



TCSC ve SSSC Cihazları Kullanılarak Enterkonnekte İletim Sisteminin Gerilim ve Yüklenme Parametrelerinin Kontrolü: Örnek Güç Sistemi Uygulaması

Control of Voltage and Loading Parameters of Interconnected Transmission System Using TCSC and SSSC Devices: An Example Power System Application

Umut Emre Uzun¹ , Nihat Pamuk^{1*} , Sezai Taşkın²

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

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

Öz

Aşırı yük altında çalışan enterkonnekte güç sistemlerinde artan enerji talebi ile farklı türde problemler oluşmaktadır. Olası bu tür problemlerin büyümesi ya da birkaç farklı problemin aynı anda meydana gelmesi ile enterkonnekte iletim sisteminin kararlılık yapısı bozulmaktadır. Bu problemlerin düzeltilmesi ve enterkonnekte güç sisteminin kararlılık yapısının artırılması amacıyla güç sistemlerine Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi cihazları (FACTS) bağlanmaktadır. Güç elektroniği elemanlarından meydana gelen FACTS cihazları hızlı ve otomatik tepki verme kabiliyetleri ile güç sisteminin yük taşıma kapasitesini ve kararlılık yapısını anlık olarak arttırmaktadır. Bu çalışmada örnek bir güç sistemi olarak 420 kV Kuzeybatı Anadolu (KBA) enterkonnekte güç sistemi incelenmiştir. İncelenen yüksek gerilim güç sisteminde hat kararlılık indeksleri yardımıyla en kritik enerji iletim hatları tespit edilmiştir. Enterkonnekte güç sisteminin gerilim kararlılık yapısının iyileştirilmesi amacıyla kritik durumdaki enerji iletim hatlarına FACTS cihazları, Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC) bağlanmıştır. Çalışmanın sonunda ise, FACTS cihazlarının güç sistemindeki bara gerilim değerlerine, hat yüklenme parametresine, aktif ve reaktif güç kayıplarına olan etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kuzeybatı Anadolu enterkonnekte güç sistemi, FACTS cihazları, Gerilim kararlılığı, Hat kararlılık indeksleri

Abstract

Different problems occur with the increasing energy demand in interconnected power systems operating under overload. The stability of the interconnected transmission system deteriorates with the growth of such possible problems or the simultaneous occurrence of several different problems. To correct these problems and increase the stability of the interconnected power system, Flexible Alternating Current Transmission System devices (FACTS) are connected to the power systems. FACTS devices, which consist of power electronics elements, instantly increase the loading capacity and stability of the power system with their fast and automatic response capabilities. In this study, a 420 kV Northwest Anatolian (KBA) Interconnected power system is investigated as an example power system. The most critical energy transmission lines are determined with the help of line stability indices in the examined high-voltage power system. FACTS devices, Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC), and Static Synchronous Series Capacitor (SSSC) are connected to the critical energy transmission lines to improve the voltage stability of the interconnected power system. At the end of the study, the effects of FACTS devices on bus voltage magnitudes, line loading parameter, active and reactive power losses in the power system are analyzed in detail.

Keywords: Northwest Anatolian interconnected power system, FACTS devices, Voltage stability, Line stability indices

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: nihatpamuk@gmail.com

Umut Emre Uzun orcid.org/0000-0002-6209-2962

Nihat Pamuk orcid.org/0000-0001-8980-6913

Sezai Taşkın orcid.org/0000-0002-2763-1625



1. Giriş

Günümüzde elektrik, vazgeçilmez bir enerji türüdür. Artan nüfus, gelişen teknoloji ve büyüyen sanayi ile elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Artan enerji talebinin karşılanması için yeni elektrik üretim tesisleri kurulmakta, üretilen enerjinin kayıpsız ve kaliteli bir şekilde tüketiciye ulaştırılması hedeflenmektedir (Tian vd. 2021). Üretilen elektrik enerji kilometrelerce uzunlukta olan enerji iletim hatları ile tüketicilere iletilmektedir. İletim sırasında güç kayıpları artmakta, enerji iletim hatlarının güç taşıma kapasitesi azalmakta ve güç sisteminin kararlılık yapısı bozulmaktadır (Haider vd. 2021). Bu sorunların önüne geçmek için güç sistemlerinde FACTS cihazları kullanılmaktadır. FACTS cihazlarının temel amacı, enerji iletim hatlarının güç taşıma kapasitesini arttırmak, bara gerilim değerlerini düzenlemek ve güç kayıplarını azaltmaktır (Biswas vd. 2021, Singh ve Agnihotri 2018). Güç sistemlerinde farklı yapıda pek çok FACTS cihazı kullanılmaktadır.

Bazı FACTS cihazları güç sistemlerindeki baralara paralel olarak bağlanarak bağlandıkları baraya akım enjekte ederken, bazı FACTS cihazları enerji iletim hatlarına seri olarak bağlanarak bağlandıkları enerji iletim hattına gerilim enjekte etmektedir (Zarkani vd. 2021). Literatür incelendiğinde paralel bağlanan FACTS cihazlarının optimal yerleşim yerinin tespiti için en sık kullanılan yöntem sürekli güç akışı analizi iken, seri bağlanan FACTS cihazlarının optimal yerleşim yerinin tespiti için genellikle hat kararlılık indeksleri kullanılmıştır (Akbar vd. 2021, Chandra vd. 2017, Nadeem vd. 2020, Taher vd. 2021).

Apribowa vd. (2019), 500 kV Java-Bali güç sistemini Power System Analysis Toolbox (PSAT) programında modellemişlerdir. Yapılan çalışmada, modellenen güç sisteminin gerilim kararlılığı sürekli güç akışı analizi ile incelenmiş ve analiz sonucuna göre gerilim değeri en düşük olan baraya SVC cihazı bağlanmıştır. SVC bağlantısı ile güç sisteminin yüklenme kapasitesinde ve bara gerilim profilinde iyileşmeler görülmüştür. Vaidya ve Chandrakar (2022), IEEE 57 baralı güç sistemini hem normal hem de aşırı yüklenme durumunda incelemişlerdir. Yapılan çalışmada sürekli güç akışı analizi ile güç sisteminin yüklenme kapasitesi ve bara gerilim değerleri hesaplanmış, gerilim değeri en düşük olan baraya paralel FACTS cihazlarından Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) bağlanmıştır. Güç sisteminin performansında hem normal hem de aşırı yüklenme durumunda STATCOM cihazının bağlanması ile iyileşmeler görülmüştür. Taher vd. (2022), IEEE 30 baralı güç sisteminin yüklenme kapasitesi arttırmak ve üretim maliyetini

azaltmak için FACTS cihazlarının bağlantı yerini ve kapasitesini tespit eden bir optimal güç akışı algoritması önermişlerdir. Çoklu amaç fonksiyonu içeren optimal güç akışı algoritmasında FACTS cihazlarının bağlantı yerini ve boyutunu tespit etmek için sürekli güç akışı analizinin entegre edildiği İyileştirilmiş Güve-Alev Optimizasyon (IMFO) algoritması kullanılmıştır. Analizler, yüklenme kapasitesi arttırmada, gerilim kararlılığını iyileştirmede, üretim maliyetini ve güç kayıplarını minimize etmede önerilen algoritma ile FACTS cihazları kullanımının güç sistemini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ravikumar vd. (2020), IEEE 5 ve IEEE 6 baralı güç sistemlerinde hat kopması durumunu incelemişlerdir. Güç sistemlerindeki en kritik enerji iletim hattı Aktif Güç Performans İndeksi (APPI) ile belirlenmiş, bu hattın kopması durumunda TCSC cihazının bağlantı yeri Hat Gerilim Kararlılık İndeksi (LQP) ile tespit edilmiştir. TCSC cihazının bağlanması ile güç sistemlerinin bara gerilim değerlerinde ve güvenilirliğinde artış gözlenmiştir. Gupta vd. (2021), IEEE 14 baralı güç sisteminde her bir enerji iletim hattının kopma durumu incelemişlerdir. Çalışmada, kopması durumunda güç sistemi yüklenme kapasitesinin en fazla düşüş gösterdiği enerji iletim hatları sürekli güç akışı analizi ile tespit edilmiştir. Bu hatların kopması durumunda L_{min} , FVSI ve LQP hat kararlılık indeksleri kullanılarak güç sistemini iyileştirmek için kullanılacak SSSC cihazının optimal bağlantı yeri belirlenmiştir.

Bu çalışmada, KBA güç sisteminin 420 kV'luk kısmı PSAT programında modellenmiş ve hat kararlılık indekslerine göre en kritik durumdaki enerji iletim hattına TCSC ve SSSC cihazları bağlanmıştır (Pamuk 2009). Yapılan bağlantılar sonrasında bara gerilim değerlerinde, yüklenme parametresinde, aktif ve reaktif güç kayıplarında meydana gelen değişimler analiz edilmiştir. Daha önce analiz edilmemiş gerçek zamanlı bir güç sisteminin modellenmesi, çeşitli hat kararlılık indeksleri ile en kritik enerji iletim hatlarının tespiti ve seri FACTS cihazlarının karşılaştırılması ile literatüre katkı sağlanmıştır.

2. Gereç ve Yöntemler

2.1. Sürekli Güç Akışı Analizi

Geleneksel Newton-Raphson güç akışı analizi, güç sistemlerinin bara gerilim değerlerini, her bir enerji iletim hattından geçen aktif ve reaktif güç değerlerini hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu analiz yöntemi gerilim kararlılık sınırında çözümsüzdür. Bu nedenle gerilim kararlılığı analizi için kullanılamamaktadır (Karimi vd. 2019).

Sürekli güç akışı analizi, Newton-Raphson güç akış denklemlerine yüklenme parametresi olarak adlandırılan yeni bir değişkenin eklenmesi ile meydana gelmektedir. Yüklenme parametresi ile çözümsüzlük ortadan kaldırılmakta, güç sistemi farklı yük koşullarında incelenebilmekte ve gerilim kararlılık analizi yapılabilmektedir (Barua ve Quamruzzaman 2019).

Newton-Raphson güç akışı analizi ile n-baralı bir güç sisteminde i'inci baraya giren aktif ve reaktif güç denklemleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}),$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}),$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} \quad (2)$$

Eşitliklerde G ve L alt indisleri sırasıyla ilgili baradaki üretim ve yük değerlerini ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu güç akışı denklemlerine yüklenme parametresi eklendiğinde Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 meydana gelmektedir.

$$P_{Li} = P_{L_{i0}} (1 + \lambda) \quad (3)$$

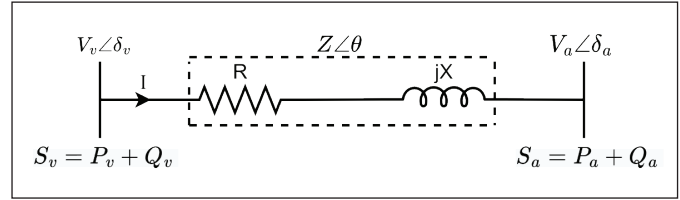
$$Q_{Li} = Q_{L_{i0}} (1 + \lambda) \quad (4)$$

Burada $P_{L_{i0}}$ ve $Q_{L_{i0}}$ temel durumdaki aktif ve reaktif yük miktarını, λ ise yüklenme parametresini ifade etmektedir. λ değerinin sürekli olarak değiştirilmesi ile farklı yüklenme durumunda güç sistemindeki her bir baranın aktif gücü ve bara gerilim değeri incelenmektedir (Barua ve Quamruzzaman 2019, Kobibi vd. 2022).

2.2. Hat Kararlılık Analizi

Hat kararlılık analizi güç sistemlerinde en kritik enerji iletim hattının tespiti için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde analiz için hat kararlılık indeksleri kullanılmaktadır. Literatürde pek çok hat kararlılık indeksi mevcuttur ve çoğu Şekil 1'de görülen 2 baralı bir güç sistemi referans alınarak türetilmiştir. Hat kararlılık indeksleri, enerji iletim hattı kararlı durumda iken 0 ile 1 arasında sonuç vermektedir. Enerji iletim hattının kararsız olduğu durumda ise sonuç 1'den büyük olmaktadır. Güç sistemlerinde tüm enerji iletim hatlarına uygulanan hat kararlılık indekslerinden en büyük değere sahip enerji iletim hattı en kritik hat olarak adlandırılmaktadır (Reis ve Barbosa 2006).

Şekil 1'de S, P, Q, V, δ, R, X sırasıyla görünür gücü, aktif gücü, reaktif gücü, bara gerilim genliğini, bara faz açısını,



Şekil 1. 2 baralı güç sistemi.

enerji iletim hattının rezistansını ve reaktansını ifade etmektedir. v ve a alt indisleri ise alıcı ve verici baraları tanımlamak için kullanılmıştır.

2.2.1 L_{mn} hat kararlılık indeksi

Eşitlik 5'te verilen hat kararlılık indeksinde bara gerilim büyüklüğü, bara faz açısı, reaktif güç, enerji iletim hattı reaktansı ve faz açısı kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının kararlı olması için L_{mn} değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir (Moghavvemi ve Omar 1998).

$$L_{mn} = \frac{4|X|Q_a}{(|V_v| \sin(\theta - \delta))^2} \leq 1 \quad (5)$$

2.2.2 FVSI hat kararlılık indeksi

Eşitlik 6'da verilen hat kararlılık indeksinde bara gerilim büyüklüğü, reaktif güç, enerji iletim hattı empedansı ve reaktansı kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının kararlı olması için FVSI değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir (Musirin ve Abdul Rahman 2002).

$$FVSI = \frac{4|Z|^2 Q_a}{|V_v|^2 |X|} \leq 1 \quad (6)$$

2.2.3 LQP hat kararlılık indeksi

Eşitlik 7'de verilen hat kararlılık indeksinde bara gerilim büyüklüğü, aktif güç, reaktif güç ve enerji iletim hattı reaktansı kullanılmaktadır. Enerji iletim hattının kararlı olması için LQP değerinin 1'den küçük olması gerekmektedir (Mohamed vd. 1998).

$$LQP = 4 \left| \frac{|X|}{|V_v|^2} \right| \left(Q_a + \frac{P_v^2 |X|}{|V_v|^2} \right) \leq 1 \quad (7)$$

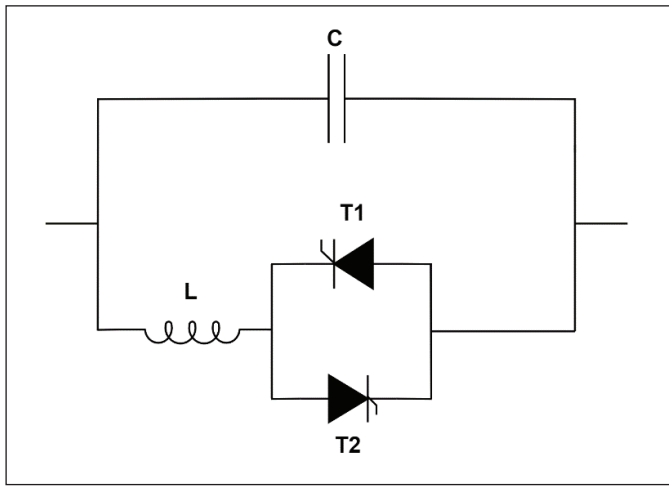
2.3. FACTS Cihazları

FACTS cihazları güç sistemlerinde kararlılığı sağlamak ve güç kalitesini arttırmak amacıyla kullanılan modern kompanzasyon sistemleridir. Geleneksel kompanzasyon sistemlerine kıyasla otomatik ve hızlı bir şekilde cevap verme kabiliyetine sahip olan FACTS cihazlarının temel amaçları güç akışını kontrol etmek ve güç iletim kapasitesini arttır-

maktır. FACTS cihazları bağlantı şekline göre seri, paralel ve seri-paralel FACTS cihazları olmak üzere 3 kısımda incelenmektedir. Seri FACTS cihazlarına Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) ve Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC), paralel FACTS cihazlarına Statik Var Kompanzator (SVC) ve Statik Senkron Kompanzator (STATCOM), seri-paralel FACTS cihazlarına ise Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) örnek olarak verilebilmektedir (Siddique vd. 2019).

2.3.1 TCSC cihazı

TCSC cihazı enerji iletim hattına seri olarak bağlanan, bir kapasitör ve bu kapasitöre paralel bağlı Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)'den meydana gelmektedir. Şekil 2'de TCSC cihazının genel yapısı verilmiştir (Barua vd. 2021).



Şekil 2. TCSC cihazının genel yapısı.

Değişken reaktansa sahip olan TCSC cihazı tristörün tetikleme açısı (α) ile ayarlanabilmektedir. Tetikleme açısı 90 derece ile 140 derece arasında iken değişken reaktans endüktif, 145 ile 180 derece arasında iken ise kapasitif durumdadır. Değişken reaktans ile tetikleme açısı arasındaki karakteristik Şekil 3'te verilmiştir (Taha vd. 2021).

2.3.2 SSSC cihazı

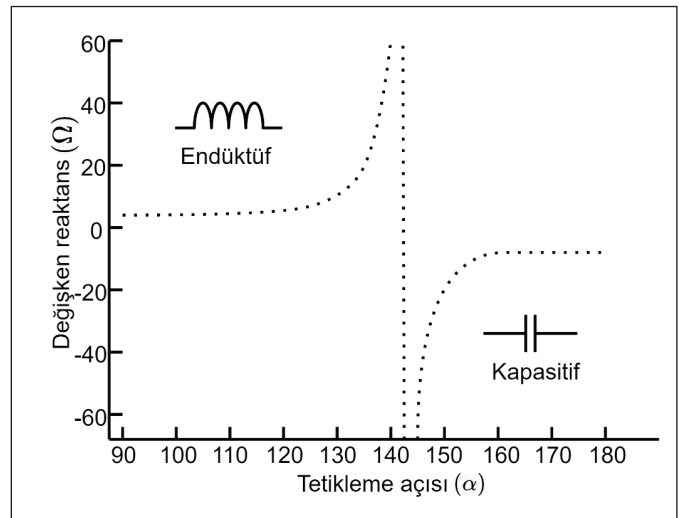
SSSC cihazı enerji iletim hattına seri olarak bağlanan senkron gerilim kaynağından oluşmaktadır. Bu gerilim kaynağı enerji iletim hattına uygun fazda gerilim enjekte etmekte ve hattın empedansını değiştirmektedir. Şekil 4'te SSSC cihazının genel yapısı verilmiştir (Khan vd. 2021).

SSSC cihazı, enerji iletim hattı ile aktif ve reaktif güç alışverişi yapabilmektedir. Cihaz tarafından enjekte edilen gerilim ile enerji iletim hattından akan akım aynı fazda olduğu

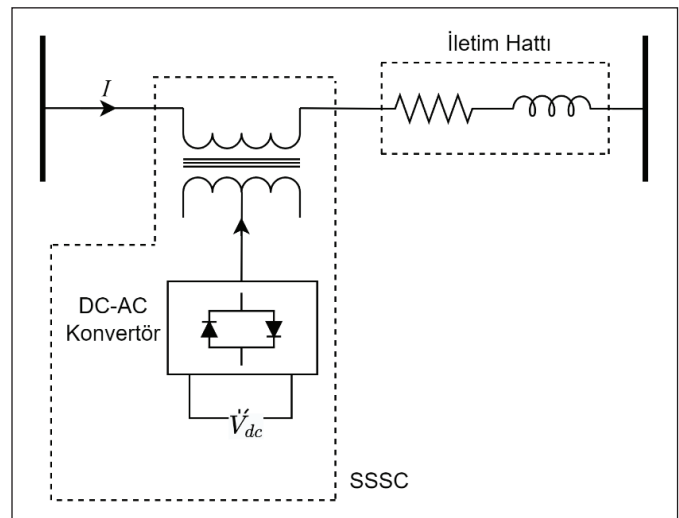
durumda aktif güç alışverişi, enjekte edilen gerilim ile enerji iletim hattından akan akım arasında 90 derece faz farkı olduğu durumda ise reaktif güç alışverişi yapılmaktadır. SSSC cihazının çalışma prensibi Şekil 5'te gösterilmiştir.

3. Bulgular

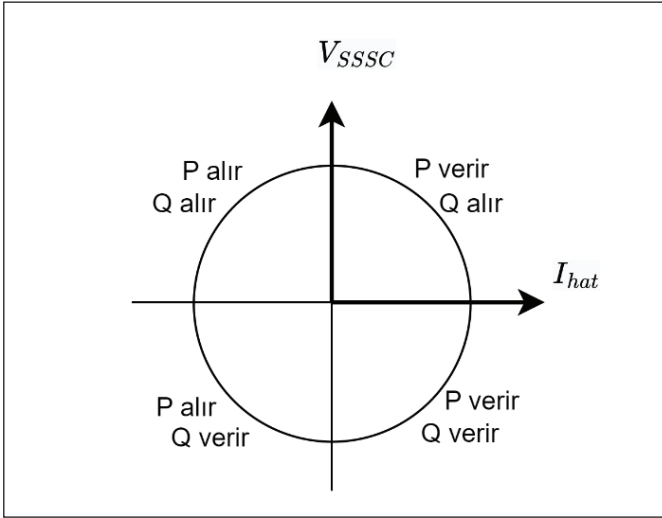
Bu çalışmada KBA güç sisteminin 420 kV'luk kısmı modellenmiş ve gerilim kararlılığı bakımından incelenmiştir. Yapılan incelemelerde güç sistemi ilk olarak temel durumda analiz edilmiştir. Daha sonra güç sistemine hat kararlılık indekslerine göre TCSC ve SSSC cihazları eklenerek analizler tekrarlanmıştır. Son olarak, eklenen FACTS cihazlarının güç sistemine etkisi karşılaştırılmıştır. Çalışmaya ait akış diyagramı Şekil 6'da verilmiştir.



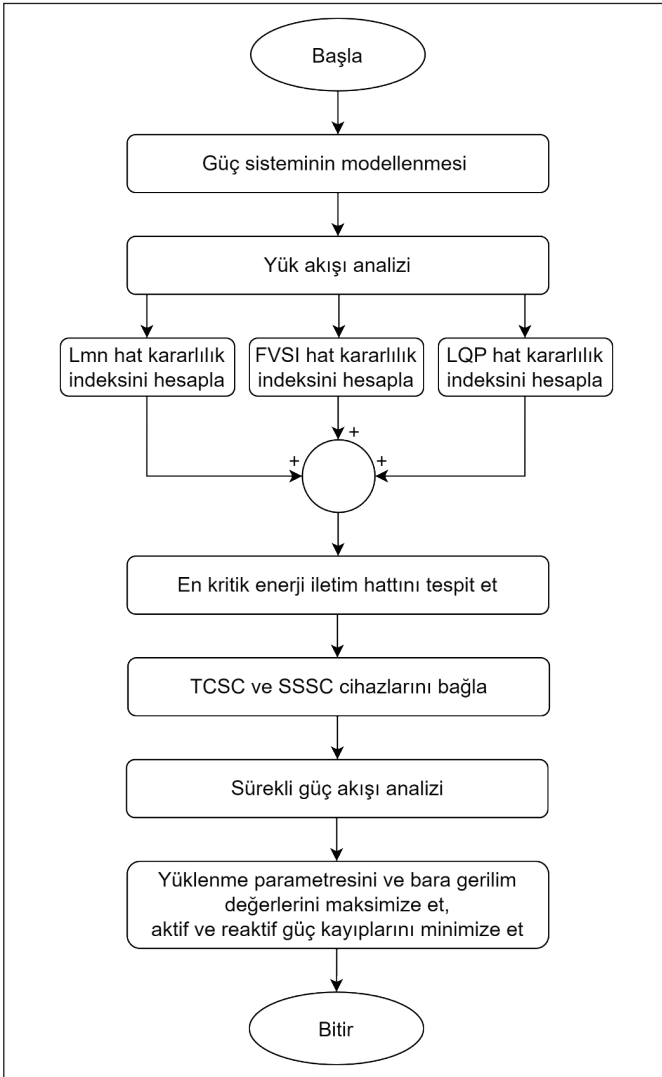
Şekil 3. TCSC cihazı çalışma karakteristiği.



Şekil 4. SSSC cihazının genel yapısı.



Şekil 5. SSSC cihazı çalışma karakteristiği.



Şekil 6. Çalışmaya ait akış diyagramı.

3.1. Kuzeybatı Anadolu (KBA) Güç Sisteminin Modellenmesi

KBA güç sisteminin 420 kV'luk kısmı 1 salınım barası, 4 üretim barası ve 7 yük barası olmak üzere toplam 12 baradan ve 16 iletim hattından meydana gelmektedir. Bu güç sistemine ait iletim hattı parametreleri Ek 1'de verilmiştir. PSAT araç kutusu ile modellenen güç sistemi Şekil 7'de görülmektedir.

3.2. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemi Temel Durum Analizi

Güç sistemlerinde herhangi bir müdahalenin olmadığı durum, temel durum olarak ifade edilmektedir. Sürekli güç akışı analizine göre temel durumdaki KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri Şekil 8A'da gösterilmiştir. Sürekli güç akışı analizine göre gerilim değeri en düşük olan 3 bara sırasıyla Ümraniye, Tepeören ve Paşaköy baralarıdır. Bu baralara ait λ -V eğrisi Şekil 8B'de verilmiştir.

Çizelge 1'de ise temel durumdaki KBA güç sistemine ait genel analiz sonuçları yer almaktadır.

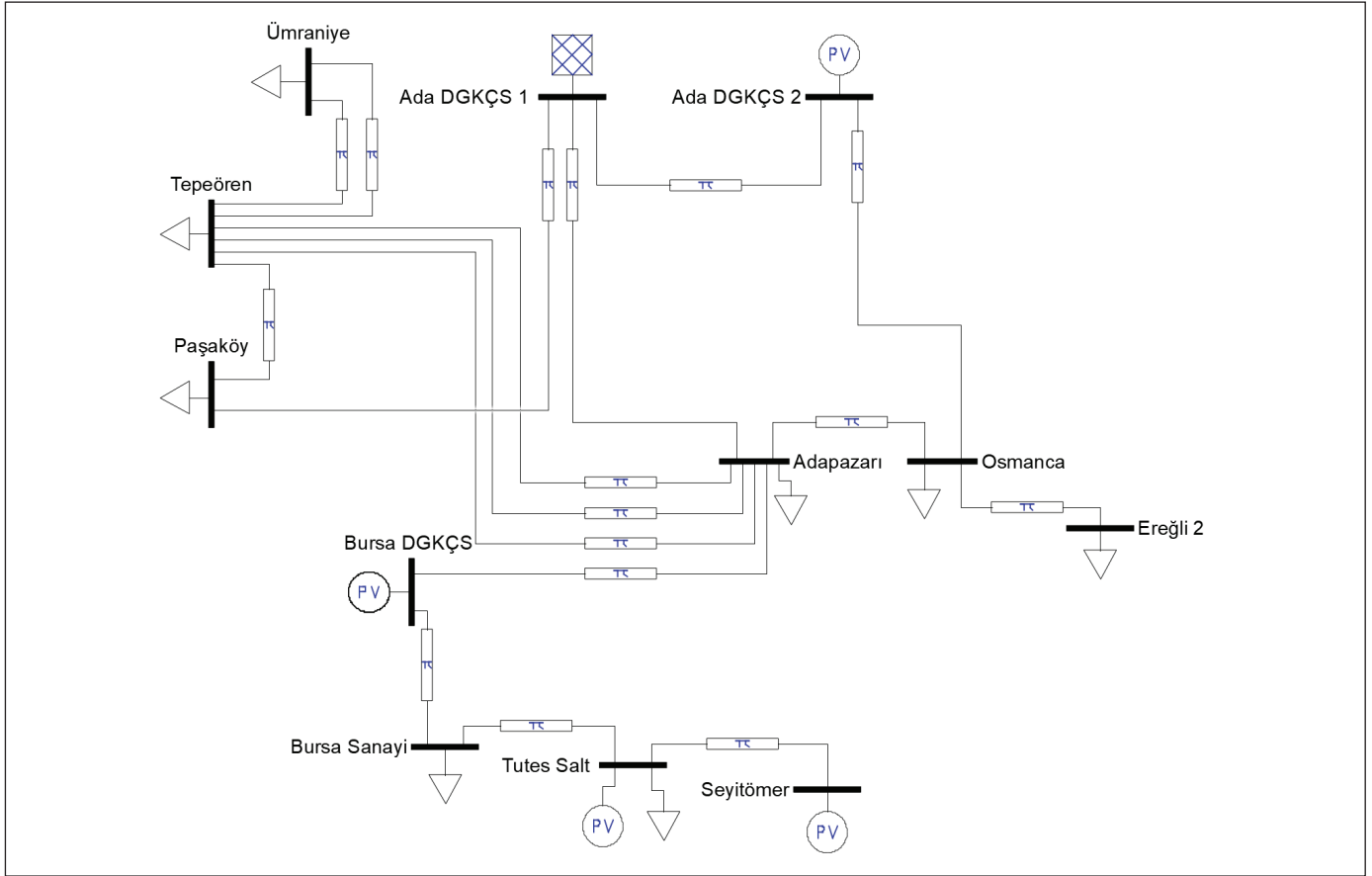
Çizelge 1. Temel durumdaki KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi.

Bara gerilim değerleri	
Ortalama bara gerilim değeri	En düşük bara gerilim değeri
0.86242 p.u.	Ümraniye = 0.57184 p.u.
Kayıplar	
Aktif Güç Kaybı	Reaktif Güç Kaybı
10.06572 p.u.	99.56205 p.u.
Yüklenme Parametresi	
4.436	

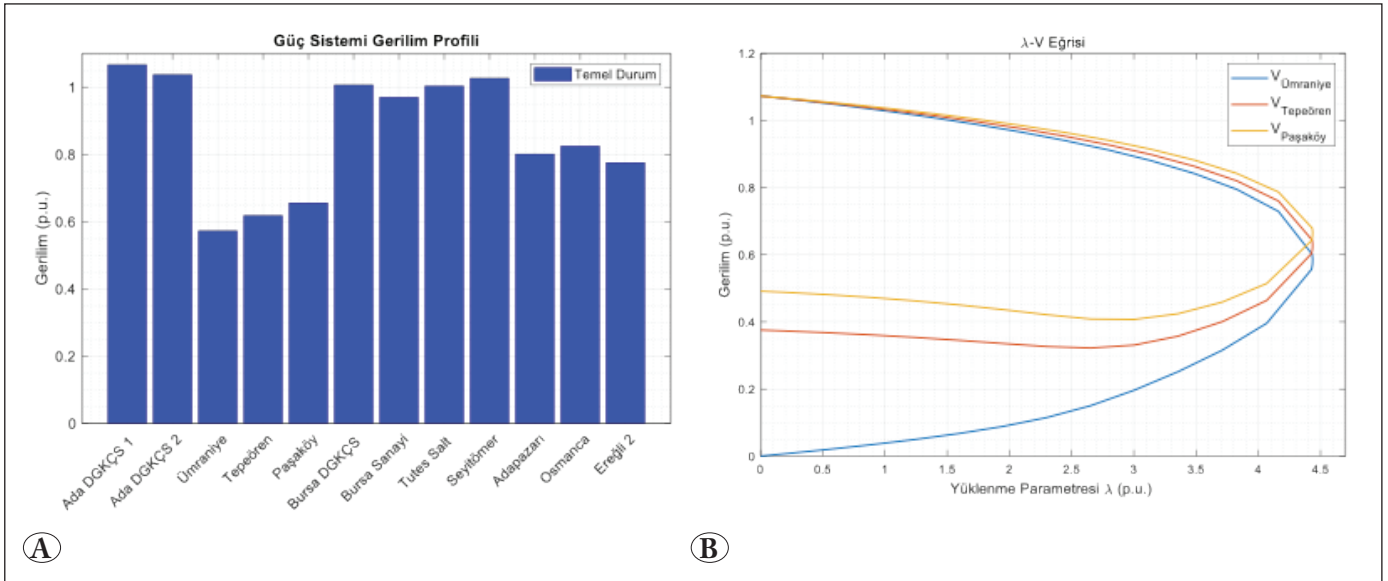
3.3. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemi Hat Kararlılık Analizi

Güç sisteminde seri FACTS cihazlarını en uygun yere yerleştirmek için hat kararlılık indeksleri kullanılmıştır. Uygulanan L_{mn} , FVSI ve LQP hat kararlılık indekslerine ait analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Tüm hat kararlılık indekslerine göre Bursa DGKÇS ve Adapazarı baraları arasında yer alan 3 numaralı enerji iletim hattı en kritik enerji iletim hattıdır. Bu enerji iletim hattına TCSC ve SSSC cihazları bağlanarak analizler tekrarlanmıştır.



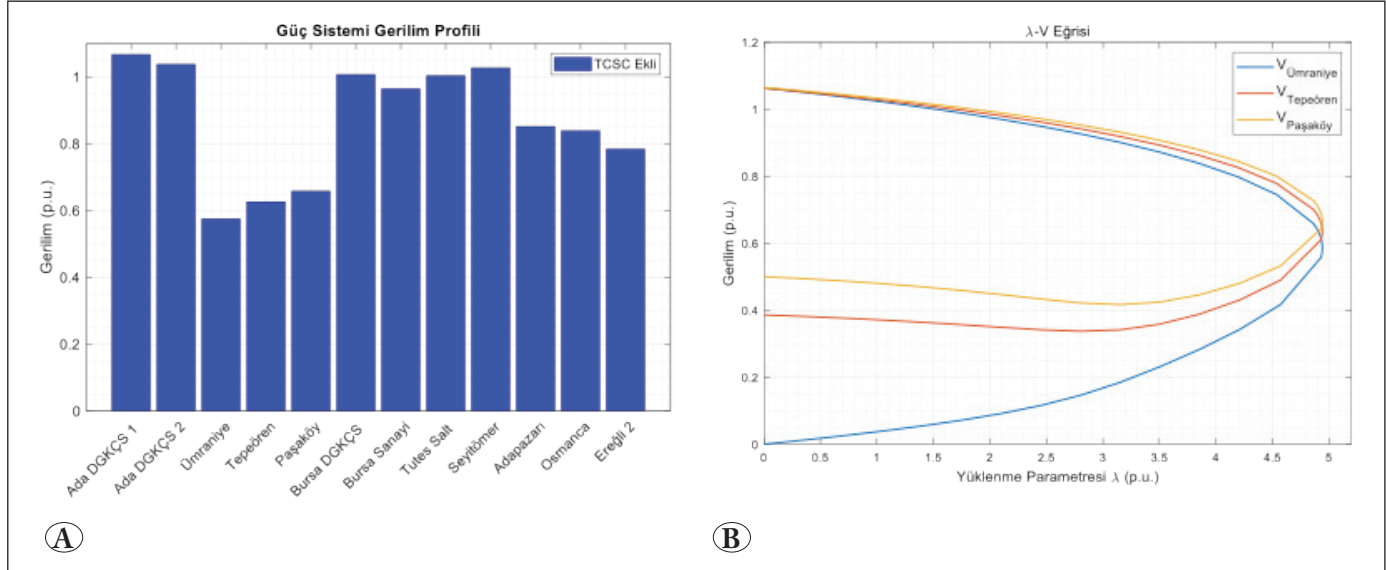
Şekil 7. 420 kV KBA güç sisteminin PSAT modeli.



Şekil 8. KBA güç sisteminin temel durumda; (A) bara gerilim profili, (B) λ- V eğrisi

Çizelge 2. KBA güç sisteminin hat kararlılık indeksi sonuçları

Hat No	L_{mn}	Hat No	FVSI	Hat No	LQP
3	0.188751	3	0.190302	3	0.281853
6	0.108785	6	0.108836	5	0.121383
5	0.108099	5	0.106809	6	0.107991
16	0.083421	16	0.082979	16	0.084298
8	0.07849	8	0.078072	8	0.079468
12	0.068129	12	0.068118	12	0.067328
2	0.039337	2	0.039136	2	0.041568
11	0.032243	11	0.031947	11	0.038959
13	0.030363	14	0.03015	13	0.036947
14	0.030072	13	0.030031	7	0.035103
7	0.028479	7	0.028167	14	0.030361
10	0.027512	10	0.027448	10	0.027579
4	0.015145	4	0.015135	4	0.015076
15	0.014419	15	0.014116	1	0.013892
1	0.013511	1	0.013475	9	0.013892
9	0.013511	9	0.013475	15	0.007025



Şekil 9. KBA güç sistemine TCSC eklendiği durumda; (A) bara gerilim profili, (B) λ- V eğrisi.

3.4. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemine TCSC Cihazının Etkisi

En kritik enerji iletim hattı olan 3 numaralı enerji iletim hattına TCSC cihazı bağlanmış ve tekrarlanan sürekli güç akışı analizine göre güç sisteminin bara gerilim değerleri Şekil 9A'da gösterilmiştir. Sürekli güç akışı analizine göre

gerilim değeri en düşük olan 3 bara sırasıyla Ümraniye, Tepeören ve Paşaköy baralarıdır. Bu baralara ait λ-V eğrisi Şekil 9B'de verilmiştir.

Çizelge 3'te ise TCSC cihazı eklenen KBA güç sistemine ait genel analiz sonuçları yer almaktadır.

Çizelge 3. TCSC cihazı ekli KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi

Bara gerilim değerleri	
Ortalama bara gerilim değeri	En düşük bara gerilim değeri
0.8690 p.u.	Ümraniye = 0.57426 p.u.
Kayıplar	
Aktif Güç Kaybı	Reaktif Güç Kaybı
7.76120 p.u.	89.64424 p.u.
Yüklenme Parametresi	
4.9412	

Temel durum ile TCSC cihazının ekli olduğu durum karşılaştırıldığında, bara gerilim değerlerinin ve yüklenme parametresinin arttığı, aktif ve reaktif güç kayıplarının ise azaldığı görülmüştür.

3.5. Kuzeybatı Anadolu Güç Sistemine SSSC Cihazının Etkisi

En kritik enerji iletim hattı olan 3 numaralı enerji iletim hattına SSSC cihazı bağlanmış ve tekrarlanan sürekli güç akışı analizine göre güç sisteminin bara gerilim değerleri Şekil 10A'da gösterilmiştir. Sürekli güç akışı analizine göre gerilim değeri en düşük olan 3 bara sırasıyla Ümraniye, Tepeören ve Paşaköy baralarıdır. Bu baralara ait λ -V eğrisi Şekil 10B'de verilmiştir.

Çizelge 4'te ise SSSC cihazı eklenen KBA güç sistemine ait genel analiz sonuçları yer almaktadır.

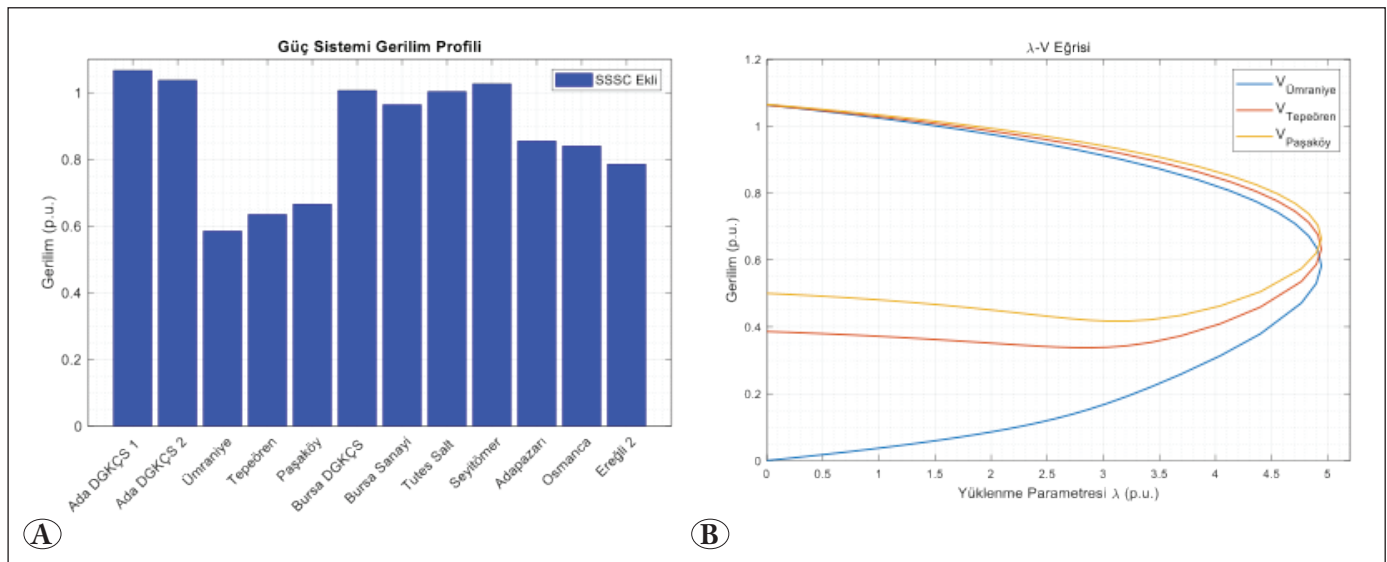
Çizelge 4. SSSC cihazı ekli KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi

Bara gerilim değerleri	
Ortalama bara gerilim değeri	En düşük bara gerilim değeri
0.87184 p.u.	Ümraniye = 0.58415 p.u.
Kayıplar	
Aktif Güç Kaybı	Reaktif Güç Kaybı
7.60345 p.u.	87.77712 p.u.
Yüklenme Parametresi	
4.9415	

Temel durum ile SSSC cihazının ekli olduğu durum karşılaştırıldığında, bara gerilim değerlerinin ve yüklenme parametresinin arttığı, aktif ve reaktif güç kayıplarının ise azaldığı görülmüştür.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada KBA güç sistemi PSAT araç kutusu kullanılarak modellenmiş ve gerilim kararlılığı bakımından incelenmiştir. Kararlılığın iyileştirilmesi için güç sistemine seri FACTS cihazları bağlanmıştır. Güç sistemine bağlanacak olan TCSC ve SSSC cihazlarının optimal yerleşim yerleri farklı hat kararlılık indeksleri kullanılarak tespit edilmiştir. Yapılan bağlantılar ile bara gerilim değerlerinde, yüklenme parametresinde, aktif ve reaktif güç kaybında meydana gelen değişimler Çizelge 5'te özetlenmiştir.



Şekil 10. KBA güç sistemine SSSC eklendiği durumda; (A) bara gerilim profili, (B) λ -V eğrisi.

Çizelge 5. Tüm durumlarda KBA güç sisteminin bara gerilim değerleri, güç kayıpları ve yüklenme parametresi.

	Ortalama bara gerilim değeri (p.u.)	En düşük bara gerilim değeri (p.u.)	Aktif Güç Kaybı (p.u.)	Reaktif Güç Kaybı (p.u.)	Yüklenme Parametresi
Temel Durum (FACTS yok)	0.86242	0.57184	10.06572	99.56205	4.436
TCSC ekli	0.86900 (% 0.76 artış)	0.57426 (% 0.42 artış)	7.76120 (% 22.89 azalış)	89.64424 (% 9.96 azalış)	4.9412 (% 11.39 artış)
SSSC ekli	0.87184 (% 1.09 artış)	0.58415 (% 2.15 artış)	7.60345 (% 24.46 azalış)	87.77712 (% 11.84 azalış)	4.9415 (% 11.40 artış)

İncelemeler sonucunda her iki FACTS cihazının da iletim hattının yük taşıma kapasitesini arttırdığı, bara gerilim değerlerini iyileştirdiği, aktif ve reaktif güç kayıplarını ise azalttığı görülmektedir. Kullanılan FACTS cihazları karşılaştırıldığında; SSSC cihazının ortalama bara gerilim değerini % 1.09, en düşük bara gerilim değerini % 2.15, yüklenme parametresini % 11.40 arttırması, aktif güç kaybını % 24.46, reaktif güç kaybını ise % 11.84 azaltması sonucunda TCSC cihazına kıyasla güç sistem performansını iyileştirmede daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Gelecek çalışmalarda KBA güç sisteminin tamamı modellenerek kararlılık bakımından incelenmesi, seri FACTS cihazlarına ek olarak paralel FACTS cihazlarının da güç sistemine bağlanarak karşılaştırılması ve FACTS cihazlarının optimal yerleşim yeri ve kapasitesinin tespiti için çeşitli optimizasyon algoritmalarının kullanılması hedeflenmektedir.

5. Kaynaklar

- Akbar, R., Sara, I. D., Suriadi. 2021.** Analysis of UPFC Installation Effect on Power Flow in the 150 kV Aceh Transmission System. *International Conference on Computer System, Information Technology, and Electrical Engineering, COSITE*, 35–40. <https://doi.org/10.1109/COSITE52651.2021.9649452>
- Apribowa, C. H. B., Listiyanto, O., Ibrahim, M. H. 2019.** Placement Static Var Compensator (SVC) for Improving Voltage Stability Based on Sensitivity Analysis : A Case Study Of 500 KV Java-Bali Electrical Power System. *6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, 276–280. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF48524.2019.9102590>
- Barua, P., Barua, R., Quamruzzaman, M., Rabbani, M. G. 2021.** Small Signal Stability and Transient Stability improvement of Bangladesh Power System using TCSC, SVC and TCSC, STATCOM based Series Shunt Compensator. *International Conference on Science and Contemporary Technologies, ICSCCT*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSCCT53883.2021.9642636>

- Barua, P., Quamruzzaman, M. 2019.** Steady state voltage vulnerability and stability limit analysis of Bangladesh power system using STATCOM as a shunt compensator. *4th International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, ICEEICT*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/CEEICT.2018.8628122>
- Biswas, P. P., Arora, P., Mallipeddi, R., Suganthan, P. N., Panigrahi, B. K. 2021.** Optimal placement and sizing of FACTS devices for optimal power flow in a wind power integrated electrical network. *Neural Computing and Applications*, 33(12): 6753–6774. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05453-x>
- Chandra, A., Pradhan, A. K., Sinha, A. K. 2017.** A Comparative Study of Voltage Stability Indices Used for Power System Operation. *International Conference on 21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications, ICTFCEN*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTFCEN.2016.8052703>
- Gupta, S. K., Mallik, S. K., Tripathi, J. M., Sahu, P. 2021.** Comparison of Voltage Stability Index with Optimal Placement of SSSC Considering Maximum Loadability. *International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation, IRIA*, 101–106. <https://doi.org/10.1109/IRIA53009.2021.9588759>
- Haider, W., Ul Hassan, S. J., Mehdi, A., Hussain, A., Adjayeng, G. O. M., Kim, C. H. 2021.** Voltage profile enhancement and loss minimization using optimal placement and sizing of distributed generation in reconfigured network. *Machines*, 9(1): 1–16. <https://doi.org/10.3390/machines9010020>
- Karimi, M., Shahriari, A., Aghamohammadi, M. R., Marzooghi, H., Terzija, V. 2019.** Application of Newton-based load flow methods for determining steady-state condition of well and ill-conditioned power systems: A review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 113: 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.055>

- Khan, N. H., Wang, Y., Tian, D., Jamal, R., Kamel, S., Ebeed, M. 2021.** Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem. *IEEE Access*, 9: 49249–49266. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3061503>
- Kobibi, Y. I. D., Djehaf, M. A., Khatir, M., Ouadafraksou, M. 2022.** Continuation Power Flow Analysis of Power System Voltage Stability with Unified Power Flow Controller, *J. Intell Syst. Control*. <https://doi.org/10.56578/jisc010106>
- Moghavvemi, M., Omar, F.M. 1998.** Technique for Contingency Monitoring and Voltage Collapse Prediction. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 145(6): 634–640. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19982355>
- Mohamed, A., Jasmon, G. B., Yusof, S. 1998.** A Static Voltage Collapse Indicator Using Line Stability Factors. *Journal of Industrial Technology*, 7(1): 73–85.
- Musirin, I., Abdul Rahman, T. K. 2002.** Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission System. *Student Conference on Research and Development: Globalizing Research and Development in Electrical and Electronics Engineering, SCORED*, 265–268. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2002.1033108>
- Nadeem, M., Imran, K., Khattak, A., Ulasayar, A., Pal, A., Zeb, M. Z., Padhee, M. 2020.** Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm. *Energies*, 13(3): 1–24. <https://doi.org/10.3390/en13030753>
- Pamuk, N. 2009.** 380 ve 154 kV'luk Kuzeybatı Anadolu Şebekesi Güç Akışı Benzetimleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 109s.
- Ravikumar, S., Upadhyay, P., Upadhyay, B. 2020.** Line Stability Index-Based Voltage Stability Assessment Placing Series Compensation of TCSC. *Learning and Analytics in Intelligent Systems*, 57–67.
- Reis, C., Maciel Barbosa, F. P. 2006.** A comparison of voltage stability indices. *Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON*, 1007–1010. <https://doi.org/10.1109/melcon.2006.1653269>
- Siddique, A., Xu, Y., Aslam, W., Rasheed, M. 2019.** A Comprehensive Study on FACTS Devices to Improve the Stability and Power Flow Capability in Power System. *Asia Power and Energy Engineering Conference, APEEC*, 199–205. <https://doi.org/10.1109/APEEC.2019.8720685>
- Singh, N., Agnihotri, P. 2018.** Power System Stability Improvement Using FACTS Devices. *International Journal of Advance Research and Development*, 4(3): 171–176.
- Taha, I. B. M., ELGebaly, A. E., Ahmed, E. S., Abd el-Ghany, H. A. 2021.** Generalized voltage estimation of TCSC-compensated transmission lines for adaptive distance protection. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 130:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107018>
- Taher, A. Kamel, S., Jurado, F., Yu, J. 2022.** Optimal Locations and Sizes of Shunt FACT Devices for Enhancing Power System Loadability Using Improved Moth Flame Optimization. *Electric Power Components and Systems*, 49(20): 1536–1554. <https://doi.org/10.1080/15325008.2022.2134512>
- Taher, M. A., Kamel, S., Jurado, F. 2021.** Maximizing Power System Loadability Based on Optimal Allocation of SVC and STATCOM. *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/CHILECON54041.2021.9703037>
- Tian, J., Li, K., Xue, W. 2021.** An adaptive ensemble predictive strategy for multiple scale electrical energy usages forecasting. *Sustainable Cities and Society*, 66:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102654>
- Vaidya, P., Chandrakar, V. K. 2022.** Congestion Management of Large Power Network with Static Synchronous Compensator. *Journal of Intelligent Systems and Control*, 1(1): 60–67. <https://doi.org/10.1109/CONIT55038.2022.9848176>
- Zarkani, M. K., Tukkee, A. S., Alali, M. J. 2021.** Optimal placement of facts devices to reduce power system losses using evolutionary algorithm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(3): 1271–1278. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v21.i3.pp1271-127>

EKLER

Ek 1. KBA güç sistemi iletim hattı parametreleri.

Hat No	Baralar		Resistans (p.u.)	Reaktans (p.u.)	Süseptans (p.u.)
1	Tepeören	Ümraniye	0.000769	0.007119	0.15741
2	Osmanca	Ada DGKÇS 2	0.001187	0.013633	0.447872
3	Bursa DGKÇS	Adapazarı	0.003374	0.031179	0.692429
4	Tepeören	Paşaköy	0.000331	0.003807	0.125077
5	Paşaköy	Ada DGKÇS 1	0.001274	0.019048	0.65504
6	Ada DGKÇS 2	Ada DGKÇS 1	0.000013	0.000147	0.004842
7	Adapazarı	Tepeören	0.001979	0.018287	0.406122
8	Adapazarı	Ada DGKÇS 1	0.000469	0.004334	0.096258
9	Tepeören	Ümraniye	0.000769	0.007119	0.15741
10	Ereğli 2	Osmanca	0.001174	0.010699	0.249531
11	Adapazarı	Tepeören	0.001321	0.015177	0.498591
12	Adapazarı	Osmanca	0.001631	0.014856	0.346473
13	Adapazarı	Tepeören	0.002097	0.019424	0.429504
14	Bursa DGKÇS	Bursa Sanayi	0.000389	0.003592	0.079781
15	Bursa Sanayi	Tutes Salt	0.002112	0.019471	0.443313
16	Tutes Salt	Seyitömer	0.00101	0.009314	0.212059