararlılığındaki değişimin güç sistemine etkisi değerlendirilmiştir [8, 9]. Toplam dağıtık üretimin toplam yük oranı sonucu elde edilen katılım oranının [10], dağıtık üretimin bağlantı tipi ve boyutlarının [11], rüzgâr santrallerini içeren güç sisteminin stokastik bir modelinin ve şebekeye hakim olan yenilenebilir enerjinin getirmiş olduğu yeniliklerinin rotor açısı kararlılığı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir [12-13]. Yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinde değişimler karşısında dengeleyiciler, röle tasarımı, kontrol teknolojileri, güç kalitesi analizi ve izlemesine genel bir bakış sunulmuştur [14]. Geleneksel güç sistemlerine entegre edilen rüzgâr santrallerinin sistemde oluşturabileceği en problemli durumların modelize edildiği senaryolar oluşturmak adına önerilerde bulunulmuş ve detaylı frekans kararlılığı analizleri yapılmıştır [15]. Önerilen teknolojiyle güneş santrallerinin güç kalitesi sorunlarına ve gerilim kararlılığına önemli bir katkı sağladığı açıklanmıştır [16]. Yenilenebilir enerji üretiminin oldukça yaygın olduğu güç sistemlerindeki olası değişiklikler ve problemler açıklanmış ve tanımlanmıştır. Ayrıca güç sistemlerinin geçici kararlılığının artırılması adına ileri kontrol yöntemleri önerilmiş ve analiz edilmiştir [17]. Rüzgâr ve güneş santralleri gibi yenilenebilir enerji kaynağına dayalı güç sistemlerinde sistemin ölçüm tekniklerine ve gücüne genel bir bakış sunulmuştur, sistem gücünün ölçüm tekniklerinden ve gelecekte yaşanabilecek zorluklardan bahsedilmiştir [18]. Yenilenebilir enerjiye dayalı çok düğümlü bir güç sisteminde en kritik düğümler belirlenmiş ve üç farklı arıza stratejisi oluşturulmuştur. Bu strateji altında güç sisteminin performansı yapı ve işlev açısından değerlendirilmiştir [19]. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde dağıtık üretimin entegrasyonunun artmasıyla bu güncel konuda yapılan çalışmaların arttığı, sistemlerin güç kalitesi, sürdürülebilirlik, frekans kararlılığı, gerilim kararlılığı gibi birçok açıdan değerlendirildiği görülmektedir.

Bu çalışmada ise, örnek güç sistemi üzerinden belirsiz üretim ve tüketimin koşulları dikkate alınarak 24 saatlik üretim ve tüketim profilleri dâhil edilerek oluşturulan senaryolar üzerinden sistem kararlılığı bir bütün olarak incelenmiştir. Böylece dağıtık, belirsiz üretim ve tüketim koşullarının sistem kararlılığı üzerindeki hem olumlu hem de olumsuz etkileri aynı anda değerlendirilebilmiştir. Güç sistemlerinde olabilecek özellikle arıza problemlerinin sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini ve temizlenme sürelerinin daha hassas değerlerde görülebilmesi amaçlandığından, bu çalışmada arızalardan etkilenme oranı diğer daha büyük baralı sistemlere göre (IEEE 30 ve 39) daha fazla olan IEEE 14 sistemi kullanılmıştır.

2. Kuramsal Temeller (Theoretical Foundations)

Kararlılık, güç sistemini oluşturan elemanların normal çalışma koşulları altında dengede çalışması veya sistemin herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra dengeyi yeniden sağlama davranışı olarak tanımlanabilir [20]. Sistem kararlılığını oluşturan hem rotor açısı hem frekans hem de gerilim kararlılığı için bu denge noktası, sistemin yapısına bağlı olarak başlangıçtaki denge noktası olabileceği gibi yeni bir denge noktası da olabilir. Özellikle belirsiz ve değişken yapıdaki dağıtık üretim ve yük birimleri ile sistemin yapısı değişirken denge noktasının önemi artmaktadır. Bu nedenden dolayı belirsiz ve değişken yapıdaki dağıtık üretim ile yük birimlerinin tüm kararlılık tipleri üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak analizler yapılmalıdır.

2.1. Rotor Açısı Kararlılığı (Rotor Angle Stability)

Geleneksel güç sisteminde makinelerin senkronizmada kalma yeteneği olarak ifade edilen rotor açısı kararlılığı için en önemli faktör salınım denkleminde yer alan atalet sabitidir. Bir makinenin salınımı Eş. 1 şeklinde gösterilmektedir.

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = \Delta P \quad (1)$$

Eş. 1'de P_m mekanik giriş gücünü, P_e elektriksel çıkış gücünü, δ rotor açısını, f_0 doğal frekansını ve H atalet sabitini ifade etmektedir. Sistem herhangi bir bozulmayla karşı karşıya kaldığında arızanın etkilerini azaltmak ve/veya arızanın kendisini ortadan kaldırmak için gerekli olan sönümleme ve senkronizma momenti atalet sabiti sayesinde sağlanmaktadır. Bununla birlikte geleneksel üretim birimlerinin yerini atmosferik olaylardan kaynaklı olarak değişken ve belirsiz yapıdaki yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim birimlerinin almasıyla sistem ataletinde büyük bir değişiklik söz konusu olacaktır. Özellikle rüzgâr ve güneş gibi enerji kaynaklarının sahip olduğu yapısal özelliklerden dolayı ya çok küçük atalet değerine sahip olabilecek ya da herhangi bir atalet değerine sahip olamayacaktır. Bu durum ise genel sistemin atalet değerinin azalmasına ve dağıtık üretim birimlerinin meydana gelebilecek bozulmalar süresince sisteme daha az sönümleme ve senkronizma momenti desteği sağlaması beklenmektedir. Sistem kısa süreli bozulmalarda bu azalmayı tolere edebilirken uzun süreli ciddi bozulmalarda jeneratörler aşırı bir şekilde hızlanmaktadır. Bu hızlanma sistemdeki jeneratörlerin tek tek veya grup halinde devre dışı kalarak güç arzının büyük çoğunluğunu karşılayan jeneratörün aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Aşırı yüklenmeyi kısa süre devam ettirebilen jeneratör sürenin artmasıyla daha fazla marjinal kararlılıkta çalışmayarak devre dışı kalır ve bozulma güç sistemi çökmesiyle sonuçlanmaktadır.

2.2. Frekans Kararlılığı (Frequency Stability)

Enerji otoritelerine göre frekans kararlılığı, üretim ve yük arasında önemli bir dengesizlikle sonuçlanabilen ciddi bir sistem

bozulmasından sonra güç sisteminin kararlı durum frekansını koruyabilmesi yeteneğidir [21]. Rotor açısı kararlılığının aksine süresine bakılmaksızın herhangi bir bozulma frekansında salınımlara neden olmaktadır. Salınım \pm % 5 sınıra kadar kabul edilen değeri aşarsa sistemin frekans bakımından kararlılığı azalabilir veya kararsız hale gelebilir. Eş. 1 yeniden düzenlendiğinde frekans değişimini gösteren Eş. 2 elde edilecektir.

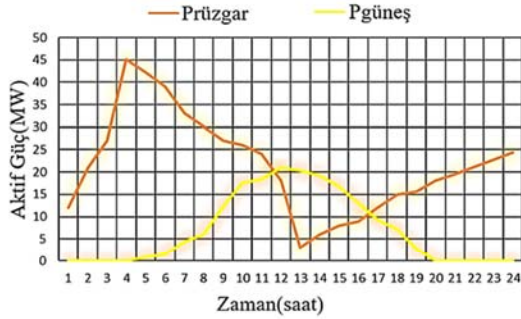
$$\frac{df}{dt} = \frac{f_0}{2H} \Delta P \quad (2)$$

Eş. 2'de hem güç değişimi (ΔP) hem de atalet değeri (H) frekans değerini doğrudan etkilemektedir. Rotor açısı kararlılığında dağıtık üretim birimlerinin atalet değerinin geleneksel üretim birimlerine kıyasla daha düşük olacağı ifade edilmesinin yanı sıra gün içerisinde rüzgâr hızındaki değişim ile güneş ışımamasından kaynaklı belirsizlik güç üretim değerini değiştirmektedir. Dahası bu belirsizliğe değişken yük talebinin de eklenmesiyle frekans değişiminde ciddi artışlar veya azalışlar gözlemlenebilir.

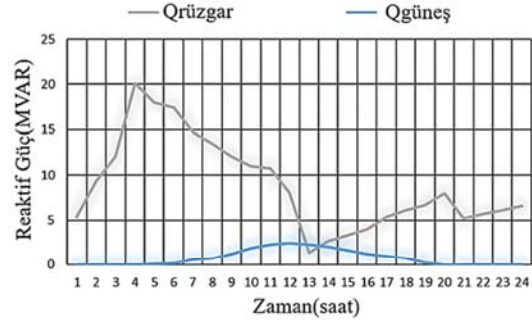
2.3. Gerilim Kararlılığı (Voltage Stability)

Sistemin çalışma süresince tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalma yeteneği olarak ifade edilen gerilim kararlılığını,

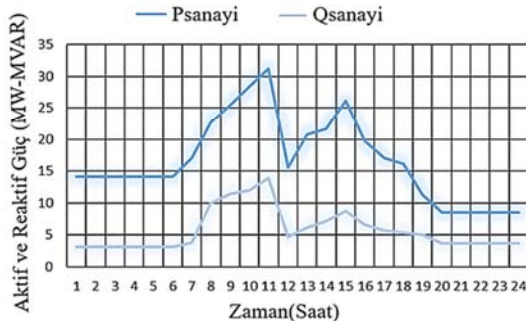
- Yük karakteristikleri,
- Reaktif güç dengesi,
- İletim hatlarının dayanıklılığı,
- Güç transfer seviyeleri,
- Koordinasyon zayıflığı,
- Yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek orandaki entegrasyonu doğrudan etkilemektedir [21].



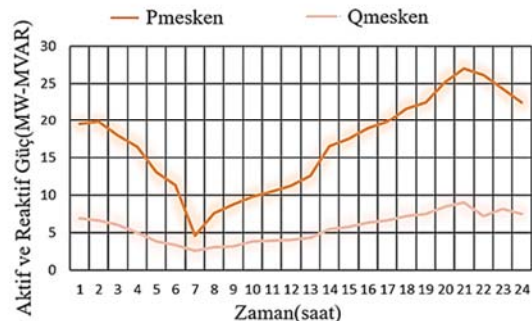
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1. 24 saatlik (a-b) Rüzgâr ve Güneş İçin Aktif ve Reaktif Güç Üretim Profili, Sanayi ve Mesken için Aktif ve Reaktif Tüketim profili (c-d) (Active and Reactive Power Generation Profile for Wind and Solar (a-b), Active and Reactive Consumption profile for Industry and Residential(c-d), 24 hours)

Gerilimde yaşanabilecek değişimler yerel bir olgu iken sistemin tamamına etki edebilecek genel bir olaya dönüşebilir. Bu durumun önüne geçilmesinde dağıtık üretim birimleri her zaman aynı güç desteği sağlayamayacağı ve reaktif güç dengesini bozacağı için o anda bir sorun oluşturmasa dahi gelecekte yüksek kullanım oranlarından kaynaklı olarak zincirleme devre dışı kalmayı tetiklemesi sonucunda sistem çökmesinin görülebilmesi olasıdır. Buna karşın dağıtık üretimin beraberinde getirmiş olduğu üretken tüketici özelliği sayesinde yükün ihtiyacı bu kaynaktan sağlanabileceği gibi herhangi bir nedenden kaynaklı devre dışı kalan jeneratörler için sıcak yedek olmaları gerilim üzerinde iyileştirici bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir.

3. Sistem Konfigürasyonu (System Configuration)

Çalışmada 5 jeneratör, 11 yük ve 15 iletim hattından oluşan geleneksel yapıya sahip IEEE 14 baralı güç sistemi mevcut durumu ifade ederken farklı iki tipteki dağıtık üretim ve yük birimleri eklenerek test sistemleri elde edilmiştir. Dağıtık üretim birimi entegrasyonu yapılırken sistemin yük yoğunluk haritasına bakılmıştır. Bunun sonucunda 2. bara %73, 4. bara %63 yoğunluğa sahipken bunları 5. bara takip etmektedir. Yük yoğunluğunu hafifletmek amacı ile genellikle üretim birimleri yük yoğunluğunun fazla olduğu baralara entegre edilmiştir [22].

Yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim için rüzgâr ve güneş enerjisinin atmosferik olaylardan kaynaklı aralıklı ve belirsiz doğal yapısını temsilen Şekil 1a'daki varsayımsal olarak oluşturulan 24 saatlik üretim profili kullanılmıştır. Ayrıca sistemde değişken yük için sanayi ve mesken tipi yükü temsil etmesi için Şekil 1c ve Şekil 1d'deki 24 saatlik ortalama tüketim profili kullanılmıştır.

- *Test Sistemi 1:* 5 nolu baraya rüzgâr dağıtık üretimi birimi

- *Test Sistemi 2:* 5 nolu baraya güneş dağıtık üretimi birimi
- *Test Sistemi 3:* 2 ve 5 nolu baraya rüzgâr ile 4 nolu baraya güneş dağıtık üretimi birimi
- *Test Sistemi 4:* 2 ve 5 nolu baraya rüzgâr ile 4 nolu baraya güneş dağıtık üretimi birimi ve 5 nolu baraya sanayi ile 4 nolu baraya mesken tipi yük birimi olacak şekilde planlanan test sistemleri Şekil 1'de gösterilmektedir.

4. Test Senaryoları ve Sonuçları (Test Scenarios and Conclusions)

Güç sistemlerinde kararlılık kavramı büyük bir öneme sahiptir. Gün geçtikçe belirsizlik üretim seviyeleri içeren yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerinin kullanımının artması klasik güç sistemlerinin yeniden şekillenmesine sebep olmuştur. Sistemin bu yönlü şekillenmesinden kaynaklı güç sistem kararlılığında değişimler meydana gelmiştir. Bu sistemler üzerinde oluşabilecek arızaların veya bozulmaların sonucunda sistemin verebileceği cevabın önceden bilinmesi sistemin sürdürülebilirliği açısından hayati öneme sahiptir [23]. Böylece, bu değişimleri daha net gözlemlemek amacıyla modifiye edilen sistemler üzerinden yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim ve belirsiz tüketim birimlerinin güç sistemi kararlılığında oluşturacağı etkileri gözlemlemek açısından farklı senaryolar üzerinden simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Bu simülasyonlarla yük akışı ve kararlılık analizleri aşağıdaki sırayla yapılmıştır:

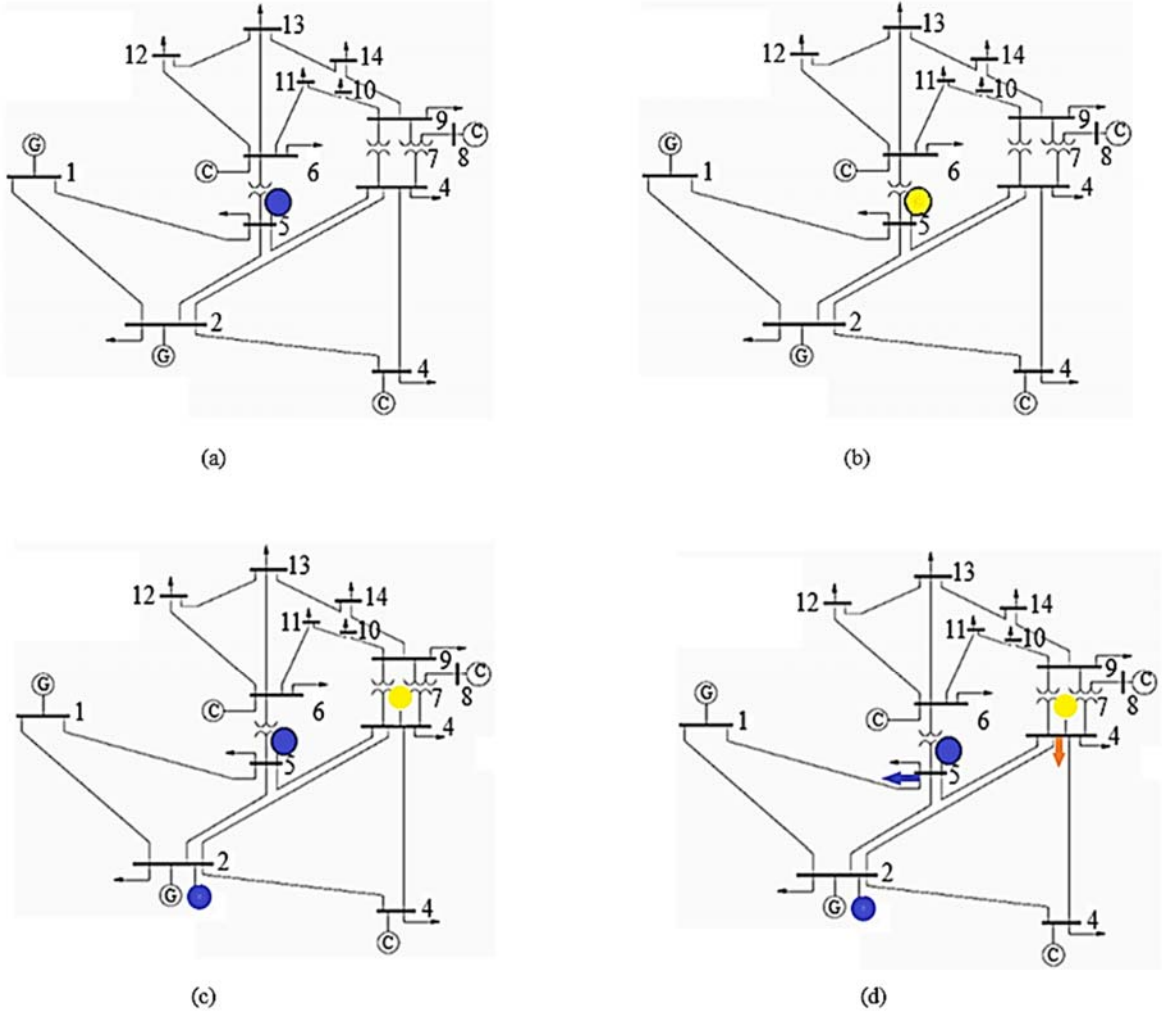
- 1- III. bölümde tanımlanan test sistemleri oluşturulmuştur.
- 2- Bu test sistemlerinin yük akışı analizi MATLAB programı ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda gerilim kararlılığı göstergeleri elde edilmiştir. Rotor açısı ve frekans kararlılığının ilk şartları elde edilmiştir.
- 3- Geçici durum olarak arıza senaryosu belirlenip sistem analiz edilmiş ve sistemin bu arıza karşısında gösterdiği tepki rotor açısı ve frekans kararlılığı olarak kabul edilmiş ve kararlılık gözlemleri yapılmıştır.

Bu analizlerde sistemdeki geleneksel üretim birimlerinin sahip olduğu atalet sabitlerine kıyasla çok düşük olacak şekilde rüzgâr için atalet sabiti(H) 2.5 ve güneş için 0.2 tercih edilmiştir [22, 23].

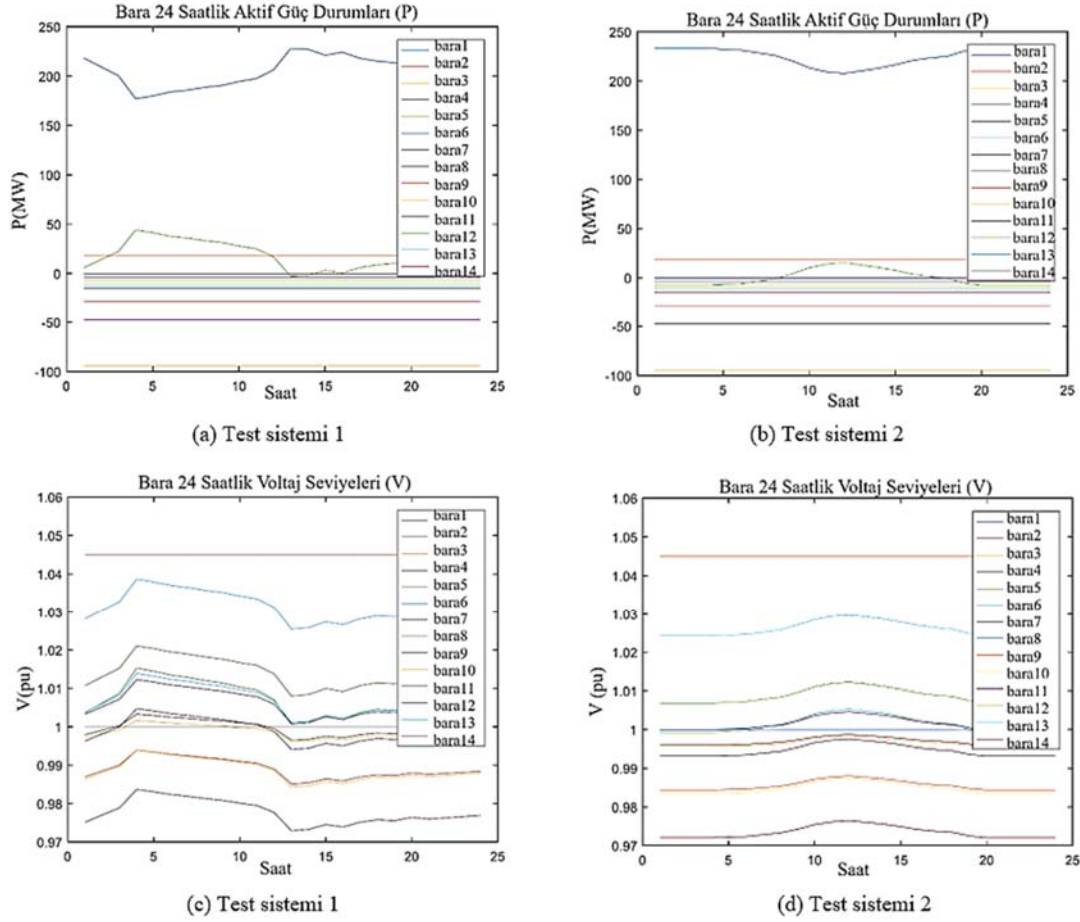
4.1. Senaryo 1 (Scenario 1)

Dağıtık üretim birimine yakın bir noktada meydana gelebilecek arıza düşüncesinden yola çıkarak [4-5] hattında 5 nolu baraya yakın üç fazlı bir arıza tanımlanmıştır. Bu arıza hem mevcut durum hem de Şekil 2a ve Şekil 2b'deki test sistemleri için gerçekleştirilmiştir.

Yük akışı çalışması sonucu 1. ve 2. senaryoya ait test sistemlerinin gerilim ve güç değişimleri Şekil 3'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 2. (a) Test Sistem 1, (b) Test Sistem 2 (c) Test Sistem 3, (d) Test Sistem 4
(a) Test Sistem 1, (b) Test Sistem 2, (c) Test Sistem 3, (d) Test Sistem 4)



Şekil 3. 24 saatlik (a)-(c) Güç değişimi, (b)-(d) Bara gerilim değişimi
(For 24 hours (a)-(c) Power change, (b)-(d) Bus voltage change)

Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir.

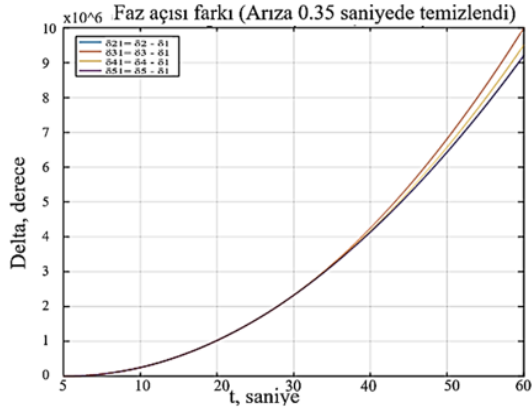
Yapılan bu çalışmada belirsiz-değişken üretimin sistem üzerindeki etkisi analiz edilmek istenmiştir. Şekil 3' de geleneksel sistemden farklı karakteristiğe sahip dağıtık üretimli test sistemlerine ait güç ve gerilim değişimleri verilmiştir. Test sistemi 1 ve 2 bünyesindeki rüzgâra ve güneşe (güç eğrisinde yeşil ile ifade edilen) dayalı dağıtık üretimlerin var olması durumunda, özellikle bu birimlerin etkin olduğu zaman dilimlerinde referans jeneratör (güç eğrisinde mavi ile ifade edilen) üzerindeki yük yoğunluğunun azaltılmasına yardımcı olmuştur. İki sistem karşılaştırıldığında rüzgâr enerjisinin yüksek güç arzından dolayı yoğunluğun azaltılmasında ön plana çıktığı söylenebilir. Böylelikle iletim hatları üzerinden yüklere enerji aktarımı sırasında meydana gelen kayıpların önüne geçilip sistem gücünde pozitif bir etki oluşturulmaktadır.

14 baralı sistemin gerilim değişimlerine bakıldığında ise mevcut sistemdeki en küçük değişimin tüm sisteme yansımaları durumu rüzgâr ve güneş üretim birimlerinin dahil edilmesiyle de gözlemlenir. Özellikle üretimin yoğun olduğu zaman dilimlerinde Test sistemi 1'de 5. baraya rüzgâr üretim biriminin dahil edilmesiyle 1, 2 ve 8 nolu bara dışındaki tüm baraların gerilimlerinde bir artış meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca sistemde gün içerisinde %1,4 seviyesinde gerilim değişiminin en büyük olduğu bara, rüzgâr üretim biriminin bağlı olduğu 5 nolu baradır. 5 nolu baraya güneş enerjisinin bağlandığı Test sistemi 2'de ise test sistemi 1'e göre daha az olmakla birlikte üretimin

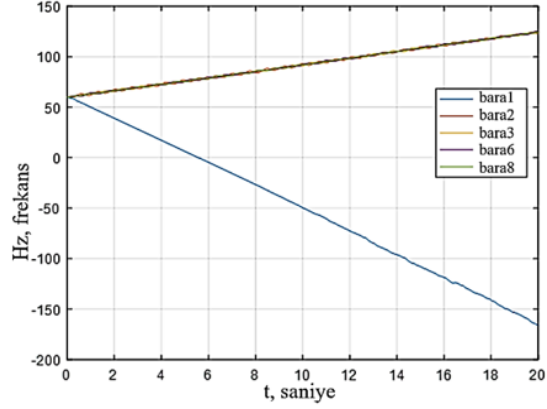
fazla olduğu zaman dilimlerinde 1, 2 ve 8 nolu bara dışındaki tüm bara gerilimlerinde artışlar görülmüştür. Yine en büyük değişimin gözlemlendiği bara %0,13 seviyesindeki değişimle dağıtık üretim biriminin bağlı olduğu 5 nolu baradır. Her iki sistemde dağıtık üretimin doğal sonucu olan artış ve azalışlar nominal sınırlar içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durum gerilim kararlılığı açısından incelendiğinde her iki sistemde de olumsuz bir etki meydana getirmediği görülmüştür. Bununla birlikte ayrıca rüzgâr enerjisinin yapı ve de güç değişiminden kaynaklı olarak az da olsa iyileştirici etki bakımından güneş enerjisine göre daha etkin olduğu yorumu yapılabilir.

Simülasyon analiz sıralaması göz önüne alınarak geçici durum üzerinden rotor açısı ve frekans kararlılık çalışması gerçekleştirilmiştir. Geçici durumda oluşturulan arıza, yük yoğunluğunun fazla olduğu ve dağıtık üretim birimlerine yakın olduğu bölgeyi temsilen oluşturulmuş olup mevcut sisteme ve test sistemine ayrı ayrı uygulanmıştır. Her sistem için 4-5 hatında 5 nolu baraya yakın bir arıza oluşturulmuştur. Arıza 0,35 saniyede temizlenecek şekilde 20 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arızaya karşı sistemlerin verdiği cevap Şekil 4'de gösterilmiştir.

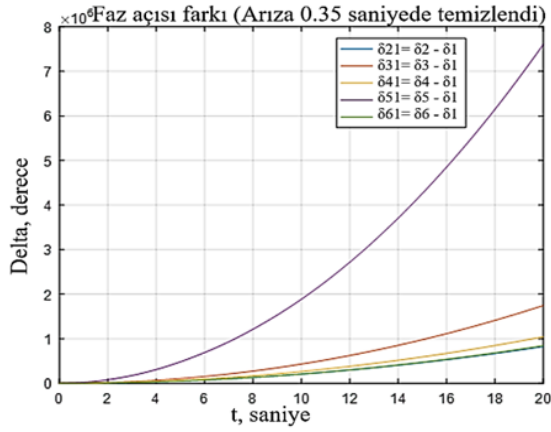
Simülasyon sonuçları incelendiğinde aynı arıza koşullarında 12. saat dilimi için her üç sistemin de kararsız olduğu gözlemlenmiştir. 12. saat diliminde Test sistemi 1'deki rüzgâr enerjisi üretimi, Test sistemi 2 güneş enerjisi üretimine kıyasla fazla olmasına rağmen herhangi bir üstünlük oluşturmamıştır. Dahası arıza 24 saatlik üretim ve tüketim



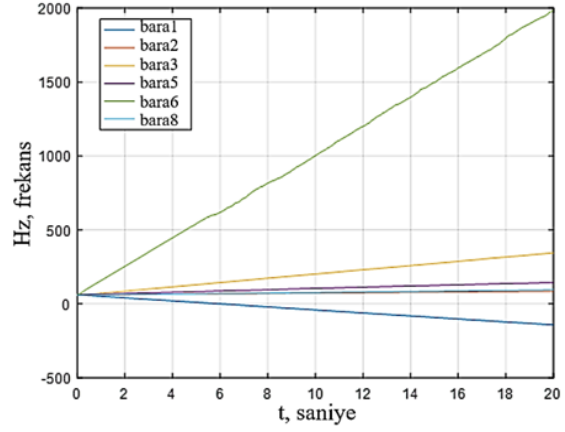
(a) Mevcut durum



(b) Mevcut durum



(c) Test sistemi 1



(d) Test sistemi 2

Şekil 4. (a)-(c) Jeneratör rotor açı değişimleri (b)-(d) Frekans değişimleri (12. Saat dilimi)
 ((a)-(c) Generator rotor angle changes (b)-(d) Frequency changes (12th time zone))

profillerinin her saat dilimi için tekrarlandığında yeni üretim birimlerine rağmen toplam eylemsizlik sabiti azaldığından ötürü sistem yeterli senkronizma ve sönmüleme momenti üretmediği için kararsız hale geçmiştir. Şekil 4b'deki mevcut durum, test sistemi 1 ve 2 sistemlerine ait frekans değişim grafiklerine bakıldığında frekanslarda ilk saniyeden itibaren sonsuz yönde artış ve azalış meydana geldiği görülmüştür. Sonsuz yöndeki bu değişimler, bu sistemlerin rotor açı kararsızlığına ek olarak frekans bakımından da kararsız olduğunu göstermektedir. Seçilen arızanın hem dağıtık üretime hem de yük yoğunluğunun fazla olduğu bir noktaya yakın olması ayrıca sistemde arızayı tolere edebilecek yeterli düzeyde depolanmış enerjinin olmaması sistemlerde görülen kararsızlık durumunda etkili olmuştur.

4.2. Senaryo 2 (Scenario 2)

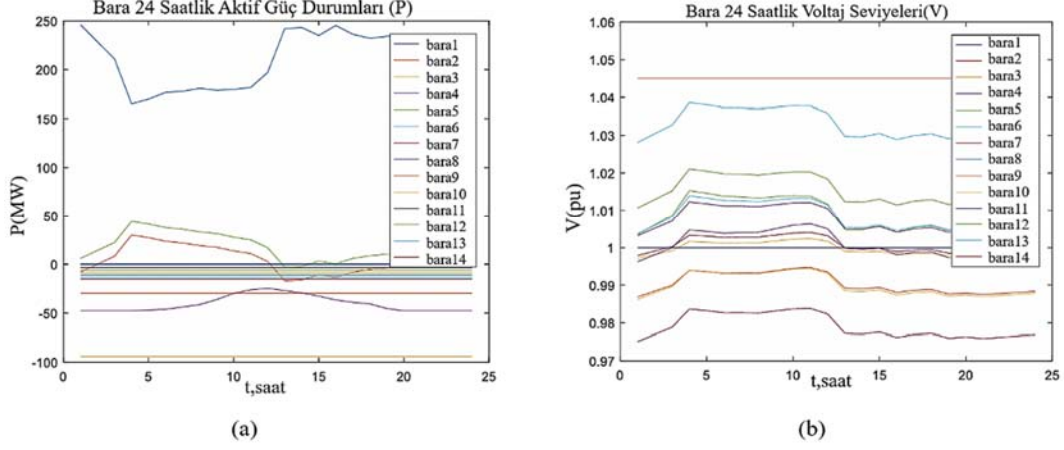
Senaryo 1'de olduğu gibi dağıtık üretim ile ana üretim merkezine yakın olacak şekilde [2-3] hattında 3 nolu baraya yakın ve dağıtık üretimden uzak olacak şekilde [13, 14] hattında 13 nolu baraya yakın üç fazlı bir arıza tanımlanmıştır. Arızalar mevcut sistem, Şekil 2c ve Şekil 2d'de verilen test sistemi 3 ile test sistemi 4 için analizler yapılmıştır.

Senaryo 1'den farklı olarak değişken-belirsiz dağıtık üretim sayısının artırıldığı Şekil 2c'deki test sisteminin yük akış çalışması sonucu elde edilen gerilim ve güç değişimleri Şekil 5'deki gibi elde edilmiştir.

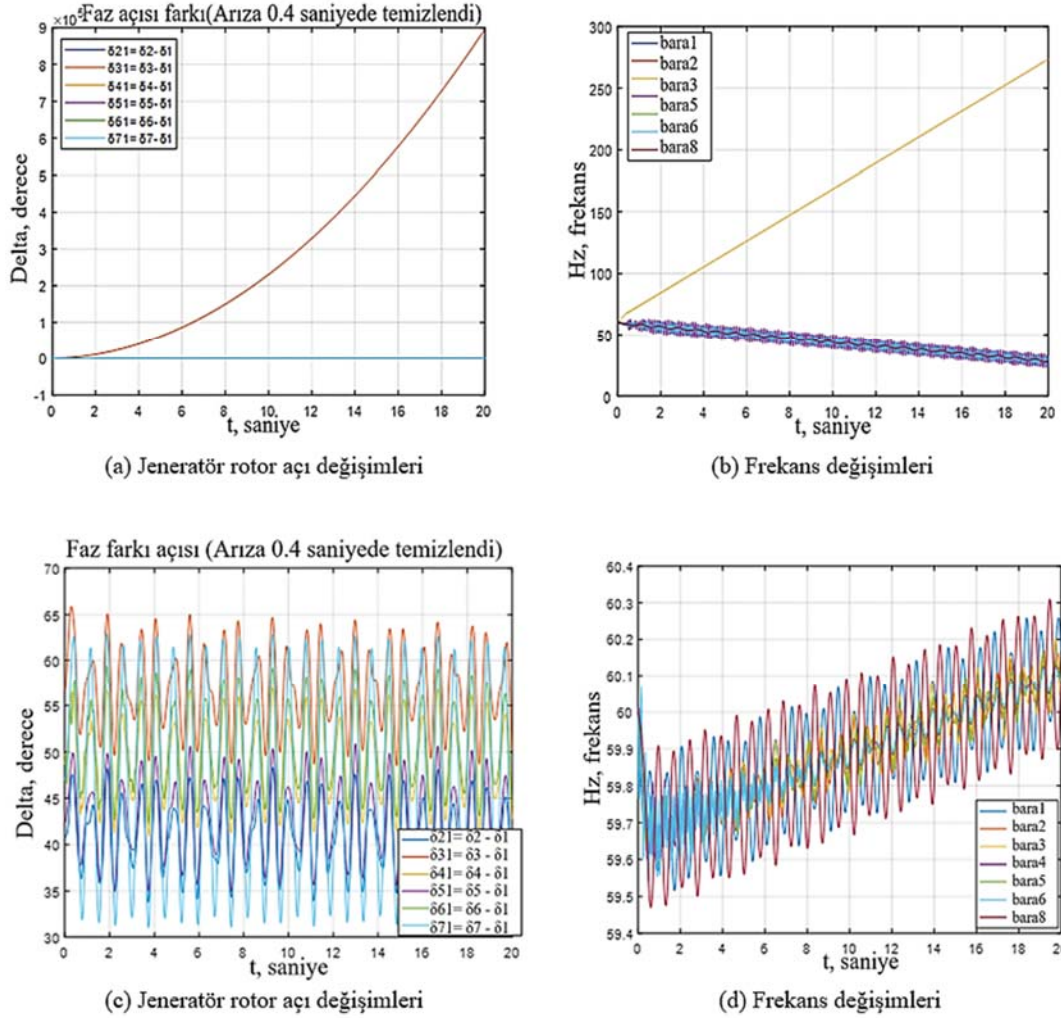
Grafiklerde negatif değerler tüketim baralarını, pozitif değerler üretim baralarını ve sıfır değeri de geçiş baralarını temsil etmektedir. Şekil 5a'da farklı karakteristiğe sahip güneş (güç eğrisinde mor ile ifade edilen) ve rüzgâr (güç eğrisinde yeşil ve kırmızı ile ifade edilen) dağıtık üretim birimlerinin sistemde aynı anda var olmaları, sisteme sağlanmış 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 5b'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 gelmiştir. Özele indirdiğimizde ise en büyük değişim %1,2 seviyesindeki değişimle 5 nolu barada görülmekte olup bunu 4, 12 ve 13 nolu baralar takip etmektedir. Bununla beraber sistem genelinde oluşan güç ve gerilim değişimleri nominal sınırlar içerisinde meydana gelmiştir. Senaryo 1'i de göz önünde bulundurduğumuzda mevcut sisteme daha fazla dağıtık üretimi birimi entegre etmek ekstra güç bakımından büyük avantaj sağlarken gerilimde ise daha küçük değişim yaratması bu sistemin gerilim kararlılığı üzerinde iyileştirici etkisinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Simülasyon analiz sıralamasına göre geçici durum üzerinden rotor açı ve frekans kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Geçici durum 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. Amaç sisteme dağıtık üretim

birimleri dâhilken arıza noktasının ana üretim merkezine yakınlığı ve uzaklığının kararlılık üzerindeki etkisini gözlemlemektir. Oluşturulan bu arızalar 0.4 saniyede temizlenecek şekilde 20 saniyelik bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan arızalara sistemin verdiği

cevap şekil 4’de gösterildiği gibidir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında [2-3] hattında 3 nolu baraya yakın bir arıza karşısında kararsız olan Şekil 6a’da gösterilen rüzgâr ve güneş enerjisi modifiye edilen test sistemi, mevcut durum çalışmalarında olduğu gibi 0.4



Şekil 5. 24 saatlik (a) Güç değişimi, (b) Bara gerilim değişimi (For 24 hours (a) Power change, (b) Bus voltage change)



Şekil 6. (a)-(c) 2-3 hattında 3 nolu baraya yakın bir arıza durumu (b)-(d) 13-14 hattında 13 nolu baraya yakın bir arıza durumu (16. saat dilimi) ((a)-(c) A fault condition on line 2-3 close to bus number 3 (b)-(d) A fault condition on line 13-14 close to bus number 13 (16th time zone))

saniyelik temizlenme süresince kararsızlığını devam ettirmektedir. Kararsızlığın dağıtık üretim birimlerinin sisteme entegre edilmesinden sonra da devam etmesinde aşağıdaki etmenler etkili olmuştur. Bunlar;

- 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 etmenler sistemde rotor açısı kararsızlığına neden olmuştur. Frekans kararlılığı açısından Şekil 6a'daki frekans değişimi incelendiğinde ise sistemin frekansında sonsuz yönlü değişimler meydana gelmesinden ötürü sistemin ilk andan beri kararsız olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu tip ciddi arızalar karşısında sistemde yeterli seviyede enerji üretiminin veya depolanmış enerjinin olmaması, sistemin yeterli senkronizma ve sönmleme momenti üretememesi ayrıca enerji talebinin sürekli devam etmesi karşısında bu talebe daha fazla cevap veremeyen sistemin rotor açısı ve frekans kararsızlığından dolayı çökmesi olayı kaçınılmazdır.

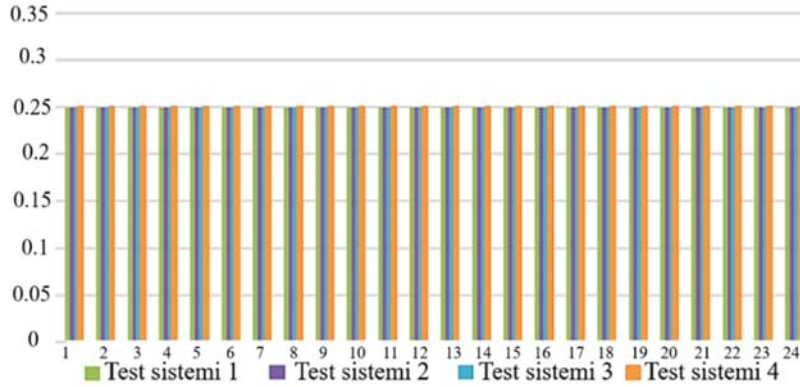
4.3. Senaryo 3 (Scenario 3)

Tüm test sistemlerinde temizleme süresi 0,25 kabul edilip 24 saat için temizleme sürelerine bakılmıştır. Test sistemleri 3 ve 4'teki güneşe ait atalet sabiti 0,2 yerine 2,5 olması durumu için dağıtık üretim ile ana üretim merkezine yakın olacak şekilde [2-3] hattında 3 nolu baraya yakın ve dağıtık üretimden uzak olacak şekilde [13, 14] hattında 13 nolu baraya yakın üç fazlı bir arıza tanımlanmıştır. Yük akış çalışması sonucu sisteme ait gerilim ve güç değişimleri Senaryo 2'ye ait Şekil

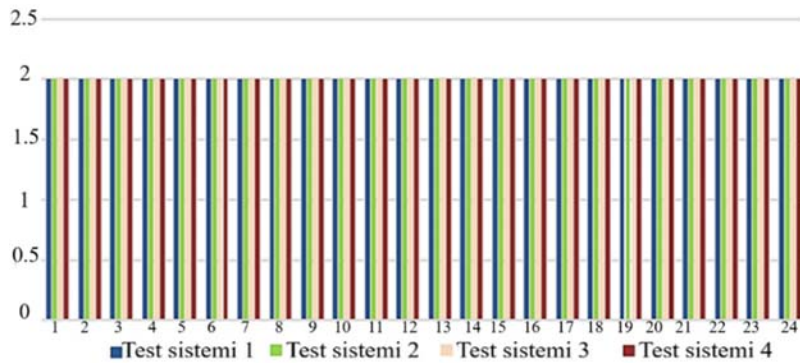
5'deki değişimlerle aynı olduğu görülmüştür. Senaryo 2'de olduğu gibi her iki arıza tekrarlandığında ise Şekil 6'da 16. saat için kararlılık cevaplarına benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 7'de 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi dikkate alınarak üretim merkezine yakın noktada yapılan arıza analizlerinin toplu sonucu verilmiştir. Şekil 8'de ise 24 saatlik üretim ve tüketim profillerinin her saat dilimi dikkate alınarak üretim merkezine uzak noktada yapılan arıza analizlerinin toplu sonucu verilmiştir.

Şekil 7'de üretim birimine yakın noktada bir arıza senaryosu üzerinden tüm test sistemlerinin temizleme sürelerine bakılmıştır. Temizleme süresi 0,25 kabul edilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere tüm test sistemlerinin yeterli sönmleme momenti üretilmediğinden sistemler bu arıza karşısında kararlılığını koruyamamıştır. Şekil 8'de ise üretim birimlerine uzak noktada bir arıza senaryosu üzerinden tüm test sistemlerinin temizleme sürelerine bakılmıştır. Tablodan görüldüğü üzere üretim birimlerine uzak noktada oluşan arızadan sistemler etkilenmemiştir.

H sabitindeki artışın toplam sistem ataletini artırdığı için üretim birimlerine yakın noktada olan arızalar karşısında daha iyileştirici bir etki oluşturması beklenirken 14 baralı sistem yapısı itibarıyla küçük bir güç sistemi olduğundan sistemin üretim birimlerinin yakınında bulunan arızadan büyük güçteki güç sistemlerine göre daha fazla etkilendiği görülmüştür. Dolayısıyla sisteme eklenen dağıtık üretim birimlerinin artması arıza olması durumunda sistemde herhangi bir iyileştirici etki göstermemiştir. Bu sonuca varırken sistemin mevcut yük yoğunluğuna ek olarak sisteme eklenen mesken ve sanayi tipi yüklerin de etkili olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Dolayısıyla 14 baralı güç sistemi herhangi bir arıza anında bozulmaya giderken sistemin yapısından kaynaklı H sabitinin olumlu yönde etkisi görülmemiştir [22, 23].



Şekil 7. [2, 3] hattı arasında 3. baraya yakın arıza durumu için temizlenme süre değişimi (saniye)
(Clearing time change (seconds) for the fault condition close to the 3rd busbar between the [2, 3] line)



Şekil 8. [13, 14] hattı arasında 13. baraya yakın arıza durumu için temizlenme süre değişimi (saniye)
(Clearing time change (seconds) for the fault condition close to the 13rd busbar between the [13, 14] line)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, 14 baralı güç sistemi üzerine yenilenebilir enerjiye dayalı aralıklı ve değişken yapıdaki dağıtık üretim ve değişken yapıdaki tüketim birimleri modifiye edilerek oluşturulan 4 farklı test sisteminin kararlılığında meydana gelen değişimler gözlemlenmiş ve yük akışı gerçekleştirilerek sistem içerisindeki parametreler üzerinden gerilim kararlılığı analiz edilmiştir. Yük akış analizi sonucu elde edilen verilerden yola çıkılarak oluşturulan arıza durumları ile rotor açığı ve frekans kararlılığı analiz edilmiştir. Çalışmada, 4 farklı test sistemi ve bu test sistemlerine özgül entegrasyon koşullarının oluşturulması analiz sonuçlarında farklı durumların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu durum ise sistemi genel olarak yorumlamak yerine her sistemi kendi koşullarında incelemenin daha doğru olacağı sonucunu doğurmuştur. Bu değerlendirmeye bağlı olarak sistem incelendiğinde aşağıdaki sonuca ulaşılmıştır:

14 baralı güç sistemine ait test sistemleri için yenilenebilir enerjiye dayalı dağıtık üretim birimlerinin varlığı gerilim kararlılığında olumlu bir etkiye sahipken arıza konumuna ve eylemsizlik sabitine bağlı olarak rotor açığı ve frekans kararlılığında sistemin arıza karşısında yeterli sönümleme momenti üretilmediğinden kararlılığını koruyamadığı görülmüştür. Literatürdeki büyük güç sistemlerindeki arıza senaryoları incelendiğinde 14 baralı güç sisteminin küçük bir güç sistemi olmasından ötürü oluşacak olan arızalardan lokal olarak değil de bütün olarak etkilendiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan bu çalışmada her test sisteminin farklı kararlılık cevapları vermesi gerçek şebekelerde de farklı kararlılık cevapları vereceği düşüncesine varmamıza neden olmaktadır. Yenilenebilir enerjiye dayalı güç sistemlerinin güç kalitesi, güç sistemlerine entegrasyonu ve olası arızalar karşısında güç sistemlerinin genelde veya özelde vereceği cevaplar bu sistemlerin hayatımızdaki önemli yerinden ötürü araştırılması gereken konuların başında gelmektedir. Bu amaçla güç sistemlerine dağıtık üretim birimlerinin ve değişken tüketim birimlerinin entegrasyonunda akıllı teknolojiler de dâhil edilerek en uygun koşulların sağlanmasına yönelik çalışmalar hız kesmeden devam ettirilmelidir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma 1002 program kodlu 118E863 nolu proje kapsamında TÜBİTAK'ın sağladığı destekle tamamlanmıştır. Her zaman bilimin ve bilime yapılan katkılarının destekçisi olan TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürler.

Kaynaklar (References)

1. Tuttokmağlı Ö., Kaygusuz A., Transient Stability Analysis of Power Systems with Distributed Generation, International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), 1-6, 2019.
2. Tuttokmağlı Ö., Kaygusuz A., Transient Stability Analysis of a Power System with Distributed Generation Penetration, 7th International Istanbul Smart Grid Congress and Fair (ICSG), IEEE, 1-5, 2019.
3. Borunda A., Why renewables aren't to blame for California's blackouts, <https://www.nationalgeographic.com/science/2020/08/why-renewables-arent-reason-california-blackouts/>, August 25, 2020.
4. Zuo J., Zhang B., Xiang M., Shen Y., Chen Y., Study of transient voltage stability with transient stability probing method in human power grid, 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), 252-256, 2017.
5. Xu J. vd., Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis, 2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 1-6, 2013.
6. Angelim J.H., Affonso C.M., Impact of distributed generation technology and location on power system voltage stability, IEEE Lat. Am. Trans., 14 (4), 1758-1765, 2016.
7. Eleschová Ž., Belán A., Cintula B., Bendík J., ve Cenky M., Smart Grids analysis - View of the transmission systems voltage stability, 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 1-6, 2018.
8. Samanta S. K., Chanda C. K., Investigate the impact of smart grid stability analysis on synchronous generator, 2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON), 241-247, 2017.
9. Wu Y.-K., Ye G.-T., Chang L.-T., Hsieh T.-Y., Jan B.-S., Capacity determination of a dynamic energy storage system in an island power system with high renewable energy penetration, 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), 1698-1701, 2017.
10. Khosravi A., Jazaeri M., Mousavi S. A., Transient stability evaluation of power systems with large amounts of distributed generation, 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, 1-5, 2010.
11. Sharma R., Singh M., Jain D. K., Power system stability analysis with large penetration of distributed generation, 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON4), 1-6, 2014.
12. Wu W., Wang K., Li G., Hu Y., A stochastic model for power system transient stability with wind power, 2014 IEEE PES General Meeting | Conference Exposition, 1-5, 2014.
13. Wei S., Zhou Y., Huang Y., Synchronous Motor-Generator Pair to Enhance Small Signal and Transient Stability of Power System with High Penetration of Renewable Energy, IEEE Access, 5, 11505-11512, 2017.
14. Tür M. R., Yaprakdal F., Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesi Analizi, Kontrolü ve İzlemesi, Gazi Univ. J. Sci. Part C Des. Technol., 8, 3, 2020.
15. Ortiz-Villalba D., Rahmann C., Alvarez R., Canizares C. A., Strunck C., Practical Framework for Frequency Stability Studies in Power Systems with Renewable Energy Sources, IEEE Access, 8, 202286-202297, 2020.
16. Khaleel M., Yusupov Z., Yasser N., Elkhazondar H., Ahmed A. A., An Integrated PV Farm to the Unified Power Flow Controller for Electrical Power System Stability, Int J Electr Eng Sustain, 18-30, 2023.
17. Wu Q.-H. vd., Control and Stability of Large-scale Power System with Highly Distributed Renewable Energy Generation: Viewpoints from Six Aspects, CSEE J. Power Energy Syst., 9 (1), 8-14, 2023.
18. Qays M. O., Ahmad I., Habibi D., Aziz A., Mahmoud T., System strength shortfall challenges for renewable energy-based power systems: A review, Renew. Sustain. Energy Rev., 183, 113447, 2023.
19. Wang S., Dong Q., Zhang J., Sun J., Gu X., Chen C., Robustness assessment of power network with renewable energy, Electr. Power Syst. Res., 217, 109138, 2023.
20. Kundur P., Power System Stability and Control, 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
21. Tuttokmağlı Ö., Akıllı Şebekelerin Sistem Kararlılığı Bakımından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2019.
22. Acar A., Yenilenebilir Enerjiye Dayalı Güç Sistemlerinde Enerji Depolamanın Sistem Kararlılığı Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, 2022.
23. Kaygusuz A., Dağıtık-Belirsiz Üretim ve Tüketim Koşullarının Güç Sistemlerinin Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, TÜBİTAK, 118E863, 2021.