



Improvement of voltage stability and loading capacity using FACTS devices and distributed generation resources in power systems

Umut Emre Uzun^{1*}, Nihat Pamuk¹, Sezai Taşkın²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Zonguldak Bülent Ecevit University, 67100, Zonguldak, Türkiye

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Manisa Celal Bayar University, 45140, Manisa, Türkiye

Highlights:

- Determining the optimal location of distributed generation (DG) resources and FACTS devices
- Improvement of the power system voltage profile and loading capacity in cases of the base, overloading, and line outage
- Modeling a real power system (NWA power system) and improving the voltage stability

Keywords:

- Voltage stability
- FACTS devices
- Distributed generation resources

Article Info:

Research Article

Received: 11.04.2024

Accepted: 18.06.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1280971

Correspondence:

Author: Umut Emre Uzun

e-mail:

umut.uzun@beun.edu.tr

phone: +90 372 291 1445

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the IEEE-30 bus test system and the Northwest Anatolian (NWA) real power system are investigated in case of base, overload, and line outage. Voltage stability of the power systems is improved by connecting Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) devices and Distributed Generation (DG) resources to the optimal location. The optimal location of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) is the most critical transmission line, and it is determined by the line stability index. On the other hand, the optimal locations of the Static Var Compensator (SVC) and DG resources are the weakest buses, and they are determined by the continuation power flow analysis. The flowchart of the study is given in Figure A.

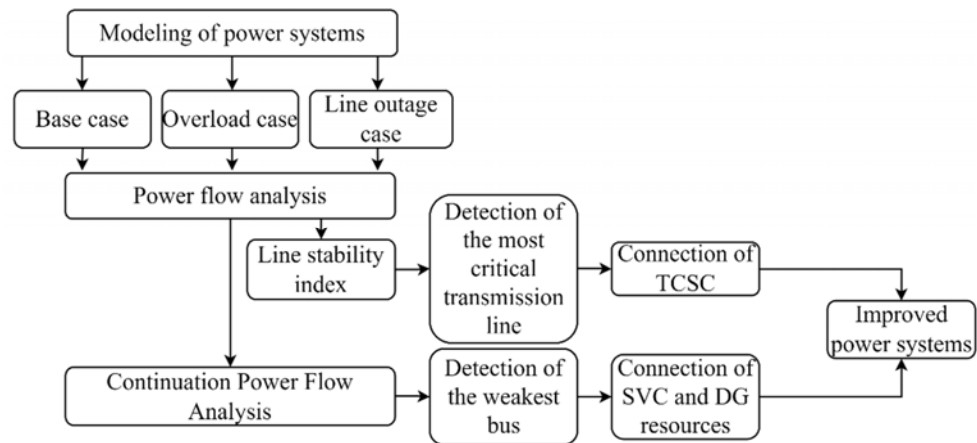


Figure A. The flow chart of the study

Purpose: It is aimed to improve the voltage stability of the IEEE-30 bus test system and NWA real power system with FACTS devices and DG resources placed in the optimal location.

Theory and Methods: In this paper, IEEE-30 bus test system and NWA real power system are modeled in Power System Analysis Toolbox (PSAT). Voltage stability analyses of both power systems are carried out under the base, overload, and line outage situations. SVC and DG resources are connected to the weakest buses and TCSC is connected to the most critical transmission line. The weakest buses are determined by continuation power flow analysis, and the most critical transmission lines are determined by the line stability index in power systems. The changes are analyzed in the bus voltage values and loading parameters of the power systems by examining bus voltage profiles and loading parameter curves.

Results: When all proposed FACTS devices and DG resources are connected to the IEEE-30 bus test system in case of base, overload, and line outage, the weakest bus voltage values are increased by %1.44, %5.96, %6.99 and the loading parameter is increased by %32.16, %33.37, %86.90 for each case respectively. Similarly in the NWA real power system, the weakest bus voltage values are increased by %6.14, %10.22, %8.92 and the loading parameter is increased by %37.42, %35.96, %37.93 for each case respectively.

Conclusion: It is important to analyze and improve the voltage stability in power systems. In this study, FACTS devices and DG resources are used to improve the voltage stability in the power systems, and their optimal locations are successfully determined by continuation power flow analysis and line stability index.



Güç sistemlerinde FACTS cihazları ve dağıtık üretim kaynakları kullanılarak gerilim kararlılığının ve yükleme kapasitesinin iyileştirilmesi

Umut Emre Uzun^{1*}, Nihat Pamuk¹, Sezai Taşkın²

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, Türkiye

²Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- FACTS cihazlarının ve dağıtık üretim kaynaklarının optimal yerleşim yerinin belirlenmesi
- Temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında güç sistemi gerilim profilinin ve yüklenme kapasitesinin iyileştirilmesi
- Gerçek bir güç sisteminin (Kuzeybatı Anadolu güç sistemi) modellenmesi ve gerilim kararlılığının iyileştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.04.2024

Kabul: 18.06.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1280971

Anahtar Kelimeler:

Gerilim kararlılığı,
FACTS cihazları,
dağıtık üretim kaynakları,
Kuzeybatı Anadolu güç
sistemi

ÖZ

Gerilim kararlılığı, güç sistemlerinde incelenmesi gereken önemli bir konudur. Sürekli artan elektrik enerjisi talebi, artan talebi karşılamak için yeni elektrik üretim santrallerinin kurulumu ve güç sistem arızaları gerilim kararlılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüzde gerilim kararlılığını iyileştirmek için güç sistemlerinde Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS cihazları) kullanılmakta olup, ayrıca enerji talebini karşılamak ve gerilim kararlılığını iyileştirmek için güç sistemlerine Dağıtık Üretim Kaynakları (DGs) entegre edilmektedir. Bu çalışmada, IEEE 30 baralı güç sistemi ile Kuzeybatı Anadolu (KBA) güç sistemi, gerilim kararlılığı bakımından temel (nominal), aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında incelenmiştir. İncelenen güç sistemlerine FACTS cihazlarından Statik Var Kompansatör (SVC) ve Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC), DGs'lerden ise Yakıt Hücresi (YH), Güneş Enerji Santrali (GES) ve Rüzgâr Enerji Santrali (RES) ayrı ayrı ve birlikte bağlanmıştır. Güç sistemlerinin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler analiz edilmiştir.

Improvement of voltage stability and loading capacity using FACTS devices and distributed generation resources in power systems

HIGHLIGHTS

- Determining the optimal location of FACTS devices and distributed generation resources
- Improvement of the power system voltage profile and loading capacity in cases of the base, overloading, and line outage
- Modeling a real power system (North-west Anatolia power system of Turkey) and improving the voltage stability

Article Info

Research Article

Received: 11.04.2024

Accepted: 18.06.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1280971

Keywords:

Voltage stability,
FACTS devices,
distributed generation
resources,
North-west Anatolia power
system of Turkey

ABSTRACT

Voltage stability is an important issue to be studied in power systems. The ever-increasing demand of electrical energy, new power generation plant installations to meet the increasing demand to meet the increasing demand, and failures in the power system adversely affect the voltage stability. Today, Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS devices) are used in power systems to improve voltage stability, and Distributed Generation sources (DGs) are integrated into power systems to meet energy demand and improve voltage stability. In this study, the IEEE 30 bus power system and the North-west Anatolia (KBA) power system are investigated in base (nominal), overload, and line outage cases regarding voltage stability. Static Var Compensator (SVC) and Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) from FACTS devices, Fuel Cell (YH), Solar Power Plant (GES), and Wind Power Plant (RES) from DGs are connected separately and together in the power systems. Changes in bus voltage values and loading parameters of power systems are analyzed.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *umut.uzun@beun.edu.tr, *nihatpamuk@beun.edu.tr, sezai.taskin@cbu.edu.tr /
Tel: +90 372 291 1445

1. Giriş (Introduction)

Teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı elektrik enerjine olan talebi her geçen gün arttırmaktadır. Artan talep üretim santralleri tarafından karşılanamadığı durumlarda iletim kayıpları artmakta ve bara gerilim değerlerinde düşüşler meydana gelmektedir [1]. Talep edilen enerjinin karşılanması için güç sistemlerine yeni üretim santrallerinin eklenmesi ise enerji yönetiminde karmaşıklığa sebep olmaktadır. Her iki durumda da, güç sistemlerinde gerilim kararlılığı problemi ortaya çıkabilmektedir. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı, bara gerilim değerlerinin tüm koşullar altında (herhangi bir bozucu etki olması durumunda bile) belirlenen sınırlar arasında kalabilmesi olarak ifade edilmektedir [2].

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığını etkileyen pek çok problem bulunmaktadır. Yük artışı, hat kopması, kısa devre, generatör arızası ve transformatör kademe değişimi bu problemlerden bazılarıdır [3]. Bu ve bunun gibi problemler güç sistemlerinin aktif ve/veya reaktif güç talebini arttırmaktadır. Artan talebin karşılanamaması durumunda bara gerilim değerlerinde düşüşler görülmekte ve problem(ler)in uzun süre devam etmesi durumunda gerilim çökmesi meydana gelmektedir [4]. Tüm bu problemlerin önüne geçebilmek, güç talebini karşılamak ve gerilim kararlılığını iyileştirmek için güç sistemlerine farklı yöntemler ile müdahale edilmektedir. Koruma elemanlarının, otomatik gerilim regülatörlerinin (AVR), güç sistemi kararlı kılıcılarının (PSS), geleneksel kompanzasyon sistemlerinin, FACTS cihazlarının veya DGs'lerin kullanımı bu yöntemlerden bazılarıdır [5–7]. Literatürde bu yöntemler kullanılarak pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Sriram ve Kishore [8] IEEE 9 baralı güç sistemine mesafe röleleri ve devre kesicileri yerleştirilerek faz-toprak arızasını incelemişlerdir. Çalışmada mesafe röleleri ile arızanın yeri tespit edilmiş, devre kesicileri ile ise iletim hatlarının açılması sağlanmıştır. Essallah vd. [9] IEEE 39 baralı güç sistemine AVR ve PSS cihazları ile kontrol edilen rüzgâr enerji santralleri yerleştirilerek güç sisteminin küçük sinyal kararlılığını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada Tip 3 AVR ve tip 1 PSS kullanımının güç salınımlarını azaltmada ve kararlılığı iyileştirmede en iyi sonucu verdiği tespit edilmiştir. Laghari vd. [10] güç sistemlerinde yapay sinir ağları, bulanık mantık kontrolü, uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS), genetik algoritma (GA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) teknikleri ile verimli ve güvenilir yük atma yöntemlerini araştırmışlar ve bu yöntemlerin birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajlarını tartışmışlardır. El-Ela vd. [11] üç farklı güç sistemine DGs ve kapasitör grupları eklemiştir. Su döngüsü algoritması kullanılarak optimal bağlantı yeri ve kapasitesi belirlenen DGs'lerin ve kapasitör gruplarının güç kayıplarını ve enerji üretim maliyetini azalttığı, teknik, ekonomik ve çevresel faydalar sağladığı görülmüştür.

Literatürde FACTS cihazlarının kullanımı ve yerleşim yerinin tespiti ile ilgili çalışmalar incelendiğinde; Roshan vd. [12] IEEE 14 baralı güç sistemine SVC cihazı bağlayarak sistemin gerilim profilini iyileştirmiş, güç kayıplarını azaltmış ve güç akışını düzenlemişlerdir. Çalışmada FACTS cihazının optimal yerleşim yerinin tespiti için güç kararlılık indeksi (PSI) ve hızlı gerilim kararlılık indeksi (FVSI) kullanılmıştır. Reaktif güç kaybını azaltmada ve güç akışını düzenlemede FVSI indeksinin, aktif güç kaybını azaltmada ise PSI indeksinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Kamarposhti ve Lesani [13] IEEE 14 baralı güç sistemine en zayıf barayı sürekli güç akışı analizi ile tespit ederek bu baraya hem seri hem de paralel FACTS cihazı yerleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda paralel FACTS cihazlarının seri FACTS cihazlarına kıyasla gerilim profilini ve maksimum yüklenme parametresini iyileştirmede daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Oukennou ve Sandali [14] L_{index} , FVSI,

NLSI, VQI, LQP ve SFVSI hat kararlılık indekslerini güç sistemi nominal durumunda ve çeşitli arıza durumlarında iken kıyaslayarak gerilim kararlılığını değerlendirmede SFVSI hat kararlılık indeksinin daha duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir.

DGs'lerin kullanımı ve yerleşim yerinin tespiti ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ise; Hu vd. [15] IEEE 33 baralı güç sisteminde her bir baranın gerilim kararlılığını oransal mevcut iletim kapasitesi indeksi (RATCI) ile değerlendirmiş ve güç sistemine dağıtık yenilenebilir enerji kaynakları entegre ederek gerilim kararlılığını iyileştirmişlerdir. Duong vd. [16] IEEE 33 ve IEEE 69 baralı güç sistemlerinde GES'in optimal yerleşim yerini ve boyutunu Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BBO) algoritmasını kullanarak tespit etmişlerdir. GA, PSO ve Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ile karşılaştırılan BBO algoritmasının daha hızlı yakınsama ile yüksek doğrulukta çözüm sunduğu ifade edilmiştir. AL Rhia vd. [17] IEEE 33 baralı güç sisteminde en zayıf baraları sürekli güç akışı analizi ile tespit etmişler ve bu baralara farklı senaryolarda çeşitli DGs ve Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) bağlamışlardır. Yapılan çalışma ile güç sistemi gerilim profilinin iyileştiği ve kayıplarının azaldığı görülmüştür. Essallah vd. [18] IEEE 33 ve IEEE 69 baralı güç sistemlerine farklı yüklenme koşulları altında DGs'ler yerleştirmişlerdir. DGs'lerin optimal yerleşim yeri gerilim kararlılığı kazanç indeksi (VSMI) ile, optimal kapasitesi ise eğri uyurma yaklaşımı ile tespit edilmiştir. Bu çalışmalar ve yapılan daha pek çok çalışma ile güç sistemlerinin incelenmesi ve iyileştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, IEEE 30 baralı enterkonnekte güç sistemi ve Türkiye Kuzeybatı Anadolu (KBA) enterkonnekte güç sisteminin bir bölümü gerilim kararlılığı bakımından temel durumu, aşırı yüklenme ve hat kopması arızalarının meydana geldiği durumlarda incelenmiştir. Güç sistemlerinin gerilim kararlılığını iyileştirmek için paralel FACTS cihazlarından SVC, DGs'lerden ise GES, RES ve YH en zayıf baralara; seri FACTS cihazlarından TCSC ise en kritik durumdaki enerji iletim hatlarına bağlanmıştır. Güç sistemlerindeki en zayıf baralar sürekli güç akışı analizi ile, en kritik enerji iletim hatları ise SFVSI hat kararlılık indeksi ile tespit edilmiştir. FACTS cihazları ve DGs'ler güç sistemlerine ayrı ayrı ve birlikte bağlanarak bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Literatür incelendiğinde KBA güç sisteminde DGs'lerin yerleşimi ile ilgili bir çalışmanın yapılmadığı ve günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları entegrasyonunun artması sonucunda mevcut şebekenin gerilim kararlılığı bakımından incelenmediği tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda KBA güç sistemine DGs'lerin ve FACTS cihazlarının yerleştirilmesi ile literatüre katkı sağlanmıştır.

Altı bölümden oluşan çalışmanın ikinci bölümünde güç sistemlerinde kararlılık analizi, üçüncü bölümünde FACTS cihazları ve dördüncü bölümünde dağıtık üretim kaynakları hakkında teorik bilgiler yer almaktadır. Çalışmanın beşinci bölümünde FACTS cihazları ve DGs'lerin yerleştirildiği güç sistemlerinin kararlılık analiz sonuçları verilirken, altıncı bölüm olan sonuç bölümünde çalışmanın değerlendirilmesi yapılmaktadır.

2. Kararlılık Analizleri (Stability Analysis)

2.1. Güç Akışı Analizi (Power Flow Analysis)

Güç akışı analizi, güç sistemlerinde bara gerilim büyüklüklerini, faz açılarını, aktif ve reaktif güç değerlerini hesaplamak için kullanılan iteratif bir analiz yöntemidir [19]. Bu çalışmada literatürde en çok kullanılan Newton-Raphson güç akışı analizi kullanılmıştır. Newton-Raphson güç akışı analizine göre n-baralı bir güç sistemi

incelendiğinde, bu güç sisteminin i'inci barasındaki aktif ve reaktif güç değerleri Eş. 1 ve Eş. 2'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j=1, j \neq i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (1)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) - \sum_{j=1, j \neq i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2)$$

Aktif ve reaktif güç denklemlerinin Taylor serileri açılır, yüksek mertebeli türevleri ihmal edilir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa Eş. 3 elde edilmektedir [20].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = [J^{(k)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad (3)$$

Burada Jakoben matrisi, aktif ve reaktif güç denklemlerinin bara gerilim büyüklüklerine ve faz açılarına göre kısmi türevlerini içermektedir. Eş. 4 ve Eş. 5'teki ΔP ve ΔQ değerleri, Eş. 1 ve Eşiklik 2 ile hesaplanan aktif ve reaktif güç değerlerinden tahmini güç değerinin çıkarılması ile elde edilmektedir [21, 22].

$$\Delta P^{(k)} = P_{\text{tahmin}}^k - P_{\text{hesaplanan}}^k \quad (4)$$

$$\Delta Q^{(k)} = Q_{\text{tahmin}}^k - Q_{\text{hesaplanan}}^k \quad (5)$$

ΔP ve ΔQ değerleri Eş. 3'te yerine yazıldığında $\Delta \delta$ ve ΔV değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan $\Delta \delta$ ve ΔV değerleri Eş. 6 ve Eş. 7'de kullanılarak her bir baranın faz açısı ve gerilim değeri hesaplanmaktadır.

$$\delta_i^{k+1} = \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \quad (6)$$

$$|V_i^{k+1}| = |V_i^k| + \Delta |V_i^k| \quad (7)$$

Geleneksel Newton-Raphson güç akışı analizinde Jakoben matrisi gerilim kararlılık sınırında (maksimum yüklenme noktasında) tekil durumdadır. Bu noktada çözümsüz olan Jakoben matrisinin çözülebilmesi için güç akış denklemlerine yeni bir değişken eklenmektedir [23].

2.2. Sürekli Güç Akışı Analizi (Continuation Power Flow Analysis)

Sürekli güç (yük) akışı analizi, güç sistemlerinin farklı yüklenme koşulları altında incelenmesi ve maksimum yüklenme kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılan önemli bir analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemi ile her bir baranın kararlı ya da kararsız duruma gerilim profilleri aracılığı ile belirlenmektedir [24]. Newton-Raphson güç akış denklemlerine yeni bir değişken olan yüklenme parametresinin (λ) eklenmesi ile Eş. 8 elde edilmektedir.

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (8)$$

Bu eşitlik sürekli güç akışı analizdeki doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin en genel halidir. Sürekli güç akışı analizi Şekil 1'de görüldüğü üzere tahmin edici ve düzeltici adım olmak üzere iki adımdan meydana gelmektedir.

2.2.1. Tahmin edici adım (Predictor step)

Tahmin edici adımda ilk olarak Eş. 8'in türevi alınarak Eş. 9'da verilen tanjant vektörü elde edilmektedir [24, 25].

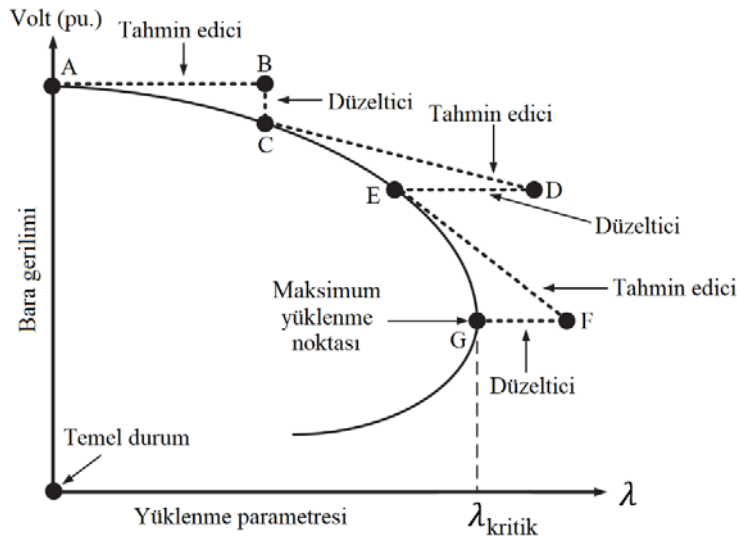
$$[F_\delta \ F_V \ F_\lambda] \begin{bmatrix} d_\delta \\ d_V \\ d_\lambda \end{bmatrix} = 0, \quad t = \begin{bmatrix} d_\delta \\ d_V \\ d_\lambda \end{bmatrix} \quad (9)$$

Burada tanjant vektörü (t) bileşenlerinden biri +1 veya -1 olarak belirlenerek Jakoben matrisinin gerilim kararlılık sınırında tekil olma durumunun önüne geçilmektedir. Eş. 9'un çözülebilmesi için güç akış denklemlerine ilave bir denklemin (e_k) eklenmesi gereklidir. Bu ilave denklem k. elemanı 1, diğer elemanları 0 olan bir satır vektörüdür. Eş. 9'a ilave denklemin eklenmesi ile Eş. 10 meydana gelmektedir.

$$\begin{bmatrix} F_\delta & F_V & F_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} [t] = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix}, \quad e_k = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0] \quad (10)$$

Eş. 10 ile tanjant vektörü bulunmakta ve tahmin işlemi Eş. 11 ile gerçekleştirilmektedir. Burada σ tahmin işleminin adım boyutudur.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix}^k + \sigma \begin{bmatrix} d_\delta \\ d_V \\ d_\lambda \end{bmatrix} \quad (11)$$



Şekil 1. Sürekli güç akışı analizi adımları (Steps of the continuation power flow analysis)

2.2.2. Düzeltici Adım (Corrector Step)

Düzeltilme adımında, tahmin etme adımındaki çözüm düzeltilmektedir. Bunun için bölgesel parametrisasyon yöntemi kullanılmaktadır [24,25]. Eş. 12'de x_k , durum değişkenleri içerisinde seçilen süreklilik parametresini, η ise bu parametrenin tahmini değerini ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} F(\delta, V, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = 0, \quad x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.3. Hat Kararlılık İndeksleri (Line Stability Indices)

Elektrik enerjisine olan talebin her geçen gün artması sonucunda günümüz güç sistemleri bara sayısı yüksek, karmaşık ve analizi zor bir yapı haline gelmektedir. Bu durumdaki güç sistemlerinde enerji iletim hatlarının kararlılığını analiz etmek için hat kararlılık indeksleri kullanılmaktadır. Hat kararlılık indeksleri, Şekil 2'de görüldüğü üzere şönt admittansı ihmal edilen 2 baralı güç sisteminin parametreleri temel alınarak türetilmiş eşitliklerdir [26]. Bu eşitlikler bara sayısı yüksek olan güç sistemlerinde, her bir enerji iletim hattına uygulanarak elde edilen sonuçlar ile tüm hatların kararlılık durumları tespit edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlar küçükten büyüğe doğru sıralanmakta ve hat kararlılık indeksi değeri yüksek olan hatlar kritik enerji iletim hattı olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 2'de sırasıyla, alıcı ve verici baralar a ve v alt indisleri ile, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri P , Q , S ile, bara gerilim büyüklüğü ve faz açısı V , δ ile, iletim hattının empedans, rezistans, reaktans ve faz açısı ise Z , R , X , θ ile ifade edilmiştir. Hat kararlılık indekslerinin çoğu iletim hattı kararlı durumda iken 0 ile 1 arasında, kararsız durumda iken ise 1'den büyük değer vermektedir [25]. Bu çalışmada, çok fazla değişkene sahip olmaması, hesaplama yükünün az olması ve diğer hat kararlılık indekslerine göre daha iyi sonuç vermesi sebebiyle SFVSI hat kararlılık indeksi kullanılmıştır [14].

2.3.1. Basitleştirilmiş hızlı gerilim kararlılık indeksi (Simplified fast voltage stability index)

Basitleştirilmiş Hızlı Gerilim Kararlılık İndeksi (SFVSI) Sahari vd. tarafından türetilmiş bir hat kararlılık indeksidir. Güç sistemlerinde iletim hattının başındaki bara (verici bara) ile sonundaki bara (alıcı bara) arasındaki açı farkı genellikle çok küçük olduğundan, bu açı farkı ihmal edilerek türetilen SFVSI hat kararlılık indeksi Eş. 13'te verilmiştir [27].

$$SFVSI = 4 \left(\frac{|V_a|}{|V_v|} \right) \left(1 - \frac{|V_a|}{|V_v|} \right) \leq 1 \quad (13)$$

3. FACTS Cihazları (FACTS Devices)

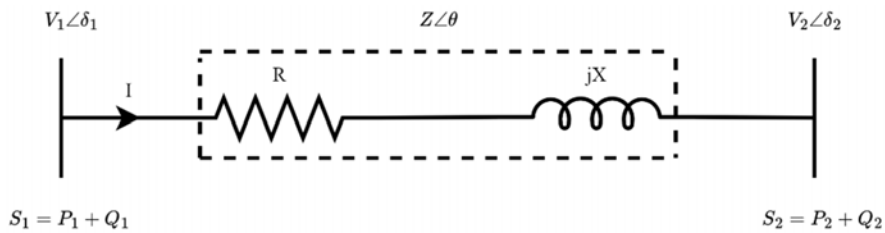
FACTS cihazları, geleneksel kompanzasyon sistemlerine kıyasla kompanzasyon işlemini hızlı ve otomatik bir şekilde gerçekleştiren, güç elektroniği elemanları ile tasarlanmış statik denetleyicilerdir.

FACTS cihazları genel olarak güç sistemlerinde güç akışı kontrolünü sağlamak, güç kayıplarını azaltmak ve bara gerilimlerini belirlenen alt ve üst sınır değerleri arasında tutmak için kullanılmaktadır [28]. Bağlantı şekline göre sınıflandırılan FACTS cihazları seri, paralel ve seri-paralel FACTS cihazları olmak üzere üç gruba ayrılırken, kontrol yapısına göre sınıflandırılan FACTS cihazları genellikle tristör kontrollü ve gerilim kaynaklı-konvertör tabanlı FACTS cihazları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [29].

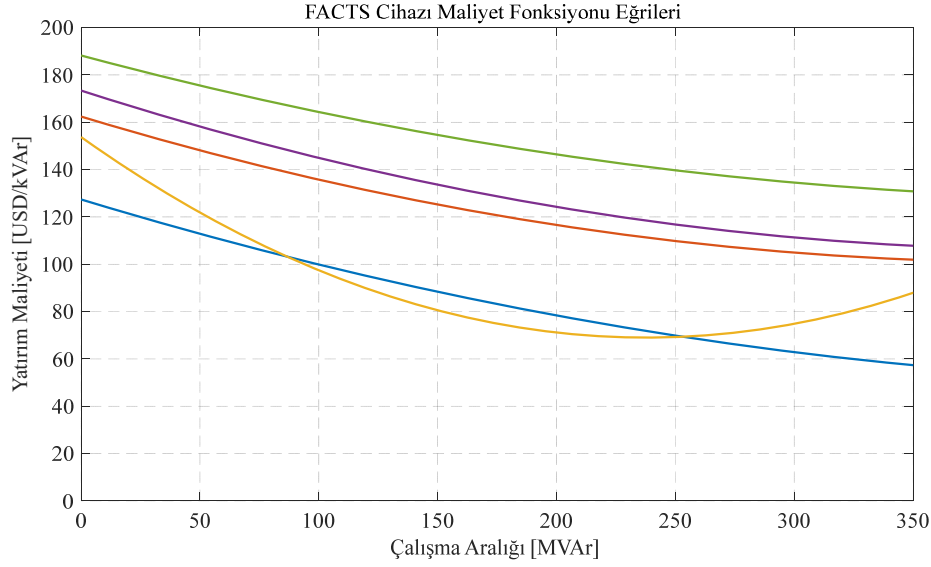
FACTS cihazlarının ilk kullanımı 1970'li yıllarda başlamıştır. General Electric (GE) firması tarafından 1974 yılında Nebraska'da kurulan Statik Var Kompanzator (SVC) cihazı kullanıma alınan ilk tristör kontrollü FACTS cihazıdır. Şu an ise dünyada 800'den fazla SVC cihazının aktif bir şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Gerilim kaynaklı-konvertör tabanlı ilk FACTS cihazı olan Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) ise Mitsubishi firması tarafından 1991 yılında geliştirilmiş ve Japonya'nın Inuyama trafo merkezinde kurulmuştur. Günümüzde farklı ülkelerde 20'den fazla STATCOM cihazı aktif bir şekilde çalışmaktadır. İlk üç fazlı Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) cihazı ise 1992 yılında ABB firması tarafından ABD'nin Arizona eyaletinin Kayenta trafo merkezinde kurulmuş ve iletim hattının kapasitesini yaklaşık olarak %30 arttırmıştır. 2004 yılının sonuna kadar başta İsveç, Çin ve Hindistan olmak üzere dünyanın farklı yerlerinde birçok TCSC cihazı kurulmuştur [30]. STATCOM ve Statik Seri Senkron Kompanzator (SSSC) cihazlarının birleşiminden meydana gelen Birleşik Güç Akış Denetleyicisi (UPFC) cihazı ise ilk olarak ABD'nin Kentucky eyaletinin Inez trafo merkezinde 1998 yılında kurulmuştur. Diğer FACTS cihazlarına kıyasla sayısı az olsa da dünyanın farklı yerlerinde UPFC cihazlarının kullanımı mevcuttur. Türkiye'de ise FACTS cihazları ile ilgili ilk çalışma 2006 yılında gerçekleştirilmiştir. "Güç Kalitesi Milli Projesi" kapsamında yapılan çalışma ile ± 50 MVAR T-STATCOM cihazı Sincan trafo merkezinde devreye alınmıştır [31]. 310 MVAR kapasitesi ile dünyanın en büyük kapasiteli TCR-SVC cihazlarından biri olan FACTS cihazı ise 2018 yılında İzmir Aliğa bölgesinde kurulmuştur.

FACTS cihazları yatırım maliyeti açısından iki alt kategoriye ayrılarak incelenmektedir. Bunlar; gerekli cihaz-ekipman maliyeti ve alt yapı maliyetidir. Cihaz-ekipman maliyeti reaktör, kapasitör, transformator vb. asli ve yedek devre ekipmanlarına, cihazın kurulu gücüne ve çevre şartlarına göre belirlenirken, alt yapı maliyeti arazi, inşaat ve kurulum işlemlerine göre belirlenmektedir. Belirtilen tüm maliyet kısıtları göz önüne alınarak elde edilen çeşitli FACTS cihazlarına ait maliyet fonksiyonu eğrileri Şekil 3'te verilmiştir [32].

Güç sistemlerinde gerekli aktif güç talebinin karşılanması için yeni enerji üretim tesislerinin ve yeni enerji iletim hatlarının kurulması gerekmektedir. Bunun yerine temel olarak güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu yapan, iletim hatlarındaki güç kayıplarını ve kayıp maliyetlerini minimize eden, ayrıca maksimum aktif güç aktarımını sağlayan FACTS cihazlarının kurulması güç sistemlerindeki aktif güç talebinin yeni enerji üretim tesisleri ya da yeni enerji iletim hatlarının kurulmasına gerek kalmadan daha uygun



Şekil 2. İki baralı güç sistemi (Two bus power system)

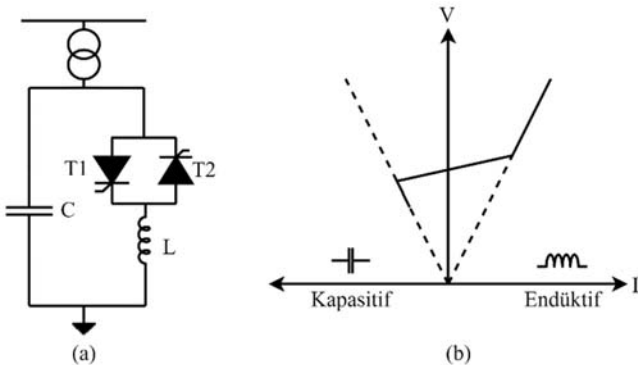


Şekil 3. Çeşitli FACTS cihazlarına ait maliyet fonksiyon eğrileri (Cost function curves of various FACTS devices)

maliyet ile karşılanmasını sağlamaktadır. Teknik özellik bakımından gerilim kaynaklı-konvertör tabanlı FACTS cihazları gerilim, faz açısı ve empedans kontrolünde daha yüksek performans özelliğine sahiptir. Ancak tristör kontrollü FACTS cihazları uygun maliyet özelliği ile ön plana çıkmaktadır [33]. Bu nedenle, bu çalışmada maliyeti en düşük olan tristör kontrollü seri ve paralel FACTS cihazları (SVC ve TCSC) kullanılmış ve güç sistemlerine etkileri analiz edilmiştir.

3.1. SVC

SVC (Statik Var Kompanzator), tristör kontrollü paralel FACTS cihazıdır. Güç sistemine akım enjekte eden SVC cihazı, reaktif güç kontrolünü sağlamak ve bara gerilim değerlerini sınır değerleri arasında tutmak için kullanılmaktadır. Şekil 4a'da görüldüğü üzere SVC cihazı tristör kontrollü reaktöre paralel bağlanan bir kapasitör bankından meydana gelmektedir. Tristörün tetikleme açısı (α) ayarlanarak reaktör ve/veya kapasitör devreye alınmakta ya da devreden çıkarılmaktadır. Bu durumda değişken değerli bir süseptans değeri oluşmakta ve sisteme enjekte edilen akım ayarlanmaktadır [34,35].



Şekil 4. SVC cihazının, a) eşdeğer devresi, b) V-I karakteristiği (SVC device, a) equivalent circuit, b) V-I characteristic)

SVC cihazı tarafından ayarlanan akım Eş. 14'te verilmiştir. Burada V , SVC cihazının bağlı olduğu baraya ait gerilim değerini, B_{SVC} ise cihazın süseptans değerini ifade etmektedir. Ayarlanan süseptans değeri ile SVC cihazının V-I karakteristiğinde meydana gelen değişim Şekil 4b'de gösterilmiştir [34, 35].

$$I_{SVC} = V \cdot B_{SVC} \quad (14)$$

3.2. TCSC

TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kapasitör), tristör kontrollü seri FACTS cihazıdır. Güç sistemine gerilim enjekte eden TCSC cihazı, iletim hattının reaktans değerini azaltarak aktif güç akışını olabildiğince arttırmayı amaçlamaktadır. Şekil 5a'da görüldüğü üzere TCSC cihazı birbirlerine paralel olarak bağlanmış tristör kontrollü reaktör, kapasitör bankı ve varistörden meydana gelmektedir [36, 37]. TCSC cihazı da tristörün tetikleme açısı ile kontrol edilmektedir. Tetikleme açısı ile ayarlanan TCSC'nin değişken reaktansı iletim hattına seri olarak bağlanmakta ve toplam reaktans değerini azaltarak maksimum aktif güç akışını sağlamaktadır. Tetikleme açısı ile değişken reaktans arasındaki ilişki Şekil 5b'de görülmektedir.

TCSC ile güç sistemine enjekte edilen gerilim Eş. 15'te verilmiştir [36,37]. Burada x_c , TCSC'nin değişken reaktans değerini, I ise iletim hattından geçen akımı ifade etmektedir.

$$V = -jx_c I \quad (15)$$

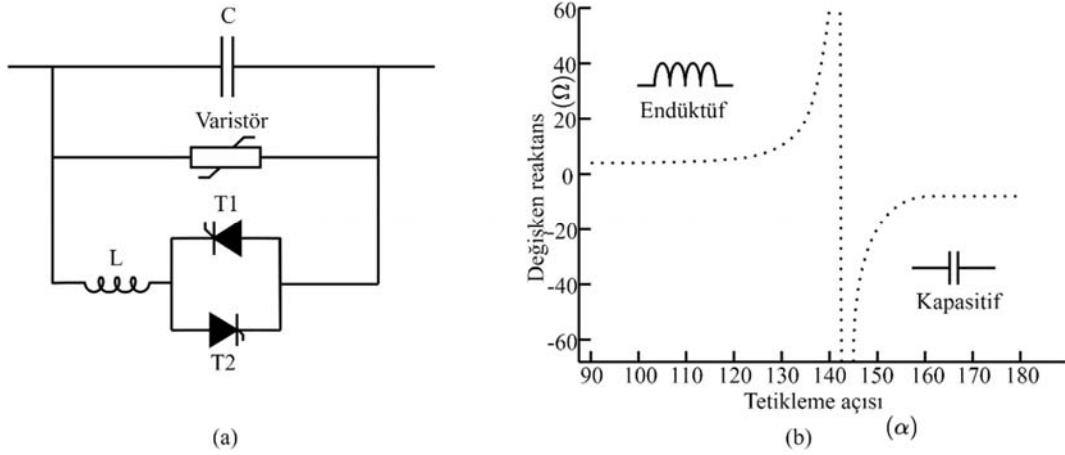
4. Dağıtık Üretim Kaynakları (Distributed Generation Resources)

4.1. Güneş Enerji Santralleri (Solar Energy Systems)

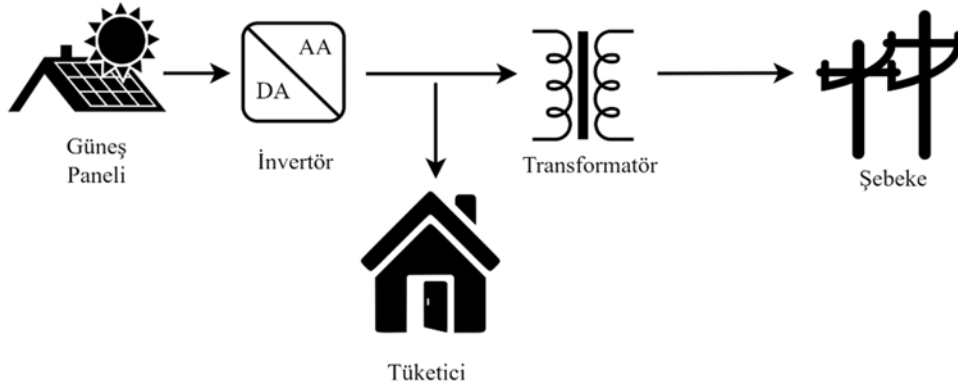
Güneş enerji santralleri (GES) güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten enerji sistemleridir. Bir GES genellikle güneş paneli, invertör ve transformator olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir. Güneş panelleri ile üretilen doğru akım (DA) elektrik enerjisi invertör ile alternatif akım (AA) elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Transformator ile invertörden gelen elektrik enerjisi alçaltılarak ya da yükseltilerek tüketiciye veya şebekeye iletilmektedir. Bir GES sisteminin bağlantı şeması Şekil 6'da görülmektedir [38,39].

4.2. Rüzgâr Enerji Santralleri (Wind Energy Systems)

Rüzgâr enerji santralleri (RES) rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üreten enerji sistemleridir. Bir RES genellikle türbin, dişli kutusu, generatör, konvertör ve transformator olmak üzere beş kısımdan meydana gelmektedir. Türbin kanatlarına çarpan rüzgâr ile generatör rotoru döndürülür, böylece mekanik enerjiden elektrik enerjisi üretilmektedir. RES'lerde sabit hızlı ya da değişken hızlı rüzgâr

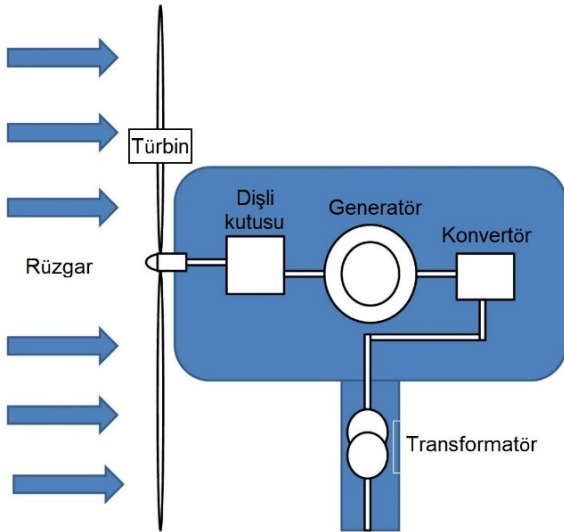


Şekil 5. TCSC cihazının, a) eşdeğer devresi, b) tetikleme açısı-değişken reaktans karakteristiği (TCSC device, a) equivalent circuit, b) firing angle-variable reactance characteristic)



Şekil 6. GES bağlantı şeması (GES connection diagram)

türbinleri kullanılmaktadır. Sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde senkron ya da asenkron generatörler kullanılırken, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde sabit miktatsız senkron generatör ya da çift beslemeli asenkron generatör kullanılmaktadır. Bir RES sistemine ait bağlantı şeması Şekil 7’de verilmiştir [40, 41].



Şekil 7. RES bağlantı şeması (RES connection diagram)

4.3. Yakıt Hücresi (Fuel Cell)

Yakıt hücreleri (YH) kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Bir YH genellikle anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç kısımdan meydana gelmektedir. Anot kısmından giren yakıt yüksek sıcaklık ile elektron ve protonlarına ayrılmakta, ayrılan elektronlar bir dış devre yardımıyla anot kısmından katot kısmına geçerek bir elektrik akımı oluşturmaktadır. Kullanılan elektrolitin kimyasal özelliğine göre isimlendirilen yakıt hücrelerinden en sık kullanılanları alkali (bazik) yakıt hücresi, eriyik karbonat yakıt hücresi, proton geçirgen membranlı yakıt hücresi, fosforik asit yakıt hücresi ve katı oksit yakıt hücresidir. Bir yakıt hücresinin iç yapısı Şekil 8’de görülmektedir [42,43].

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

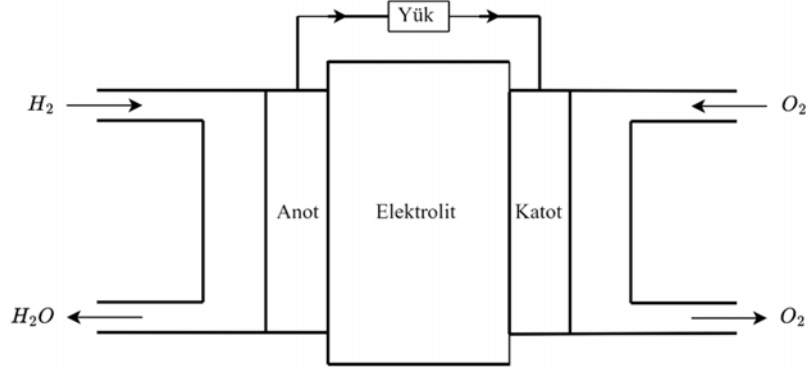
Bu çalışmada enterkonnekte güç sistemlerinin gerilim kararlılığı; temel (nominal) durumda, aşırı yüklenme durumunda ve hat kopması durumunda incelenmiştir. İncelemeler ilk olarak IEEE 30 baralı enterkonnekte güç sisteminde, daha sonra ise KBA güç sisteminde gerçekleştirilmiştir. Güç sistemleri MATLAB® programının PSAT (Power System Analysis Toolbox) araç kutusu kullanılarak modellenmiş ve bu güç sistemlerine her bir durum için FACTS cihazları (SVC ve TCSC) ve DGs (YH, GES ve RES) ayrı ayrı ve birlikte bağlanmıştır. SVC cihazı ve DGs’ler sürekli güç akışı analizine göre gerilim değeri en düşük olan baraya, TCSC cihazı ise hat kararlılık indeksi sonucuna göre değeri en yüksek olan enerji iletim hattına bağlanmıştır. Güç sistemini iyileştirme çalışmaları üç ayrı senaryoda gerçekleştirilmiştir. Senaryo 1’de sadece FACTS

cihazları, Senaryo 2’de sadece DGs’ler, Senaryo 3’te ise hem FACTS cihazları hem de DGs’ler güç sistemine bağlanmıştır.

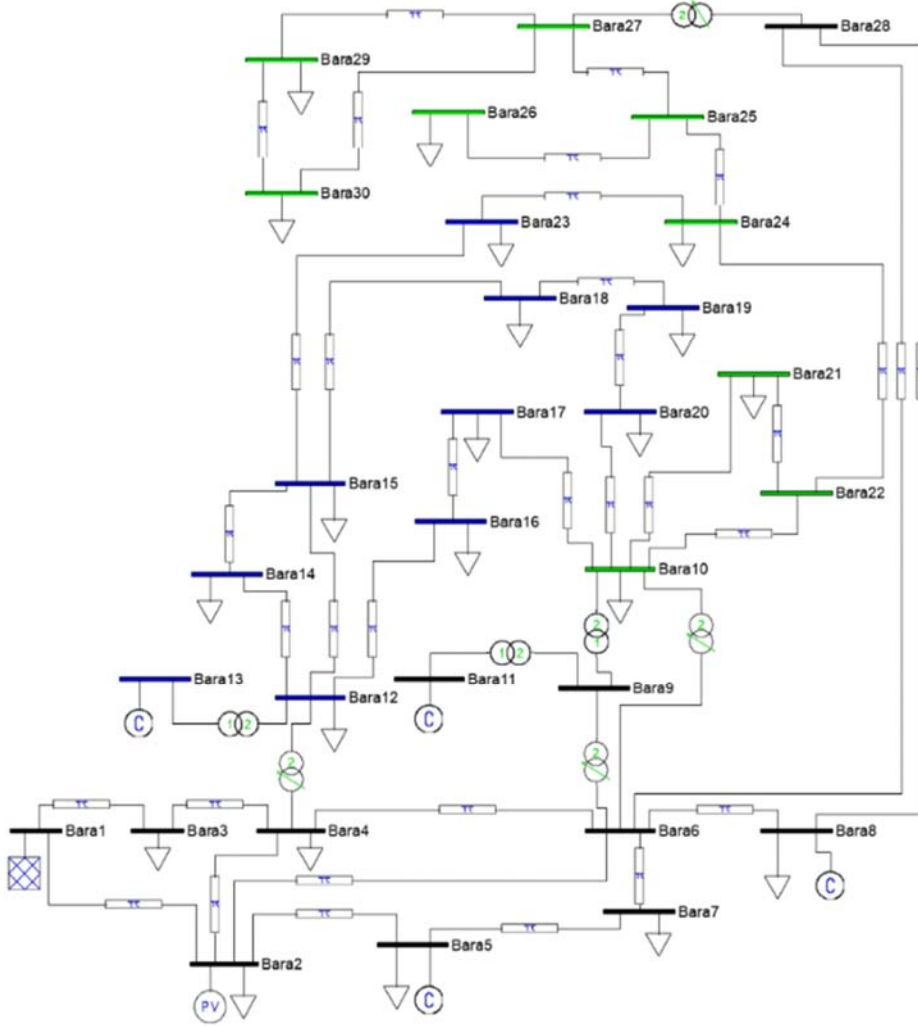
5.1. IEEE 30 Baralı Güç Sistemi ve Sonuçları
(IEEE 30 Bus Power System and Results)

6 üretim barasına, 24 yük barasına ve 41 enerji iletim hattına sahip olan IEEE 30 baralı güç sistemi Şekil 9’da verilmiştir. Güç sistemi ilk

olarak temel durumda incelenmiştir. Temel durumda 30 numaralı bara en zayıf bara olarak, 27-30 numaralı baralar arasındaki enerji iletim hattı ise en kritik enerji iletim hattı olarak tespit edilmiştir. İkinci olarak, yük baralarının aktif ve reaktif güç değerleri %50 oranında artırılarak güç sistemi aşırı yüklenme durumunda incelenmiştir. Temel durumda olduğu gibi aşırı yüklenme durumunda da 30 numaralı bara en zayıf bara olarak, 27-30 numaralı baralar arasındaki enerji iletim hattı ise en kritik enerji iletim hattı olarak tespit edilmiştir. Son



Şekil 8. Yakıt hücresinin temel yapısı (Basic structure of fuel cell)



Şekil 9. IEEE 30 baralı enterkonnekte güç sistemi (IEEE 30 bus interconnected power system)

olarak, temel durumdaki en kritik enerji iletim hattının (27-30 numaralı enerji iletim hattı) açma yaptığı varsayılmış ve güç sistemi hat kopması durumunda incelenmiştir. Hat kopması durumunda 30 numaralı bara en zayıf bara olarak, 27-29 numaralı baralar arasındaki enerji iletim hattı ise en kritik enerji iletim hattı olarak tespit edilmiştir. Üç farklı durum altında incelenen güç sisteminde en zayıf baraya ve en kritik enerji iletim hattına ait değerler Tablo 1'de verilmiştir.

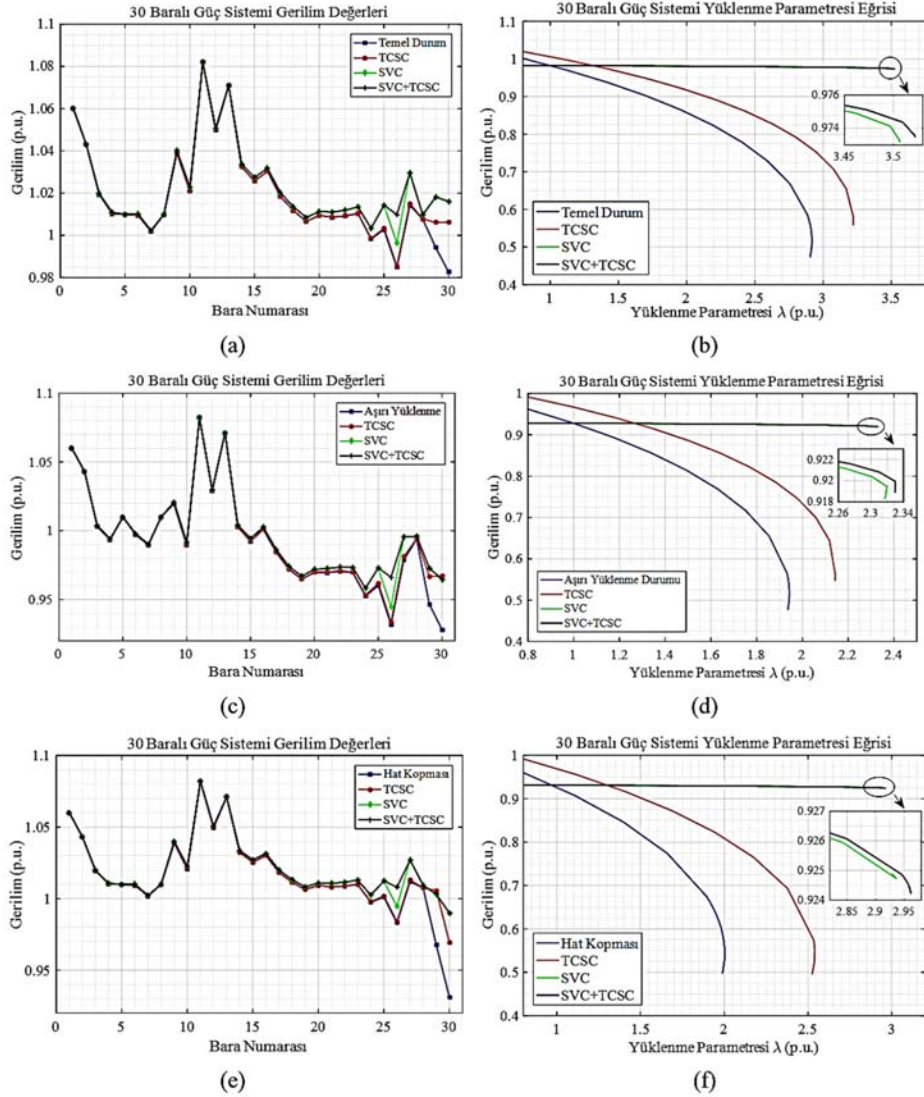
Senaryo 1: FACTS Cihazlarının Kullanımı (Use of FACTS Devices)

Bu senaryoda güç sistemini iyileştirmek için yalnızca FACTS cihazları kullanılmıştır. İlk aşamada güç sistemine sadece SVC cihazı, ikinci aşamada ise sadece TCSC cihazı bağlanmıştır. Son aşamada ise SVC cihazı bağlı durumda iken analizler tekrarlanmış ve en kritik enerji iletim hattına TCSC cihazı da bağlanarak her iki FACTS cihazının da güç sistemine bağlı olduğu durum analiz edilmiştir. Güç sisteminin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler Şekil 10'da gösterilerek, Tablo 2'de ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

Tablo 1. IEEE 30 baralı güç sisteminin farklı durumlarda en zayıf bara ve en kritik enerji iletim hattı değerleri (The weakest bus voltage and the most critical energy transmission line values of the IEEE 30 bus power system in different situations)

	En Zayıf Baralar		En Kritik Enerji İletim Hatları	
	Bara Adı	Bara Gerilimi (p.u.)	Bağlı Olduğu Baralar	Hat Kararlılık İndeksi Sonucu
Temel Durum	Bara 30	0,498277	27-30	0,120821
	Bara 29	0,575110	27-29	0,077452
	Bara 26	0,585837	25-26	0,070302
Aşırı Yüklenme Durumu	Bara 30	0,501331	27-30	0,197016
	Bara 29	0,577516	27-29	0,127426
	Bara 26	0,587181	25-26	0,115127
Hat Kopması Durumu	Bara 30	0,528389	27-29	0,168175
	Bara 29	0,677631	29-30	0,143954
	Bara 26	0,812325	25-26	0,070540

Şekil 10a, Şekil 10c ve Şekil 10e incelendiğinde, bara gerilim değerlerinde en fazla artış, FACTS cihazlarının bağlı olduğu bölgelerde görülmektedir. Şekil 10b, Şekil 10d ve Şekil 10f



Şekil 10. FACTS cihazlarının kullanıldığı IEEE 30 baralı güç sisteminin temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında bara gerilim değerleri ve yüklenme parametresi eğrileri (The bus voltage values and the loading parameter curves of the IEEE 30 bus power system in cases of base, overload, and line outage when using FACTS devices)

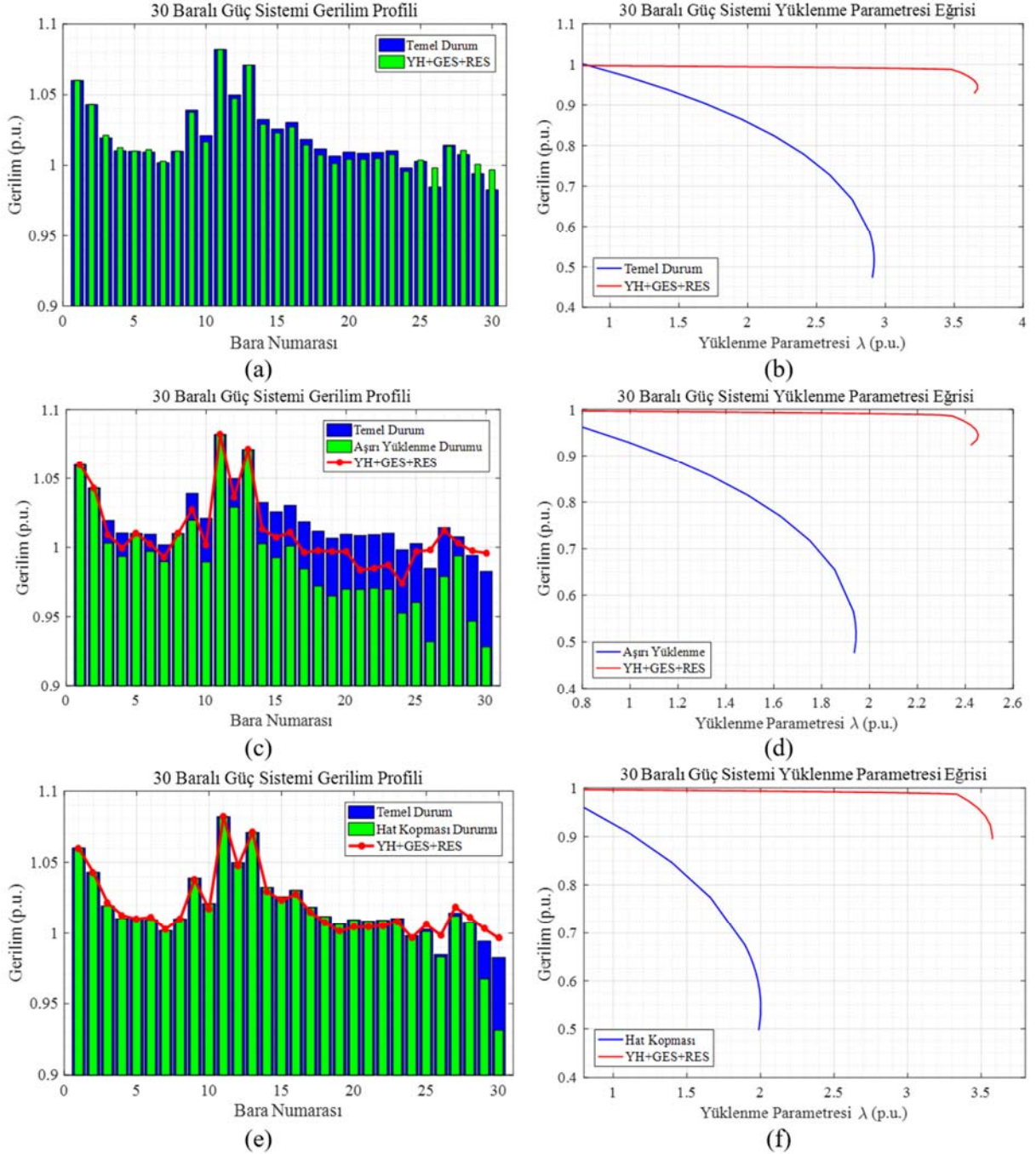
incelendiğinde ise, TCSC cihazının bağlı olduğu durumda yüklenme parametresi arttıkça bara gerilim değerlerinin düştüğü, SVC cihazının bağlı olduğu durumlarda yüklenme parametresi artsa dahi bara gerilim değerlerinin sabit kaldığı görülmektedir.

Senaryo 2: Dağıtık Üretim Kaynaklarının Kullanımı (Use of Distributed Generation Resources)

Bu senaryoda güç sistemini iyileştirmek için yalnızca DGs'ler kullanılmıştır. Sürekli güç akışı analizi sonucuna göre yakıt hücresi 30 numaralı baraya, güneş enerjisi santrali 26 numaralı baraya, rüzgâr

enerji santrali ise 19 numaralı baraya bağlanmıştır. Güç sisteminin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler Şekil 11'de gösterilerek, Tablo 2'de ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

Şekil 11a, Şekil 11c ve Şekil 11e incelendiğinde, DGs'lerin güç sistemine eklenmesi ile bara gerilim değerlerinin 1 p.u. değerine yaklaştığı, Şekil 11b, Şekil 11d ve Şekil 11f incelendiğinde ise yüklenme parametresinin iyileştiği ve bara gerilim değerlerinin çökme noktasına kadar sabit kaldığı görülmektedir.



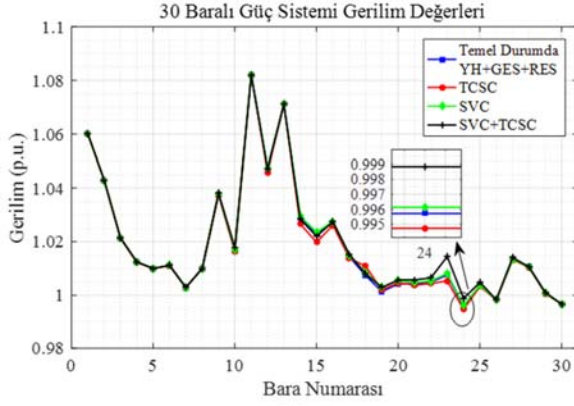
Şekil 11. DGs'lerin kullanıldığı IEEE 30 baralı güç sisteminin temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında bara gerilim değerleri ve yüklenme parametresi eğrileri (The bus voltage values and the loading parameter curves of the IEEE 30 bus power system in cases of base, overload, and line outage when using DGs)

Senaryo 3: FACTS Cihazlarının ve Dağıtık Üretim Kaynaklarının Kullanımı (Use of FACTS Devices and Distributed Generation Resources)

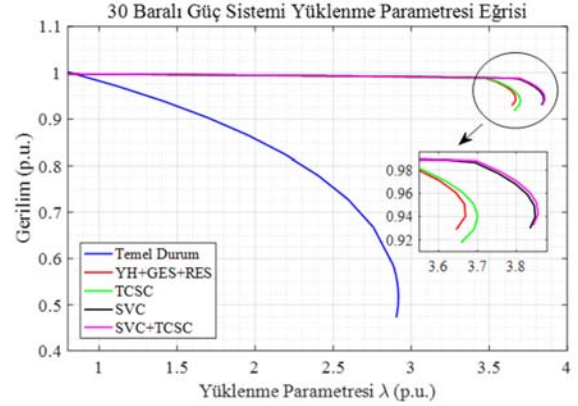
Güç sistemini iyileştirmek için son olarak FACTS cihazları ve DGs'ler birlikte kullanılmıştır. Güç sisteminin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler Şekil 12'de gösterilerek, Tablo 2'de ayrıntılı olarak özetlenmiştir. Şekil 12a, Şekil 12c ve Şekil 12e incelendiğinde, güç sistemine DGs'lerin eklenmesi ile en zayıf bara geriliminin bile 1 p.u. değerine yaklaştığı görülmektedir. DGs'lere ek olarak FACTS cihazlarının bağlanması ile bara gerilim değerlerinin biraz daha arttığı ancak DGs'ler ile yeterli iyileşme sağlandığı için FACTS cihazları bara

gerilim değerlerinde çok fazla artışa sebep olmamıştır. Şekil 12b, Şekil 12d ve Şekil 12f incelendiğinde ise, DGs'lerin eklenmesi ile yüklenme parametresinin oldukça iyileştiği, tüm DGs'ler ve FACTS cihazlarının bağlanması ile yüklenme parametresinin en yüksek değerine ulaştığı görülmüştür.

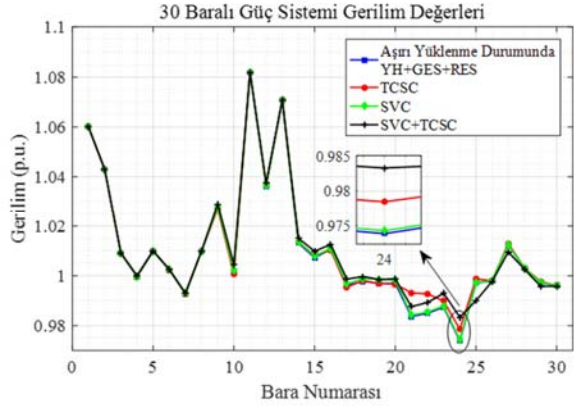
Tablo 2 incelendiğinde; güç sisteminin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde en fazla artış her iki FACTS cihazının bağlı olduğu durumlarda görülmektedir. Güç sistemine DGs'ler ekli değil iken temel durumda, aşırı yüklenme durumunda ve hat kopması durumunda her iki FACTS cihazının bağlanması ile en düşük bara gerilim değeri sırasıyla %2,00, %3,26 ve %6,30 oranında, yüklenme



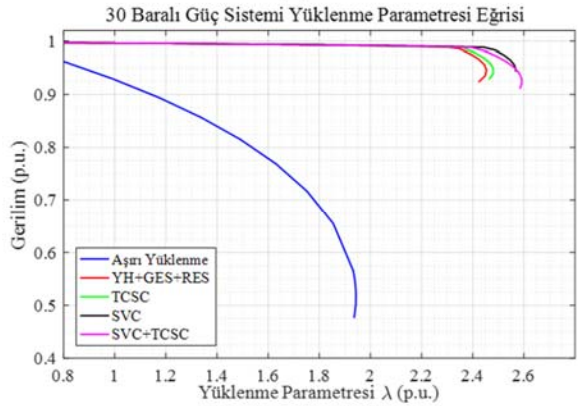
(a)



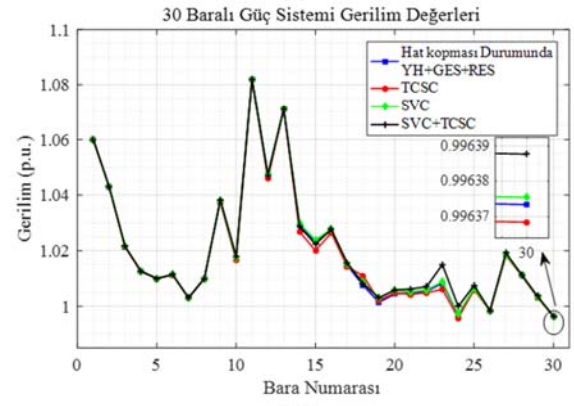
(b)



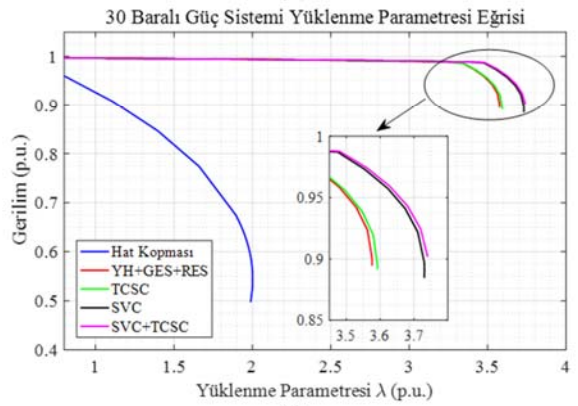
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 12. FACTS cihazlarının ve DGs'lerin kullanıldığı IEEE 30 baralı güç sisteminin temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında bara gerilim değerleri ve yüklenme parametresi eğrileri (The bus voltage values and the loading parameter curves of the IEEE 30 bus power system in cases of base, overload, and line outage when using FACTS devices and DGs)

Tablo 2. IEEE 30 baralı güç sistemine farklı durumlarda bağlanan FACTS cihazlarının ve DGs'lerin bara gerilim değerlerine ve yüklenme parametresine etkileri (The effects on bus voltage values and loading parameters of FACTS devices and DGs connected to the IEEE 30 bus power system in different situations)

		En Düşük Bara Gerilimi (p.u.)	Değişim (%)	Yüklenme Parametresi	Değişim (%)
Değişik Üretim Kaynaklarının Eklili Olmadığı Durumunda	Temel Durum	FACTS yok	Bara30-0,982626		2,9179
		TCSC	Bara26-0,985396	0,28 ↑	3,2223
		SVC	Bara26-0,996385	1,40 ↑	3,5065
		SVC+TCSC	Bara07-1,00231	2,00 ↑	3,5219
	Aşırı Yüklenme Durumu	FACTS yok	Bara30-0,928021		1,9433
		TCSC	Bara26-0,933468	0,59 ↑	2,1445
		SVC	Bara26-0,944617	1,79 ↑	2,3196
	Hat Kopması Durumu	SVC+TCSC	Bara24-0,958297	3,26 ↑	2,3301
		FACTS yok	Bara30-0,931312		2,0014
		TCSC	Bara30-0,969575	4,11 ↑	2,5408
		SVC	Bara30-0,99000	6,30 ↑	2,9363
	Değişik Üretim Kaynaklarının Eklili Olduğu Durumunda	Temel Durum	SVC+TCSC	Bara30-0,99000	6,30 ↑
FACTS yok			Bara24-0,995724		3,6693
TCSC			Bara24-0,994731	0,10 ↓	3,7009
SVC			Bara24-0,996135	0,04 ↑	3,8491
Aşırı Yüklenme Durumu		SVC+TCSC	Bara30-0,996766	0,10 ↑	3,8564
		FACTS yok	Bara24-0,973821		2,4538
		TCSC	Bara24-0,978478	0,48 ↑	2,4799
Hat Kopması Durumu		SVC	Bara24-0,974246	0,04 ↑	2,5684
		SVC+TCSC	Bara24-0,983328	0,98 ↑	2,5917
		FACTS yok	Bara30-0,996373		3,5761
		TCSC	Bara24-0,995794	0,0600 ↓	3,5925
		SVC	Bara24-0,996375	0,0002 ↑	3,7311
	SVC+TCSC	Bara30-0,996388	0,0015 ↑	3,7408	

parametresi ise sırasıyla %20,70, %19,90, %47,99 oranında artış göstermiştir. Güç sistemine DGs'ler eklili iken temel durumda, aşırı yüklenme durumunda ve hat kopması durumunda her iki FACTS cihazının da bağlanması ile en düşük bara gerilim değerinde sırasıyla %0,10, %0,98 ve %0,0015 oranında, yüklenme parametresinde ise sırasıyla %5,10, %5,62, %4,61 oranında ek artış meydana gelmiştir.

5.2. KBA Güç Sistemi ve Sonuçları (KBA Power System and Results)

Bu bölümde Şekil 13'te verilen KBA güç sisteminin 7 üretim barasının, 29 yük barasının ve 48 enerji iletim hattının bulunduğu bir kısmı incelenmiştir. KBA güç sistemi, IEEE 30 baralı güç sistemi gibi üç farklı durumunda incelenmiştir. Sürekli güç akışı analizi ve hat kararlılık indeksine göre en zayıf baralar ve en kritik enerji iletim hatları tespit edilmiş ve sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Temel durumda ve aşırı yüklenme durumunda 26 numaralı bara, hat kopması durumunda ise 27 numaralı en zayıf bara olarak tespit edilirken, üç durumda da 23-34 numaralı baralar arasındaki enerji iletim hattı en kritik enerji iletim hattı olarak tespit edilmiştir.

Senaryo 1: FACTS Cihazlarının Kullanımı (Use of FACTS Devices)

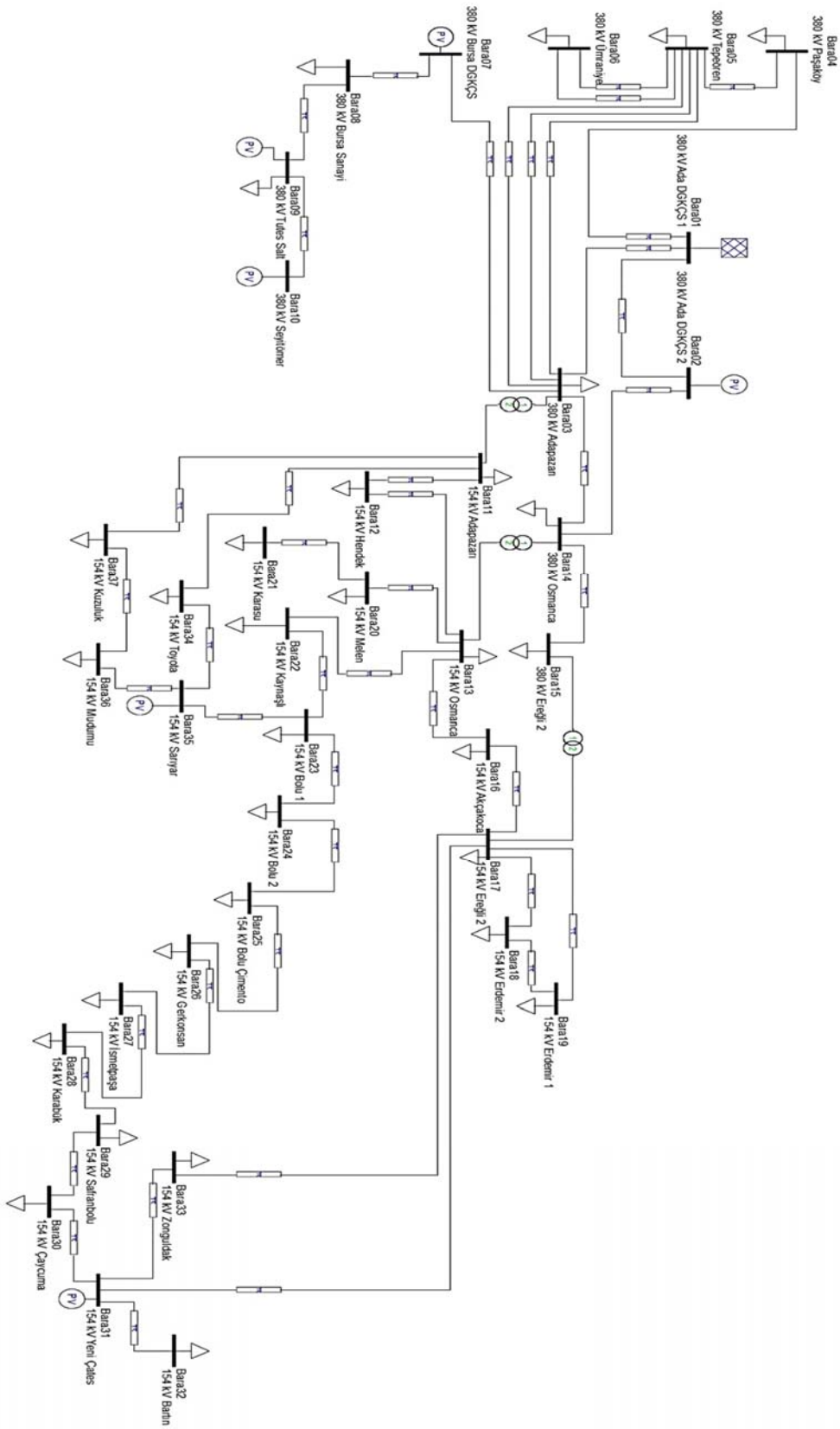
Bu senaryoda güç sistemini iyileştirmek için yalnızca FACTS cihazları kullanılmıştır. Aynı ayrı ve birlikte bağlanan FACTS cihazları ile güç sisteminin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme

parametresinde meydana gelen değişimler Şekil 14'te gösterilerek, Tablo 4'te ayrıntılı olarak özetlenmiştir. Şekil 14a, Şekil 14c ve Şekil 14e incelendiğinde, bara gerilim değerlerinde en fazla artış, FACTS cihazlarının bağlı olduğu 20 ile 30 numaralı baralar arasında görülmektedir. Şekil 14b, Şekil 14d ve Şekil 14f incelendiğinde ise, SVC cihazının bağlı olduğu durumlarda yüklenme parametresinin daha fazla arttığı ve gerilim değerinin daha stabil olduğu görülmektedir. Her iki FACTS cihazının kullanımı ile ise yüklenme parametresi en yüksek değerine ulaşmaktadır.

Senaryo 2: Dağıtık Üretim Kaynaklarının Kullanımı (Use of Distributed Generation Resources)

Bu senaryoda güç sistemini iyileştirmek için yalnızca DGs'ler kullanılmıştır. Sürekli güç akışı analizine göre yakıt hücresi 26 numaralı baraya, güneş enerji santrali 24 numaralı baraya, rüzgâr enerji santrali ise 19 numaralı baraya bağlanmıştır. Güç sisteminin bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler Şekil 15'te gösterilerek, Tablo 4'te ayrıntılı olarak özetlenmiştir.

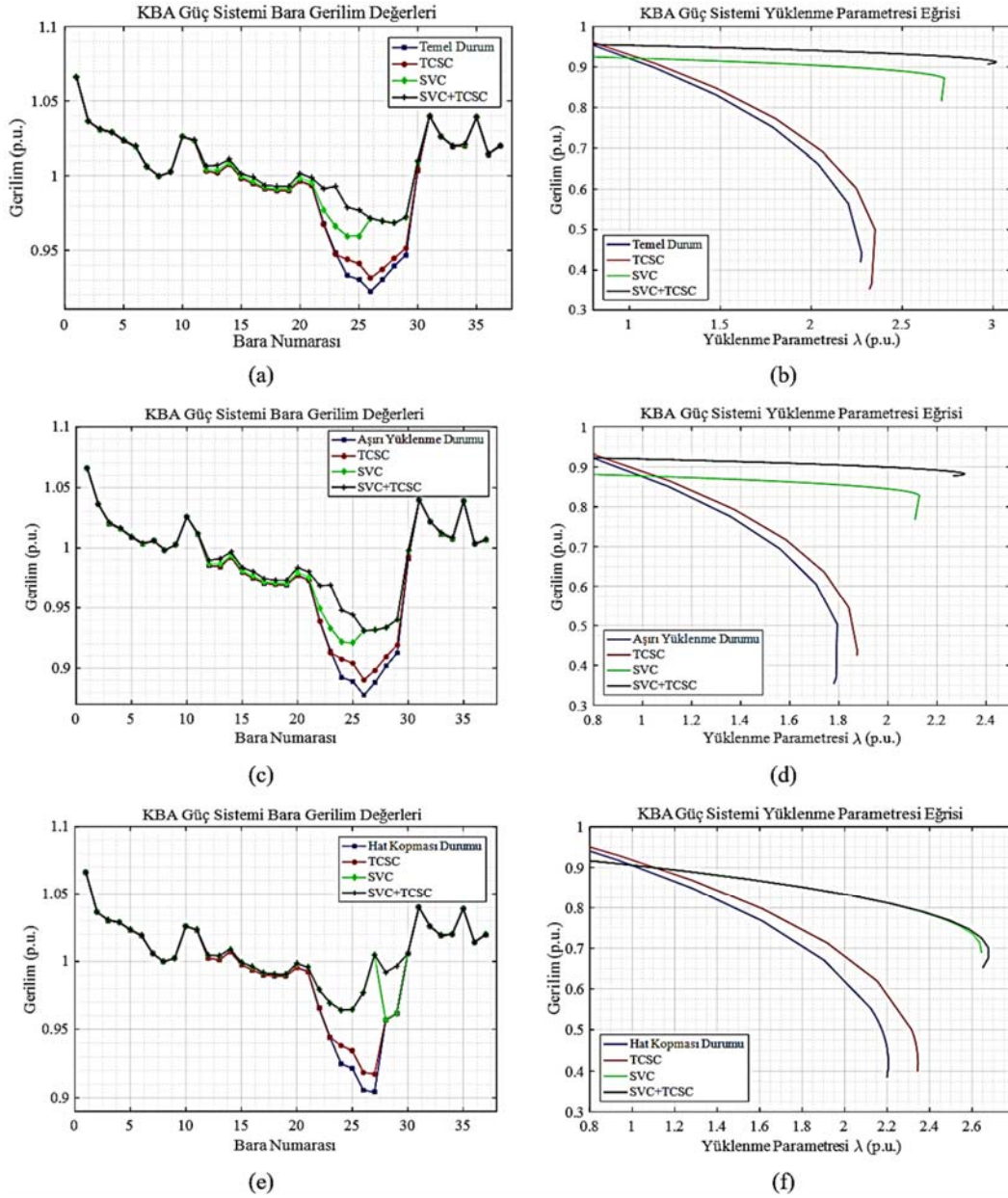
DGs'lerin güç sistemine eklenmesi sonucunda; Şekil 15a, Şekil 15c ve Şekil 15e incelendiğinde, bara gerilimlerinin 1 p.u. değerine yaklaştığı, Şekil 15b, Şekil 15d ve Şekil 15f incelendiğinde ise yüklenme parametresi değerinin arttığı görülmektedir.



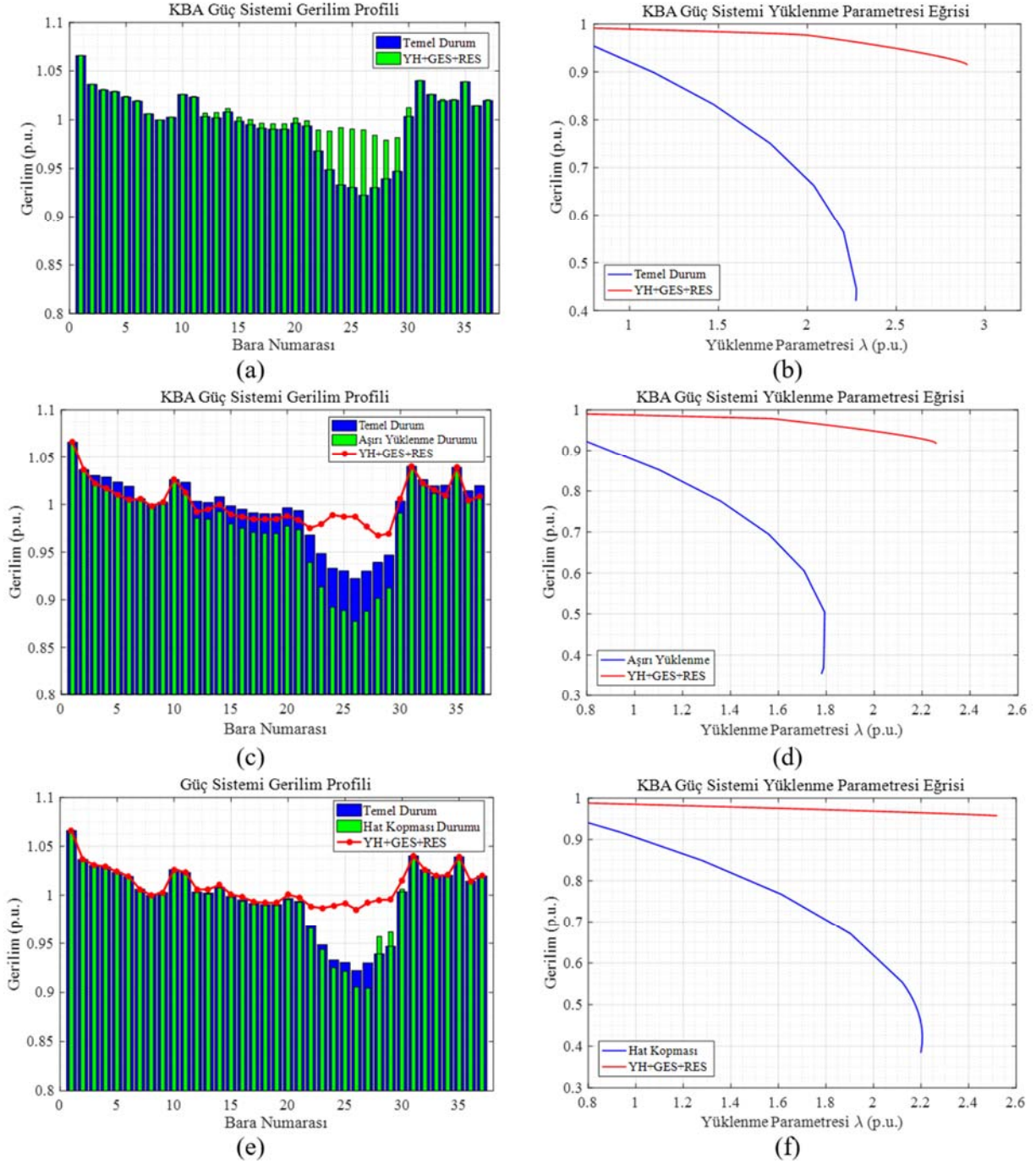
Şekil 13. KBA güç sistemi (KBA power system)

Tablo 3. KBA güç sisteminin farklı durumlarda en zayıf bara ve en kritik enerji iletim hattı değerleri
(The weakest bus voltage and the most critical energy transmission line values of the KBA power system in different situations)

	En Zayıf Baralar		En Kritik Enerji İletim Hatları	
	Bara Adı	Bara Gerilimi (p.u.)	Bağlı Olduğu Baralar	Hat Kararlılık n İndeksi Sonucu
Temel Durum	Bara 26	0,433144	23-24	0,064588
	Bara 27	0,474608	27-28	0,038758
	Bara 25	0,486091	25-26	0,034538
Aşırı Yüklenme Durumu	Bara 26	0,369556	23-24	0,090951
	Bara 27	0,415122	27-28	0,05914
	Bara 25	0,434726	25-26	0,050252
Hat Kopması Durumu	Bara 27	0,394963	23-24	0,077503
	Bara 26	0,404748	25-26	0,068752
	Bara 25	0,498065	24-25	0,015133



Şekil 14. FACTS cihazlarının kullanıldığı KBA güç sisteminin temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında bara gerilim değerleri ve yüklenme parametresi eğrileri (The bus voltage values and the loading parameter curves of the KBA power system in cases of base, overload, and line outage when using FACTS devices)



Şekil 15. DGs'lerin kullanıldığı KBA güç sisteminin temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında bara gerilim değerleri ve yüklenme parametresi eğrileri (The bus voltage values and the loading parameter curves of the IEEE 30 bus power system in cases of base, overload, and line outage when using DGs)

Senaryo 3: FACTS Cihazlarının ve Dağıtık Üretim Kaynaklarının Kullanımı
(Use of FACTS Devices and Distributed Generation Resources)

Bu senaryoda güç sistemini iyileştirmek için FACTS cihazları ve DGs'ler birlikte kullanılmıştır. Bara gerilim değerlerinde ve yüklenme parametresinde meydana gelen değişimler Şekil 16'da gösterilerek, Tablo 4'te ayrıntılı olarak özetlenmiştir. Şekil 16'nın tamamı incelendiğinde güç sistemine eklenen DGs'ler ile bara gerilim değerlerinin ve yüklenme parametresinin yeterli seviyede iyileştiği,

DGs'lere ek olarak FACTS cihazlarının bağlanması ile ise bu değerlerde daha fazla iyileşme görüldüğü ancak artışın çok fazla olmadığı izlenmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde; güç sistemine DGs'ler ekli değil iken temel durumda, aşırı yüklenme durumunda ve hat kopması durumunda her iki FACTS cihazının bağlanması ile en düşük bara gerilim değeri sırasıyla %4,99, %6,10 ve %6,62 oranında, yüklenme parametresi ise sırasıyla %31,61, %84,78, %21,39 oranında artış göstermiştir. Güç sistemine DGs'ler ekli iken temel durumda, aşırı yüklenme

Tablo 4. KBA güç sistemine farklı durumlarda bağlanan FACTS cihazlarının ve DGs'lerin bara gerilim değerlerine ve yüklenme parametresine etkileri

(The effects on bus voltage values and loading parameters of FACTS devices and DGs connected to the KBA power system in different situations)

		En Düşük Bara Gerilimi (p.u.)	Değişim (%)	Yüklenme Parametresi	Değişim (%)	
Dağıtık Üretim Kaynaklarının Ekli Olmadığı Durumda	Temel Durum	FACTS yok	Bara26-0,92228	2,2749		
		TCSC	Bara26-0,931261	0,97 ↑	2,3511	3,35 ↑
		SVC	Bara24-0,959549	4,04 ↑	2,7317	20,08 ↑
		SVC+TCSC	Bara28-0,96828	4,99 ↑	3,0167	32,61 ↑
	Aşırı Yüklenme Durumu	FACTS yok	Bara26-0,877462		1,7933	
		TCSC	Bara26-0,890205	1,45 ↑	1,8752	4,57 ↑
		SVC	Bara25-0,920771	4,94 ↑	2,128	18,66 ↑
	Hat Kopması Durumu	SVC+TCSC	Bara26-0,931	6,10 ↑	3,3136	84,78 ↑
		FACTS yok	Bara27-0,904304		2,2054	
		TCSC	Bara27-0,917556	1,47 ↑	2,345	6,33 ↑
		SVC	Bara28-0,956886	5,81 ↑	2,6433	19,86 ↑
	Dağıtık Üretim Kaynaklarının Ekli Olduğu Durumda	Temel Durum	SVC+TCSC	Bara24-0,964191	6,62 ↑	2,6771
FACTS yok			Bara28-0,978878		2,8987	
TCSC			Bara28-0,978917	0,0040 ↑	3,0323	4,61 ↑
SVC			Bara28-0,978887	0,0010 ↑	3,0365	4,75 ↑
Aşırı Yüklenme Durumu		SVC+TCSC	Bara28-0,978929	0,0052 ↑	3,1261	7,84 ↑
		FACTS yok	Bara28-0,967102		2,2576	
		TCSC	Bara28-0,967162	0,0062 ↑	2,3767	5,28 ↑
Hat Kopması Durumu		SVC	Bara28-0,967113	0,0011 ↑	2,3762	5,25 ↑
		SVC+TCSC	Bara28-0,96713	0,0029 ↑	2,4382	8,00 ↑
		FACTS yok	Bara26-0,984944		2,5204	
		TCSC	Bara26-0,984945	0,0001 ↑	2,847	12,96 ↑
		SVC	Bara26-0,984944	-	2,8231	12,01 ↑
	SVC+TCSC	Bara26-0,984995	0,0052 ↑	3,042	20,70 ↑	

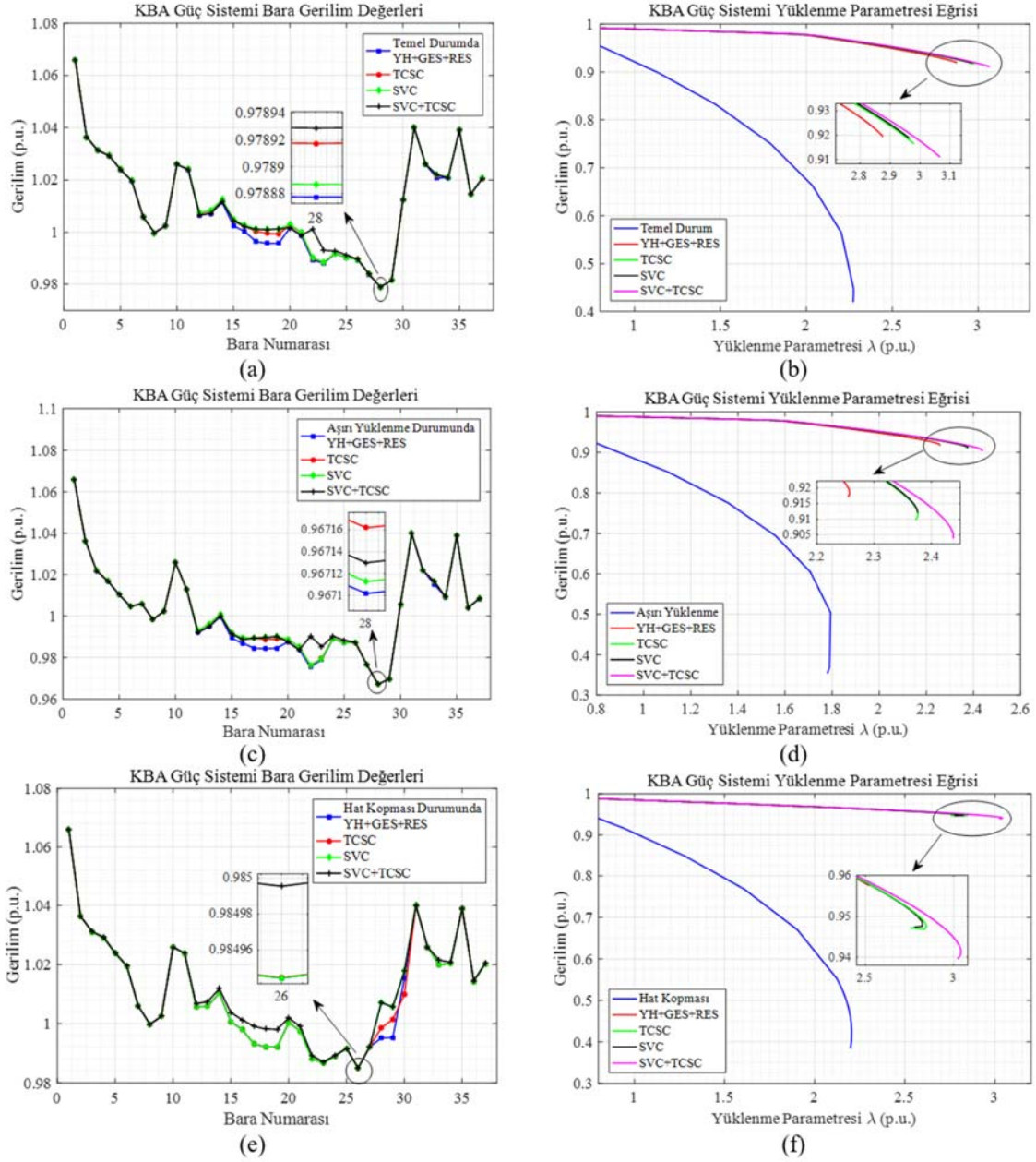
durumunda ve hat kopması durumunda her iki FACTS cihazının da bağlanması ile en düşük bara gerilim değerinde sırasıyla %0,0052, %0,0029 ve %0,0052 oranında, yüklenme parametresinde ise sırasıyla %7,84, %8,00, %20,70 oranında ek artış meydana gelmiştir.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, IEEE 30 baralı güç sistemi ile KBA güç sistemi temel durumda, aşırı yüklenme ve hat kopması arızalarının meydana geldiği durumlarda incelenmiştir. İncelenen güç sistemlerinde sürekli güç akışı analizi ile en zayıf baralar, hat kararlılık indeksi ile ise en kritik enerji iletim hatları tespit edilmiştir. En zayıf baralara reaktif gücü kompanze etmek ve bara gerilim değerlerini iyileştirmek için SVC cihazı, aktif güç sağlamak ve yüklenme kapasitesini arttırmak için DGs'ler bağlanırken; en kritik enerji iletim hatlarına ise hattın reaktansını düşürerek maksimum aktif güç akışını sağlamak için TCSC cihazı bağlanmıştır. Her iki güç sistemine temel durumda ve arıza durumlarında bağlanan DGs'ler ve FACTS cihazları ile bara gerilim değerlerinin iyileştiği ve yüklenme parametresinin arttığı

görülmüştür. En iyi sonuçların ise arızanın olmadığı temel durumdaki güç sistemlerine tüm DGs'lerin ve FACTS cihazlarının bağlanması durumunda elde edildiği tespit edilmiştir. Temel durumda DGs'lerin ve FACTS cihazlarının bağlanması ile en düşük bara gerilim değeri; IEEE 30 baralı güç sisteminde 0,982626 p.u. değerinden 0,996766 p.u. değerine, KBA güç sisteminde ise 0,92228 p.u. değerinden 0,978929 p.u. değerine yükselmiştir. Ayrıca temel durumda DGs'lerin ve FACTS cihazlarının bağlanması ile IEEE 30 baralı güç sisteminin yüklenme parametresi 2,9179 değerinden %32,16 artış ile 3,8564 değerine, KBA güç sisteminin yüklenme parametresi ise 2,2749 değerinden %37,42 artış ile 3,1261 değerine yükselmiştir.

Bu çalışma ile DGs'lerin ve FACTS cihazlarının güç sistemlerinde en uygun bağlantı noktaları belirlenmiş, arıza durumlarında güç sistemlerine etkileri analiz edilmiş, ayrı ayrı ve birlikte kullanıldıkları durumlarda güç sistemlerinin gerilim kararlılığını iyileştirdikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca IEEE verileri kullanılarak yapılan çalışmalar haricinde gerçek bir güç sistemi de modellenmiş, test verilerine uygulanan analizlerin gerçek güç sistemine uygulanabilirliği benzer



Şekil 16. FACTS cihazlarının ve DGs'lerin kullanıldığı KBA güç sisteminin temel, aşırı yüklenme ve hat kopması durumlarında bara gerilim değerleri ve yüklenme parametresi eğrileri (The bus voltage values and the loading parameter curves of the KBA power system in cases of base, overload, and line outage when using FACTS devices and DGs)

sonuçların alınması ile doğrulanmıştır. Böylece önerilen analiz yöntemleri ve iyileştirme çalışmaları kullanılarak farklı güç sistemlerinin de incelenebilmesine ve iyileştirilmesine katkı sağlanmıştır. Gelecek çalışmalarda, güç sistemlerinin frekans ve rotor açısı kararlılığı bakımından incelenmesi, DGs'lerin ve FACTS cihazlarının bağlantı yerinin tespiti için sezgisel algoritmaların kullanılması hedeflenmektedir.

Kaynaklar (References)

1. Nafeh A.A., Heikal A., El-Sehiemy R.A., Salem W.A.A., Intelligent fuzzy-based controllers for voltage stability enhancement of AC-DC micro-grid with D-STATCOM, Alexandria Engineering Journal, 61 (3), 2260-2293, 2022.
2. Lin Y., Zhang X., Wang J., Shi D., Bian D., Voltage Stability Constrained Optimal Power Flow for Unbalanced Distribution System Based on Semidefinite Programming, Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 10 (6), 1614-1624, 2022.
3. Amroune M., Machine Learning Techniques Applied to On-Line Voltage Stability Assessment: A Review, Archives of Computational Methods in Engineering, 28 (2), 273-287, 2021.
4. Adebayo I.G., Sun Y., Performance Evaluation of Voltage Stability Indices for a Static Voltage Collapse Prediction, 2020 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Nairobi-Kenya, 1-5, 25-28 August, 2020.
5. Liu H., Su J., Yang Y., Qin Z., Li C., Compatible Decentralized Control of AVR and PSS for Improving Power System Stability, IEEE Syst J, 15 (2), 2410-2419, 2021.
6. Nahid-Al-Masood, Shazon M.N.H., Deeba S.R., Modak S.R., A Frequency and Voltage Stability-Based Load Shedding Technique for Low Inertia Power Systems, IEEE Access, 9, 78947-78961, 2021.

7. Bakir H., Kulaksiz A.A., Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23 (3), 576-584, 2020.
8. Sriram C., Kishore M.N.R., Teaching Distance Relay Protection and Circuit Breaker Co-ordination of an IEEE 9 Bus System Using MATLAB/SIMULINK, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 626, 439-447, 2020.
9. Essallah S., Bouallegue A., Khedher A., Integration of automatic voltage regulator and power system stabilizer: small-signal stability in DFIG-based wind farms, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7 (5), 1115-1128, 2019.
10. Laghari J.A., Mokhlis H., Bakar A.H.A., Mohamad H., Application of computational intelligence techniques for load shedding in power systems: A review, *Energy Convers Manag.*, 75, 130-140, 2013.
11. El-Ela A.A.A., El-Schiemy R.A., Abbas A.S., Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation and Capacitor Banks in Distribution Systems Using Water Cycle Algorithm, *IEEE Syst J.*, 12 (4), 3629-3636, 2018.
12. Roshan R., Samal P., Sinha P., Optimal placement of FACTS devices in power transmission network using power stability index and fast voltage stability index, 2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3), Gorakhpur-India, 246-251, 14-15 February, 2020.
13. Kamarposhti M.A., Lesani H., Effects of STATCOM, TCSC, SSSC and UPFC on static voltage stability, *Electrical Engineering*, 93 (1), 33-42, 2011.
14. Oukennou A., Sandali A., Assessment and analysis of Voltage Stability Indices in electrical network using PSAT Software, 18th International Middle-East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo-Egypt, 705-710, 27-29 December, 2016.
15. Hu S., Xiang Y., Zhang X., Liu J., Wang R., Hong B., Reactive power operability of distributed energy resources for voltage stability of distribution networks, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7 (4), 851-861, 2019.
16. Duong M.Q., Pham T.D., Nguyen T.T., Doan A.T., van Tran H., Determination of optimal location and sizing of solar photovoltaic distribution generation units in radial distribution systems, *Energies*, 12 (1), 1-24, 2019.
17. AL Rhia R., Daghrour H., Alsamara M., Optimal Location of Distributed Generation and its Impacts on Voltage Stability, 12th International Renewable Engineering Conference (IREC), Amman-Jordan, 6-11, 14-15 April, 2021.
18. Essallah S., Khedher A., Bouallegue A., Integration of distributed generation in electrical grid: Optimal placement and sizing under different load conditions, *Computers and Electrical Engineering*, 79, 1-14, 2019.
19. Tostado M., Kamel S., Jurado F., Developed Newton-Raphson based Predictor-Corrector load flow approach with high convergence rate, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 105, 785-792, 2019.
20. Abokrishna M., Diaa A., Selim A., Kamel S., Development of Newton-raphson power-flow method based on second order multiplier, 19th International Middle-East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo-Egypt, 976-980, 19-21 December, 2017.
21. Yetkin E.F., Assesment of soft error sensitivity of power flow analysis, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 579-589, 2023.
22. Grisales-Noreña L.F., Morales-Duran J.C., Velez-Garcia S., Montoya O.D., Gil-González W., Power flow methods used in AC distribution networks: An analysis of convergence and processing times in radial and meshed grid configurations, *Results in Engineering*, 17, 1-9, 2023.
23. Kumar S., Kumar A., Sharma N.K., Analysis of power flow, continuous power flow and transient stability of IEEE-14 bus integrated wind farm using PSAT, 2015 International Conference on Energy Economics and Environment (ICEEE), Greater Noida-India, 10-15, 27-28 March, 2015.
24. Kundur P., *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York, USA, 1994.
25. Dong X., Wang C., Yun Z., et al, Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 94, 225-233, 2018.
26. Salama H.S., Vokony I., Voltage stability indices—A comparison and a review. *Computers and Electrical Engineering*, 98, 1-26, 2022.
27. Sahari S., Abidin A.F., Rahman T.K.A., Development of artificial neural network for voltage stability monitoring, 2003 National Power Engineering Conference (PECon), Bangi-Malaysia, 37-42, 15-16 December, 2003.
28. AL Ahmad A., Sirjani R., Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review, *Ain Shams Engineering Journal*, 11 (3), 611-628, 2020.
29. Zhang X.P., Rehtanz C., Pal B., *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, Springer, Berlin, Germany, 2012.
30. Muisyo I.N., Kaberere K.K., Utilization of FACTS devices in power systems: A review. In: *Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference*, 1-7, 2018.
31. Ertay M.M., Aydoğmuş Z., Güç sistemlerinde FACTS uygulamaları, *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 40 (2), 40-58, 2012.
32. Sharma A.K., Mittapalli R.K., Pal Y., FACTS Devices Cost Recovery During Congestion Management in Deregulated Electricity Markets. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 97 (3), 339-354, 2016.
33. Acharya N., Sode-Yome A., Mithulananthan N., Facts about flexible AC transmission systems (FACTS) controllers: practical installations and benefits, *Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 1-7, 2005.
34. Le V.D., Li X., Li P., Le C.Q., A novel approach for determining optimal number and placement of static var compensator device to enhance the dynamic performance in power systems, *Electrical Engineering*, 100 (3), 1517-1533, 2018.
35. Eltamaly A.M., El-Sayed A.H.M., Mohamed Y.S., Elghaffar A.N.A., A modified techniques of transmission system by static var compensation (SVC) for voltage control, 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Manama-Bahrain, 1-5, 15-17 April, 2019.
36. Kamel S., Abokrishna M., Selim A., Jurado F., Power flow control of power systems based on a simple TCSC model, *Ain Shams Engineering Journal*, 12 (3), 2781-2788, 2021.
37. Sayed F., Kamel S., Taher M.A., Jurado F., Enhancing power system loadability and optimal load shedding based on TCSC allocation using improved moth flame optimization algorithm, *Electrical Engineering*, 103 (1), 205-225, 2021.
38. Worighi I., Maach A., Hafid A., Hegazy O., van Mierlo J., Integrating renewable energy in smart grid system: Architecture, virtualization and analysis, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 18, 1-13, 2019.
39. Kumar G.B.A., Shivashankar, Optimal power point tracking of solar and wind energy in a hybrid wind solar energy system, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 13 (1), 77-103, 2022.
40. García D., Luis J., Modeling and Control of Squirrel Cage Induction Generator with Full Power Converter Applied to Windmills, e-report, Oulun Yliopisto University of Oulu, Finland, 2009.
41. Hiremath R., Moger T., Comprehensive review on low voltage ride through capability of wind turbine generators, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30 (10), 1-39, 2020.
42. Abd Aziz A.J., Baharuddin N.A., Somalu M.R., Mughtar A., Review of composite cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cell applications, *Ceram Int.*, 46 (15), 23314-23325, 2020.
43. Singh M., Zappa D., Comini E., Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges, *Int J Hydrogen Energy*, 46 (54), 27643-27674, 2021.