T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN FACTS ELEMANLARI KULLANILARAK ŞEBEKE GERİLİM VE FREKANS REGÜLASYONU ÜZERİNE FİZİBİLİTE ANALİZİ

Ergin KAYAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2020

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN FACTS ELEMANLARI KULLANILARAK ŞEBEKE GERİLİM VE FREKANS REGÜLASYONU ÜZERİNE FİZİBİLİTE ANALİZİ

Ergin KAYAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2020

ANTALYA

T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN FACTS ELEMANLARI KULLANILARAK ŞEBEKE GERİLİM VE FREKANS REGÜLASYONU ÜZERİNE FİZİBİLİTE ANALİZİ

Ergin KAYAR

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez TUBİTAK tarafından 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı 2018/2 proje ile desteklenmiştir.

TEMMUZ 2020

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN FACTS ELEMANLARI KULLANILARAK ŞEBEKE GERİLİM VE FREKANS REGÜLASYONU ÜZERİNE FİZİBİLİTE ANALİZİ

Ergin KAYAR

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 09/07/2020 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Hamza Feza CARLAK (Danışman)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Atilla DÖNÜK

ÖZET

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN FACTS ELEMANLARI KULLANILARAK ŞEBEKE GERİLİM VE FREKANS REGÜLASYONU ÜZERİNE FİZİBİLİTE ANALİZİ

Ergin KAYAR

Yüksek Lisans Tezi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hamza Feza CARLAK

Temmuz 2020; 97 sayfa

Elektrik enerjisinin arzında süreklilik çok önemli olup enterkonnekte güç sistemlerinde enerjinin devamlılığını sağlamak için, üretim ve tüketim miktarları her zaman dengede olmalıdır. Bu da ancak güç sisteminin gerilim ve frekansını dengede tutarak mümkün olabilir. Başka bir ifade ile arz ve talebin dengesi süreklilik göstermelidir. Aksi takdirde istenmeyen büyük dinamik salınımlar, gerilim çökmeleri meydana gelebilir. Enterkonnekte güç sistemlerinde elektrik enerjisinin kalitesi bozulur ve enterkonnekte güç sisteminin bölgesel veya ulusal çökmesine kadar varabilen problemlere yol açabilir. Çalışma kapsamında güç elektroniğine dayalı mikro elektronik, haberleşme ve ileri kontrolör uygulamaları içeren FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) kontrolörleri ile güç sistemleri kontrol altında tutularak, güç transferlerinin düzenlenip, taşıma kapasitelerinin de belirli sınırlar dâhilinde artırılabileceği gösterilmiştir. FACTS cihazları ile baralardaki gerilimin büyüklüğü ve faz açısı kontrol edilirken, iletim hatlarının işletme limitleri dâhilinde güvenli bir şekilde yüklenmesi ile sistem kayıpları en aza indirgenebilecektir. Güç sisteminde kullanılacak olan FACTS cihazlarının yerlerinin belirlenmesinde sezgisel algoritmalar kullanılarak, kayıpların minimize edilmesi doğrultusunda FACTS cihazlarının konumlanacağı bölgeler belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmalarında sezgisel yöntemler ile elde edilen GA ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. Sezgisel yöntemler ile güç sisteminin Kuzey barası optimum bara, ve FACTS cihazlarının çıkış gücü değeri 255 MVAr olarak bulunmuştur. Farklı sezgisel yöntemlerin optimizasyon teknikleri kullanarak, FACTS cihazların gerilim kararlılığına ve sistem kayıplarının azaltılmasına olan etkileri gösterilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda enerji iletim sisteminin gerilim değerleri regüle edilmiş ve kayıpların azaltılmasına bağlı olarak sistem yüklenebilirliği artırılmıştır. Tez çalışmasında, Batı Akdeniz Bölgesi'nde bulunan güç sistemi, gerçekçi ulusal veriler kullanılarak yük akışı analizleri Dig-SILENT Power Factory yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Güç sisteminde arıza oluşması durumunda, bara gerilimleri, aktif ve reaktif yük akışları incelenmiştir. FACTS cihazlarının dinamik bir sistem olan güç sistemlerinde, anlık ihtiyaçlara bağlı olarak reaktif güç üretip tüketebilen, reaksiyon süresi oldukça hızlı olan, güvenli ve işletme esnekliğine sahip sistemler olduğu görülmüştür. Enerji iletim sistemlerinde maksimum yüklenme sınırlarının bu sayede artırılabileceği ve güç sisteminin kontrolünü de kolaylaştırabileceği gerçekçi parametrelerle belirlenmiştir. SVC ve STATCOM kontrolörlerinin güç sisteminde oluşan gerilim çökmelerine karşı, sistemin kararlılık sınırlarına olan etkileri incelenmiştir. Optimize edilmiş FACTS cihazlarının güç sistemine entegre edilmesiyle, kritik baraların yüklenme kapasiteleri artmıştır. Şebeke modelinde meydana gelen sistem arızalarından

ötürü kritik bara gerilimlerinde aşırı osilasyonlar oluşmaktadır. Alt limit aralığı 0.95-1.0p.u. olan gerilim düşümlerinde ve üst limit aralığı 1.0-1.05p.u. olan gerilim yükselmelerinde, FACTS cihazları bara gerilimlerini işletme limitlerinde tutmaktadır. Ayrıca, generatör gerilim kararlılığı da yükseltilerek buna göre güç sisteminin kapasitesi artırılmıştır. Enerji iletim sistemindeki 55.87 MWh olan toplam teknik kayıplar, SVC kontrolörleri ile 52.88 MWh'e ve STATCOM kontrolörleri ile 48.48 MWh değerine düşürülmüştür. Teknik kayıpların azaltılmasında en yüksek performansı, %13.22 kayıpları azaltan STATCOM kontrolörünün göstermiş olduğu, SVC denetleyicileri ile ise teknik kayıpların % 5.33 azaltıldığı tespit edilmiştir. STATCOM kontrolörleri, SVC kontrolörlerine göre iletim kayıplarını daha etkin bir şekilde minimize ederek, mevcut iletim sisteminin çalışma sınırlarını genişletmektedir. STATCOM kontrolörleri modellenen pilot güç sisteminde, SVC kontrolörlerine göre %10 daha fazla reaktif güç sağlayabilmektedir. STATCOM kontrolörlerinin bulunduğu baralarda, ani reaktif güç değişimlerine ve gerilim düşümlerine karşı simülasyon süresinin %1 inden daha düşük bir sürede anahtarlama yaparak cevap verdiği ve simülasyon süresinin %5 'inden daha düşük bir sürede sistemin kararlı hale getirdiği görülmektedir.

Pilot bölge olarak seçilen ulusal bir elektrik enerji iletim sistemini, FACTS teknolojisi kullanılarak gerçekçi değerlerle modelleyip fizibilite çalışmasının gerçekleştirilmesi ile elde edilen sonuçlar ışığında Türkiye enterkonnekte sistemi için gerilim ve reaktif güç kontrolünün hassasiyetini artırarak, üretim ve tüketim dengesini daha kararlı hale getirmek suretiyle, teknik olarak enerji iletim maliyetinin düşürülmesine katkıda bulunulabileceği ön görülmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Güç sistemleri, yük akışı, gerilim regülasyonu, gerilim kararlılığı, reaktif güç regülasyonu, yapay sinir ağları, FACTS, STATCOM, SVC.

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Hamza Feza CARLAK

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Atilla DÖNÜK

ABSTRACT

FEASIBILITY ANALYSIS OF ENERGY TRANSMISSION SYSTEMS ON GRID VOLTAGE AND FREQUENCY REGULATION USING FACTS ELEMENTS

Ergin KAYAR

MSc Thesis in Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hamza Feza CARLAK

July 2020; 97 pages

In interconnected power systems, continuity is an essential requirement for the supply of electrical energy and in order to provide this, production and consumption amounts must always be in balance. This can only be possible by means of balancing the voltage and frequency of the power system. i.e., there must always be the supply and demand equilibrium. Failing that, undesired large dynamic oscillations and voltage collapse may occur, and the quality of electrical energy in interconnected power systems deteriorates and this may cause regional or national crashes. Within the scope of the study, it has been shown that by arranging the power transfers their carrying capacity can be increased within certain limits by keeping power systems under control with micro-electronics, communication, and advanced controller applications. While the voltage size and phase angle of the bus are controlled with FACTS devices, system losses can be minimized by safely loading the transmission lines within the operating limits. By using neural network algorithms, the optimum locations and dimensions of the FACTS devices were determined in order to minimize the technical losses. The optimization study was implemented by GA and PSO algorithms. The optimum bus was obtained as the north bus and the output power of the FACTS devices was acquired as 255 MVAr. Using optimization techniques of different neural network methods, the effects of FACTS on the voltage stability, and the reduction of system losses have been demonstrated. As a result of the optimizations study, the bus voltages of the energy transmission system were regulated and the system loadability was increased due to the reduction of losses. In this work, the power system of the Western Mediterranean grid was modeled using Dig-SILENT Power Factory software for load flow analyses using realistic national data. In case of failure in the power system, bus voltages, active and reactive load flows were analyzed. FACTS devices are dynamic power systems that can produce and consume reactive power based on instantaneous needs, have a fast reaction time, are safe, and have operational flexibility. It is determined by realistic parameters that maximum load limits in energy transmission systems can be increased in this way and facilitate the control of the power system. The effects of SVC and STATCOM controllers on the stability limits of the system against voltage crashes in the power system were studied. The loading capacity of critical busses has increased with the integration of optimized FACTS devices. Due to system failures occurring in the network model, excessive oscillations occur in critical bus voltages. FACTS devices keep bus voltages at operating limits in the case of voltage drops (0.95-1.0 p.u.), and voltage increases (1.0-1.05 p.u.). In addition, by improving the voltage stability of the generator, the capacity of the power system has been increased accordingly. Total technical losses of 55.87 MWh in the power transmission system were reduced to 52.88 MWh with SVC controllers and 48.48 MWh

with STATCOM controllers. The highest performance in reducing technical losses was performed by the STATCOM controller, which reduced losses by 13.22%, while the technical losses were reduced by 5.33% with the SVC controllers. STATCOM controllers have been extended the operating limits of the existing transmission system by minimizing transmission losses more effectively than SVC controllers. STATCOM controllers can provide 10% more reactive power than SVC controllers in the modeled pilot power system. It is considered STATCOM controllers respond to sudden reactive power changes and voltage drops by switching in less than 1% of the simulation time and stabilizing the system in less than 5% of the simulation duration.

The feasibility study was carried out for the pilot grid which is a national electric power transmission system using FACTS technology with the realistic network data. The results obtained. In the light of the feasibility analysis, by increasing the sensitivity of the voltage and reactive power control for the Turkey's interconnected system, the balance of production and consumption may be achieved, and that can contribute to reduce the cost of energy transmission by lowering the technical losses.

KEYWORDS: Power systems, load flow, reactive power regulation, voltage regulation, voltage stability, neural networks, FACTS, STATCOM, SVC.

COMMITTEE Asst. Prof. Dr. Hamza Feza CARLAK

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Asst. Prof. Dr. Atilla DÖNÜK

ÖNSÖZ

Mevcut elektrik şebeke altyapısı giderek daha karmaşık hale gelen ve büyüyen elektrik güç sistemlerindeki gereksinimleri karşılamada yetersiz kalabilmekte ve büyük dinamik salınımlar, geçici ve sürekli hal kararsızlığı, gerilim çökmesi ve salınımları, düşük transfer kapasitesi ve iletim hatlarındaki termal kapasitelerin aşılması söz konusu olabilmektedir. Enerji iletiminde en önemli parametreler, kalite, güvenilirlik, süreklilik ve bütün parametrelerin en ekonomik şekilde sağlanabilmesidir. Bu aşamada, enerji kalitesi ve üretim maliyetinin en uygun değerde işlenebilmesi için enerji üretim sistemlerindeki kontrol edilebilir parametrelerin optimize edilmesi amacıyla sistemin matematiksel modellemesinin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Güç elektroniğine dayalı mikro elektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) olarak isimlendirilen yeni bir kontrol sistemi ile güç sistemleri kontrol altında tutularak güç transferlerinin düzenlenip taşıma kapasitelerinin de belirli sınırlar dâhilinde artırılabilmesi ön görülmektedir. Bu bağlamda güç akışı kontrolünde, dinamik kararlılıkta, sürekli ve geçici hal kararlılığında, iletim transfer kapasitesinin arttırılmasında, gerilim kararlılığında, reaktif güç kontrolünde önemli faydalar sağlayan FACTS cihazlarının yerinin ve boyutunun belirlenmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir. Literatürdeki ilgili çalışmalara bakıldığında, FACTS teknolojisine yönelik primitif çalışmalar yapılmış ve FACTS kontrolörleri sınıflandırarak incelenmiş olmasına karşın gerçek bir enerji iletim sistemi için hatta dair bütün parametreler hesaba katılarak gerçekçi değerlerle oluşturulmuş gerçek bir güç sistemi modeli için FACTS teknolojisi kullanılarak fizibilite çalışması gerçekleştirilmemiştir.

FACTS cihazlarının bara gerilim değişimleri ve hat kapasiteleri açısından optimum yerleşimlerini ve değerlerini belirleyen bir yöntemle performansı test edilecektir. Gerçek bir bölgeye ait ulusal veriler kullanılarak analizler gerçekleştirilecek ve elde edilen sonuçlar hali hazırda kullanılan mevcut sistemle karşılaştırılarak FACTS teknolojisinin sağlamış olduğu faydalar Türkiye enterkonnekte sisteminin iyileştirmesi için değerlendirilecektir.

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Hamza Feza CARLAK ‘a, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili hocam sayın Prof Dr. Şükrü ÖZEN ‘e çalışmalarım sırasında manevi desteğini her zaman hissettiğim ve hep yanımda olan sevgili eşim Merve KAYAR ‘a ve sevgili oğlum Ege Ergin KAYAR ’a yürekten teşekkür ederim.

Bilimin ve bilim insanının destekçisi olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt içi Yüksek Lisans Burs Programı 2018/2 desteğinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
ÖNSÖZ v
AKADEMİK BEYAN viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 4
3. MATERYAL VE METOT 9
3.1. Güç Akışı 9
3.2. İletim Sisteminde Güç Kompanzasyonunun Temel Prensibi 12
3.2.1. Paralel kompanzasyon 13
3.2.2. Seri kompanzasyon 14
3.3. FACTS Cihazları 15
3.3.1. SVC (Statik Var Kompanzatör) Kontrolörleri 17
3.3.2. STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) kontrolörleri 18
3.4. Güç Sistemlerinde FACTS Cihazlarının Optimum Yerleştirilmesi ve Boyutlandırılması (Genetik Algoritma ve PSO algoritma uygulaması) 21
3.4.1. Genetik algoritma uygulaması 24
3.4.2. Parçacık sürü optimizasyonu uygulaması 25
3.4.3. Sezgisel algoritmalar ile optimal güç akışı 26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 31
4.1. Seri ve Şönt Elemanlar Kullanarak Gerilim ve Reaktif Güç Regülasyonu 32
4.1.1. Hat arızası durumunda gerilim ve reaktif güç analizi 42
4.2. FACTS Elemanları vasıtasıyla gerilim ve reaktif güç regülasyonu 51
4.2.1. Optimizasyon çalışması 52
4.2.2. Optimize edilmiş FACTS elemanları kullanılarak gerilim ve reaktif güç regülasyonu 55
4.2.3. Hat arızası sonrası FACTS elemanları kullanılarak gerilim ve reaktif güç regülasyonu 60

4.3. FACTS Cihazlarında Yatırım Maliyet Analizi 76
5. SONUÇLAR 86
6. KAYNAKLAR 88
8. EKLER 94
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Enerji İletim Sistemlerinin FACTS Elemanları Kullanılarak Şebeke Gerilim ve Frekans Regülasyonu Üzerine Fizibilite Analizi" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

……/……../2020

Ergin KAYAR

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A : Amper

C : Kondansatör

I : Akım

IC : Minimum Kurulum Maliyeti

kA : Kiloamper

kV : Kilovolt

kW : Kilowatt

MVA : Megavolt Amper

MVAr : Megavolt Amper Reaktif

MW : Megawatt

P : Etkin Güç

p.u. : Birim Değer

R : Direnç

s : FACTS Cihazlarının Çalışma Seviyesi

Sn : Saniye

V : Gerilim

W : Watt

Q : Tepkin Güç

X_L : Endüktif Reaktans

X_c : Kapasitif Reaktans

δ : Faz Açısı

Ω : Ohm

Kısaltmalar

ABC : Yapay Arı Koloni Algoritması

AC : Alternatif Akım

ASVC : Gelişmiş Statik Var Kompanzatör

BSA : Geri İzleme Arama Algoritmasını

CIGRE : Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi

DC : Doğru Akım

DE : Diferansiyel Evrim

EPDK : Enerji Piyasa Düzenleme Kurumu

EPİAŞ : Enerji Piyasaları İşletme Anonim Şirketi

EPRI : Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü

ETSO : Avrupa İletim Sistemi Operatörleri

FA : Ateş Böceği Algoritması

FC : Sabit Kapasitör

FR : Sabit Reaktör

FACTS : Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi

GA : Genetik Algoritma

GSA : Yerçekimi Arama Algoritması

IEEE : Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü

IPFC : Hat Arası Güç Akış Kontrolörü

ICA : Emperyalist Rekabetçi Algoritma

MATLAB : Matrix Laboratory

MSC : Mekanik Anahtarlamalı Kapasitör

MSR : Mekanik Anahtarlamalı Reaktör

NPV : Net Bugünkü Değer

PV : Güneş Fotovoltaik

PSAT : Güç Sistemi Analizi Araç Kutusu

PSO : Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

RES : Rüzgâr Elektrik Santrali

SSSC : Statik Senkron Seri Kompanzatör

STATCOM : Statik Senkron Kompanzatör

SVS : Senkron Gerilim Kaynağı

SVC : Statik Var Kompanzatör

TCPST : Tristör Kontrollü Faz Kaydırma Transformatörü

TCR : Tristör Kontrollü Reaktör

TCSR : Tristör Kontrollü Seri Reaktör

TSC : Tristör Anahtarlı Kondansatör

TSR : Tristör Anahtarlı Reaktör

TSSC : Tristör Anahtarlı Seri Kompanzatör

TSCS : Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör

TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

TWB : Dünya Bankası

UPFC : Birleşik Güç Akış Kontrolörü

UCTE : Birlik Koordinasyon İletim Elektrik

VSC : Voltaj Kaynaklı Dönüştürücü

Tezde ondalık yazım olarak “21.01” ondalık ayıracı kullanılmıştır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. a) Güç iletim sistemi basitleştirilmiş modeli **b)** Faz diyagramı 12

Şekil 3.2. a) Şönt kompanzasyonlu iletim sistemi basitleştirilmiş model; **b)** Faz diyagramı; **c)** Güç açısı eğrisi 14

Şekil 3.3. a) Seri kompanzasyonlu iletim sistemi basitleştirilmiş model; **b)** Faz diyagramı; **c)** Güç açısı eğrisi 15

Şekil 3.4. a) SVC bağlantı yapısı; **b)** SVC V-I çalışma bölgesi karakteristiği 17

Şekil 3.5. a) STATCOM bağlantı yapısı; **b)** STATCOM V-I çalışma bölgesi karakteristiği 19

Şekil 3.6. STATCOM üzerinden reaktif güç alışverişi **a)** Reaktif güç üretimi (kapasitif); **b)** Reaktif güç tüketimi (endüktif) 19

Şekil 3.7. a) STATCOM V-I karakteristiği; **b)** SVC V-I karakteristiği 20

Şekil 3.8. Örnek iletim hattı modeli 29

Şekil 3.9. Örnek iletim hattı gerilim kaybı 30

Şekil 4.1. Güç sistemindeki bara voltajlarının karşılaştırılması 34

Şekil 4.2. Güç sisteminde gerilim çökmesine uğrayan baraların birim voltaj değerleri 34

Şekil 4.3. Generatörler tarafından sağlanan Aktif ve Reaktif güç değerleri 39

Şekil 4.4. Modellenen güç sistemindeki kritik iletim hatlarında meydana gelen reaktif güç kayıpları 41

Şekil 4.5. Arıza sonrası baralara ait gerilim değerleri 43

Şekil 4.6. Arıza sonrası baralarda meydana gelen gerilim sapmaları 45

Şekil 4.7. Arıza sonrası kritik bara gerilimleri 45

Şekil 4.8. Şönt ekipmanların arıza sonrası reaktif güç yüklenmeleri 46

Şekil 4.9. Arıza sonrası şönt ekipmanlar servis harici iken bara gerilimlerinin karşılaştırılması 47

Şekil 4.10. Generatör kapasite eğrisi 48

Şekil 4.11. Arıza sonrası generatör yüklenmeleri 49

Şekil 4.12. Doğu hes generatör rotor açısı için genlik ve rotor hızı 50

Şekil 4.13. Güney santrali rotor açısı için genlik ve rotor hızı 50

Şekil 4.14. (a) GA Optimizasyon öncesi ve sonrası iletim hattı bara gerilim seviyeleri 52

Şekil 4.14. (b) PSO Optimizasyon öncesi ve sonrası iletim hattı bara gerilim seviyeleri 54

Şekil 4.15. SVC bağlı durumda bara gerilim değerleri..... 55

Şekil 4.16. STATCOM bağlı durumda bara gerilim değerleri 56

Şekil 4.17. SVC kullanımında bara gerilim değişimleri..... 57

Şekil 4.18. STATCOM kullanımında bara gerilim değişimleri..... 57

Şekil 4.19. SVC bağlı durumda güç sisteminde Aktif ve Reaktif güç alışverişi 58

Şekil 4.20. STATCOM bağlı durumda güç sisteminde Aktif ve Reaktif güç alışverişi 58

Şekil 4.21. 3 faz hat arızası sonrası SVC bağlı durumda bara gerilimler değerleri..... 61

Şekil 4.22. 3 faz hat arızası sonrası STATCOM bağlı durumda bara gerilimler değerleri..... 61

Şekil 4.23. SVC bağlı durumda 3 faz kısa devre sonrası kritik bara gerilimleri 62

Şekil 4.24. STATCOM bağlı durumda 3 faz kısa devre sonrası kritik bara gerilimleri..... 63

Şekil 4.25. 3 faz kısa devre sonrası güç sistemi bara gerilim değerleri 64

Şekil 4.26. Güç sisteminde 3 faz kısa devre sonrası generatör reaktif üretiminin şönt ekipman, SVC ve STATCOM kullanımı durumlarının karşılaştırılması..... 67

Şekil 4.27. Şönt ekipman bağlı durumda 3 faz kısa devre kritik bara gerilimleri 69

Şekil 4.28. Şönt ekipman bağlı durumda faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri..... 69

Şekil 4.29. SVC bağlı durumda 3 faz kısa devre kritik bara gerilimleri..... 69

Şekil 4.30. Şönt ekipman bağlı durumda 2 faz kısa devre kritik bara gerilimleri 69

Şekil 4.31. Şönt ekipman bağlı durumda 2 faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri..... 69

Şekil 4.32. SVC bağlı durumda 2 faz kısa devre kritik bara gerilimleri 69

Şekil 4.33. SVC bağlı durumda faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri 70

Şekil 4.34. STATCOM bağlı durumda 3 faz kısa devre kritik bara gerilimleri 70

Şekil 4.35. STATCOM bağlı durumda faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri 70

Şekil 4.36. SVC bağlı durumda 2 faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri 70

Şekil 4.37. STATCOM bağlı durumda 2 faz kısa devre kritik bara gerilimleri 70

Şekil 4.38. STATCOM bağlı durumda 2 faz toprak kısa devre kritik bara 70

Şekil 4.39. Modellenen güç sisteminde güney bara kısa devre arızası öncesi yük akış durumu 71

Şekil 4.40. Geçici hal (transient) şönt ekipman bankları bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası kritik bara gerilim salınımları 72

Şekil 4.41. Sürekli hal (steady-state) şönt ekipman bankları bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası bara gerilimleri 72

Şekil 4.42. Sürekli hal (steady-state) SVC bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası kritik bara gerilim salınımları 73

Şekil 4.43. Sürekli hal (steady-state) SVC bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası bara gerilimleri 73

Şekil 4.44. Sürekli hal (steady-state) STATCOM bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası kritik bara gerilim salınımları 74

Şekil 4.45. Sürekli hal (steady-state) STATCOM bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası bara gerilimleri 74

Şekil 4.46. Güç sisteminde reaktif kompanzasyon şönt ekipman, SVC ve STATCOM kontrolörleri vasıtasıyla gerçekleştirilen reaktif güç kompanzasyonu sonucu düşürülen teknik kayıpların karşılaştırılması 75

Şekil 4.47. SVC ve STATCOM için yatırım maliyetleri 79

Şekil 4.48. FACTS cihazlarının maliyet dağılımı 79

Şekil 4.49. FACTS cihazlarının yatırım maliyet karşılaştırması 84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. FACTS cihazlarının sürekli durum uygulamaları 16

Çizelge 4.1. Güç sistemi şebeke modeline ait güç değerleri..... 32

Çizelge 4.2. Optimizasyon çalışması öncesi şönt ekipmanların yüklenmeleri..... 35

Çizelge 4.3. Optimizasyon çalışması öncesi generatör yüklenmeleri..... 35

Çizelge 4.4. Optimizasyon çalışması öncesi enerji iletim hattı yüklenmeleri..... 36

Çizelge 4.5. Optimizasyon çalışması öncesi trafo yüklenmeleri..... 37

Çizelge 4.6. Modellenen güç sisteminde meydana gelen Aktif/Reaktif güç kayıpları..... 40

Çizelge 4.7. Arıza sonrası enerji iletim hattı Aktif/Reaktif güç ve yüklenme değerleri..... 43

Çizelge 4.8. Optimizasyon sonrası FACTS cihazlarının konumları ve boyutları..... 54

Çizelge 4.9. Optimum konuma yerleştirilen FACTS cihazları sonrası enerji iletim hattı yüklenmeleri..... 59

Çizelge 4.10. FACTS cihazların optimizasyonu sonrası enerji iletim hattı kayıpları..... 65

Çizelge 4.11. FACTS cihazlarının yatırım maliyetleri..... 77

1. GİRİŞ

Mevcut elektrik şebeke altyapısı, giderek daha karmaşık hale gelen ve gelişen enterkonnekte güç sistemlerindeki gereksinimleri karşılamada yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte son yıllarda, enerji üretimi için kullanılan fosil yakıtlarının tükenecek miktarda azalmasına bağlı olarak yeni enerji kaynakları için arayışlar ve yönelmeler başlamıştır. Bu durum dinamik salınımlar, geçici ve sürekli hal kararsızlığı, gerilim çökmeleri ve salınımları, düşük transfer kapasitesi ve iletim hatlarındaki termal kapasitelerin aşılması gibi sorunları ortaya çıkarmakta ve enterkonnekte güç sisteminin kontrollü bir şekilde yönetilmesini ve işletilmesini zorlaştırmaktadır. Artan yenilenebilir enerji kaynaklarından dolayı güç sistemlerinin daha karmaşık bir hal alması, talep edilen yükün sürekli değişmesi gibi problemlerden dolayı güç sistemlerinin desteklenmesi için büyük güçlü yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr ve güneş santrallerinin kurulumu önem kazanmıştır. Enterkonnekte çalışan sistemlerde, rüzgâr ve güneş santralinin ilave olması ile güç ve gerilim sınır limitlerinde iyileşmeler olmaktadır. Bunun yanı sıra rüzgâr ve güneş santralleri istenildiği zaman sisteme hızlı bir şekilde alınabilir veya sistemden çıkartılabilir. Güç sistemlerinde rüzgâr ve güneş santralinin kullanımının artması da bazı problemleri yanında getirmiştir. Rüzgâr santrallerinde uyartım kontrolü küçük güçlü rüzgâr santrali için uygun olmasına karşın, büyük güçlü rüzgâr santralinde uyartım kontrolü zorlaşmaktadır. Rüzgâr santralinde uyartım kontrolünün zorlaşması neticesinde sistem kararsız hale gelebilmektedir. Bunun için güç sistemlerinde aktif güç, reaktif güç, empedans ve gerilim kontrolü için kullanılan güç elektroniği tabanlı sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler esnek alternatif akım İletim Sistemi (FACTS) olarak tanımlanmaktadır. FACTS cihazlarının büyük güçlü enterkonnekte sistemlerde kullanımı sayesinde sistem kontrolü sağlanmaktadır. Güç akışı kontrolünde, dinamik kararlılıkta, sürekli ve geçici hal kararlılığında, iletim transfer kapasitesinin artırılmasında, gerilim kararlılığında, reaktif güç kontrolünde önemli faydalar sağlayan FACTS cihazlarının yerinin ve boyutunun belirlenmesi hem teknik hem de ekonomik açıdan büyük önem arz etmektedir. Literatürde ilgili çalışmalara bakıldığında, FACTS teknolojisine yönelik primitif çalışmalar yapılmış ve FACTS cihazların kontrolörleri sınıflandırılarak incelenmiştir. Güç sistemlerinde enerji iletim hattına dair bütün parametreler hesaba katılarak gerçekçi değerlerle oluşturulmuş güç sistemi modeli için FACTS teknolojisi kullanılarak fizibilite çalışması gerçekleştirilmemiştir.

Bara gerilim değişimleri ve hat kapasite değerleri ile FACTS cihazlarının optimum yerleşimlerini ve kapasite değerlerini belirleyen sezgisel yöntemler kullanarak MATLAB ortamında analizler gerçekleştirilmiştir. Sezgisel yöntemlerde kullanılan yük değerlerinin diğer çalışmalardan farkı, sabit bir yük profili yerine uzun vadede anlık ve rastgele değişen gerçekçi yük profilinin kullanılmasıdır. Gerçek bir bölgeye ait ulusal veriler kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar hali hazırda kullanılan mevcut sistemle karşılaştırılmıştır.

Enerji sistemlerindeki karmaşık yapılar, yetersiz bir kontrol ve aşırı reaktif güç ihtiyacıyla birleşerek büyük dinamik salınımlar, geçici ve sürekli hal kararsızlığı, gerilim çökmesi, düşük transfer kapasitesi gibi birçok sorunu beraberinde getirmiştir. Karmaşık yapılı bir enerji iletim şebekesinde güç, paralel iletim hatlarından sağlanarak yüksek bir güvenlik elde edilirken, hatların yüklenmesinde sistematik bir kontrol yoktur. Sadece enerji iletim hattına, seri ve paralel kondansatör ve reaktörler (manuel olarak) ilave edilerek veya çıkartılarak sınırlı bir değişkenlik sağlanır. Sistem hem dinamik hem de

sürekli hal çalışmasında gerçekte kontrolsüzdür. İletim hattı geriliminin kontrol edilmesi gerekmektedir, gerilimin kontrolü hattın belli noktalarında güç akış kontrolörleri ile gerçekleştirilir. Bara gerilimi ve baranın reaktif gücü kontrol edilerek, kararlılık sınırları artırılır, iletim kapasitesinin etkili kullanımı sağlanır ve gerilim düşümü azaltılır. Geleneksel kondansatör ve reaktör grupları ile yapılan kompanzasyonun en büyük dezavantajı, sistemde meydana gelen değişimlere yeterince hızlı cevap verememesidir.

İletim hatlarının reaktif kompanzasyonunun, tristörler ve diğer yarı iletken elemanlarla hızlı bir şekilde yapılması durumunda, güç sisteminin dinamik kararlılığını iyileştirebiliriz ve gerilim çökmelerini önleyebiliriz. Günümüzde gelişen güç elektroniği elemanları tabanlı FACTS cihazları sayesinde karmaşıklaşan ve sürekli büyüyen güç sistemlerin gerilim salınım problemleri daha hızlı ve etkin şekilde çözülmektedir (Mithulananthan vd. 2005). Ayrıca, güç sistemlerinin kararlılık sınırlarını artırarak güç sisteminde mevcut kaynakların en iyi şekilde kullanılmasını sağlamak mümkündür. FACTS cihazlarının temel olarak iki temel işlevi vardır. Bunlardan ilki, bağlı olduğu güç sistemi işletme limitlerinin taşıma kapasitesini artırmak, ikincisi de enterkonnekte güç sistemdeki güç akışını kontrol etmektir (Hasanovic 2000). FACTS cihazları bir iletim sistemi şebekesine bağlanma şekline göre paralel, seri ve birleşik yapılı olarak sınıflandırılırlar, gerilimin genliğini faz açısı ve hat empedansını kontrol ederler. Bu cihazların anma değerleri, karakteristikleri ve üstünlükleri, cihazların fiyatında, performansında, boyutlarında, işletme kapasitesinde ve kayıplarında büyük öneme sahiplerdir. FACTS cihazları, güç akışı kontrolünde, dinamik kararlılıkta, sürekli ve geçici hal kararlılığında, iletim transfer kapasitesinin artırılmasında, gerilim kararlılığında ve reaktif güç kontrolünde önemli faydalar sağlamasının yanında, çevresel faktörler, yapım süresi, yerleşim alanı açısından da avantajları vardır. Bugüne kadar birçok güç akış kontrolörü önerilmiş ve dünya çapında birçok FACTS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu güç elektroniği tabanlı kontrolörleri genel olarak geleneksel tristör tabanlı kontrolörler ve SVS (Senkron Gerilim Kaynağı) prensibine göre çalışan konverter tabanlı kontrolörler olarak ikiye ayırmak mümkündür. FACTS cihazlarının nereye ve hangi kapasitede bağlanması gerektiği en önemli ve çözülmesi gerekli olan problemlerdir. Optimum sayıda FACTS cihazlarının yerleşim problemi, çeşitli optimizasyon teknikleri ve farklı amaç fonksiyonları ile çözülmektedir. Gerilim kararlılığı, FACTS cihazlarının maliyeti ve güç kayıpları, matematiksel olarak modellenmiştir (Singh vd. 2010). Bir diğer yandan aynı değişkenler, ağırlık katsayıları kullanılarak modellenmiştir (Preethi vd. 2011). Bu sayede tüm fonksiyonu optimize etmektense sadece ağırlık katsayılarının optimum değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu tezde, güç sistemi enerji iletim şebekesi için FACTS kontrolörlerinden SVC ve STATCOM kontrolörleri, güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı Dig-SILENT Power Factory programı kullanılarak, statik ve dinamik yükler için reaktif güç kompanzasyonu yapılmış, hat empedansının değiştirilmesi yoluyla yük akımı ve geriliminin kontrolü sağlanmıştır. Bununla birlikte çok sayıda generatör ve iletim hattının bağlı olduğu güç sisteminde FACTS kontrolörleri kullanılarak kompanzasyon uygulamaları için sistemdeki aktif ve reaktif güç akışının değişimi incelenmiş ve sonuçları yorumlanmıştır.

Tez çalışması;

- Enerji iletim hatlarının reaktif güç sebebiyle aşırı yüklenmesini ve reaktif güçten kaynaklanan ilave kayıpları önlemek için mevcut durumda manuel olarak devreye alınıp devre dışı bırakılan kondansatör gruplarını ve reaktörleri, FACTS teknolojisi kullanılarak otomatik olarak devreye alıp devre dışı bırakarak, bu işlemin çok daha hızlı ve kararlı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayarak, kayıpların minimize edilmesi ve gerilim kontrolünün sağlanması;
- Uzun vadeli yük belirsizlikleri altında sezgisel algoritma ile FACTS cihazlarının bara gerilim değişimleri ve hat kapasiteleri açısından optimum yerleşimlerini ve değerlerini belirleyen bir PSO ve GA algoritmalar ile performansının gerçekçi değerler kullanılarak test edilmesi;
- FACTS kontrolörlerini güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı kullanılarak, modellenmesi ve bu model için gerilim düşümü, anlık enerji üretimi gibi çeşitli durumlar için analizler gerçekleştirilmesi;
- FACTS kontrolörlerinin tanımlanması, gelişimi ve sınıflandırılması ele alınarak Batı Akdeniz Bölgesi elektrik enerji iletim sistemi için gerçekçi değerlerle modellenerek, benzetim çalışması gerçekleştirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların yorumlanması ve sağlamış olduğu faydaların matematiksel verilerle belirlenmesi;
- Benzetim çalışmasında şebekeye bağlı FACTS cihazları ile farklı aktif ve reaktif yüklerdeki gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişiminin incelenmesi,
- Farklı zamanlarda değişken yüklerin devrede olması sırasında yük baralarının gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişiminin incelenmesi, sunulması ve analizler gerçekleştirilmesi;
- Elde edilen sonuçların, sistem güvenilirliği ve kararlılığını artırmak, hataların ve donanımsal bozuklukların etkilerini sınırlandırarak tekerrürlü enerji kesilmelerini önlemek ve Türkiye enterkonnekte sisteminin gerilim ve güç kontrolü kararlılığını artırarak, daha verimli, kaliteli ve ekonomik bir şekilde elektrik enerjisi sürekliliğinin sağlanması üzerine elde edilen sonuçların yorumlanması, aşamalarından oluşmaktadır.

Türkiye elektrik işletmecisi olan TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü'nce geleneksel sistemlerde olduğu gibi gerilim kontrolü genel olarak iki farklı yol ile sağlanmaktadır. Senkron generatörler, şönt kapasitörler ve reaktörlerdir. Reaktif güç kontrol edilerek gerilim profilleri değiştirilebileceği gibi, kontrol genel olarak transformatörler ve generatörler ile sağlanmaktadır. Gerçekçi veriler kullanılarak pilot bölge olan Batı Akdeniz Bölgesi elektrik enerji iletim sistemi için tez çalışma kapsamında gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon çalışması sonucunda, Türkiye enterkonnekte sistemine FACTS cihazlarını entegre ederek gerilim kontrolü yapılması durumunda güç sistemi üzerindeki kayıpların azaltılarak, elektrik enerjisinin güvenli, kontrollü ve en ekonomik şekilde iletilmesi ülke ekonomisine önemli ölçülerde katkılar sağlanabileceği düşünülmektedir.

2. KAYNAK TARAMASI

Reaktif güç kompanzasyonu, enterkonnekte iletim sistemlerinin elektrik enerjisinin iletiminde ve kontrolünde önemli bir problemdir. Reaktif güç, iletim sisteminde kayıpları artırırken iletim hattının güç iletim kapasitesini de azaltır ve hat sonundaki gerilimin genliğinde çok büyük değişimler meydana getirir. Bu yüzden alternatif akımlı güç sistemlerinde iletilebilir gücü artırmak, kayıpları azaltmak ve hat sonundaki gerilimin genliğindeki büyük değişimleri azaltmak için kompanzasyon yapmak gereklidir. Ayrıca, uzun iletim hatlarında hat endüktansının ve kapasitesinin etkisi, az yüklü durumlarda işletme limitlerinde aşırı gerilimlere ve çok yüklü durumlarda ise gerilim düşümlerine neden olur. Bu nedenle iletim hattı geriliminin kontrolü gerekmektedir. Bu da hattın belli noktalarında güç akış kontrolörleri ile kompanzasyon yapılarak gerçekleştirilir. Bara gerilimi ve baranın reaktif gücü kontrol edilerek, kararlılık sınırları artırılır, iletim kapasitesinin etkili kullanımı sağlanır ve gerilim düşümü azaltılır. Sabit ve mekanik anahtarlamalı reaktör-kondansatör grupları ve senkron generatörler, iletim hatlarındaki işletme limitleri dahilindeki gerilim profilini kontrol ederek kararlı durum güç akışını artırmak, için uzun süreden beri kompanzasyon amacı ile kullanılmaktadırlar. Geleneksel kondansatör ve reaktör grupları ile yapılan kompanzasyonun en büyük dezavantajı sistemde meydana gelen değişmelere yeterince hızlı cevap verememesidir.

Enerji iletim hatlarınca transfer edilen gücün kapasitesini, kontrol edilebilirliğini artırmak sistemin reaktif güç talebinin hızlı bir şekilde sağlamak için, statik kontrolörler ve güç elektroniği elemanları yardımı ile kompanzasyon yapılmaktadır. Yarı iletken tabanlı anahtarlama tipi dönüştürücüler ile şönt reaktif kompanzatör aygıtları tasarlanabilir. Kompanzasyon için kullanılan bu tip aygıtlara FACTS cihazları denir. Güç sistemi şebeke kaynaklarının verimli kullanımı için, 1980'lerin sonunda FACTS cihazları tanıtılmıştır. FACTS cihazları, güç sistemi enerji iletim hatlarının kompanzasyonunda kondansatör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan anahtarlamalı dönüştürücü devreleri yardımı ile reaktif güç üretip tüketebilmektedirler. Güç iletim sistemlerinde FACTS cihazların kullanılması ve gelişmesi güç sistemlerinin gerilim kararlılığını dengelemek için birçok uygulamayı da beraberinde getirmektedir (Hingorani 1993). FACTS cihazları ile ilgili kontroller gerilim kararlılığının artırılması, gerilim salınımların sönümlenmesi, gibi problemler üzerine gerçekleştirilmektedir. Bu kontroller gerilim değerinin ve faz açısının kontrolü ile yapılabilir (Yang vd. 2001). Sistemin güç kararlılığını artırmak ve güç akışını kontrol etmek için kullanılan bu tip kontrolörlerin en büyük avantajı esneklikleri ve kontrol edilebilirlikleridir (Cheng vd. 2004). FACTS cihazlarının temel konsepti, iletim sistemindeki aktif ve reaktif güç akışını ve gerilimi kontrol etmek için güç elektroniğinin kullanımına dayanmaktadır (Sharaf ve Gandoman 2015). Kapsamlı araştırmalar, FACTS cihazlarının iletim ve dağıtım sistemlerindeki performansını artırmak ve dolayısıyla güç sistemi güvenirliğini arttırmak için VSC (voltaj kaynaklı dönüştürücülerin) yeni topolojilerine ve mimarilerine odaklanmıştır (Sharaf ve Khaki 2012; Abdelsalam vd. 2013). Agüero vd. (2014) tarafından FACTS cihazlarının enerji iletim şebekesine dahil etmek için bir metodoloji açıklanmıştır. Kararlılık çalışmaları için kullanılan SVC, TCSC, SSSC ve STATCOM kontrolörlerini güç sistemlerine uygulama tekniklerini içermektedir. Sonuçlar, Dig-SILENT Power Factory programı kullanılarak, programındaki güç modellerin uygulandığı ve FACTS cihazlarının

güç sisteminin kontrolünün iyileştirmesi yönünde katkıda bulunduğunu göstermiştir (Agüero vd. 2014).

Harmonikler şebeke güç kalitesinin bozulmasına neden olurlar. Harmonik bozulmanın azaltılması, elektrik enerjisi iletimi ve son kullanıcılarının karşılaştığı çok büyük problem olarak ortaya çıkmıştır. Çeşitli FACTS cihazları ve kontrolörler, güç kalitesi sorunlarının iyileşmesinde ve azaltılmasında önemli bir rol oynamıştır. (Darabian ve Jalilvand 2017). Son yıllarda, verimli enerji kullanımı, arz talep kontrolü, gerilim salınım dengeleme, güç kalitesi iyileştirme, güç faktörü düzeltmesi ve harmonik bozulma azaltma konularında FACTS teknolojisi kontrolörlerin kullanımı oldukça artmıştır (Barrios-Martínez ve Ángeles-Camacho 2017). Ek analizler arasında, güç akış kontrolü, gerilim regülasyonu, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim kararlılığı, güç şebekesi kaybını azaltma ve güç kalite iyileştirme çalışmaları bulunmaktadır (Fadaee ve Radzi 2012; Jumaat vd. 2017).

FACTS cihazları yenilenebilir enerji kaynaklardan enerji üretiminde daha önemli bir rol oynamaktadır (Mahela vd. 2015). Önemli araştırmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimi elde edilmesini sistem gereksinimleri için maksimum seviyede faydalanmaya odaklanmıştır. FACTS cihazlarının yenilenebilir enerji sistemlerine sahip akıllı şebekelerde uygulanmasının sonuçları güç sistemleri için cesaret verici olmuştur. (Crow 2004; Suresh ve Sreejith 2017). Güç sistemlerinde yenilenebilir enerji ve dağıtık üretimin kullanılması, verimli kaliteli elektrik enerjisi kullanımı ve elektrik şebekesinin daha fazla güvenilirliği için güç sistemlerinde kullanımını giderek artmaktadır (Sadaiappan vd. 2010). Ayrıca, güneş fotovoltaik (PV) sistemleri, hidroelektrik sistemleri, rüzgâr, biokütle, kaynakları kullanılarak yenilenebilir enerji kullanımı ile ilgili olarak mikro gridler için yeni yöntemler ortaya çıkmıştır (Liu vd. 2014). Kalair vd. (2017) tarafından dağıtık üretim değişken arz talep durumları için gün içi dinamik yük akış analizi yapılmış, değişken arz ve talep durumları, güç parametre değerlerinin saatlik değişimleri hesaplanmış ve incelenmiştir. Sonuç olarak üretim süreksizliği gösteren generatörlerden oluşan dağıtık üretimin, gerilim ve güç faktörü kararlılığı üzerindeki etkileri değişen arz ve talepleri üzerine analiz edilmiştir (Kalair vd. 2017).

Modern kompanzasyon yöntemleri sayesinde FACTS cihazlarının, kısa sürede tepki verip, her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilirliği, dengesiz yükleri kompanzasyonun da bu cihazların kullanımı çok önem kazanmıştır (Carlak ve Kayar 2019). FACTS cihazları, iletim hatlarının reaktif güç kompanzasyonun da kapasitör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan, anahtarlamalı konvertör devreleri kullanarak reaktif güç üretebilir ve tüketebilirler. Bu cihazlar, doğru optimizasyon teknikleri ile kullanıldığında enerji iletim hatlarının stabilite sınırlarını artırırlar. FACTS kontrolörleri altında birçok güç akış kontrolör cihazı geliştirilmiştir. En yaygın olarak kullanılanlar; SVC, TCS, STATCOM, UPFC ve SSSC olarak bilinen güç akış kontrolörleri cihazlarıdır. Belirli bir güç sisteminin karakteristikleri, talep edilen yük ve üretim arttıkça bu güç sisteminin karakteristikleri de zaman ile değişir. Eğer enerji iletim uygulamaları yeterli bir şekilde geliştirilmezse, güç sistemi sürekli durum ve geçici durum problemlerine karşı kararsız zayıf bir hale gelir ve kararlılık sınırları gittikçe daralır. Enerji iletim sistemi sınırlamaları bir veya daha fazla karakteristikleri içerebilir, sürekli durum güç transfer limiti, gerilim kararlılık limiti, dinamik gerilim limiti, geçici kararlılık limiti, güç sistemi dalgalanma

sönümleme limiti, döngü akış limiti, termal limit ve kısa devre akım limiti her bir enerji iletim problemi veya bölgesel kısıtlama problemine sahiptir (Paserba 2003). TSCS ve SVC denetleyicilerinin güç sistemi gerilim kararlılığına olan etkileri Öztürk vd. (2016) tarafından, beş baralı örnek güç sistemi üzerinde denenmiş, sürekli güç akışı analizi yöntemi kullanılarak, gerilim çökmeleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Enerji iletim hatlarının güç kararlılık limitleri ve baralara ait gerilim kararlılık değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlere göre güç sistemi FACTS cihazların bağlantı noktaları tespit edilmiş ve güç sistem analiz simülasyonu programı ile yük akışı analiz çalışmaları yapılmıştır. Gerçekleştirilen analiz çalışmaları ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kararlılık sınır değer problemlerini iyileştirmede ve aktif güç kayıplarını azaltmada FACTS cihazlarının önemli bir etkisi olduğu görülmüştür (Öztürk vd. 2016). Beltran vd. (2016) tarafından FACTS cihazlarının uygulanmasına ve işletilmesine dair karşılaştırmalı bir analiz çalışması yapmışlardır. Ocak 2016 - Ağustos 2016 dönemini hesaplayan sekiz aylık periyot için enerji iletim yükleri incelenmiştir. Meksika Oaxaca Tehuantepec'in İstmo bölgesi alanında güç sistemi yönetimi ve gerilim desteği denetleyici kontrolörlerinin, teknik uygulaması yapılmıştır (Beltran-Valle vd. 2016). Choi vd. (2016) tarafından STATCOM kontrolörü ile sistem iyileştirme çalışmaları, Kore elektrik gücünün geçici SPS (special protection scheme) özel koruma şemasını geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. İlk olarak, SPS ile ilgili özelliği açıklanmış olup, sonraki bölümlerde STATCOM kontrolörünün kapasitesini ve generatörlerin arıza açma sayısını azaltmak için eşit alan kriteri kullanılmıştır. Ayrıca, elektrik enerjisi sisteminin pratik verileri ile STATCOM kontrolörü için yeni kontrol yönteminin etkinliği doğrulanmıştır (Choi vd. 2016).

Evrimsel optimizasyon tekniklerini kullanarak Shaheen vd. (2007) tarafından, UPFC kontrolörü için optimum konumu araştırılmıştır. IEEE-14 bara güç sistemi analiz edilmiş güç sistemine GA ve PSO algoritma yöntemleri uygulanmıştır. UPFC kontrolörünün, sistemdeki güç akışını kontrol etmek için en önemli FACTS cihazlarından biri olduğu görülmüştür. UPFC kontrolörü için optimum yeri bulmak için evrimsel optimizasyon tekniği seçilmiş ve sonrasında sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada güç sisteminin aktif güç kaybını en aza indirgeyen tek bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bu optimizasyon çalışmasında, bara gerilim büyüklüğü, gerilimin açısı ve reaktif güç, en düşük ve en yüksek değer aralığında güç sistem kısıtları olarak kabul edilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarıyla ilgili olarak, GA optimizasyon tekniği kullanıldığında en düşük kayıp değeri 0.1198p.u. ortalama kayıp değeri 0.1235p.u. ve hesaplama süresinin de 76.9 sn olduğu görülmüştür. Ancak PSO optimizasyon tekniği kullanıldığında en düşük kayıp değeri 0.1198p.u, ortalama kayıp değeri 0.1257p.u. ve hesaplama süresinin 39.4 saniye olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, GA' nın güç sistemi kayıpların azaltılması bakımından, PSO tekniğinin ise yakınsama karakteristiği açısından daha üstün olduğunu göstermiştir (Shaheen vd. 2007). Lu vd. (2007) tarafından GA, PSO ve BSA sezgisel yöntem algoritmalarını kullanarak FACTS cihazlarının optimum konumu ve kapasite tespiti için IEEE-30 ve IEEE-118 bara güç sistemleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, FACTS cihazlarının sistem performansını ve güç kalitesini artırdığını göstermiştir. IEEE-118 bara güç sisteminde GA yönteminde güç kaybının 320.18 MW, PSO 'da 359.64 MW ve BSA 'da 297.62 MW olduğu; IEEE-30 bara güç sistemi üzerinde yapılan çalışmada, GA yönteminde güç kaybının 12.07 MW, PSO 'da 8.21 MW, BSA 'da 6.49 MW analiz sonuçlarında görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre, BSA 'nın PSO ve GA yöntemlerinden daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Lu vd. 2007). SVC kontrolörlerinin optimum konumu için Mohammadi ve Jazaeri (2007) tarafından sezgisel

yöntem algoritması önerilmiş, simülasyon çalışması için IEEE-68 baralı güç sistemi kullanılmıştır. İki parametreden oluşan bir amaç fonksiyonu oluşturulmuş, birinci parametre, bara gerilim limitleri ile, ikinci parametre ise işletme ve kurulum maliyeti ile ilgili olmuştur. Optimizasyonun amacı, güç sistemlerinde FACTS cihazlarının konumu için en uygun yeri tespit etmektir. Elde edilen analiz sonuçlara göre, GA yöntemi SVC kontrolörü için optimum konumun 34. bara olduğu elde edilmiştir. FACTS cihazının sisteme eklenmesinden sonra toplam güç sistem kaybının 0.35p.u. azaldığı görülmüştür. PSO algoritması FACTS cihazı için en uygun konumun 31. bara olduğunu belirlemiş, toplam güç sistem kaybında da 0.46p.u. azalma olduğu gözlemlenmiştir. FACTS cihazı için en uygun konumun ve kayıpların düşürülmesinde PSO ve GA sezgisel yöntemleri diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. (Mohammadi ve Jazaeri 2007).

Enerji iletim hattının mevcut kapasitesini artırmak için FACTS cihazlarının optimal yerleşim konum noktalarının belirlenmesinde İdris vd. (2009) tarafından, Diferansiyel Evrim (DE) ve Genetik Algoritma (GA) kullanmıştır. DE yöntemi FACTS cihazlarının konum ve kontrolör tipini tespit etmektedir. Optimizasyon çalışmasında TCSC, SVC ve TCPST olmak üzere üç tip FACTS kontrolörü kullanılmıştır. Simülasyonlar IEEE-30 bara güç sisteminde gerçekleştirilmiştir. Güç sistemi her birinde iki generatör bulunan üç alan bölgesine ayrılmış, güç sistemine dahil edilen SVC kontrolörünün çalışma aralığı -100 MVAr ile +100 MVAr arasında seçilmiştir. Ayrıca, hat reaktansını değiştiren bir TCSC, iletim hattına seri bağlanmıştır. TCSC kontrolörünün çalışma aralığı $-0.7\ XLine$ ve $0.2\ XLine$ arasındadır. FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi, güç sistem simülasyon sonuçlarından DE algoritması kullanıldığında mevcut transfer kapasitesinin 211.98 MW 'dan 233.98 MW 'a çıktığı, GA yöntemi kullanıldığında ise 231.96 MW 'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre DE algoritması GA algoritmasından daha hızlı ve daha esnek bir çözüm sunmuştur (Idris vd. 2009). Sheeba vd. (2011) tarafından yapay zekâ tekniklerini kullanarak SVC kontrolörünün optimal konumunu belirlenmiş, daha düşük maliyet ve yüksek sistem geliştirme özelliği nedeniyle SVC kontrolörleri kullanıldığı görülmüştür. IEEE-14 bara güç sisteminde FACTS cihazı SVC kontrolörlerin optimal yerleşim noktalarını belirlemek için GA ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. SVC kontrolörlerin optimal yerleşim noktalarını tespit etmek için gerilim sapması amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Gerilim büyüklüğü ve reaktif güç, en düşük ve en yüksek değer sınırlarıyla birlikte optimizasyon kısıtları olarak değerlendirilmiştir. Hem GA hem de PSO sezgisel yöntem algoritmaları aynı optimum noktaları belirlemiştir. Her iki sezgisel yönteme göre SVC kontrolörleri için optimal konumun 7 ve 13 numaralı baralar olduğu tespit edilmiştir. SVC kontrolörleri güç sistemine bağlı olmadığında gerilim sapması 0.56p.u. değerinde iken, SVC kontrolörleri optimal yerleşimi ile bu değer 0.28p.u. değerine düşmüştür (Sheeba vd. 2011). Mondal vd. (2011) tarafından PSO ve GA algoritmalarını kullanarak optimal konum ve en uygun FACTS cihaz kontrolör parametreleri bulunması amaçlanmıştır. FACTS cihazlarının üstünlüğü ve performansı, güç sistemi problemlerine bağlantılı olarak karşılaştırılmıştır. Kritik öz değer ve zaman yanıt analizinin karakteristiklerine göre, GA analiz sonuçları, kritik yüklenme durumlarında PSO analiz sonuçlarına göre daha hızlı olduğunu ortaya koymuştur (Mondal vd. 2011).

Tous vd. (2012) tarafından PSO sezgisel yöntemini kullanarak UPFC kontrolörü için optimal konum ve parametre kapasite ayarını gerçekleştirmiş, amaç fonksiyonu kullanarak aşırı yüklenme ve gerilim seviyesi ile aktif ve reaktif güç akışı kontrol ayarının

gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. UPFC kontrolörünün, şebeke yüklerinde meydana gelen artışa bağlı olarak gerilim düşümü duyarlılığına göre güç sistemindeki konumları belirlenmiştir. UPFC kontrolörünün güç sistemine dahil edilmesi ile gerilim seviyesinin tüm baralarda limit değerlere getirildiği gözlemlenmiştir (Tous vd. 2012). UPFC kontrolörü denetleyicisinin optimal yerleşim noktalarının belirlenmesini ve kayıpların azaltılmasını sağlamak için Ramesh ve Reddy (2013) tarafından FA ve GA, kullanılmıştır. Güç kayıplarını azaltmak ve şebekelerdeki gerilim limitlerinin etkisini göstermek için IEEE-14 ve IEEE-30 bara güç sistemlerinde analizler yapılmıştır. Ayrıca, yükleme koşullarının normal ve %150 olduğu durumlarda benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistem kayıpları açısından, her iki algoritmanın da normal yüklenme durumunda aynı çözüme ulaştığı görülmüştür. Fakat %150 yüklenme durumunda FA algoritmasının, GA sezgisel yönteminden daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Ramesh ve Reddy 2013). Bhattacharyya vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, SVC, TCSC ve UPFC kullanılarak güç sisteminin en ekonomik şekilde işletilmesi amaçlanmıştır. İletim kayıplarını en aza indirgemek için GA sezgisel yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile FACTS cihazlarının optimal konumunu belirlemek için IEEE-30 bara güç sistemi kullanılmıştır. FACTS cihazlarının optimal konumunun tespiti için iki senaryo düşünülmüştür. İlk senaryoda TCSC seri kontrolör ve SVC şönt kontrolörü cihazı, güç sisteminin ekonomik çalışmasını sağlamak için güç sistemi değişkenleri analiz veri dizisi kullanılmıştır. İkinci senaryoda UPFC kontrolörü, aktif güç kayıplarını ve sistem işletim maliyetini en aza indirgemek için seri ve şönt FACTS cihaz bileşenleri ile birlikte kullanılmıştır. UPFC kontrolörü kullanılması ile işletme maliyeti ve güç kayıpları, diğer FACTS cihazlarına göre azaltılabilmiştir (Bhattacharyya vd. 2014).

3. MATERYAL VE METOT

Tezin ilk aşamasında elektrik güç sistemlerinde kullanılan, FACTS cihazlarından SVC ve STATCOM kontrolörleri elektrik güç akışı algoritmaları ile analiz edilmiş gerekli güç hesaplamaları yapılarak sistem modeli oluşturulmuştur. İkinci aşamada, farklı işletme senaryoları altında FACTS cihazların etkileri ve çalışma performansları üzerinde güç sistem kontrolü yapılmıştır. FACTS cihazlarının sezgisel algoritma ile optimum konumu ve boyutu teknik ve ekonomik açıdan belirlenmiştir. Uzun vadeli yük belirsizlikleri altında sezgisel algoritma ile FACTS cihazlarının bara gerilim değişimleri ve hat kapasiteleri açısından optimum yerleşimleri ve kapasite değerleri bulunmuştur. FACTS cihazların performansı gerçekçi değerler kullanılarak test edilmiştir. Son aşamada güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı Dig-SILENT Power Factory programı kullanılarak, birbirine bağlı güç sistemlerinin statik ve dinamik yükler altında reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Çalışma Batı Akdeniz enerji iletim şebeke modelinin gerçekçi saha modellemesi gerçekleştirilen verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Var olan enerji iletim modeline ait güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı kullanılarak tek hat şemaları çizilmiştir. Modellenen bölgedeki trafo merkezleri ve üretim santralleri oluşturularak, gerilimleri sürekli dengesiz olan trafo merkezleri bara sistemlerine FACTS cihazlarını bağlayıp sistemin güç hesaplamaları, yük akışı analizi, gerilim düşümü, aktif ve reaktif güç değerleri anlık olarak değerlendirilerek, reaktif güç ve gerilim salınımı problemleri giderilmiştir.

3.1. Güç Akışı

Güç akışı analizlerinde literatürde kullanılan en sık metodlardan biri olan Fast - Decoupled Newton-Raphson Metodu, kullanılmıştır. Newton metodu, güç akışı denklemlerinin çözümü için diğer iteratif metotlara göre kuadratik yakınsama karakteristiğine sahiptir. Örnek çalışılan güç sistemi hakkında anlık yükler için tahmin yapmak, güç sistemi ekipmanları hakkında bilgi sahibi olmak ve bunun sonucunda yük akışı analizleri yapmak, daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bir çözüm elde etmek için gerekli iterasyon tekrarı sistemin boyutundan farklıdır, ancak her iterasyonda daha esnek ve işlevsel analizler gereklidir. Bir güç sisteminde enerji iletim hatları matematiksel olarak empedans değerlerinden modellenmektedir. Eşdeğer modelde hat başı veya hat sonuna bağlı şönt elemanların enerji iletim hattına eklenebilme kolaylığı nedeniyle tercih edilmektedir.

Fizibilite çalışmasının gerçekleştirileceği pilot bölgeye dair güç sisteminin modellenerek yük akışı analizinin gerçekleştirilmesinde, verilen aktif ve reaktif güç eşitlikleri Taylor serisine açılır ve yüksek mertebeden olan terimler ihmal edilirse, düğüm admitans matrisi yardımıyla şebekeye dair fazör akım ve gerilim bağıntıları matrisler halinde aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \widetilde{I_1} \\ \widetilde{I_2} \\ \vdots \\ \widetilde{I_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \ldots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{V_1} \\ \widetilde{V_2} \\ \vdots \\ \widetilde{V_n} \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

n : Toplam düğüm sayısı

Y_{ii} : i düğümüne ait öz admitans (i düğümünde sonlanan tüm admitansların toplamı)

Y_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki ortak admitans (i ve j düğümleri arasındaki tüm admitansların toplamının ters işaretlisi)

V_i : i düğümündeki toprağa göre fazör gerilimi

I_i : i düğümünde şebekeye verilen fazör akımı

Şebeke düğümlerine bağlanmış olan generatörlerin, doğrusal olmayan yüklerin ve diğer cihazların etkileri düğüm akımında yansıtılır. Sabit empedanslı (doğrusal) yükler de düğüm admitans matrisinde yer alırlar. Düğüm eşitliklerinin oluşturulmasında, doğrusal olmayan güç akışı eşitliklerinde, eğer *I* akım girişleri bilinirse eşitlik doğrusal olacaktır. Akım girişleri herhangi bir k düğümündeki P, Q ve *V* değerlerine bağlıdır:

$$\check{I}_k = \frac{P_k - JQ_k}{\check{V}_k} \tag{3.2}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \hline \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V|_2}\right)^{(k)} & \cdots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V|_n}\right)^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V|_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta |V|_n^{(k)} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Yük baraları için P ve Q belli olup gerilim kontrollü baralar için de P ve $\check{V}$ bellidir. Diğer düğüm tipleri için P, Q, $\check{V}$ ve $\check{I}$ arasındaki bağıntılar o düğümlere bağlanmış olan cihazların karakteristikleri ile tanımlanır. Çeşitli düğüm tiplerinin getirdiği sınır koşulları problemi doğrusal olmayan bir problem haline getirilmekte ve Fast -Decoupled Newton-Raphson Metodu kullanılarak iteratif olarak çözülmektedir. Fast -Decoupled Newton-Raphson Metodu, Newton-Raphson metodundaki Jacobian matrisinde reaktif gücün faz açısına bağlılığı (J3) ve aktif gücün gerilime bağlılığı (J2) ihmal edilerek yük akışı

analizlerinin yapılması esasına dayandığı için hesaplama sürelerinin çok daha hızlandırılmış olduğu bir yöntemdir. Elde edilen denklem sistemleri eşitlik (3.5) ve (3.6)'da verilmiştir.

$$J_1(i)\Delta\delta(i) = \Delta P(i) \tag{3.5}$$

$$J_4\,(i)\Delta V(i) = \Delta Q(i) \tag{3.6}$$

Fast-Decoupled metodunun hesaplama süresini daha da kısaltmak amacıyla Jacobian matrisi başlangıç koşullarına göre oluşturularak hesaplama süresince sabit Jacobian 'lı Fast-Decoupled metodu uygulanmıştır.

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = 2V_iG_{ii} + \sum_{\substack{k=1\\ \neq i}}^{n} V_kY_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \tag{3.7}$$

$$= 2V_iG_{ii} + \sum_{\substack{k=1\\ \neq i}}^{n} V_kY_{ik}[\cos(\theta_i - \theta_k)\cos\alpha_{ik} + \sin(\theta_i - \theta_k)\sin\alpha_{ik}] \tag{3.8}$$

$$= 2V_iG_{ii} + \sum_{\substack{k=1\\ \neq i}}^{n} V_k[G_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik}\sin(\theta_i - \theta_k)];\quad j = i$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_iY_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij}) \tag{3.9}$$

$$= V_iY_{ij}[\cos(\theta_i - \theta_j)\cos\alpha_{ij} + \sin(\theta_i - \theta_j)\sin\alpha_{ij}]$$

$$= V_i[G_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j)];\quad j \neq i \tag{3.10}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} \approx 0 \quad ve \quad \frac{\partial P_i}{\partial V_j} \approx 0 \quad \Longrightarrow \quad J_2 \approx 0 \tag{3.11}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = \sum_{\substack{k=1\\ \neq i}}^{n} V_iV_k[G_{ik}\cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik}\sin(\theta_i - \theta_k)];\qquad j = i \tag{3.12}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_iV_j[G_{ij}\cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij}\sin(\theta_i - \theta_j)];\qquad j \neq i \tag{3.13}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} \approx 0 \quad ve \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \approx 0 \quad \Longrightarrow \quad J_3 \approx 0 \tag{3.14}$$

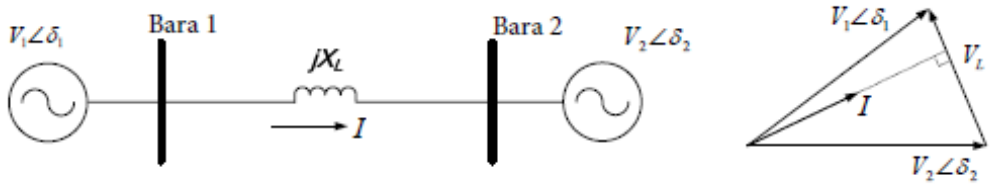
$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_1 & 0\\ 0 & J_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix} \tag{3.15}$$

Çalışmada, süreksiz dağıtık üretim ve değişken güç talep durumları altında gün içi dinamik yük akış analizleri gerçekleştirilip, bara elektriksel parametrelerinin saatlik bazda değişimleri hesaplanmıştır. Böylece, üretim süreksizliği gösteren kaynaklardan elde edilen dağıtık üretimin, gün içi değişen güç talepleri karşısında, bara gerilim ve güç faktörleri kararlılığına etkileri analiz edilmiş olacaktır. Yük akışı analizi, güç sistemi çalışmalarında kullanılan temel bir analiz yöntemidir. Bir güç sisteminin planlanması ve işletilmesi, farklı çalışma koşulları altında güç sisteminin kararlı durum performansını incelemek ve ekipman konfigürasyonundaki değişikliklerin etkilerini dikkate almak için

bazı hesaplamalar gerektirir. Bu nedenlerle üretilen yük akışı çözümleri, güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programında analiz edilmiştir. Yük akışı performansının temel amacı, bir güç sisteminin sayısal olarak incelenmesini içerir. Geleneksel devre analizinden farklı olarak, yük akışı tipik olarak aerodinamik gösterim kullanır; örneğin, farklı AC güç parametrelerine odaklanan tek satırlı bir diyagram ve birim sistem başına yük akışı çalışmasından elde edilen önemli veriler, her bir veri yolundaki gerilimin büyüklüğü ve faz açısı ve her bir hatta akan aktif ve reaktif güçtür. Bu tezde, örnek pilot bölge test sistemini simüle etmek için güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı Dig-SILENT Power Factory kullanılarak, Newton-Raphson yöntemi ile yük akışı analizleri yapılmıştır.

3.2. İletim Sisteminde Güç Kompanzasyonunun Temel Prensibi

Bir güç iletim sisteminin basitleştirilmiş modelini Şekil 3.1 (a)' da göstermektedir. Güç iletim sisteminin, kayıpsız kabul edilen ve reaktans X_L ile tanımlanan bir iletim hattı ile bağlıdır. Bara1 $V_1\angle\delta_1$ ve Bara2 $V_2\angle\delta_2$ güç iletim sistemi iki bara gerilim açıları arasında $\delta = \delta_1 - \delta_2$ bağıntısı vardır. İlgili fazör diyagramı şekil 3.1(b) ' de gösterilmiştir (Hingorani 1993).



(a) (b)

Şekil 3.1. a) Güç iletim sistemi basitleştirilmiş modeli **b)** Faz diyagramı

İletim hattındaki akımın büyüklüğü:

$$\mathrm{I} = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1\angle\delta_1 - V_2\angle\delta_2|}{X_L} \tag{3.16}$$

Bara1' deki akım akışının aktif ve reaktif bileşenleri:

$$I_{d1} = \frac{V_2 \sin\delta}{X_L}, \tag{3.17}$$

$$I_{q1} = \frac{V_1 - V_2 \cos\delta}{X_L} \tag{3.18}$$

Bara1' deki aktif güç ve reaktif güç:

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin\delta}{X_L} \tag{3.19}$$

$$Q_1 = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cos\delta)}{X_L} \tag{3.20}$$

Benzer şekilde, bara2' deki akım akışının aktif ve reaktif bileşenleri:

$$I_{d2} = \frac{V_1 \sin\delta}{X_L} \tag{3.21}$$

$$I_{q2} = \frac{V_2 - V_1 \cos\delta}{X_L} \tag{3.22}$$

Bara2' deki aktif güç ve reaktif güç:

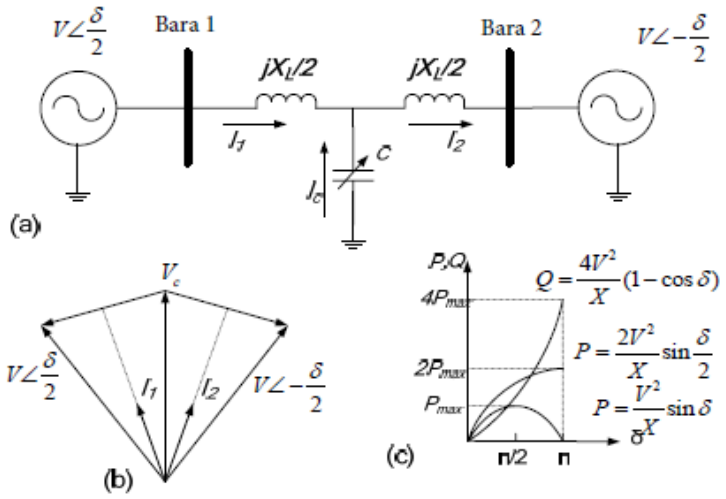
$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin\delta}{X_L} \tag{3.23}$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin\delta}{X_L} \tag{3.24}$$

Denklemler, aktif ve reaktif güç/akım akışının, iletim sisteminin gerilimlerini, faz açılarını ve hat empedansını kontrol ederek düzenlenebileceğini göstermektedir (Gyugyi 2000). Genel olarak, iletim sistemlerinin aktif ve reaktif güç telafisi için paralel (şönt) kompanzasyon ve seri kompanzasyon olarak iki ana gruba ayırabiliriz.

3.2.1. Paralel kompanzasyon

Paralel kompanzasyonu, özellikle şönt reaktif kompanzasyonu, gerilim büyüklüğünü düzenlemek, sistem kalitesini ve sistem stabilitesini arttırmak için güç iletim sisteminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hingorani 1993). Şönt bağlı reaktörler, reaktif gücü tüketerek iletim hattında aşırı gerilimlerini azaltmak için kullanılırken, şönt bağlı kapasitörler, reaktif gücü iletim hattına besleyerek gerilim seviyelerini korumak için kullanılır. Şönt kompanzasyonlu bir iletim sisteminin basitleştirilmiş bir modeli Şekil 3.2(a) ' da gösterilmiştir (Paserba 2004). Bara 1 ve Bara 2 için gerilim büyüklükleri sırası ile V_1, V_2 eşit kabul edilmiş ve aralarındaki faz açısı δ' dır. İletim hattı kayıpsız olarak kabul edilip ve reaktans X_L ile tanımlanmıştır. İletim hattının orta noktasında, kontrollü bir kondansatör C şönt bağlıdır. Bağlantı noktasındaki gerilim büyüklük değeri V olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.2. a) Şönt kompanzasyonlu iletim sistemi basitleştirilmiş model; **b)** Faz diyagramı; **c)** Güç açısı eğrisi

Bara1 ve Bara2' deki aktif güçler eşittir:

$$P_1 = P_2 = 2\frac{V^2}{X_L}\sin\frac{\delta}{2} \tag{3.25}$$

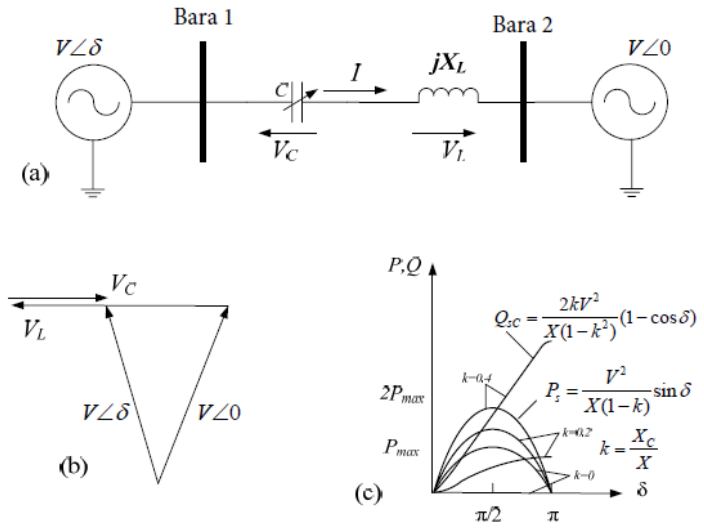
İletim hattının orta noktasındaki voltajı düzenlemek için kondansatör tarafından beslenen reaktif güç:

$$Q_c = 4\frac{V^2}{X_L}(1-\cos\frac{\delta}{2}) \tag{3.26}$$

Şekil 1.2(c) ' de gösterilen güç açısı eğrisinden, iletilen güç önemli ölçüde arttırılabilir ve tepe noktası δ=90º' den δ=180º' ye kayar. Çalışma marjı ve sistem kararlılığı şönt reaktif telafisi ile arttırılmıştır.

3.2.2. Seri kompanzasyon

Seri kompanzasyon, enerji iletim hattının seri hat empedansını doğrudan kontrol etmeyi, uzak mesafelere taşınan gücün iletilmesini, gerilim düşümlerini sınırlamak, aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltmak amacıyla gerilim kararlılığını geliştirmeyi amaçlamaktadır. AC güç iletimi öncelikle iletim hattının seri reaktif empedansı ile sınırlıdır. Seri bağlı, bir iletim hattı gerilim düşümüne karşı bir voltaj ekleyebilir, bu nedenle seri hat empedansını azaltabilir. Seri kompanzasyonlu bir iletim sisteminin basitleştirilmiş bir modeli Şekil 3.3(a) ' da gösterilmiştir. Bara 1 ve bara 2 için gerilim büyüklükleri sırası ile V_1, V_2 eşit kabul edilmiş ve aralarındaki faz açısı δ' dır. İletim hattı kayıpsız olarak kabul edilmiş ve reaktans X_L ile tanımlanmıştır. Kontrollü bir kondansatör, iletim hattına V_{inj} seri bağlanır. Faz diyagramı şekil 3.3(b) ' de gösterilmiştir (Paserba 2004).



Şekil 3.3. a) Seri kompanzasyonlu iletim sistemi basitleştirilmiş model; **b)** Faz diyagramı; **c)** Güç açısı eğrisi

C' nin kapasitansı hat reaktansının bir kısmı olarak tanımlanmıştır:

$$X_C = kX_L \tag{3.27}$$

İletim hattının seri endüktansı:

$$X = X_L - X_C = (1-k)X_L \tag{3.28}$$

İletilen aktif güç:

$$P = \frac{V^2}{(1-k)X_L}\sin\delta \tag{3.29}$$

Kondansatör tarafından sağlanan reaktif güç:

$$Q_c = 2\frac{V^2}{X_L}\frac{k}{(1-k)^2}(1-\cos\delta) \tag{3.30}$$

3.3. FACTS Cihazları

Elektrik güç iletiminde; hızlı, kontrolsüz ve plansız gelişmeler gerilim kararsızlığı, uzun ve yüklü hatlardaki aktif ve reaktif güç kararsızlığı ve frekans kontrolü problemi gibi sorunları beraberinde getirmiştir. Bu gibi sorunları elektrik güç iletiminde çözmek için, FACTS kavramı 1980'li yıllarda Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü'nde (EPRI) N.G. Hingorani tarafından öne sürülmüştür (Hingorani 2007). Elektrik güç iletiminin esnekliği, güç sisteminin çalışma koşullarındaki değişikliklere uyum sağlama

özelliği veya sürekli hal ve geçici hal sınır değerlerini belirli bir işletme limitleri dahilinde tutacak biçimde elektrik iletimi olarak tanımlanmıştır. FACTS cihazları kolay kontrol edilebilirliği ve güç transfer kapasitesini artırmak için güç elektroniği tabanlı veya diğer statik kontrolörler içeren alternatif akım iletim sistemleri şeklinde de tanımlanmıştır. Güç sistemi kontrol edilebilirliğini artırmak ve güç aktarım kabiliyetini artırmak için güç iletim sistemlerinde yeni teknoloji olarak, FACTS cihazları ve kontrolörleri kullanılmaktadır. Sadece kararlı durumda mekanik kontrollü anahtarlarla geleneksel kompansatörlerle aynı avantajları sağlamakla kalmaz, aynı zamanda güç sisteminin dinamik ve geçici performansını da geliştirmiştir. Modern kompanzasyon yöntemlerini oluşturan FACTS kontrolörlerin, çok kısa sürede tepki vermesi, her fazın ayrı ayrı denetlenebilirliği, dengesiz yükleri kompanze edebilmesi dikkate alındığında, bu cihazlarının kullanımı önem kazanmıştır. FACTS, sistemleri kontrolü bakımından güç elektroniği tabanlı olduğundan, geleneksel kontrolörlere göre daha hızlı tepki verirler. Bu cihazlar uygun bir şekilde kullanıldıkları zaman iletim hatlarının kararlılık sınırlarını artırırlar. FACTS kontrolörlerin iki temel amaçları vardır. Bunlardan birincisi, iletim sistemlerinin güç taşıma kapasitelerinin arttırılması, ikincisi ise iletim hatları üzerindeki güç akışını kontrol etmektir (Hasanovic 2000).

FACTS cihazların birçok kontrolörleri vardır. Genel olarak, şönt bağlı kontrolörler, seri bağlı kontrolörler ve bunların hibrit kombinasyonları olarak tasarlanmıştırlar. Her bir uygulamada bir FACTS kontrolörü belirli iletim sınırlamalarını azaltmak, güç sisteminde üretilen elektrik enerjisinin dağıtımını kolaylaştırmak ve yeterli sistem güvenilirliği sağlamak için kullanılır. Her bir cihazın gerilim, empedans veya iletim açısını kontrol etmedeki yeteneği, her bir aygıtın güç iletimini kontrol etmek için bağıl kapasitesini belirler. Güç sistem sınırlamalarının ve problemlerinin bazıları ve FACTS cihazlarının bu problemlerde kullanımı, geleneksel çözümlerle karşılaştırmalı olarak çizelge 3.1' de verilmiştir (Habur ve O'Leary 2004).

Çizelge 3.1. FACTS cihazlarının sürekli durum uygulamaları

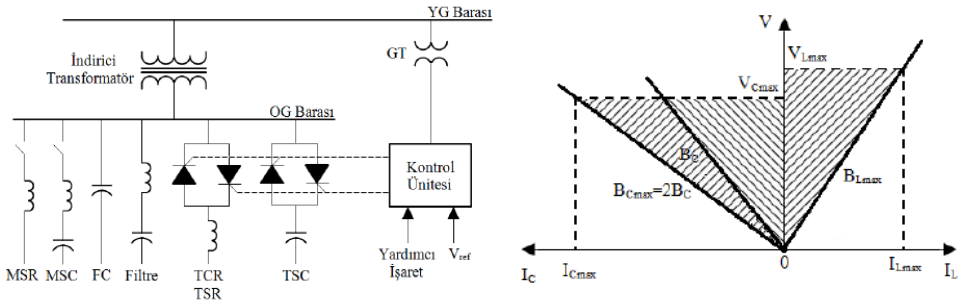
Sınırlama	**Problem**	**Düzeltici eylem**	**Geleneksel çözüm**	**FACTS cihazları**
Gerilim limiti	Ağır yükte düşük gerilim	Reaktif güç sağlamak	Şönt kapasitör, Seri kapasitör	TCSVC, TCSC, STATCOM
	Hafif yükte yüksek gerilim	Reaktif güç tüketmek	Şönt reaktörün anahtarlanması	TCSVC, STATCOM
	Kesintileri takiben yüksek gerilim	Reaktif güç tüketmek	Şönt reaktör eklenmesi	TCSVC, STATCOM

Çizelge 3.1' in devamı

Termal limiti	Hat veya Transformatörün aşırı yüklenmesi	Aşırı yükü azaltmak	Hat veya Transformatör eklemek	TCSC, UPFC, TCPAR
			Seri reaktör eklenmesi	TCSVC, TCSC
Döngü akış limiti	Paralel geçitler arasında yük paylaşımı	Seri reaktansı veya faz açısını ayarlamak	Seri reaktör / kapasitör eklenmesi veya PAR eklenmesi	UPFC, TCSC TCPAR
Kısa devre akım limiti	Yüksek kısa devre Akımı	Kısa devre akımını sınırlamak	Seri reaktör eklenmesi	UPFC, TCSC
Kararlılık	Sınırlı iletim gücü	Hat reaktansının azaltılması	Seri reaktör veya kapasitör eklenmesi	TCSC, SSSC

3.3.1. SVC (Statik Var Kompanzatör) Kontrolörleri

SVC kontrolörleri, gerilim gibi güç sistemi parametrelerini kontrol etmek için güç sisteminin kararlılık durumuna göre reaktif güç üreten veya tüketen, güç sistemine paralel olarak bağlanabilen FACTS cihazları ailesinin bir parçasıdır. Temel amacı sisteme hızlı, etkili, hassas ve kontrol edilebilir sürekli reaktif güç üretmek veya tüketmektir. Yüksek bir tepki süresine sahip olan, sınırsız bir aralıkta çalışan, güvenli ve operasyonel esnekliğe sahip olan cihazlardır (Gyugyi 2000). SVC kontrolörleri, büyük endüstriyel tesislerde reaktif güce olan talep yüksek olduğunda, dinamik güç faktörü düzeltmesi için de kullanılırlar. SVC kontrolörleri, tesisin güç faktörünü artırır, tesis girişindeki gerilim dalgalanmalarını en aza indirir ve tesisin işletme maliyetlerini azaltırlar. Gerilim kontrolü ve sistem stabilitesinin arttırılması için SVC kontrolörleri güç sistemlerinde kullanılmaktadır.



(a) (b)

Şekil 3.4. a) SVC bağlantı yapısı; **b)** SVC V-I çalışma bölgesi karakteristiği

SVC kontrolörleri, genellikle TCR (Tristör Kontrollü Reaktör), TSR (Tristör Anahtarlamalı Reaktör) ve TSC (Tristör Anahtarlamalı Kapasitör) gibi reaktif güç kontrol elemanlarından oluşur. Ayrıca bir SVC kontrolör sistemi, MSC (Mekanik Anahtarlamalı Kapasitör), MSR (Mekanik Anahtarlamalı Reaktör), FC (Sabit Kapasitör), FR (Sabit Reaktör) ve harmonik filtreler gibi bileşenleri de içermektedir. SVC kontrolör elemanının çalışma prensibi hesaplanan tetik açılarına bağlı olarak kapasitörlerin ve reaktörlerin devreye alınması veya çıkarılmasıyla değişken değerin şönt empedansının elde edilmesine dayanmaktadır ve yarı iletkenleri kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Reaktif güç, maksimum kapasitif reaktif güç değerinden statik VAR generatörünün uygun bir tetikleyici ile bağlandığı baradaki maksimum endüktif reaktif güç değerine kadar geniş bir aralıkta ayarlanabilir (Arifoğlu 2002). Şekil 3.4(b)' de TCR-TSC' ye ait gerilim-akım (V-I) çalışma bölgesi karakteristiği verilmiştir. Bu karakteristik ile FC-TCR' ye ait gerilim-akım (V-I) çalışma bölgesi karakteristiğinin TCR-TSC' ye ait karakteristikte, kapasitif akım sınırı daha yüksektir. Endüktans, cihazın kapasitif veya endüktif çalışmasını belirler. Endüktansın değeri, aşağıdaki denklemle (3.31) belirlenmektedir (Canizares ve Faur 1999).

$$X_V = X_L \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \tag{3.31}$$

Burada X_L tristör kontrolsüz temel endüktif reaktans ve α ise tetikleme açısıdır. Kontrolörün toplam empedansı aşağıdaki denklem (3.32) ile bulunur.

$$X_e = X_c \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - \frac{1}{r_x})} \tag{3.32}$$

Burada, $r_x = X_c / X_L$ tetikleme açılarının sınırları ile kontrolörlerin limit değerlerini verir, $X_c$ise kapasitif reaktanstır. SVC'nin çıkış gücü ise aşağıda belirtilen denklem (3.33) ile belirlenir ve burada V hattın gerilimidir.

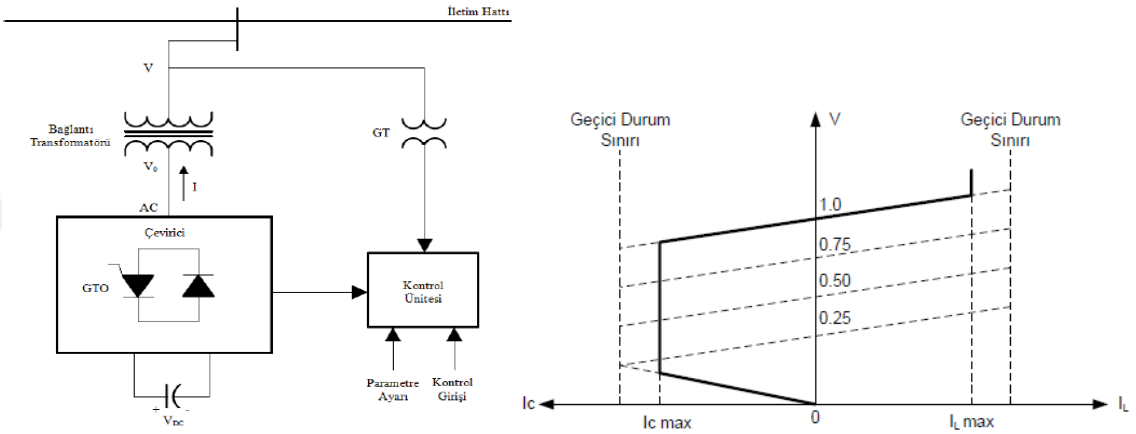
$$Q_c = \frac{V^2}{X_v} - \frac{V^2}{X_c} \tag{3.33}$$

Çalışmada SVC kontrolörleri; bekleme anındaki kayıpları azaltarak sürekli kontrol edilebilme, harmonikleri minimize etme, düşük kayıplara sahip olma yedekleme gibi özelliklerinden ötürü modellemesi gerçekleştirilen pilot güç sistemi modelinde kullanılmıştır.

3.3.2. STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) kontrolörleri

Güç sistemi için talep edilen aktif ve reaktif gücü sağlamak veya desteklemek amacıyla DC gerilim kaynaklı bir dönüştürücüdür. ASVC (Gelişmiş Statik Var Kompanzatör) olarak bilinen STATCOM kontrolörü, güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilen ve bir DC enerji depolama elemanı ile üç fazlı bir sistem arasında bir invertöre bağlanan bir FACTS cihazıdır. STATCOM kontrolörü iletim

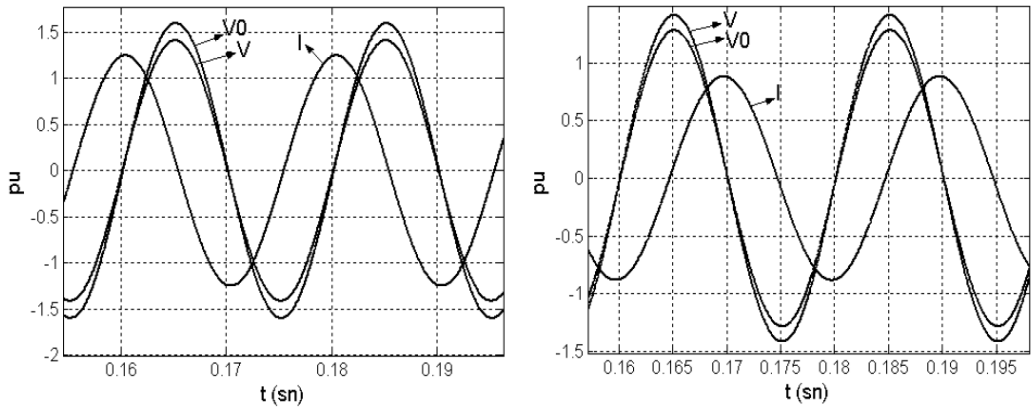
hattına şönt bağlanır, bağlantı hattındaki gerilimi, iletim hattından kontrollü bir reaktif akım çekerek işletme limitlerinde dengeler (Schauder ve Mehta 1993). STATCOM kontrolörü elektrik iletim sistemlerinde; sürekli rejim çalışma koşullarında bara geriliminin regülasyonu, geçici rejim veya dinamik rejim çalışma koşullarında ise geçici rejim kararlılık marjlarının iyileştirilmesi ve dinamik salınımların sönümlenmesinde kullanılmaktadır. STATCOM kontrolörü; kontrol cihazı, bağlantı transformatörü, gerilim kaynağı invertörü ve DC enerji depolama elemanlarından oluşmaktadır. Enerji depolama elemanı küçük bir kapasitör olduğundan, sadece STATCOM kontrolörü iletim sistemiyle reaktif güç alışverişi yapabilir.



(a) (b)

Şekil 3.5. a) STATCOM bağlantı yapısı; **b)** STATCOM V-I çalışma bölgesi karakteristiği

STATCOM kontrolörü, büyük güç değerlerinde reaktörlere veya kondansatör gruplarına ihtiyaç duymaksızın kademe noktasında reaktif güç tüketerek veya üreterek gerilim desteği sağlar. Transformatör çıkış uç gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre sistemden etkin güç çekmekte veya sisteme etkin güç aktarılmaktadır.



(a) (b)

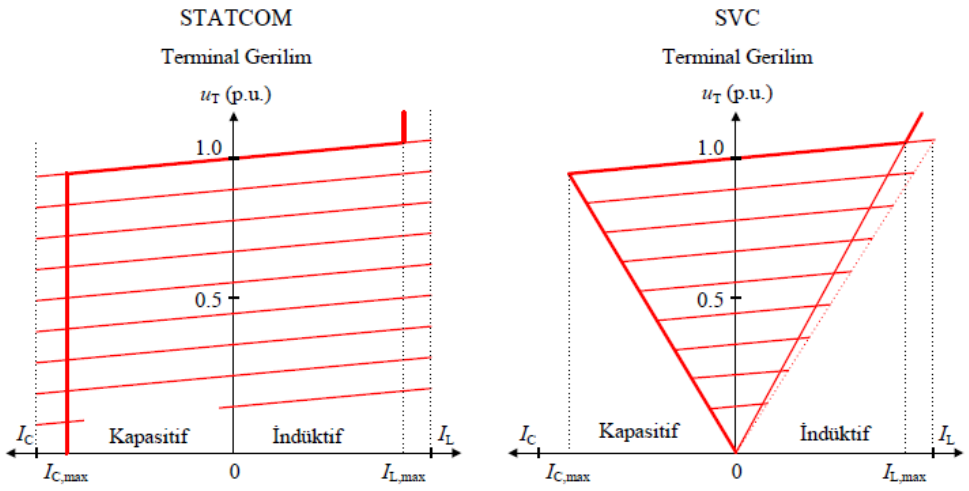
Şekil 3.6. STATCOM üzerinden reaktif güç alışverişi **a)** Reaktif güç üretimi (kapasitif); **b)** Reaktif güç tüketimi (endüktif)

Gerilim kaynaklı inverterin 3-faz çıkış geriliminin genliği değiştirilerek, STATCOM kontrolörünün reaktif güç üretmesi veya tüketilmesi (çekmesi) kontrol edilebilir. Eğer inverterin çıkış gerilimi V_0 AC sistem geriliminden V_{ac} büyük olursa, o zaman AC akım I_{ac} inverterden reaktif güç üreten AC sisteme transformatör reaktansı üzerinden akar. Bu durumda inverter AC sistem için, gerilimden ileride bir açıyla kapasitif akım üretir. Eğer inverterin çıkış geriliminin genliği AC sistem geriliminden küçük olursa akım, AC sistemden gerilim kaynaklı invertere doğru akar. Bu durumda ise inverter geriliminden geride bir açıyla, endüktif bir akım çeker yani reaktif güç tüketir. Eğer inverterin çıkış gerilimi ve AC sistem gerilimlerinin genlikleri eşit ise, inverterden AC sisteme veya AC sistemden invertere bir akım akışı olmayacaktır. Kısaca inverter reaktif güç üretimi veya tüketimi yapmayacaktır (Gyugyi 1988). Gerilim kaynaklı inverter ile AC sistem arasındaki aktif güç alışverişi denklem (3.34) kullanılarak hesaplanabilir. Gerilim kaynaklı inverterden hatta doğru akan, akımın genlik değeri aşağıdaki denklem (3.35) ile hesaplanabilir. Burada X bağlantı transformatörünün kaçak reaktansıdır, karşılıklı alınıp verilen reaktif güç ise denklem (3.36)'daki gibi ifade edilebilir.

$$P = \frac{V_0 V_{ac} \sin \alpha}{X} \tag{3.34}$$

$$I_{ac} = \frac{V_0 - V_{av}}{X} \tag{3.35}$$

$$Q = \frac{V_0^2 - V_0 V_{ac} \cos \alpha}{X} \tag{3.36}$$



(a) (b)

Şekil 3.7. a) STATCOM V-I karakteristiği; **b)** SVC V-I karakteristiği

Şekil 3.7' de SVC ve STATCOM kontrolörü V-I karakteristikleri verilmiştir. İşletme limitlerindeki düşük gerilimlerde STATCOM kontrolörünün akım besleme kapasitesi SVC kontrolöründen çok daha iyi olduğu görülmüştür. STATCOM

kontrolörleri herhangi bir sistem gerilimi değerinde, tam kapasitif veya tam endüktif çıkış akımı sağlayabilir. STATCOM kontrolörü tarafından sağlanan reaktif güç kompanzasyonu miktarı SVC kontrolörleri tarafından sağlanan reaktif güç miktarından daha fazladır. Çünkü SVC kontrolöründe düşük bir gerilim düzeyinde, reaktif güç gerilimin karesi ile orantılı olarak azalırken, STATCOM kontrolöründe gerilim ile doğrusal olarak azalır. Bu STATCOM kontrolörünün reaktif güç denetlenebilirliğini, SVC kontrolöründen üstün kılmaktadır. STATCOM kontrolörün reaktif gücünü SVC kontrolöründen daha kontrol edilebilir hale getirmiştir (Paserba vd. 2000). STATCOM kontrolörü güç sistemlerinde gerilim salınımları sonucu gerilim dengesizliği olduğu durumlarda gerilim kararlılığı için SVC kontrolöründen daha iyi performans gösterir. STATCOM kontrolörü, güç sistemine paralel bağlı en yaygın FACTS cihazlarından birisidir. Bu cihazın en önemli özelliklerinden biri de güç kalitesini artırmasıdır. STATCOM senkron gerilim kaynağı olarak kullanılır ve bu özellik SVC kontrolöründen daha iyi bir çalışma ve esneklik sağlamaktadır (Zhang vd. 2012).

3.4. Güç Sistemlerinde FACTS Cihazlarının Optimum Yerleştirilmesi ve Boyutlandırılması (Genetik Algoritma ve PSO algoritma uygulaması)

Modern enterkonnekte güç sistemleri işletme ve kontrol yapısındaki karmaşıklıklardan dolayı birçok problem ile karşı karşıya kalınmaktadır. En önemli problemlerden biri olan enterkonnekte güç sisteminin gerilim kararsızlığı olmuştur. Güç sistemindeki bu kararsızlık, FACTS cihazları olarak adlandırılan güç elektroniği tabanlı cihazların kullanımı ile önlenebilir (Song ve Johns 1999).

Güç sisteminde FACTS cihazlarının kullanılması sadece güç sistemi kararlılığını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda güç sistemine, işletme ve kontrol esnekliği de sağlamıştır. FACTS teknolojisi güç sistemi performansını artırarak mevcut iletim ve üretim kaynaklarının daha iyi kullanılmasını sağlar (Mathad vd. 2013). Güç sistemlerinde normal işletme esnasında ve beklenmeyen koşullar (arıza halleri, işletme limit aşımları gibi) altında bara gerilimi, reaktif güç ve aktif güç gibi sistem parametrelerini kabul edilebilir işletme limit aralığında tutmak oldukça zor olacaktır. Bu enterkonnekte güç sistemlerinde işletme ve kontrol problemidir ve sistemde meydana gelen bir arıza sonrasında senkronizasyonu sağlamak oldukça önemlidir. Çünkü sistemin aşırı yüklenmesi, alıcı uçta kontrolsüz yüklere neden olacaktır. Enerji iletim hatlarında reaktif güç eksikliği ve zorlu hava koşulları, enterkonnekte güç sistemlerinde normal işletme esnasında karşılaşılan zorluklar olarak gösterilebilirler (Makkar ve Dewan 2010; Karthik ve Arul 2013). FACTS cihazlarının her bir baraya eklenmesi, güç sistemlerinde kurulum ve işletme maliyetini artıracağından optimum işletme şartları gerçekleşmeyecektir. Bu sebepten dolayı sınırlı sayıdaki FACTS kontrolörlerinin, güç sistemlerinde en uygun konuma (bara veya hat) yerleştirilmesi gerekir. Bu nedenlerden ötürü, çalışmada Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritma (GA) yöntemleri kullanarak güç sisteminde FACTS cihazlarının optimum yerleşimi ve boyutlandırması gerçekleştirilmiştir.

FACTS cihazlarının optimal konumlandırılması ile gerilim profili seviyesini kararlı hale getirmek, güç kayıplarını azaltmak, güç sistemi enerji verimliliği ve kalitesini arttıracaktır. FACTS cihazlarının optimal konumunu ve boyutunu belirlemek, yeni üretim tesislerinin ve yeni enerji iletim hatlarının kurulumuna gerek kalmadan güç şebekelerinden maksimum güç ve enerji verimi elde edilecektir. İşletme maliyetlerinden

dolayı FACTS cihazlarının en uygun yerlere yerleştirilmesi temel amaçtır. Bu amaçla FACTS cihazlarının matematiksel modeli tasarlanıp daha sonra optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. FACTS cihazlarının yerleşim noktalarının belirlenmesindeki PSO ve GA performansını karşılaştırabilmek için algoritmalarda benzer başlangıç popülasyonları ve durdurma ölçütleri kullanılmıştır.

Güç sistemini iyileştirmek için FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi ve sistem kararlılığına etkisi hakkında birçok araştırma projesi ve çok sayıda çalışma yapılmıştır. FACTS cihazlarının güç sistemlerindeki en uygun yerleri ve boyutunu belirlemek için kullanılan yaklaşımlar ve teknikler; analitik yaklaşımlar, aritmetik programlama yöntemleri veya geleneksel yöntemler, sezgisel optimizasyon teknikleri ve melez yöntemler olarak ayrılabilir. Bu kategoride, sezgisel yöntemler, belirli bir uygunluk veya objektif işlev için en iyi çözümü bulmak için kullanılmıştır. FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktaları çalışmalarında kullanılanlar arasında en popüler sezgisel yöntemler PSO ve GA algoritmalarıdır. FACTS cihazlarının güç sistemlerindeki optimum konumunu belirleme problemini çözmek için yeni ortaya konulan ve geliştirilmiş PSO olarak adlandırılan yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma, diğer optimizasyon algoritmalarına göre daha düşük sınır değeri aşımlarının, gerilim sapmalarının ve güç kayıplarının elde edilmesini sağlamıştır (Sarker ve Goswami 2014). GA kullanılarak gelişmiş FACTS cihazlarının optimum güç akışını sağlayacak şekilde güç sistemindeki konumlarının bulunması probleminin çözümü elde edilmiştir. Çeşitli test sistemleri üzerinde yapılan benzetimler, sezgisel algoritmalara göre doğruluk ve yakınsama özellikleri bakımından daha iyi çözümler sunduğunu göstermektedir.

FACTS cihazlarının kontrolörleri, çoklu hedeflere ulaşmak için yapılandırılmış kontrol algoritmalarını kabul etme yetenekleri ile karakterize edilirler (Ara vd. 2011). Sezgisel yöntemler en yaygın kullanılan yaklaşımlardır ve aynı zamanda en etkili yaklaşımlar olarak kabul edilirler. Esneklikleri nedeniyle, Sezgisel yöntemler çeşitli karmaşık mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için başarıyla kullanılmaktadır (Yildiz ve Solanki 2012; Shokri-Ghaleh ve Alfi 2014). Analitik yaklaşımlar, FACTS cihazlarının güç sistemlerindeki optimum konumunu bulma problemini çözmek için yetersiz hesaplama doğruluğuna sahiptir ve aritmetik programlama yaklaşımları, kısıtlı optimizasyon problemlerini yönetmede genellikle verimsizdir. Bununla birlikte, sezgisel yöntemler, çok yönlü, çok kısıtlı, çok nesnel ve ayrık bir sistemle uğraşmada oldukça verimli olan stokastik, popülasyona dayalı optimizasyon algoritmalarıdır.

Sezgisel yöntemler FACTS cihazlarının güç sistemlerindeki optimum konumunu belirlemek için en yaygın kullanılan metodolojilerdir. Ayrıca, analitik yöntemlerin veya klasik optimizasyon yaklaşımlarının meta-sezgisel optimizasyon teknikleriyle kullanılması, önerilen meta-sezgisel optimizasyon tekniğinin arama alanını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Güç sistemlerinde FACTS cihazlarının en uygun konumlarını ve kapasitelerini belirlemek oldukça karmaşıktır ve büyük bir veri seti her zaman gereklidir. Soruna tam olarak en uygun çözümü sağlayan uygulamalı bir algoritma bile, bir simülasyon senaryosunda çözüm süresi veya alan karmaşıklığı alanlarında başarılı olamayabilir (Pezzini vd. 2011).

İletim sistemlerinde veya dağıtım sistemlerinde FACTS cihazlarının güç sistemlerindeki optimum konumunu belirlemek için kullanılan ve önerilen yaklaşımın etkinliğini kanıtlamak için önemli parametrelerin bir analizi yapılmalıdır. Analiz parametreleri, iletim hattı güç kayıpları azaltma, enerji üretim maliyeti, FACTS cihazlarının güç sistemlerindeki optimum kurulum ve işletme maliyeti, gerilim sapması, gerilim kararlılığı ve gerilim harmoniklerini azaltmada önemli bir rolü ve profili vardır. (Kumar ve Srikanth 2017; Musa vd. 2018) İki aşamalı bir yaklaşımla bir STATCOM kontrolörü optimum konumda, yükleme ve optimum güç miktarını belirleyerek, sistemde güç kaybını azaltmak için kullanılmıştır. Sezgisel analizi dayanan genelleştirilmiş yaklaşım, STATCOM kontrolörünün optimal yerleşimini belirlerken, Newton-Raphson yöntemi uygun kapasitesini belirlemiştir. STATCOM kontrolörünün daha düşük bir güç kaybına ve daha iyi gerilim profiline sahip olduğu görülmüştür (Rao 2017). PSAT / MATLAB programları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında IEEE-9 bara sisteminde üç fazlı simetrik arıza altında reaktif güç sürdürülebilirliği ve gerilim stabilizesinin sağlanmasında SVC, STATCOM, UPFC ve SSSC kontrolörleri dahil olmak üzere FACTS cihazların karşılaştırılması yapılmıştır (Dwivedi ve Vadhera 2019).

Sezgisel optimizasyon teknikleri üç gruba ayrılabilir. İlk olarak; karınca kolonisi optimizasyon algoritması, bağışıklık algoritması, yapay arı kolonisi, parçacık sürü optimizasyonu, yerçekimsel arama algoritması, ateşböceği algoritması, algoritma ve kimyasal reaksiyon optimizasyonu, öğrenme öğretme sürüsü vardır. İkincisi, genetik algoritma, diferansiyel algoritma, evrimsel programlama ve evrimsel stratejiler algoritması, diferansiyel arama algoritması gibi evrim tabanlı algoritmalar vardır. Üçüncüsü, Fa ve CS, IPSO ve IGA, ABC ve GSA ve PSO ve SQP gibi hibrit optimizasyon algoritmaları vardır. Optimizasyon teknikleri aynı anda FACTS cihazlarının optimal konumunu ve boyutlandırmalarını belirlemek için kullanılabilir. Hibrit yaklaşımlar sezgisel ve analitik yaklaşımlar veya konvansiyonel optimizasyon yöntemleri olabilir. Hibrit yaklaşımların uygulanmasının amacı, daha basit bir yapı ve daha az hesaplama süresi elde etmek için sezgisel optimizasyon tekniklerinin arama alanını azaltmaktır.

Sezgisel optimizasyon teknikleriyle analitik yöntemlerin veya klasik optimizasyon yaklaşımlarının kullanılması, önerilen optimizasyon tekniğinin arama alanını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu, daha basit bir yapıya ve daha az hesaplama süresine neden olmaktadır (Elmitwally ve Eladl 2016). Analitik yaklaşımlar, aritmetik programlama yöntemleri veya geleneksel yöntemler, güç akışı modelinin doğrusal olmayanlarının dikkate alınmaması, hesaplama doğruluğunu olumsuz yönde etkileyebilir. Buna ek olarak, bu yaklaşımların algoritma yeteneği aynı anda FACTS cihazların optimal konumu ve boyutunu belirlemede kısıtlıdır. Geleneksel optimizasyon yaklaşımları etkili yakınsama özelliklerine sahiptir. Ancak, kısıtlı optimizasyon problemlerini yönetmek ve çözümlemek zor ve karmaşıktır. Sezgisel optimizasyon teknikleri en yaygın kullanılan yaklaşımlardır ve aynı zamanda çeşitli karmaşık mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için en etkili yaklaşımlar olarak kabul edilirler. Esneklikleri nedeniyle, sezgisel yöntemler, çok tipli FACTS cihazlarının en uygun konumunun belirlenmesinde ve boyutlandırılmasında başarıyla kullanılmaktadırlar.

Yük akışı analizinde generatör ve yük ile ilgili aktif ve reaktif güçlerin yanı sıra her bir baradaki gerilim büyüklüğü ve açılar da hesaplanmıştır. Minimum gerilim düşümü ve şebeke kayıplarını sağlamak amacıyla güç sisteminde FACTS cihazlarının yerinin ve boyutunun belirlenmesi için farklı sezgisel algoritmalar kullanılmış ve algoritmaların bu problemin çözümündeki performansları karşılaştırılmıştır. Bunun için, algoritmalar MATLAB ortamında sezgisel yöntemlerin karşılaştırmasının eşit koşullarda yapılabilmesi amacıyla aynı birey sayıları, iterasyon sayıları ve tekrar sayıları ile söz konusu problemin çözümünde kullanılmıştır. MATLAB ortamında yazılan kodların genel algoritma akış diyagramına göre her bir sezgisel algoritma güç sisteminin bütün baraları için çözümlenerek en uygun çözümün bulunması amaçlanmıştır. Böylece FACTS cihazlarının yerinin ve boyutunun belirlenmesi için en uygun baranın bulunması sağlanmıştır. Güç sisteminin farklı yüklenme koşulları göz önünde bulundurularak simülasyon çalışmalarında kullanılan FACTS cihazlarının tepki güç değeri, çalışmalarda 1.0p.u. ile sınırlandırılmıştır.

3.4.1. Genetik algoritma uygulaması

GA metodunun temeli, doğal genetik ve seçilime dayanmaktadır (Rao 2017). Geleneksel optimizasyon tekniklerine göre bazı farklılıkları vardır. Başlangıç işlemini tek bir değer yerine seçilen popülasyonun tamamını kullanarak yapar. Popülasyon ne kadar büyük olursa sonuç da o kadar doğru olmaktadır, fakat hesaplama zamanı artmaktadır. GA, en iyi bireyleri seçmek için rastgele bir başlangıç popülasyonu ile başlar. Çaprazlama, mutasyon ve seçim GA' nın işlevsel basamaklarıdır.

GA optimizasyon probleminin çözümü başlangıç popülasyonun yaratılması ile başlar. Belirlenmiş sayıdaki popülasyon, tasarımdaki veri değişkenleriyle bağlantılı rastgele diziler içermektedir. Her dizi kendine ait en iyi veri değerini bulması için karşılaştırılır. Yeni popülasyon sırası ile çoğalma, çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile elde edilir. Oluşan dizilerin en iyi değeri tekrar hesaplanır ve durma kriteri test/kontrol edilir. Her iterasyon işlemine jenerasyon denir. İterasyon, eski ve yeni hesaplanan en iyi veri değerleri arasındaki fark belirlenen değerden küçük olana kadar veya üretim sayısının belli bir değerden büyük olmasına kadar devam eder, buna durma (sınır) denir. Çoğalma operatörü, çiftleşme alanı oluşturmak için popülasyondan pozitif diziler seçer. Olasılık prosesleri kullanarak popülasyondan pozitif diziler seçilir ve tekrar kopyaları çiftleşme alanına gönderilir. Doğal seçilimde olduğu gibi pozitif olanlar yaşamına devam ederken negatif olanlar silinir. Çoğalmadan sonra çaprazlama basamağı uygulanır. Bu operatörün amacı yeni veri dizileri oluşturmaktır. Bu işlem diziler arası bilgi alışverişi ile sağlanır. Bu operatör en iyi değeri bulmak için oluşturulan yeni jenerasyonda ana operatördür. Yeni popülasyon oluşturmak için kullanılan son operatör mutasyondur.

FACTS Cihazlarının optimum konumu ve boyutu için GA aşağıdaki adımlarda verilmiştir:

Adım 1: GA' nın popülasyon boyutunu ve FACTS Cihazının parametre değerleri başlatılır.
Adım 2: Güç akışı hesaplamaları (Newton Raphson) yapılır.
Adım 3: Tüm bireyler için nesnel değerler hesaplanır.
Adım 4: Nesnel değerlere dayanarak, hesaplama işlevine dayalı olarak eski popülasyondan yeni bir popülasyon seçilir.

Adım 5: GA operatörleri, çaprazlama ve mutasyon, yeni çözümler oluşturmak için seçilen popülasyona uygulanır.
Adım 6: Yeni kromozomlar için objektif değerler hesaplanır ve popülasyonda kullanılır.
Adım 7: Süre tamamlanmışsa, GA programını durdurulur ve en iyi birey yazdırılır, aksi halde tekrar 4. adıma geçilir.

FACTS cihazlarının en uygun yerini ve boyutunu belirlemek için formüle edilmiş amaç fonksiyonu, gerilim sapmalarını azaltmak, güç sistemi kayıplarını (aktif ve reaktif güç) en aza indirmek ve aşırı yüklü hatlarda yüklenmeleri azaltmak için kullanılmıştır.

Her bir yük barasındaki gerilim sapması,

$$VD = \sum_{i=1}^{nPQ} |V_i - 1\,|^2 \tag{3.37}$$

Aktif ve reaktif güç kaybı,

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_L} G_i(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos\,(\delta_k - \delta_m)) \tag{3.38}$$

$$Q_L = \sum_{i=1}^{N_L} B_i(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\sin\,(\delta_k - \delta_m)) \tag{3.39}$$

Aşırı yüklenen hatlarda aktif ve reaktif güç akışı,

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k \sum_{i=1}^{N_B} V_m[G_i\cos(\delta_k - \delta_m) + B_i\sin\,(\delta_k - \delta_m)] \tag{3.40}$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = V_k \sum_{i=1}^{N_B} V_m[G_i\sin(\delta_k - \delta_m) + B_i\cos\,(\delta_k - \delta_m)] \tag{3.41}$$

Denklemlerle ifade edilir (Saoji vd. 2013; Salman 2015).

3.4.2. Parçacık sürü optimizasyonu uygulaması

Parçacık sürü optimizasyonu, bireylerden oluşan bir popülasyonun elemanlarını kullanarak, belirlenmiş bir bölge içinde istenilen en uygun pozisyonu elde eder. Bu bağlamda popülasyon sürü, bireysel elemanlar ise parçacık olarak adlandırılır (Zhao v.d. 2005). Her parçacığın ulaştığı en uygun pozisyon diğer bireylerin de hızlarını ve durumlarını etkileyecek şekilde kullanılır, yani her parçacık kendisinin ve komşusunun en uygun pozisyonunu göz önüne alarak en iyi çözüm kümesine ulaşmayı amaçlar.

Başlangıç pozisyonları diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi X^{min} ve X^{max} bireyleri icin dağılım yapılabilecek sınır koşulları; i ve j ise sırasıyla parçacık sayısı ve problemin boyutu (i=1,...,SN ve j=1,...,D) olmak üzere, başlangıç pozisyonları popülasyonu eşitlik (3.42)' de gösterilmiştir.

$$S_{ij} = x_j^{min} + rand[0,1](x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.42)$$

Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasında temel işlem, tüm parçacıkların aranan en optimal konuma yani sonuca ulaşmalarıdır. Bir t zamanında n boyutlu i parçacığının konumu, hızı ve bir önceki iterasyondaki en iyi konumu sırası ile Eşitlik (3.43), (3.44) ve (3.45)'de verilmiştir.

$$S_i(t) = (S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,n}) \quad (3.43)$$

$$V_i(t) = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots . v_{i.n}) \quad (3.44)$$

$$P_i(t) = (P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,n}) \quad (3.45)$$

Mevcut iterasyona kadar her parçacığın elde edilmiş en iyi konumu aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

$$P_{gb}(t) = (P_{gb,1}, P_{gb,2}, \dots, P_{gb,n}) \quad (3.46)$$

Algoritmada bir önceki iterasyondaki konum kullanılarak, o iterasyondaki hız değeri dolayısıyla yer değiştirmesi hesaplanmaktadır. Yer değiştirmesi mevcut konum bilgisine eklenerek parçacığın yeni konum değeri elde edilir. Yeni bir konum üretmek için (3.47), (3.48) eşitlikleri kullanılır.

$$V_i(t+1) = k(w(t)V_i(t) + c_1 r_1\big(P - S(t)\big) + c_2 r_2\big(P - S(t)\big)) \quad (3.47)$$

$$S_i(t+1) = S_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.48)$$

Burada c_1 ve c_2 kullanıcı tarafından seçilen sosyal ve bilişsel parametreler; r_1 ve r_2 ise 0 ile 1 arasında rastgele atanan sayıları belirtir. w ve k ise sırasıyla atalet ağırlığını ve kısıtlama katsayısını temsil eder. Atalet ağırlığı her iterasyonda değişirken, kısıtlama katsayısı c1 ve c2 değerlerine bağlı olarak sabittir. W_{max} ve W_{min} atalet ağırlığının sınırlarını, t_{max} maksimum iterasyon sayısını ve t ise mevcut iterasyon sayısını göstermekte olup, eşitlik (3.49) ve (3.50)' de verilmiştir (Vlachogiannis v.d. 2006).

$$W(t) = W_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} t \quad (3.49)$$

$$k = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2 \quad (3.50)$$

3.4.3. Sezgisel algoritmalar ile optimal güç akışı

PSO, GA yöntemlerini kullanarak enterkonnekte güç sisteminde SVC ve STATCOM kontrolörleri cihazlarının optimal yerleşim noktalarının ve boyutlarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Sezgisel algoritmaların her bir iterasyonunda toplam şebeke kayıpları ve gerilim düşümlerini hesaplamak için bir güç akışı hesaplamasına ihtiyaç duyulmuştur. Çalışmada Newton-Raphson güç akışı hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Her bir iterasyonda Newton-Raphson güç akışı algoritması çalıştırılmış ve güç sisteminin toplam kayıpları, güç akışı hesaplamaları yolu ile bulunmuştur. Her bir bara için bu işlem tekrar edilmiştir. Algoritmaların bütün baralar için elde ettiği kayıp

değerlerinin en küçüğü tespit edilerek bu değerlere karşı düşen konum ve güç değeri elde edilmiştir.

$$Q_c = \frac{V^2}{X_v} - \frac{V^2}{X_c} \tag{3.51}$$

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \tag{3.52}$$

$$= V_i \sum_{k=1}^{n} Y_{ik}^* V_k^* = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| \angle(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) \tag{3.53}$$

$$= V_i \sum_{k=1}^{n} Y_{ik}^* V_k^* = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| \angle(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) \tag{3.54}$$

$$P_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| cos(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) = P_{Gi} - P_{Di} \tag{3.55}$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| sin(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) = Q_{Gi} - Q_{Di} \tag{3.56}$$

$$P_{Gi} = P_{Di} + P_L \tag{3.57}$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + Q_L \tag{3.58}$$

$$P_i + P_{DGi} = P_{Di} + P_L \tag{3.59}$$

$$Q_i + Q_{DGi} = Q_{Di} + Q_L \tag{3.60}$$

$$P_i + P_{DGi} = P_{Di} + P_L \tag{3.61}$$

$$Q_i = Q_{Di} + Q_L \tag{3.62}$$

$$\sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| cos(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) + P_{DGi} = P_{Di} + P_L \tag{3.63}$$

$$\sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}| sin(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) = Q_{Di} + Q_L \tag{3.64}$$

Tüm baralar için aktif güç akış denklemi

$$\sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}|cos(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) + P_{DGi} - P_{Di} - P_L = 0 \quad (3.65)$$

Tüm yük baraları için reaktif güç akış denklemi

$$\sum_{k=1}^{n} |V_i||V_k||Y_{ik}|sin(\delta_i - \delta_k + \theta_{ik}) - Q_{Di} - Q_L = 0 \quad (3.66)$$

V_i = i. bara gerilimi,
V_j = j. bara gerilimi,
Y_{ij} = i. bara ve j. bara arasında admintans
P_i = i. bara aktif güç,
Q_i = i. bara aktif güç,
$\delta_j = V_j$ gerilimin açısı
$\delta i = V_i$ gerililmin açışı

Optimal güç akışı fonksiyonu olarak tanımlanan f(x.u) 'nun bileşenleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$X = [P_{Gslack} V_l \, Q_{in}], u = [P_{gen} \, V_{gen}] \quad (3.67)$$

Burada X çıkış, u ise giriş vektörünü belirtir. Yani optimal güç akışında generatörler aktif güç üretim miktarı ve gerilimleri güç akışı denkleminin giriş vektörünü; salınım barasının aktif güç üretimi, yük baralarının gerilimleri ve reaktif güçler ise çıkış vektörünü oluşturur. Optimal aktif güç üretimi için verilen generator üretim toplam maliyet fonksiyonu ise,

$$f = \sum_{i=1}^{Ng} a_i + b_i P_{Gi} + C_j P_{Gi}^2 \ (\$/h) \quad (3.68)$$

Burada N_g generator sayısını; P_{Gi} i. generatör aktif güç üretim miktarını;a_i, $b_i$ve$c_i$ise i. generatör sabit maliyet katsayılarını belirtir. Klasik bir güç akışı denklemindeki eşitlik sınırları,

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| \left|V_j\right|\left|Y_{ij}\right| \cos\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) + P_{in} = 0 \quad (3.69)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{N_b} |V_i| \left|V_j\right|\left|Y_{ij}\right| \sin\left(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j\right) + Q_{in} = 0 \quad (3.70)$$

parametre sınır değerleri ise,

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{G\dot{i}}^{max} \; i = 1, \dots, N_g \tag{3.71}$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{G\dot{i}}^{max} \; i = 1, \dots, N_g \tag{3.72}$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G\dot{i}}^{max} \; i = 1, \dots, N_{FACTS} \tag{3.73}$$

N_g ve N_{FACTS}, generator ve FACTS cihazlarının sayısıdır. Optimal güç akışının hedefi, giriş ve çıkış parametrelerini sınır koşulları içinde tutarak amaç fonksiyonunu minimize etmektir.

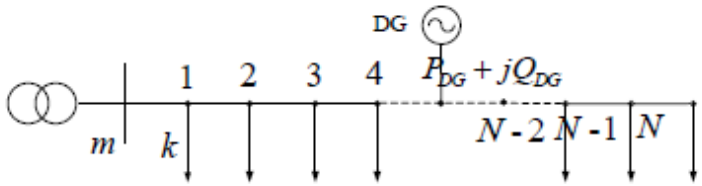
$$F_p = \sum_{k \in N_B} P_{kloss} + Penaltı\ Fonksiyonu \tag{3.74}$$

Penaltı Fonksiyonu;

$$= k_1 x \sum_{i=i}^{Ng} f\,(Q_{Ri}) + k_2 x \sum_{i=1}^{NB} f\,(V_i) + k_3 x \sum_{m=1}^{Nl} f\,(S_{lm}) \tag{3.75}$$

Toplam şebeke kayıpları ve gerilim düşümlerini hesaplamak ve en aza indirmek için FACTS cihazlarının yerinin ve boyutunun belirlenmesi problem formülasyonunda N_B hatların sayısı, g_k i ve j baralarını bağlayan hattın kondüktansı, V_i i. Baranın gerilim değeri, V_j j. baranın gerilim değeri θ_{ij} i ve j baraları arasındaki gerilim değerinin faz açısı ve P_{loss} ise toplam aktif güç kaybını ifade etmektedir.

Örnek enerji iletim hattı Şekil 3.8' de gösterilmiştir, her yük, hat boyunca bir düğüm olarak kabul edilip trafo merkezinin bara bağlantı noktasından başlayarak sırayla numaralandırılmıştır. Yükler, hattın başında ve sonunda eşit olarak dağıtılır ve her yükün boyutu $P_i + jQ_i$ dir.



Şekil 3.8. Örnek iletim hattı modeli

k noktasından önceki aktif ve reaktif yükler:

$$\begin{cases} P_{1-k} = (k-1)P_1 \\ Q_{1-k} = (k-1)Q_1 \end{cases} \tag{3.76}$$

k noktasından sonra aktif ve reaktif yükler:

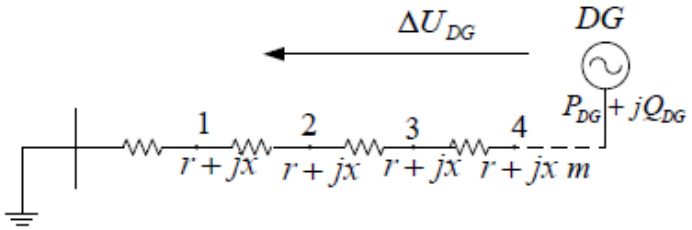
$$\begin{cases} P_{k-N} = (N-k+1)P_1 \\ Q_{k-N} = (N-k+1)Q_1 \end{cases} \tag{3.77}$$

$$\Delta U_k = \Delta U_{k1} + \Delta U_{k2} \tag{3.78}$$

$$\Delta U_{k1} = \frac{k}{2}\left(\frac{rP_{1-k} + xQ_{1-k}}{U_N}\right) = \frac{k}{2}(k-1)\frac{rP_1 + xQ_1}{U_N} \tag{3.79}$$

$$\Delta U_{k2} = k\left(\frac{rP_{k-N} + xQ_{k-N}}{U_N}\right) = k(N-k-1)\frac{rP_1 + xQ_1}{U_N} \tag{3.80}$$

Yukarıda belirtilen örnek iletim hattında, reaktif güç desteği herhangi bir yük düğümünde bulunabilir. Şekil 3.8 'de gösterildiği gibi, reaktif güç desteğinin gerilim düşümü üzerindeki etkisi, sisteme yani m noktasından önce hat üzerindedir, çünkü güç tarafı sistemi kısa devredir ve hattaki empedans yüke göre küçüktür. Önceki bölümdeki gerilim düşümü yönüne göre, buradaki gerilim düşümü, Şekil 3.9 'da gösterildiği gibi hat için negatiftir.



Şekil 3.9. Örnek iletim hattı gerilim kaybı

Süperpozisyon teoremi kullanılarak, örnek iletim hattının gerilim düşümü aşağıdaki gibidir:

$$\Delta U = \Delta U_k + \Delta U_{DG} \tag{3.81}$$

$$\Delta U = \begin{cases} \frac{k}{2}(2N-k+1)C - kD, k \in [1, m] \\ \frac{k}{2}(2N-k+1)C - mD, k \in [m+1, N] \end{cases} \tag{3.82}$$

$$u_k = \begin{cases} u_0 - \frac{k}{2}(2N-k+1)C - kD, k \in [1, m] \\ u_0 - \frac{k}{2}(2N-k+1)C - mD, k \in [m+1, N] \end{cases} \tag{3.83}$$

PL sistemdeki tüm dağıtılmış generatörlerin kapasitesi ile sistemin aktif yükü arasındaki ilişkiyi yansıtır. Dağıtılmış generatörlerin toplam kapasitesinin sistemin toplam aktif yüküne oranıdır.

$$PL_{DG}(\%) = \frac{\sum P_{DG}}{\sum P_1} x100\% \tag{3.84}$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Güç sisteminin karakteristikleri, yük büyüdükçe ve üretim arttıkça zaman ile değişir. Enerji iletim şebekesi sistem iyileştirmeleri yeterli bir şekilde geliştirilip işletilmezse, güç sistemi sürekli durum ve geçici durum problemlerine karşı kararlılık sınırları daralır (Habur ve O'Leary 2004). İletim sistemi sınırlamaları bir veya daha fazla karakteristikleri içerebilir; sürekli durum güç transfer limiti, gerilim kararlılık limiti, dinamik kararlılık, işletme gerilim limiti, geçici kararlılık limiti, güç sistemi dalgalanma sönümleme limiti, termal limit, kısa devre akım limiti. Her bir iletim engeli ve bölgesel kısıtlama bir veya daha fazla sistem seviye problemine sahiptir (Acha vd. 2004).

FACTS cihazları kontrolörlerinin tanımlanması, gelişimi ve sınıflandırılması ele alınarak incelenmiş, Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sistemi modellenerek benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. FACTS cihazlarından olan SVC ve STATCOM modelleri, güç sistemi modelleme, analiz ve simülasyon programı Dig-SILENT Power Factory kullanılarak, modellenen güç sistemi üzerine yerleştirilmiştir. Tasarlanan model için gerilim düşümü, frekans değişimleri, anlık enerji üretimi/tüketimi gibi çeşitli işletme senaryosu durumları için analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların, sistem güvenilirliği ve kararlılığını artırmak, hataların ve donanımsal bozuklukların etkilerini sınırlandırarak tekerrürlü enerji kesilmelerini önlemek ve Türkiye enterkonnekte sisteminin gerilim ve güç kontrolünün kararlılığını artırarak daha kaliteli ve ekonomik bir şekilde elektrik enerjisi sürekliliğinin sağlanması üzerine katkıları yorumlanmıştır.

Pilot bölge olan Batı Akdeniz enerji iletim modeli Dig-SILENT Power Factory programı kullanarak oluşturulmuştur. Gerilimleri sürekli değişken olan trafo merkezleri bara sistemlerine farklı sezgisel yöntemlerin optimizasyon teknikleri kullanarak bağlantı noktaları belirlenmiştir. FACTS cihazlarını bağlayıp, sistemin güç hesaplamaları, yük akışı analizi ve gerilim düşümü kontrolleri gerçekleştirilmiştir. FACTS kontrolörlerinden olan SVC ve STATCOM kontrolörleri, elektrik güç sistemine paralel bağlandığı için yardımcı bir sanal baraya ihtiyaç duyulmamıştır. Modellemede alt ve üst sınır değerleri, 400 kV gerilim seviyesi 1p.u. gerilim alt aralığı 0.95-1.0p.u. üst gerilim aralığı 1-1.05p.u. olarak belirlenmiş olup hem endüktif hem de kapasitif karakteristikte çalışabilmektedir. FACTS cihazlarının güç sistemindeki optimum lokasyonları sezgisel yöntemlerin optimizasyon teknikleri kullanılarak, Kuzey, Güney-1 ve Güney-2 baraları olarak belirlenmiştir. Modellenen Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde enerji iletim hatlarından birinin ya da birkaçının devre dışı kalması N-1 durumunda; SVC ve STATCOM kontrolörlerinin güç sisteminde oluşan gerilim çökmelerine karşı sistemin kararlılık sınırlarına etkileri incelenmiş ve sistemde oluşan bozucu etkilerden sonra meydana gelen gerilim osilasyonlarının giderilmesine karşı etkisi değerlendirilmiştir. Modellenen Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sistemi; trafo merkezlerindeki toplam bara sayısı 91 toplam hat sayısı 48 enerji iletim ağında kurulu güç 3769.80 MW, sıcak rezerv 1300.80 MW toplam yük 4974 MW, dengeli yük, pozitif bileşen ve reaktif güç limitleri dikkate alınarak oluşturulmuştur (Ek-1). Şebeke yük analizlerinde belirtilen şebeke topoloji tahmin çalışması kullanılarak, santrallerin gerilim set ayar değerleri, ototrafo kademe pozisyonları ve şönt ekipmanların durumları şebeke kayıplarını minimize edecek şekilde otomatik olarak hesaplanmıştır.

Bir güç sisteminin kritik bara değerleri, işletme limitlerindeki gerilim kararlılığının sınır değerleri olan en yüksek aktif güç, gerilim genliği ve açı değerleridir. Kritik baraların tanımlanması, gerilim kararsızlığını önlemek için FACTS cihazlarının yerini belirlemede yardımcı olmuştur. Modellenen pilot bölgede gerilim sorunu yaşayan kritik baralar için gerilim yüklenme parametresi eğrileri değerlendirilmiştir. Sistemin kritik baralarını besleyen hatların devre dışı kalmaları durumunda, kritik baraya eklenen SVC ve STATCOM 'un kritik baranın yüklenme sınırlarını ne ölçüde artırdığı incelenmiştir. Sürekli hal güç akışı analizi yapılarak, sistemde farklı bozucu etkiler olması durumunda, gerilim kararlılığının değişimi gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1. Güç sistemi şebeke modeline ait güç değerleri

Şebeke Parçası	**Aktif Güç [MW]**	**Reaktif Güç [MVAr]**	**Görünür Güç [MVA]**
Üretim	2469.00	554.98	2530.60
Harici besleme	2533.78	-267.59	2547.87
Şebekeler arası yük akışı	0.00	0.00	0.00
Yük P(U)	4974.00	1184.00	5112.98
Yük P(Un)	4974.00	1184.00	5112.98
Yük P(Un-U)	0.00	0.00	-
Şebeke kayıpları (P)	28.78	-1960.78	-
Şebeke kayıpları (Q)	-	-2601.41	-
Kompanzasyon end.	-	1064.16	-
Kompanzasyon kap.	-	-	-
Kurulu güç	3769.80	-	-
Sıcak rezerv	1300.80	-	-

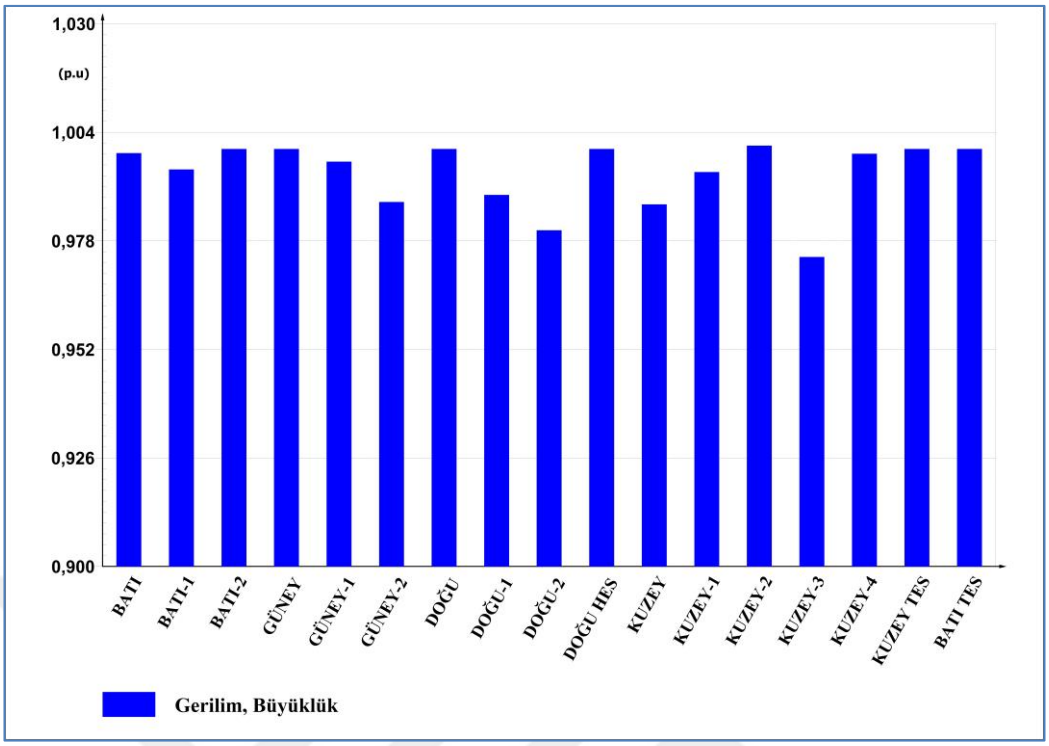
4.1. Seri ve Şönt Elemanlar Kullanarak Gerilim ve Reaktif Güç Regülasyonu

Güç sistemlerinde kararlılık, güç sisteminde ortaya çıkan planlanmamış sistem arızasının niteliğine, boyutuna ve oluşum zamanına (anlık oluşum süresine) göre değerlendirilmekte olup, kalıcı durum kararlılığı ve dinamik kararlılık olarak ikiye ayırabilmektedir. (Kundur vd. 1994). Gerilim kararlılığı ise güç sisteminde meydana gelen sistem arızası sonrasında sistemdeki tüm gerilim seviyelerinin başlangıçtaki gerilim seviyelerine dönebilme eğilimi olarak tanımlanmıştır (Anderson ve Fouad 1977). Gerilim kararlılığı, güç sisteminde yük ile generatörler arasındaki aktif ve reaktif güç dengesini koruyabilme niteliğine bağlıdır. Güç sisteminde mevcut reaktif güç kaynaklarının sistemin reaktif güç gereksinimlerini karşılayamamaları gerilim kararsızlığının temel nedenidir (Hoballah 2011). Gerilim kararsızlığının diğer problemlerinden biri de mevcut enerji iletim hattının işletme limitlerinin üzerinde veya altında çalıştırılması olmuştur. Bunun sebebi ise yeni iletim hatları inşa etmenin ekonomik ve coğrafi konum zorlukları olmuş, bu durumda güç sistemindeki mevcut enerji iletim hatlarından en üst seviyede faydalanmak istenmiştir (Tosun 2011). Güç sistemi tasarımcıları ve kontrolcüleri, sistem gerilim kontrolünde yardımcı olması için kapasitif ve endüktif yük reaktif güç depolama

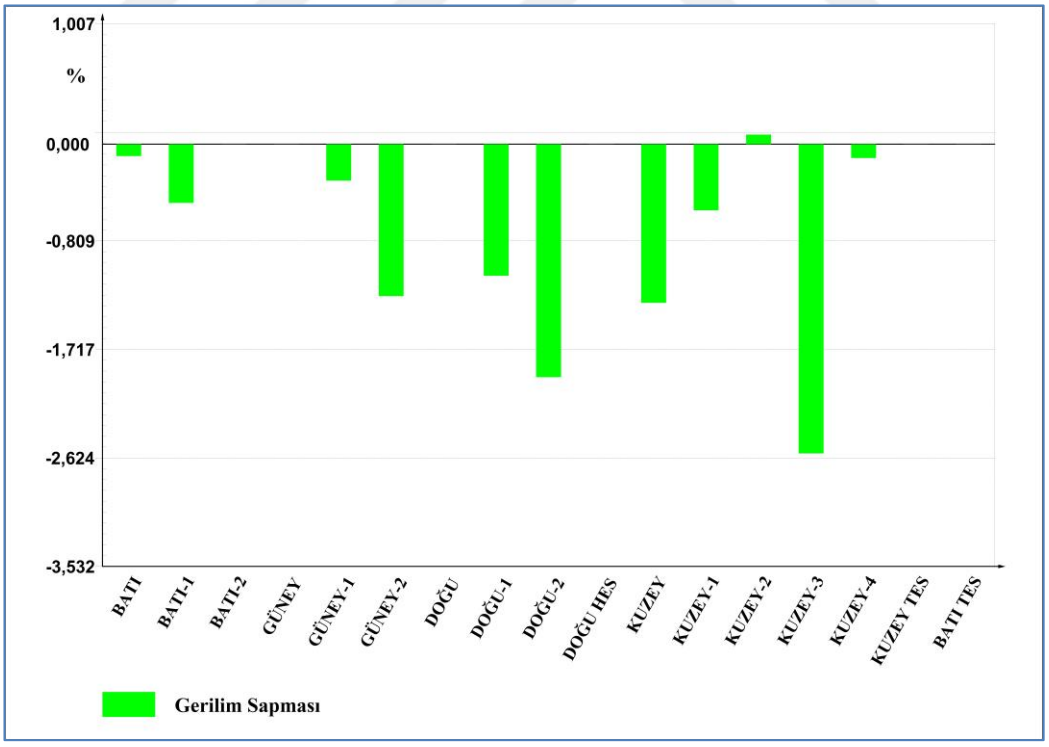
çevrimindeki farklardan yararlanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, sistemdeki yükün çoğu endüktif yüktür. Bir endüktif yük, sistemle reaktif güç alışverişinde bulunduğunda, yükler ile generatör arasında akım akmasına neden olur. Bu akım sisteme akarken gerilim düşümlerine ve güç kayıplarına neden olur. Gerilim düşümlerini ve kayıplarını azaltmanın bir yolu, sistem üzerinden akan reaktif güç miktarını azaltmaktır. Akan reaktif güç miktarını azaltmanın basit bir yolu, endüktif yükün yakınına kapasitörler eklemektir. Kondansatör, generatörün yerini reaktif güç kaynağı olarak alabilir.

Gerilim düşümlerini sınırlamak, aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltmak amacıyla gerilim kararlılığını geliştirmek ve uzak mesafelere reaktif güç taşınamadığı için tüketim bölgelerine yakın yerlerde kompanzasyon yapılması gerekmektedir. Bunu başarmanın en basit ve en ekonomik yolu şönt ekipmanları kompanzasyon cihazlar kullanmaktır. Bir kapasitor veya bir şönt reaktör ya direkt olarak baraya ya da bir transformatörün tersiyer sargısına bağlanabilir. Güç iletim sistemlerinde şönt kompanzasyon uygulamasının birinci amacı, gerilimin kontrolü ve kararlılığının sağlanmasıdır. Şönt kompanzasyon güç sistemlerinde senkron generatörler gibi görev görür. Senkron generatörler aşırı uyarıldıklarında bir reaktif güç kaynağı gibi davranır ve reaktif güç üretirler ve gerilim ve reaktif güç kontrolünde önemli bir rol oynarlar. Ancak, güç sistemi için maliyetleri yüksektir. Değişen yük durumlarında gerilimi işletme limitleri içerisinde tutarak kararlılığı iyileştirirler. Güç sistemlerinde aşırı yüklenme durumunda, sisteme bağlı olan bazı reaktör grupları servis harici olabilir ve güç sisteminde bağlı olan şönt kapasitörler gerilimi arttırarak bir reaktif güç kaynağı olarak davranırlar. Bu da güç sistemlerinde istenmeyen bir durumdur.

Simülasyon çalışması, toplam 24 saniyelik çalışma süresi boyunca 4 saniyelik adımlarla dengeli 3-fazlı sistem gerilimleri ile gerçekleştirilmiştir. Amaç Pilot uygulama bölgesi için enerji iletim sisteminin hat ve baralarının N-1 arıza durumunda, yüklenme aralıklarını detaylı bir şekilde incelemektir. Simülasyon çalışması ilk durumda güç sistemine FACTS cihazlarının bağlı olmadığı, şönt ekipmanların bağlı olduğu durumda gerçekleştirilmiştir. Enerji iletim hatlarının reaktif güç sebebiyle aşırı yüklenmesini ve reaktif güçten kaynaklanan ilave kayıpları önlemek için güç sisteminde oluşan gerilim çökmelerine karşı sistemin kararlılık sınırlarına etkileri incelenmiştir. Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sisteminin modellenerek yük akışı analizi gerçekleştirilmesi sonucunda sistemin gerilim çökmesine uğradığı noktalar tespit edilip bu noktalardaki gerilim etkinliğinin karşılaştırılması yapılmıştır (Şekil 4.1). Optimizasyon öncesi güç akışı sonucu elde edilen bara gerilimleri gösterilmiş ve birçok baralardaki gerilimin birim değerin 1p.u. altında, kaldığı bazı bara gerilim değerlerinin ise kabul edilebilir seviyelerde oldukları görülmektedir. Enerji iletim şebekelerinde şönt ve seri elemanlar olan seri kapasitor veya şönt reaktörler, gerilimi nominal değere yakın tutmak, hat akımını azaltarak şebeke kayıplarını azaltmak ve böylece kararlılığa katkıda bulunarak endüktif yükü dengelerler. Güç akışı analizleri sonucunda şebekede mevcut olan şönt kompanzasyonun, gerilim kararlılığı açısından etkileri incelenmiş olup, güç sisteminin gerilim karakteristiği bakımından en zayıf baralarının Kuzey, Kuzey-3 ve Doğu-2 baraları olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Güç sistemindeki bara voltajlarının karşılaştırılması



Şekil 4.2. Güç sisteminde gerilim çökmesine uğrayan baraların birim voltaj değerleri

Çizelge 4.2. Optimizasyon çalışması öncesi şönt ekipmanların yüklenmeleri

Bara İsmi	Tip	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVAr]	Akım [kA]	Akım [p.u.]
BATI-1 RK	REAKTÖR	0.000	87.766	0.127	0.948
DOĞU-2 Shnt RK	REAKTÖR	0.000	159.554	0.235	0.934
GÜNEY-1 Shnt RK	REAKTÖR	0.000	164.940	0.239	0.949
KUZEY Shnt RK1	REAKTÖR	0.000	129.802	0.190	0.940
KUZEY Shnt RK2	REAKTÖR	0.000	107.739	0.158	0.940
KUZEY Shnt RK3	REAKTÖR	0.000	52.968	0.077	0.940
KUZEY TES Shnt RK	REAKTÖR	0.000	108.844	0.157	0.952
KUZEY-1 Shnt RK	REAKTÖR	0.000	164.117	0.238	0.947
KUZEY-4 Shnt RK	REAKTÖR	0.000	88.434	0.128	0.951

Çizelge 4.3. Optimizasyon çalışması öncesi generatör yüklenmeleri

Genaratör İsmi	Tip	Yüklenme [%]	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVAr]	Güç Faktörü	Akım [p.u.]
BATI TESY-GR-1	GENERATÖR	66.82	164.000	18.611	0.99	0.635
BATI TESY-GR-2	GENERATÖR	66.82	164.000	18.611	0.99	0.635
BATI TESY-GR-3	GENERATÖR	0.00	0.000	0.000	1.00	0.000
BATI-2 BTR-1	GENERATÖR	63.77	191.000	-48.412	0.97	0.606
BATI-2 GT-1	GENERATÖR	58.23	178.000	-48.907	0.96	0.553
BATI-2 GT-2	GENERATÖR	54.27	-44.000	166.300	-0.26	0.515
DOĞU GR-1	GENERATÖR	67.84	110.000	-27.115	0.97	0.645
DOĞU GR-2	GENERATÖR	66.96	110.000	-20.115	0.98	0.636
DOĞU HES GR-1	GENERATÖR	83.82	115.000	50.836	0.91	0.796
DOĞU HESGR-2	GENERATÖR	83.82	115.000	50.836	0.91	0.796
DOĞU HESGR-3	GENERATÖR	82.53	115.000	45.836	0.93	0.784
DOĞU HESGR-4	GENERATÖR	82.53	115.000	45.836	0.93	0.784
GÜNEY BTR	GENERATÖR	79.77	241.000	81.728	0.95	0.758
GÜNEY GT-1	GENERATÖR	67.19	196.000	70.522	0.94	0.638
GÜNEY GT-2	GENERATÖR	69.00	199.000	78.402	0.93	0.655
KUZEY TESGR-1	GENERATÖR	70.16	125.000	18.002	0.99	0.666
KUZEY TESGR-2	GENERATÖR	70.16	125.000	18.002	0.99	0.666
KUZEY TESGR-3	GENERATÖR	67.18	125.000	18.002	0.99	0.638
KUZEY TESGR-4	GENERATÖR	67.18	125.000	18.002	0.99	0.638

Çizelge 4.4. Optimizasyon çalışması öncesi enerji iletim hattı yüklenmeleri

Enerji İletim Hattı	Yüklenme [%]	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVAr]	Güç Faktörü	Akım [p.u.]
SANAL HAT - DOĞU	16.09	-271.392	56.418	-0.98	0.160
BATI TES - GÜNEY-1	23.2	329.207	-41.170	0.99	0.232
BATI TES - Harici Şebeke(1)	7.53	154.726	-27.505	0.98	0.175
BATI-2 - KUZEY-1	4.87	11.241	-83.034	0.13	0.049
BATI-BATI TES HAT1	5.45	20.286	-47.732	0.39	0.055
BATI-BATI TES HAT2	4.35	24.613	-57.112	0.40	0.044
BATI-BATI-1 HAT	3.26	-9.383	28.855	-0.31	0.032
BATI-BATI-1 HAT_a	6.24	-9.384	-58.335	-0.16	0.062
BATI-Harici Şebeke(1) HAT	12.47	201.921	1.833	1.00	0.124
BATI-Harici Şebeke(2) HAT	27.92	453.600	22.101	1.00	0.279
DOĞU - DOĞU-2 HAT	8.32	-51.447	13.344	-0.97	0.031
DOĞU - DOĞU-2 HAT	3.47	-51.585	-28.372	-0.88	0.035
DOĞU HES - SANAL	16.03	-270.377	-27.844	-0.99	0.157
DOĞU-1 - DOĞU HES	19.02	-313.564	-86.210	-0.96	0.190
DOĞU-1 - GÜNEY-2	4.63	-58.461	-53.216	-0.74	0.046
DOĞU-2 Harici Şebeke(1)	23.78	363.573	63.321	0.99	0.227
GÜNEY- BATI-2 HAT1	11.32	-175.072	85.141	-0.90	0.113
GÜNEY- BATI-2 HAT1_a	11.15	-175.075	-79.148	-0.91	0.112
GÜNEY- BATI-2 HAT2	12.18	-160.976	-65.020	-0.93	0.122
GÜNEY- DOĞU-1 HAT	42.22	581.899	139.469	0.97	0.418
GÜNEY- GÜNEY-1 HAT	19.62	268.924	-77.152	0.96	0.196
GÜNEY- GÜNEY-2 HAT	29.27	-396.368	-117.175	-0.96	0.293
KUZEY - KUZEY-1 HAT	34.47	-324.726	-13.913	-1.00	0.343
KUZEY - KUZEY-3 HAT	9.88	-19.758	90.101	-0.21	0.098
KUZEY - KUZEY-3_a HAT	10.05	-19.759	37.682	-0.46	0.045
KUZEY TES - BATI -1	8.06	57.818	-21.999	0.93	0.065
KUZEYTES Harici Şebeke(1)	.35	-22.987	-14.391	-0.85	0.031
KUZEYTES Harici Şebeke(2)	.40	-30.072	-9.771	-0.95	0.032
KUZEY-1 KUZEY-2 HAT_a	10.75	-164.150	84.065	-0.89	0.107
KUZEY-1 KUZEY-2 HAT_b	10.61	-164.154	-79.399	-0.90	0.106
KUZEY-3 ŞEBEKE1 HAT	25.95	329.607	-13.902	1.00	0.245
KUZEY-4 ŞEBEKE1 HAT	13.72	183.897	-3.686	1.00	0.137
KUZEY-4 ŞEBEKE2 HAT	9.79	85.776	-15.175	0.98	0.097
KUZEY-4 ŞEBEKE3 HAT	8.27	132.443	-8.957	1.00	0.082
KUZEY-DOĞU HES HAT	14.42	-78.710	61.766	-0.79	0.106
KUZEY-GÜNEY HAT	9.42	76.169	-108.952	0.57	0.094
KUZEY-KUZEY-1 HAT	17.62	157.151	-44.015	0.96	0.172

Çizelge 4.5. Optimizasyon çalışması öncesi trafo yüklenmeleri

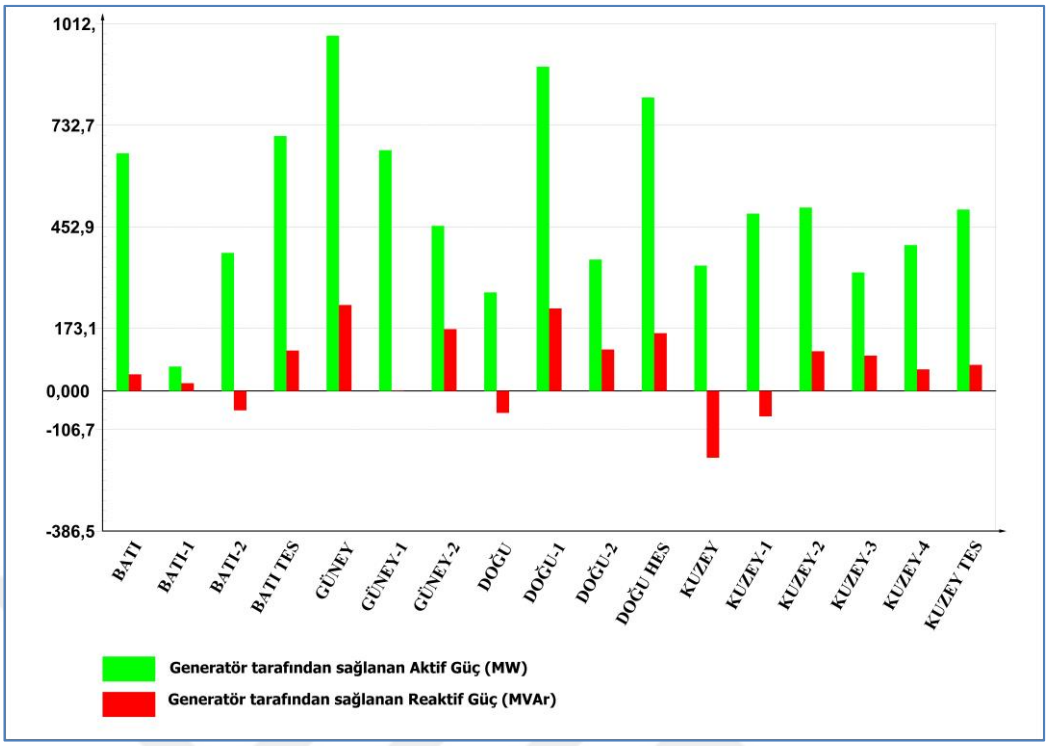
Bara ismi / Trafo Tip	Yüklenme [%]	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [Mvar]	Güç Faktörü	Akım [p.u.]
BATI OTR-1	61.12	153.499	47.530	0.96	0.611
BATI OTR-2	58.52	146.944	45.606	0.96	0.585
BATI OTR-3	59.39	149.143	46.187	0.96	0.594
BATI OTR-4	60.24	151.300	46.819	0.96	0.602
BATI TES-GR-1-TR1	61.97	-164.000	-18.485	-0.99	0.620
BATI TES-GR-2-TR2	61.97	-164.000	-18.485	-0.99	0.620
BATI TES-GR-3-TR3	0.00	0.000	0.000	1.00	0.000
BATI TES-OTR-1	50.61	123.184	50.665	0.92	0.506
BATI TES-OTR-2	51.35	125.187	50.859	0.93	0.513
BATI TES-OTR-3	51.35	125.187	50.859	0.93	0.513
BATI-1 OTR-1	26.86	67.117	21.083	0.95	0.269
BATI-2 BT-TR3	58.51	-191.000	48.578	-0.97	0.585
BATI-2 GT-1-TR1	54.81	-178.000	49.053	-0.96	0.548
BATI-2 GT-2-TR2	51.03	44.000	-166.173	0.26	0.510
DOĞU HES OTR-1	63.40	161.924	40.216	0.97	0.634
DOĞU HES OTR-2	63.83	165.241	30.108	0.98	0.638
DOĞU HES OTR-3	65.60	167.562	41.526	0.97	0.656
DOĞU HES TR1	79.60	-230.000	-101.442	-0.91	0.796
DOĞU HES TR2	78.38	-230.000	-91.449	-0.93	0.784
DOĞU TR1	64.08	-110.000	27.204	-0.97	0.641
DOĞU TR2	63.24	-110.000	20.202	-0.98	0.632
DOĞU-1 OTR-1	71.86	182.127	42.481	0.97	0.719
DOĞU-1 OTR-2	71.97	182.429	42.547	0.97	0.720
DOĞU-1 OTR-3	72.17	182.967	42.442	0.97	0.722
DOĞU-1 OTR-4	71.63	181.590	42.144	0.97	0.716
DOĞU-1 TR-5	42.33	54.130	10.190	0.98	0.423
DOĞU-1 TR-6	40.63	52.127	8.870	0.99	0.406
DOĞU-2 OTR-1	42.08	96.968	48.827	0.89	0.421
DOĞU-2 OTR-2	35.84	55.273	-4.754	1.00	0.358
DOĞU-2 OTR-3	32.28	80.414	21.710	0.97	0.323
DOĞU-2 OTR-4	31.25	77.835	21.060	0.97	0.312
GÜNEY BT TR	75.76	-241.000	-81.432	-0.95	0.758
GÜNEY TR1	63.81	-196.000	-70.317	-0.94	0.638
GÜNEY TR2	65.52	-199.000	-78.186	-0.93	0.655
GÜNEY-1 OTR-1	52.92	135.699	29.340	0.98	0.529
GÜNEY-1 OTR-2	52.52	134.685	29.136	0.98	0.525
GÜNEY-1 TR-A	46.23	60.141	7.839	0.99	0.462
GÜNEY-1 TR-B	49.68	64.149	11.478	0.98	0.497
GÜNEY-2-OTR-1	86.56	209.362	82.112	0.93	0.866
GÜNEY-2-OTR-2	86.53	209.362	81.911	0.93	0.865
GÜNEY-2-TR-1	28.22	36.106	6.368	0.98	0.282

Çizelge 4.5' in devamı

KUZEY TES GR-TR1	66.65	-125.000	-17.905	-0.99	0.666
KUZEY TES GR-TR2	66.65	-125.000	-17.904	-0.99	0.666
KUZEY TES GR-TR3	66.65	-125.000	-17.898	-0.99	0.666
KUZEY TES GR-TR4	66.65	-125.000	-17.900	-0.99	0.666
KUZEY TES OTR	49.03	62.117	46.194	0.80	0.490
KUZEY-1 OTR-1	43.03	65.785	15.444	0.97	0.430
KUZEY-1 OTR-2	39.06	99.464	23.637	0.97	0.391
KUZEY-1 OTR-3	39.13	61.053	6.917	0.99	0.391
KUZEY-1 OTR-4	36.23	94.182	10.901	0.99	0.362
KUZEY-2 OTR-1	42.88	101.997	48.502	0.90	0.429
KUZEY-2 OTR-2	47.78	68.275	32.223	0.90	0.478
KUZEY-2 OTR-3	48.49	67.585	36.109	0.88	0.485
KUZEY-2 OTR-4	44.27	102.692	55.207	0.88	0.443
KUZEY-3 OTR-1	36.01	75.048	53.756	0.81	0.360
KUZEY-3 OTR-2	37.52	78.221	55.952	0.81	0.375
KUZEY-3 OTR-3	33.67	76.855	39.279	0.89	0.337
KUZEY-3 OTR-4	33.47	76.399	39.055	0.89	0.335
KUZEY-4 OTR-1	25.43	64.442	17.725	0.96	0.254
KUZEY-4 OTR-2	25.96	65.788	18.068	0.96	0.260
KUZEY-4 OTR-3	19.71	50.381	12.099	0.97	0.197
KUZEY-4 OTR-4	19.50	49.830	11.979	0.97	0.195

Güç sistemlerinde reaktif güç eksikliğine neden olabilecek birçok neden vardır. Bir güç sistemi düşük gerilim sorunları olmaksızın, belirli bir süre aşırı yüklenme periyotları boyunca çalışabilir. Aynı sistem, yoğun yük akışının olduğu zaman dilimleri boyunca önemli bir reaktif güç desteği yoksa (şönt kapasitor, şönt reaktör vs.), gerilim düşümleri ile karşılaşabilir. Sistem gerilimlerinin işletme limit aralığı, doğrudan reaktif gücün kullanılabilirliği ile ilgilidir. Reaktif güç veya reaktif rezervlerin miktarı arttıkça, sistem gerilimlerini işletme limitleri aralığında tutması da o kadar mümkün olacaktır. İşletme gerilim limitleri, doğrudan reaktif güç durumuna bağlıdır. Reaktif güç gerekli olduğu alanlarda yeterli reaktif güç kaynakları mevcutsa, sistem gerilimleri kontrol edilebilir. Reaktif güç eksikliği varsa, gerilim seviyeleri düşer ve eğer reaktif güç fazlalığı varsa, gerilim seviyeleri yükselecektir.

Gerçekleştirilen yük akışı analizinde, her generatörün reaktif güç destek kabiliyeti, her ünitenin işletme limitleri reaktif yeteneği eğrisi tarafından tanımlanmıştır. Güç sisteminde bağlı olan her bir generatörün reaktif yüklenmeleri gösterilmiştir (Şekil 4.3). Bu grafikde, kabul edilebilir generatör işletme sınırlarını göstermektedir. Pozitif dikey eksen, generatör tarafından üretilen aktif güç (MW) ve reaktif gücü (MVAr), negatif dikey eksen ise generatör tarafından tüketilen aktif güç (MW) ve reaktif gücü (MVAr) göstermektedir.



Şekil 4.3. Generatörler tarafından sağlanan Aktif ve Reaktif güç değerleri

Gerilim düşümünün temel nedenlerinden biri de güç sisteminde yükün aktif ve reaktif güç ihtiyacının aşırı artması sonucu iletim hatlarında ve generatörlerde meydana gelen kayıplar olacaktır. Güç sistemlerinde meydana gelen kayıplar temel olarak üretim, iletim ve dağıtım kayıpları olmak üzere üç temel kategoride incelenebilir. Elektriksel kayıpların çoğunluğu iletim ve dağıtım sistemlerinde meydana gelmektedir. Üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %8'i iç kayıp ve iç tüketimden kaynaklanmaktadır (Yaşar vd. 2010). Bu nedenle elektriksel kayıpların azaltılması elektrik enerji sistemlerinin verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir. Güç sistemlerinde meydana gelen teknik kayıpların nedenleri harmonik distorsiyon, tüketici yüklerinin yanlış topraklanması, aşırı yüklenmiş ve uzun enerji iletim hatları, gerilim düşümleri ve standart olmayan ekipmanların kullanılması, şebekeden çekilen reaktif güç olarak sınıflandırılabilir (Navani vd. 2012). Kayıpların artmasıyla güç sisteminde enerji iletim hatları kapasitesinin üzerinde çalıştırılmaya maruz kalınır ve aktif ve reaktif güç kaynakları azalır. İletim hattının limitlerinin üzerinde çalıştırılması diğer hatlardaki reaktif güç kaybını artıracaktır. Böylece güç sisteminde reaktif güç ihtiyacı artmış olacaktır. Yükün artışına bağlı olarak yük baralarında önemli derecede gerilim düşümü görülecektir. Enerji iletim hattında meydana gelen gerilim düşümü, güç sistemindeki şönt ekipmanlar ve genaratörler yardımı ile gerilimler eski haline getirilerek işletme limitleri dahilinde tutulmaya çalışılır. Bu işlemler sonucunda ise hattaki aktif ve reaktif güç kayıpları artacaktır. Bunun sonucunda enerji iletim hattındaki gerilim düşümleri daha büyük olacaktır. Güç kayıplarını en aza indirgemek için güç sistemindeki akımı en aza indirmek ve gerilimi maksimize etmek gerekir. Akım ne kadar düşükse ve gerilim ne kadar yüksekse, kayıpları da o kadar düşük olacaktır. Kayıpları azaltmanın ek bir yöntemi, hat empedansını en aza indirgemektir. Aktif güç kayıpları hattın direncine bağlı iken reaktif güç kayıpları hattın endüktif reaktansına bağlıdır (Çizelge 4.6).

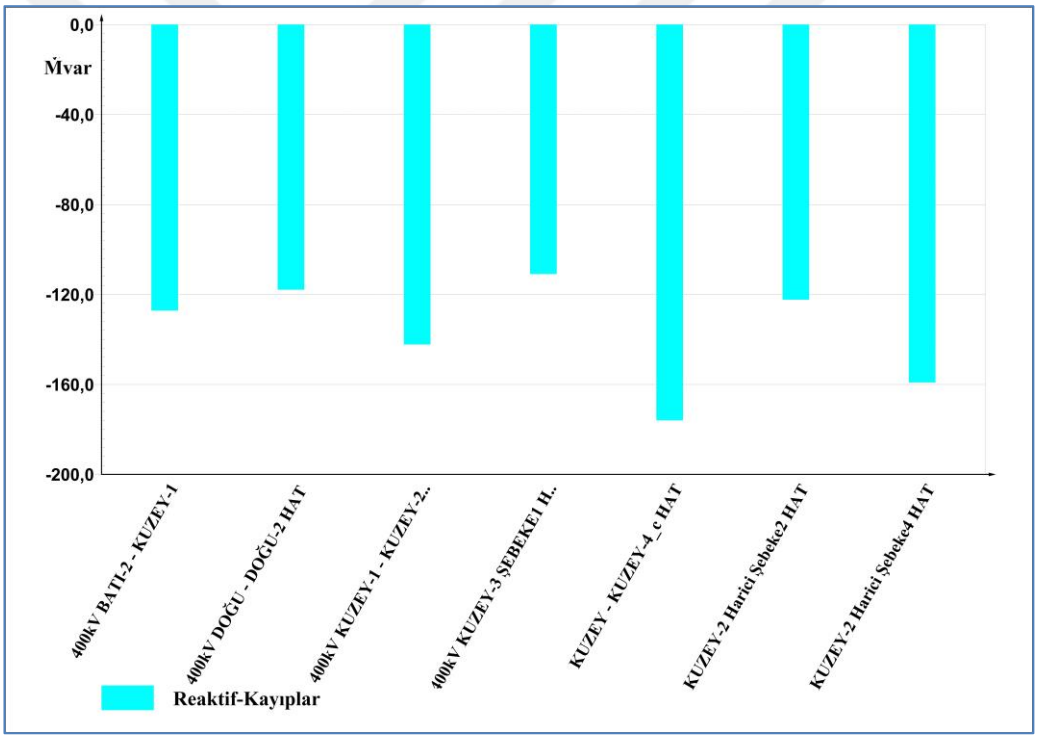
Güç sistem gerilimi ne kadar yüksek olursa, belirli bir güç dağıtımı için akım akışı da düşecektir. Enerji iletiminde akımlar azaltılabilirse hem aktif hem de reaktif kayıplar, akım düşümünün karesi nispetinde azaltılabilir.

Çizelge 4.6. Modellenen güç sisteminde meydana gelen Aktif/Reaktif güç kayıpları

Enerji İletim Hattı	**Kapasitif Yüklenme [MVAr]**	**Aktif Kayıp [MW]**	**Reaktif Kayıp [MVAr]**
400kV SANAL HAT - DOĞU	5.239566	0.055126	-4.3316
400kV BATI TES - GÜNEY-1	83.3122	1.656838	-61.9336
400kV BATI TES Harici Şebeke(1) HAT	27.62498	0.219612	-25.3363
400kV BATI-2 - KUZEY-1	127.2809	0.009127	-127.131
400kV BATI-BATI TES HAT1	85.00977	0.012348	-84.8812
400kV BATI-BATI TES HAT2	102.5027	0.012051	-102.347
400kV BATI-BATI-1 HAT	0.5786838	0.000181	-0.57681
400kV BATI-BATI-1 HAT_a	94.291	0.006822	-94.2203
400kV BATI-Harici Şebeke(1) HAT	19.23069	0.107552	-17.4592
400kV BATI-Harici Şebeke(2) HAT	7.999612	0.23842	-4.01983
400kV DOĞU - DOĞU-2 HAT	120.0998	0.13733	-117.838
400kV DOĞU - DOĞU-2 HAT_a	1.128488	0.000573	-1.11905
400kV DOĞU HES - SANAL HAT	100.9777	1.014877	-84.2621
400kV DOĞU-1 - DOĞU HES HAT	52.38043	0.796228	-39.0895
400kV DOĞU-1 - GÜNEY-2 HAT	14.79392	0.011716	-14.6009
400kV DOĞU-2 Harici Şebeke(1) HAT	75.44651	1.497918	-50.7749
400kV GÜNEY- BATI-2 HAT1	0.7117854	0.003736	-0.65025
400kV GÜNEY- BATI-2 HAT1_a	17.04216	0.083764	-15.6625
400kV GÜNEY- BATI-2 HAT2	17.14941	0.096744	-15.8675
400kV GÜNEY- DOĞU-1 HAT	23.06273	1.618887	-1.61198
400kV GÜNEY- GÜNEY-1 HAT	108.217	1.457075	-89.416
400kV GÜNEY- GÜNEY-2 HAT	35.63314	1.187799	-19.8944
400kV KUZEY - KUZEY-1 HAT	64.36818	2.26657	-40.8882
400kV KUZEY - KUZEY-3 HAT	0.5657613	0.001684	-0.54822
400kV KUZEY - KUZEY-3_a HAT	54.26908	0.088623	-53.3455
400kV KUZEY TES - BATI -1	72.81936	0.085196	-71.9368
400kV KUZEY TES Harici Şebeke(1)	33.30204	0.00589	-33.2413
400kV KUZEY TES Harici Şebeke(2)	25.45605	0.007706	-25.3766
400kV KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_a	0.7082354	0.00337	-0.65272
400kV KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_b	151.5937	0.567427	-142.248
400kV KUZEY-3 ŞEBEKE1 HAT	152.6708	3.236043	-110.915
400kV KUZEY-4 ŞEBEKE1 HAT	23.04968	0.14317	-21.2023
400kV KUZEY-4 ŞEBEKE2 HAT	34.39073	0.08299	-33.531

Çizelge 4.6' nın devamı

400kV KUZEY-4 ŞEBEKE3 HAT	33.62326	0.080941	-32.2901
400kV KUZEY-DOĞU HES HAT	48.94687	0.225112	-46.6262
400kV KUZEY-GÜNEY HAT	105.8506	0.181984	-103.502
400kV KUZEY-KUZEY-1 HAT	107.7768	0.9019	-98.4337
400kV KUZEY-KUZEY-1 HAT_a	0.283712	0.002985	-0.25294
400kVCBATI TES Harici Şebeke(2)	24.33662	0.249286	-21.7387
KUZEY - KUZEY-4 HAT	0.5674556	0.005768	-0.50799
KUZEY - KUZEY-4_a HAT	0.5814603	0.005688	-0.52283
KUZEY - KUZEY-4_b HAT	0.5675737	0.007233	-0.49301
KUZEY - KUZEY-4_c HAT	195.9695	1.946891	-175.899
KUZEY - KUZEY-4_d HAT	0.5678173	0.007369	-0.49185



Şekil 4.4. Modellenen güç sistemindeki kritik iletim hatlarında meydana gelen reaktif güç kayıpları

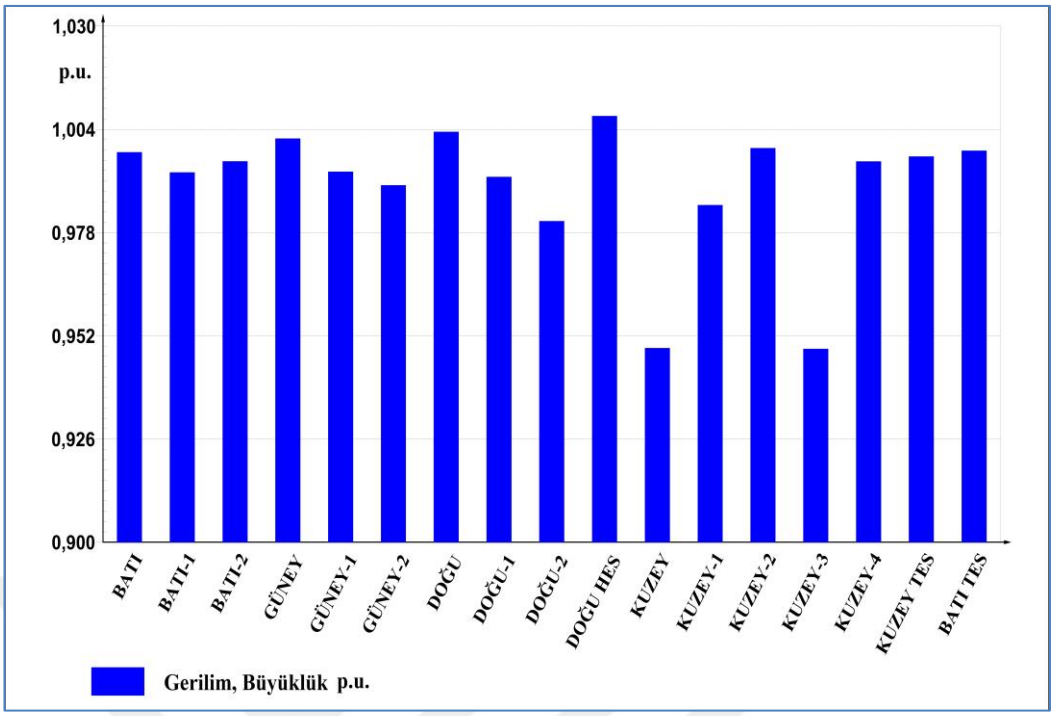
Enerji iletim sisteminde gerilim sorunu yaşayan en kritik baralar için gerilim-yüklenme parametresi eğrileri değerlendirilmiştir. Sistemin aşırı yüklenmesi durumunda gerilim kararlılığında meydana gelen değişimler incelenmiş, enerji iletim hatlarının kararlılık değerleri ve yük baralarına ait gerilim kararlılık limit değerleri hesaplanmıştır. Şönt ekipmanların reaktör ve kapasitör bankların, sistemin gerilim düşümlerine karşı kararlılık limitleri üzerindeki etkisi ve gerilim salınımlarının ortadan kaldırılması değerlendirilmiştir. Kapasitör bankalarından desteklenen reaktif güç şebekesine optimum

reaktif güç üretecek şekilde ayarlanmıştır. Reaktör ve kapasitör bankların, sistemdeki bozucu etkisinden sonra sistemin tüm baralarında gerilimi sabit bir seviyede tutabilme yeteneği oldukça yetersiz olduğu ve reaktif güç kompanzasyonu yapılarak sistemin kararlı hale getirilemediği görülmüştür (Şekil 4.4). Reaktif güç desteği analizleri ile şebeke gerilim profilinin iyileştirilmesi ve şebeke kayıplarının azaltılması ve gerilimde meydana gelen dalgalanmanın sönümlenerek sistemin kararlı hale geçeceği düşünülmektedir.

4.1.1. Hat arızası durumunda gerilim ve reaktif güç analizi

Enerji iletimi kontrolü ve işletilmesinde teçhizatı doğru ve optimum şekilde seçilmezse, güç sisteminin sürekli ve geçici durum problemlerine karşı kararlılığı bozulacaktır ve kararlılık sınırları da değişecektir. Güç sistemlerinde planlanmamış bir iletim hattının veya birkaçının servis harici olması (arıza durumu), enterkonnekte güç sisteminde paralel enerji iletim hatlarında aşırı yük artışına neden olur ve bu da gerilim düşümüne neden olacaktır. Bunun nedeni artan aktif güç ve reaktif güç kayıplarından kaynaklanmaktadır. Reaktif güç kayıplarındaki artış genellikle Aktif güç kayıplarındaki artıştan daha belirgin olacaktır.

Simülasyon çalışması, toplam 24 saniyelik çalışma süresi boyunca 4 saniyelik adımlarla dengeli 3-fazlı sistem gerilimleri ile gerçekleştirilmiştir. Kuzey- Güney ve Kuzey – Doğu Hes arasındaki hatlarda meydana gelecek arızadan dolayı devre dışı kalmış bir enerji iletim hattının aktif güç ve reaktif güç kayıplarında, gerilim düşümlerinde ve hat yüklenmelerinde nasıl büyük bir artışa neden olduğu Ek-2 ile gösterilmektedir. Güç sisteminde komşu olan baralardaki yük akışı değişimi incelenmiş, ayrıca bu sistemdeki gerilim işletme limitlerini korumak için generatör yüklenmeleri de gösterilmiştir. Güç sisteminde aynı zamanda servis harici olan enerji iletim hatlarının bağlı olduğu Kuzey barasına, komşu baralardan 254 MW, 171 MVAr civarı yük değişimi olduğu ve paralel hatlarda %-63.5 | %-53.4 yük değişimleri olduğu görülmektedir. Sisteme paralel olarak bağlı kalan hatlar çok yüklendiği, aktif ve reaktif güç kayıpları arttığı görülmüştür. Dolayısıyla güç sisteminde yük düşüşü, hat arızasını takiben yeniden ayarlanmalıdır. Doğu Hes Generatör yüklenmeleri %86.53' tür. Simülasyon süresince 5. Saniyede Kuzey – Doğu Hes arasındaki hatlarda 3 faz kısa devre meydana gelmiş ve karşılıklı olarak Kuzey baraya ait hücre 11 nolu kesici ve Doğu Hes barasına ait hücre 2 nolu kesiciler açma eylemi gerçekleştirmiştir. Arızadan dolayı hatların devre dışı kalma durumları için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş, arıza durumunda da enerji iletim sistemi şebeke modelinin tüm baralara ait gerilim değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.5). Güç sisteminde diğer baralara bağlı olan paralel hatlardaki yüklenmeleri de incelenmiştir (Çizelge 4.7).



Şekil 4.5. Arıza sonrası baralara ait gerilim değerleri

Çizelge 4.7. Arıza sonrası enerji iletim hattı Aktif/Reaktif güç ve yüklenme değerleri

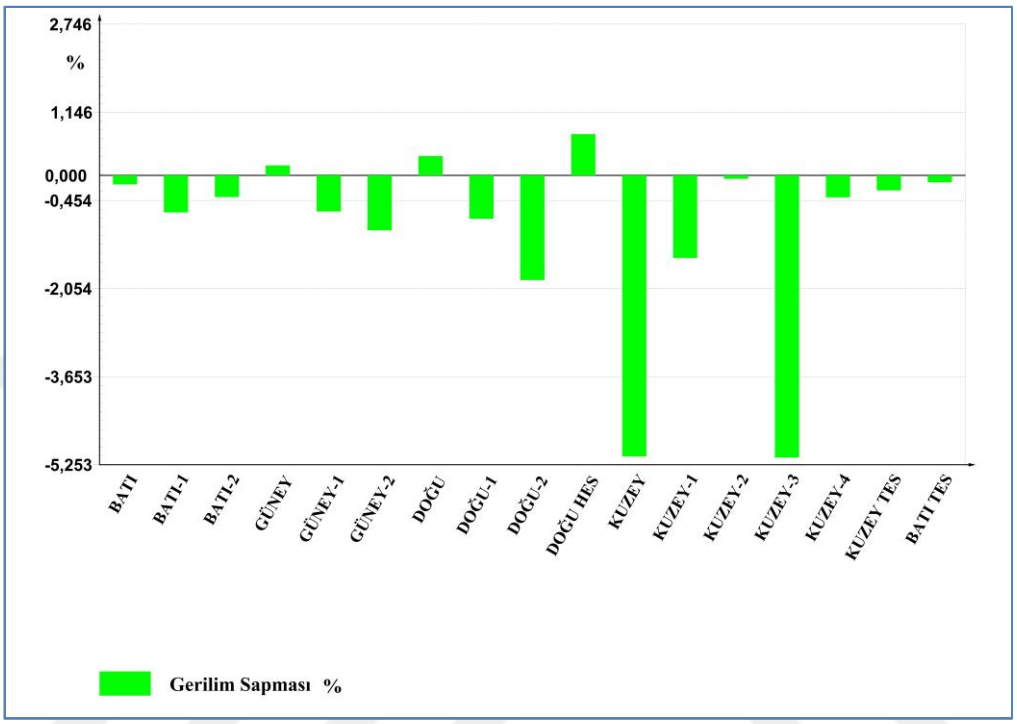
Enerji İletim Hattı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVAr]	Kapasitif Yüklenme [MVAr]	Yüklenme [%]
400kV SANAL HAT - DOĞU	-329.872	73.3121	5.277149	19.53677
400kV BATI TES - GÜNEY-1	380.7828	-29.9386	82.91675	26.74061
400kV BATI TES Harici Şebeke(1)	170.1485	-22.9857	27.57165	19.16456
400kV BATI-2 - KUZEY-1	71.1646	-103.435	125.5842	7.374052
400kV BATI-BATI TES HAT1	29.00049	-46.3749	84.85082	5.755586
400kV BATI-BATI TES HAT2	35.10751	-55.2794	102.311	4.58635
400kV BATI-BATI-1 HAT	-4.57339	24.65723	0.5765908	2.712411
400kV BATI-BATI-1 HAT_a	-4.57351	-62.2168	94.0617	6.598621
400kV BATI-Harici Şebeke(1) HAT	208.3494	5.300879	19.20958	12.88694
400kV BATI-Harici Şebeke(2) HAT	460.8282	25.9985	7.990172	28.3967
400kV DOĞU - DOĞU-2 HAT	-109.953	29.08147	120.5899	10.70286
400kV DOĞU - DOĞU-2 HAT_a	-110.29	-15.6068	1.129612	6.569543
400kV DOĞU HES - SANAL HAT	-328.377	-4.17615	102.1059	19.46911
400kV DOĞU-1 - DOĞU HES	-285.512	-123.397	52.94254	18.13728
400kV DOĞU-1 - GÜNEY-2 HAT	-49.1155	-65.1447	14.88206	4.767482
400kV DOĞU-2 Harici Şebeke(1)	423.0649	58.62375	75.45022	27.1205
400kV GÜNEY- BATI-2 HAT1	-206.37	96.53611	0.7067685	13.28535

Çizelge 4.7.'nin devamı

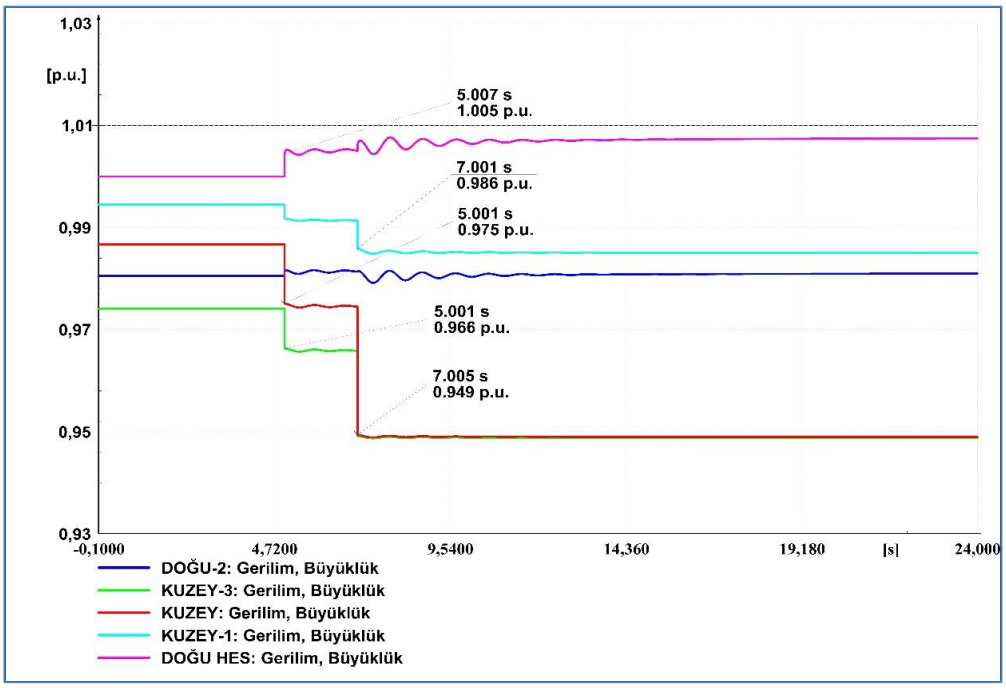
400kV GÜNEY- BATI-2 HAT1_a	-206.375	-66.6164	16.91533	12.63062
400kV GÜNEY- BATI-2 HAT2	-189.432	-53.1569	17.02206	13.84791
400kV GÜNEY- DOĞU-1 HAT	605.9974	116.447	23.17725	43.3782
400kV GÜNEY- GÜNEY-1 HAT	382.462	-96.3478	108.0341	27.76003
400kV GÜNEY- GÜNEY-2 HAT	-408.248	-106.196	35.79645	29.79234
400kV KUZEY - KUZEY-1 HAT	-308.63	-46.1025	63.58844	33.28213
400kV KUZEY - KUZEY-3 HAT	19.72637	21.93987	0.5233606	3.309612
400kV KUZEY - KUZEY-3_a HAT	19.72618	-26.5431	50.8364	3.661328
400kV KUZEY TES - BATI -1	62.39649	-25.8277	72.4906	8.169807
400kV KUZEY TES Harici Şebeke(1) HAT	-28.6945	-1.70757	33.16801	4.801264
400kV KUZEY TES Harici Şebeke(2) HAT	-36.3869	4.608035	25.349	4.736122
400kV KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_a	-151.936	58.08746	0.6948733	9.568273
400kV KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_b	-151.939	-102.289	149.9645	10.75858
400kV KUZEY-3 ŞEBEKE1 HAT	273.6196	39.19551	148.0669	24.39993
400kV KUZEY-4 ŞEBEKE1 HAT	165.1253	15.31452	22.94271	12.59956
400kV KUZEY-4 ŞEBEKE2 HAT	71.4701	-1.3662	34.24822	8.774845
400kV KUZEY-4 ŞEBEKE3 HAT	115.3224	7.700119	33.47483	7.52619
400kV KUZEY-DOĞU HES HAT	0	0	0	0
400kV KUZEY-GÜNEY HAT	0	0	0	0
400kV KUZEY-KUZEY-1 HAT	74.97648	35.62762	102.7451	16.89219
400kV KUZEY-KUZEY-1 HAT_a	74.47511	13.09997	0.2624378	8.003687
400kVCBATI TES Harici Şebeke(2)	191.7674	-22.9507	24.28867	21.55875
KUZEY - KUZEY-4 HAT	-121.263	-39.2819	0.5249228	14.25322
KUZEY - KUZEY-4_a HAT	-122.523	-50.1069	0.5781444	14.10421
KUZEY - KUZEY-4_b HAT	-121.266	-138.468	0.5251559	20.57942
KUZEY - KUZEY-4_c HAT	-121.281	-137.567	188.1901	20.4912
KUZEY - KUZEY-4_d HAT	-122.429	-139.623	0.5255057	20.75535
KUZEY-2 Harici Şebeke1 HAT	303.9348	-35.4513	18.17584	18.81452
KUZEY-2 Harici Şebeke2 HAT	43.49217	-62.9737	122.6751	4.702835
KUZEY-2 Harici Şebeke3 HAT	111.6617	-31.2153	48.67285	7.126637
KUZEY-2 Harici Şebeke4 HAT	33.33977	-80.7135	159.2752	5.365836

Enerji iletim hatlarında gerilim osilasyonları yaşandığında, hatların termal kapasitesi aşılabilir ve gerilim osilasyonlarına eşlik edebilen yüksek akımlara bağlı olarak, hattın reaktif yüklenme kapasitesinde herhangi bir iyileştirme yapılmazsa enerji iletim hatlarında termal hasar oluşabilir. Sistem kararlılığı perspektifinden bakıldığında, sistem gerilimleri ne kadar düşük olursa, güç sistem istikrarsızlık riski o kadar yüksek olacaktır. Güç sistemine şönt ekipmanları yerleştirildiğinde, reaktif güce katkıları incelenmiş ve güç sisteminde baraların ve hatların arızalanması durumunda sistemin yükleme sınırlarını ne ölçüde artırdığı incelenmiştir. Amaç Pilot uygulama bölgesi olan Batı Akdeniz bölgesi enerji iletim sisteminin hat ve baralarının N-1 arıza durumunda yüklenme aralıklarını detaylı bir şekilde incelemektir. Arıza durumunda yük akışı çalışması yapılmış ve en kritik bara olarak Kuzey ve Kuzey-3 baraları olduğu

görülmüştür. Sistemde farklı hata ve arıza olması durumunda, gerilimde meydana gelen dalgalanmanın sönümlenerek sistemin kararlı hale geçtiği gözlemlenmiştir. Kuzey barasında %-5.2 gerilim sapması ile 0.94p.u. gerilim düşümü ve Kuzey-3 %-5.1 gerilim sapması ile 0.93p.u. gerilim düşümü olduğu dolayısıyla değerlerin işletme limitlerinin altında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.6).

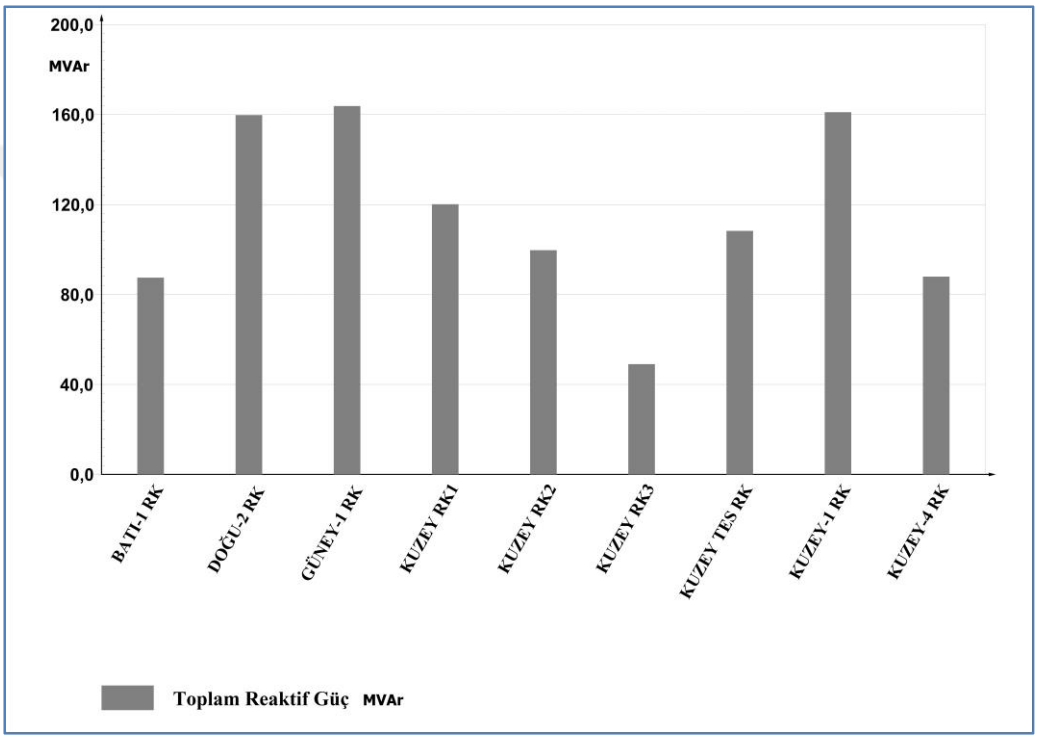


Şekil 4.6. Arıza sonrası baralarda meydana gelen gerilim sapmaları



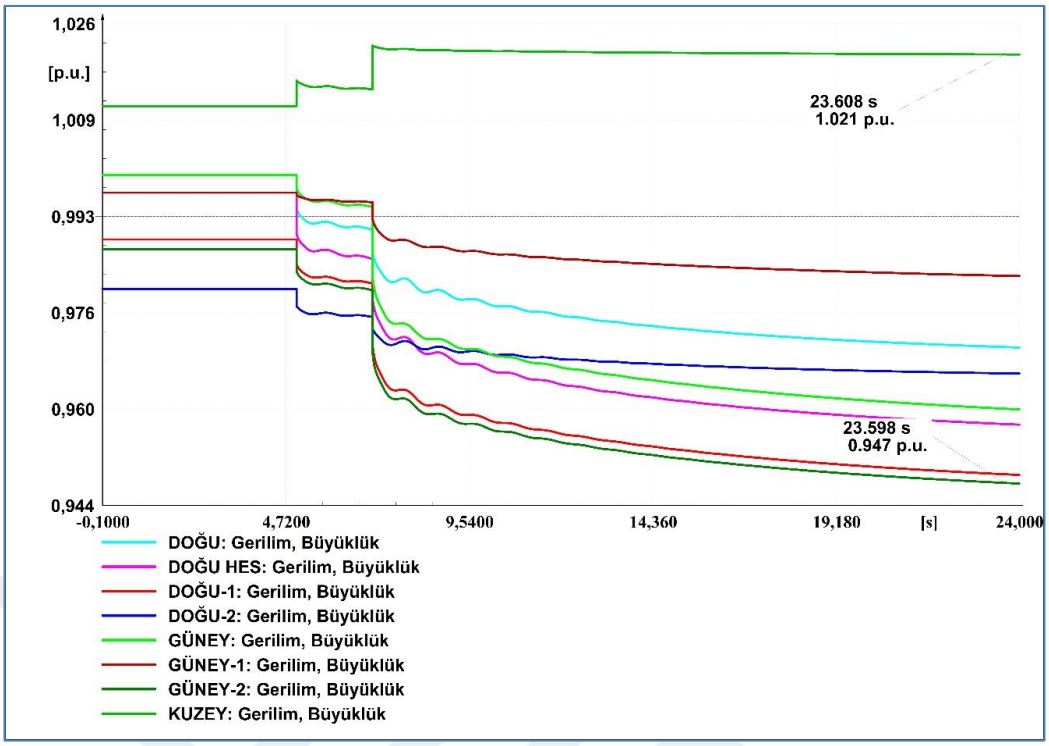
Şekil 4.7. Arıza sonrası kritik bara gerilimleri

Şönt ekipmanların sürekli Kuzey bara ya bağlı olduğu durumda ani gerilim düşümüne karşı etki edip, kritik barada dört saniyeden daha az bir süre ile bara gerilimlerini ortalama 0,96p.u. seviyelerinde tutmayı başarmıştır. Bara gerilimi kararlı hale daha geç bir sürede gelmiş ve özellikle bağlı olduğu Kuzey ve Kuzey-3 baralarında gerilim seviyelerinde düşmeler gözlemlenmiştir (Şekil 4.7). Şönt ekipmanların devreye sürekli sabit veya mekanik olarak bağlı olduklarından, ani gerilim düşümlerinde cevap verme süreleri ve gerilim çökmelerinde kararlı duruma geçme sürelerinin uzadığı ve gerilim seviyelerinde azalmalar, görülmektedir. Ayrıca, uzun iletim hatlarında hat endüktansının ve kapasitesinin, az yüklü durumlarda aşırı gerilimlere ve çok yüklü durumlarda ise gerilim düşümlerine neden oldukları tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. Şönt ekipmanların arıza sonrası reaktif güç yüklenmeleri

Şekil 4.8 'de şönt ekipmanların arıza sonrası reaktif üretim değerleri yer almaktadır. Reaktif kayıplar -2473 MVAr 'a çıkmış olup şebekenin ürettiği reaktif 775 MVAr 'a düşmüştür. Bu durumda toplam üretimin 1484 MVAr olduğu görülmektedir. Sisteme reaktif güç enjeksiyonunda 1064 MVAr net artış meydana gelmiş olmasına karşın şebekeye sağlanmakta olan ek reaktif güçten ötürü şebeke gerilimleri kayda değer düşüşler göstermemiştir. Eğer şebekeye harici şönt ekipmanlar vasıtasıyla ek reaktif güç sağlanmamış olsaydı, sistemde meydana gelen bu hat arızası sistemin çökmesine neden olacaktı (Şekil 4.9).



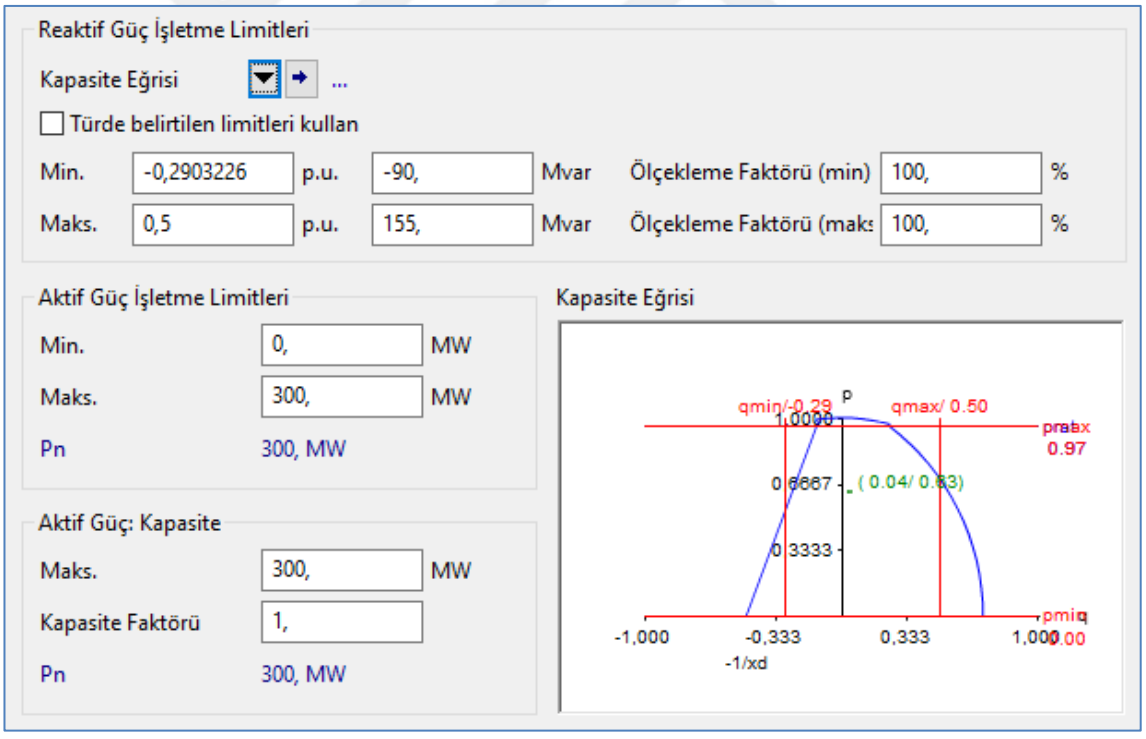
Şekil 4.9. Arıza sonrası şönt ekipmanlar servis harici iken bara gerilimlerinin karşılaştırılması

Enterkonnekte güç sistemi kontrolünde gerilim kararlılığını kontrol etmenin başlıca temel araçları güç sistemine bağlı olan generatörlerdir. Enterkonnekte güç sistemine bağlı olan herhangi bir generatör arızasında, gerilim kararlılığını kontrol etmek için en önemli kaynağın bir kısmı devre dışı kalmış olacaktır. Generatörün reaktif güç kaynağı devreden çıkmakta kalmayıp, aynı zamanda paralel yüksek empedans, enerji iletim hatları üzerinden güç akışı arttıkça sistem üretiminin yeniden yapılanması için generatörlerin ünite rezerv tribünlerinde zorlanmasına ve daha fazla gerilim düşüşüne neden olacaktır. Generatörler dışındaki reaktif güç kaynaklarının devre dışı kalması (şönt ekipman) ayrıca bir sistemin gerilimi kontrol etme kabiliyetini de ortan kaldıracaktır.

Rotor açı kararlılığı, bir güç sisteminde birbirine bağlı senkron generatörlerin normal çalışma koşullarında ve bir arıza meydana geldikten sonra senkronizasyonda kalma durumudur. Kararlı durum koşullarında, her bir generatörün mekanik torku ve elektromanyetik torku arasında denge olmalıdır ve generatör tribün hızı sabit kalmalıdır. Sistem nominal çalışma koşulları bozulduğunda ve bazı generatörlerin açısal salınımlarının artması veya azalması şeklinde generatörler de dengesiz yüklenme oluşacaktır. Rotor açı kararlılığı güç sisteminin başlangıç çalışma şartlarına bağlıdır. Bozucu rotor açı kararlılık çalışmaları 10–20 saniye süreli salınımlar olup güç sistemi küçük hat ve bara arızalarına maruz kaldığında, sistemi kararlı çalışma koşullarında tutabilme yeteneği olarak ifade edilebilir. Salınımlar, daha yüksek güç kapasitesi ve daha yüksek güvenli işletme sağlamak için genaratörlerin paralel çalışmasının bir sonucu olarak meydana gelir. Bir güç sisteminde herhangi bir ani güç değişimden (ani yük düşümü ya da ani yük alımı) salınımlar oluşacaktır.

Generatör gerilim regülatörleri, güç sistemlerinde otomatik veya manuel devreye alınıp çıkarılabilirler. Otomatik uyarma sistemi daha önceden belirlenen bir bara gerilim değerini işletme limitleri aralığında korumaya çalışır. Manuel olarak bir gerilim aralık büyüklüğü seçildiğinde generatör sargısına akım akışı olur. Manuel konumda bir generatör gerilim regülatörü, belirlenen bir bara gerilim değerini işletme sınırları içinde otomatik olarak kontrol etmek için herhangi bir değer aralığında kontrol etmez, çünkü pasif bir elemandır. Sistem işletmesi ve kontrolü açısından, tüm gerilim regülatörleri otomatik olarak konumlandırılmalıdır. Bu da generatörlerin güç sistemine gerilim kararlılığında otomatik olarak yardımcı olmasını sağlamıştır. Generatörler güç sistemi gerilim salınımlarında ilk kontrollü müdahaleyi yaparak güç sistemine artı yönde reaktif güç verirler veya eksi yönde reaktif güç çekerler. Generatör gerilim regülatörleri manuel konuma alındıklarında, gerilim kontrollerinden temel bir gerilim kontrol desteği güç sisteminden çıkarılmış olacaktır.

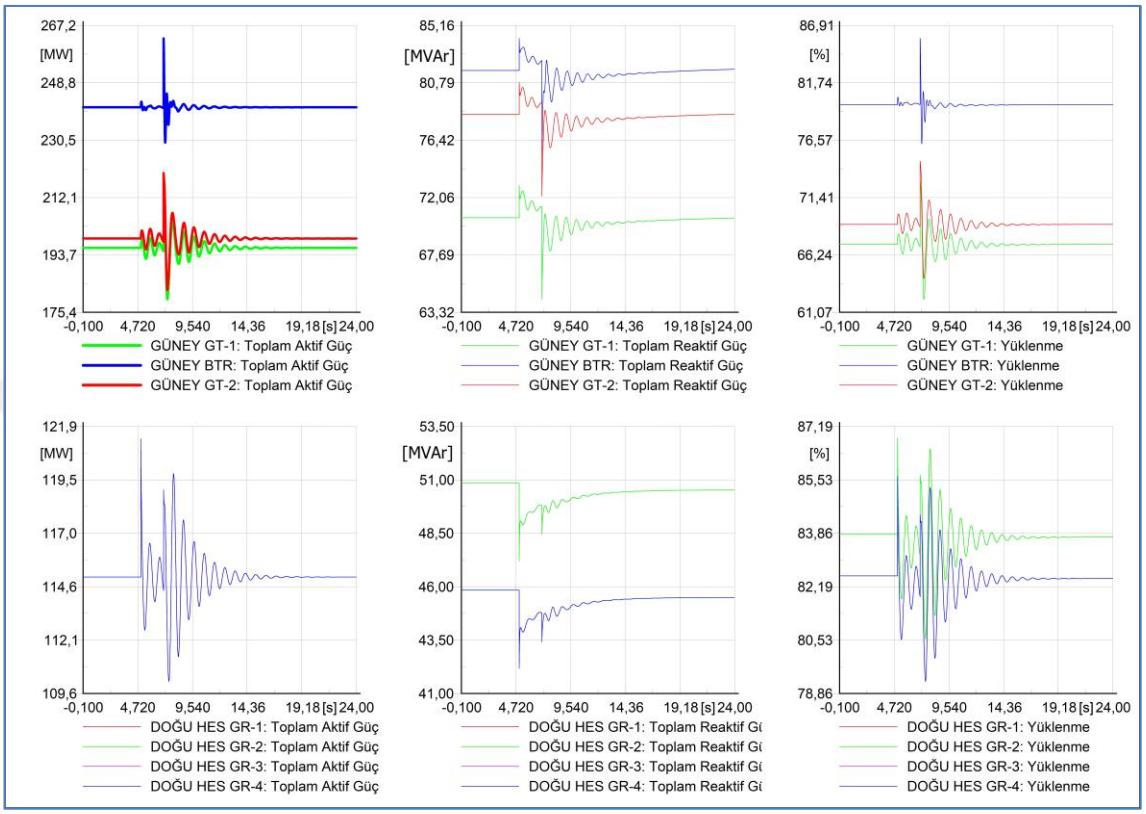
Her generatörün reaktif güç desteği, her generatör ünitesinin kapasite eğrisi tarafından tanımlanır (Şekil 4.10). Bu kapasite eğrisi, kabul edilebilir generatör reaktif işletme limitlerini göstermektedir. Generatörler kapasite eğrilerinin işletme sınırları dâhilinde çalıştırılmalıdır. Generatör bu kapasite eğrilerinin işletme sınırlarını aştığı takdirde, alan sargısında termal hasara yol açabilir veya statik sargıda termal hasar meydana gelebilir.



Şekil 4.10. Generatör kapasite eğrisi

Mevcut büyük güç şebekeleri gibi sistemlerin işletme kararlılığına neden olan yüklerde çok yönlü çeşitlilik yaşanmaktadır. Buna ek olarak, sistemin herhangi bir yerinde oluşacak sitem arızasından dolayı, stabilite her zaman değişmektedir. Genellikle çok sık bir şekilde arızalar, güç sistemlerinin enerji iletim hatlarında meydana

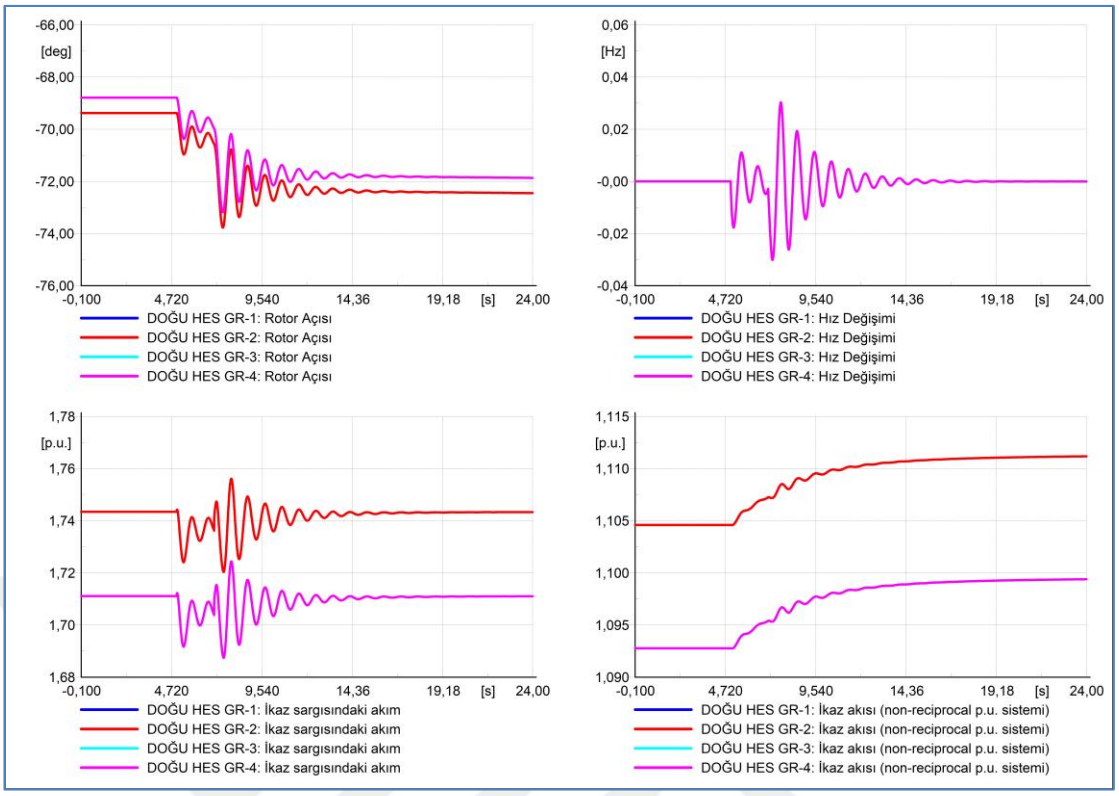
gelmektedir. Bu güç sistemi hat arızaları, generatörler ve türbinlerin normal çalışmasında sapmaya neden olmaktadır. Sistemin normal çalışmasındaki generatör sapmaları, yük açısı ve rotor hızındaki salınımlar açısından, güç sisteminin kararsızlığına neden olmaktadır (Şekil 4.11, Şekil 4.12).



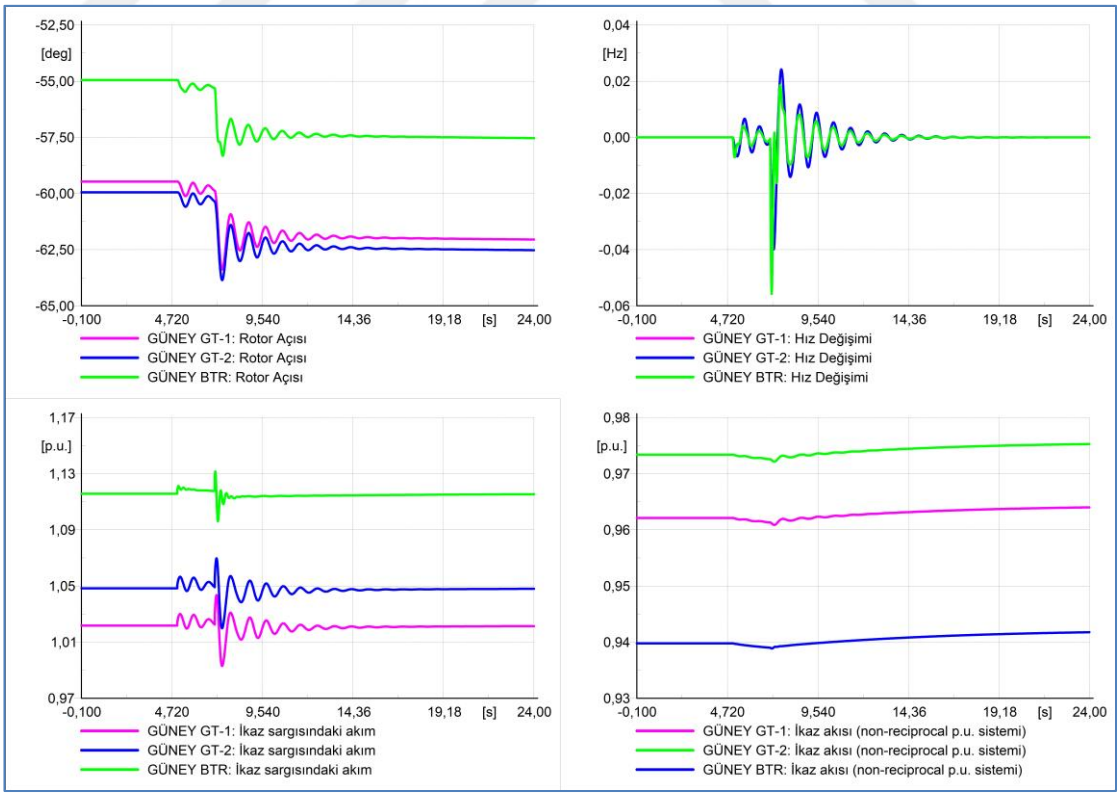
Şekil 4.11. Arıza sonrası generatör yüklenmeleri

Doğu hes ve Güney üretim santrallerinin generatörleri için güç sisteminde şönt ekipmanlar kullanılarak 0.5 sn ve 0.7 sn aralığında oluşan enerji iletim hat arızası için generatörlerde rotor açısı ve rotor hızı için elde edilen sonuçlar, (Şekil 4.12, Şekil 4.13) 'de verilmiştir. 4 – 14 sn zaman aralığında rotor açısı ve rotor hızı için elde edilen sonuçlar doğrultusunda farklı arızalar için çökme sürelerine göre salınımların her iki genliğinde de kontrol sağlandığı ve zamanla sönümlendiği görülmüştür.

Güç sisteminin aşırı yüklenmesi ya da arıza durumunda gerilim kararlılığında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Generatörlerin rotor açısı ve rotor hızı salınımlarına bakıldığında, salınımın bastırılmasına yapmış olduğu katkıların generatör gerilim kararlılığını iyileştirdiğini ve sistemin güvenilirlik ve kapasitesini artırmaya yardımcı olduğunu ortaya koyduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. Doğu hes generatör rotor açısı için genlik ve rotor hızı



Şekil 4.13. Güney santrali rotor açısı için genlik ve rotor hızı

Rotor açı kararlılığı, gerilim ve güç stabilite çalışmalarının temel amaçlarından biri olmuştur. Bununla birlikte, bazı enterkonnekte güç sistemlerinde anormal gerilim büyüklükleri ve gerilim çökmesi olaylarının rotor stabilitesinin gerilim istikrarsızlık koşullarından kaynaklı olduğu da görülmüştür. İki generatör grubu arasındaki rotor açıları makinelerin senkronizasyonunun kademeli olarak kaybedilmesi veya 180° açıyı aşması, enterkonnekte şebekedeki ara noktalarda çok düşük gerilim salınımlarına neden olmuştur. Bununla birlikte, arızanın yük tüketim noktalarına yakın olması ve gerilim düşümlerinin yük dinamiği ve reaktif güç eksikliğinden kaynaklanması durumunda, gerilim kararsızlığı, yük baralarında gecikmeli gerilim geri kazanımı ve hatta hızlı gerilim çöküşü olarak ortaya çıkmış ve sürekli gerilim kararsızlık koşulları rotor stabilitesinin bozulmasına neden olmuştur.

Modellenen Batı Akdeniz bölgesi enerji iletim hattının aşırı yüklenmesi durumunda ya da sistemde meydana gelen arıza durumunda, gerilim kararlılığında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Enerji iletim hatların gerilim değerleri, aktif ve reaktif güç değerleri ve yük baralarına ait gerilim limit değerleri hesaplanmıştır. Şönt ekipmanların güç sisteminin gerilim düşümlerine karşı kararlılık limitleri üzerindeki etkisi ve gerilim salınımlarının ortadan kaldırılması durumu incelenmiştir. Modellenen şebeke için optimum reaktif güç miktarı hesaplanarak şönt ekipmanlarla reaktif güç sağlanmıştır. Sistemin tüm baralarında gerilimi sabit bir seviyede tutabilme yeteneğinin oldukça yetersiz olduğu ve şönt ekipmanlarla reaktif güç kompanzasyonu yapılarak sistemin kararlı hale getirilemediği görülmüştür.

Gerilim kararlılığı, sistemdeki bozucu etkilerden sonra sistemin tüm baralarında gerilimi sabit bir seviyede (işletme limitlerinde) tutabilme yeteneği olarak tanımlanmıştır. FACTS denetleyicileri ile reaktif güç kompanzasyonu yapılarak sistemin kararlı hale getirilebileceği çalışma kapsamında gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir.

4.2. FACTS Elemanları vasıtasıyla gerilim ve reaktif güç regülasyonu

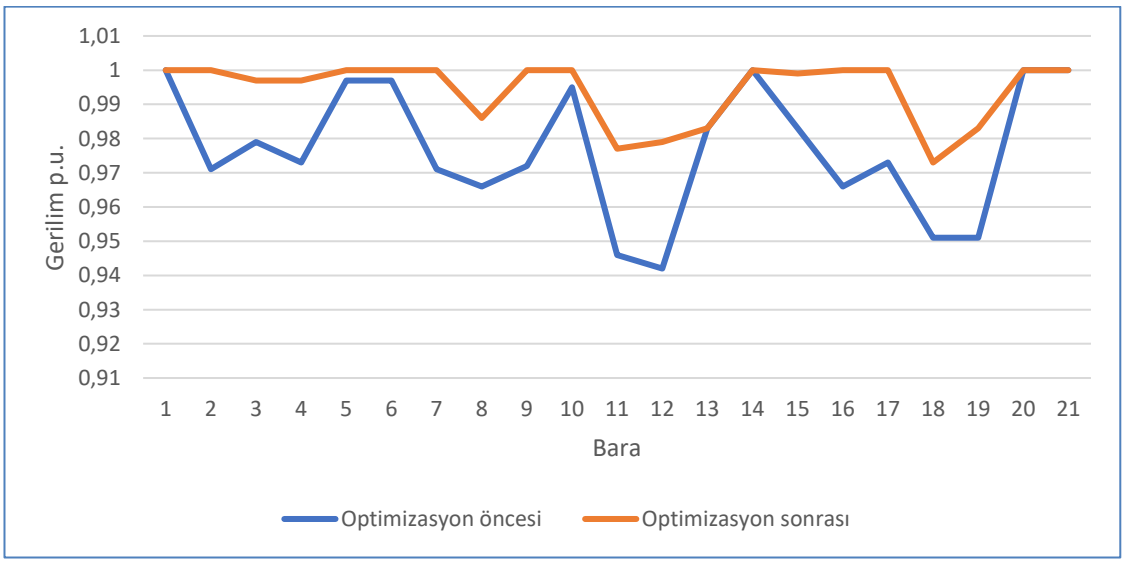
Bu bölümde sezgisel algoritmalar ile FACTS cihazlarının güç sistemi için modellenen enerji iletim sisteminde optimal yerleşim noktaları belirlenmiş ve bu noktalara SVC ve STATCOM kontrolörleri bağlanması sonucu elde edilen bara gerilim seviyeleri ve güç kayıplarını içeren simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yük akışı analizi sonucunda, gerekli baralara paralel olarak SVC ve STATCOM kontrolörleri bağlanıp gerilim regülasyonu sağlanmıştır, enerji iletim sistemin gerilim çökmelerine maruz kaldığı baralar tespit edilmiş ve bu baralarda FACTS cihazlarının etkinliği değerlendirilmiştir. SVC ve STATCOM kontrolörlerinin, sistemin gerilim çökmelerine karşı güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. STATCOM kontrolörlerin, reaktif güç yüklenme durumlarında daha iyi performans gösterdiği ve daha kararlı çalıştığı ayrıca aktif ve reaktif güç değerleri açısından en iyi güç transferini sağladığı görülmüştür. STATCOM kontrolörleri ile istenen reaktif güç kompanzasyonu hızla gerçekleştirilirken, ani yük değişikliklerine ve farklı yük karakterlerine rağmen, baralar için istenen referans gerilim değerlerinin sağlandığı görülmektedir.

4.2.1. Optimizasyon çalışması

FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesinde kullanılan sezgisel yöntemlerden PSO ve GA algoritmalarının kullanılma sebebi, problemin kesin çözüme ulaşabilecek bir yapıya sahip olmaması, anlaşılabilirlik açısından sezgisel algoritmaların kolay olması ve en önemlisi çok parametreli gerçek zamanlı bir problemin, cebirsel yöntemlerde ihmal edilen en küçük detay parametrelerinin bile ihmal edilmeden optimal çözüme ulaştırılabilmesidir.

4.2.1.1. Genetik algoritma ile FACTS elemanların optimizasyon çalışması

FACTS cihazlarının dahil edildiği güç sisteminde, optimal konumun tespiti GA sezgisel algoritmaları tarafından çözülmüştür. Test sistemi 19 iletim hattı, 8 generatör ve 21 adet yük barasını, iletim hatlarına bağlı transformatör, baralara bağlı şönt ekipman içermektedir. Güç sistemine ait hat ve yük parametreleri, 1 nolu bara salınım barası, 2, 4, 5, 6, 10, 13, 15, ve 16, numaralı baralar generatör barası olarak ifade edilmektedir. Tüm baralar için gerilim sınır değerleri 0.95 p.u. ile 1.05 p.u. olarak alınmıştır. Güç sistemindeki ilk bara, iletim şebekesinden gelen elektrik enerjisinin besleyicisi olarak kabul edilmiştir. Diğer baralar FACTS cihazlarının muhtemel konumları olarak değerlendirilmiştir. Temel şebeke değerleri 400 kV (1 p.u.) ve bu sistemin aktif ve reaktif güç yükleri 4974 MW ve 1184 MVAr 'dır. GA algoritması, şebekedeki her bara gerilimi ve yük akışı hesaplaması sonucu FACTS cihazının en iyi konumu ve boyutunu aramak için uygulanmıştır. Bu çalışmalarda üç eşitsizlik kısıtlaması göz önünde bulundurulmuştur, gerilim limiti, hat kapasitesi limiti ve reaktif güç üretim limiti, her çalışma için optimum konum kaydedilir ve maksimum yineleme ve başlangıç popülasyon boyutları sırasıyla 100, 50 ve 20 olarak ayarlanmıştır. Kullanılan GA sezgisel algoritmanın etkinliğini göstermek için güç sistemi, acil durum uygulama senaryosunda test edilmiştir. Bir hat kesintisi göz önünde bulundurularak beklenmedik durum ve normal çalışma (beklenmedik durum olmadan) durumudur.



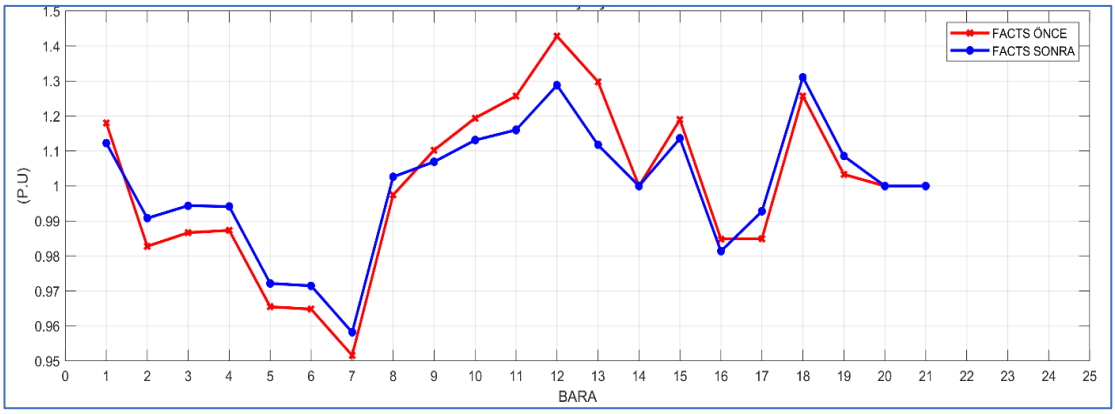
Şekil 4.14. (a) GA Optimizasyon öncesi ve sonrası iletim hattı bara gerilim seviyeleri

Şekil 4.14-a' da ise kontrol değişkenlerine göre sistemin bara gerilim değerleri gösterilmiştir. Gerilim kararlılığı indeksi açısından FACTS cihazlarının bağlı olduğu güç sistemi incelendiğinde, optimizasyon algoritmalarından elde edilen minimum değerler 0.973 p.u., 0.977 p.u., 0.979 p.u. ve 0.983 p.u. olarak elde edilmiştir. Güç sistemine FACTS cihazının eklenmesinin voltaj profiline de olumlu biçimde etki ettiği ve eklendikleri bara gerilimlerini 1 p.u. değerine çektiği görülebilmektedir. Ayrıca tüm bara gerilimleri incelendiğinde, sisteme eklenen FACTS cihazlarının tüm baraların gerilim değerlerine olumlu etki yaptığı tespit edilmiştir. Beklenmedik durum senaryosu uygulandığı durumda GA algoritması, şebekedeki her bara gerilim değerleri için yük akışı hesaplaması sonucu FACTS cihazının en iyi konumu, 255.206 MVAr optimum kapasiteye sahip iletim hattı 8-9 arasında bağlı 7 nolu (Kuzey) barasıdır.

4.2.1.2. PSO ile FACTS elemanların optimizasyon çalışması

PSO, yüksek verimlilik ve güvenilirliğe sahip sezgisel bir küresel optimizasyon algoritmasıdır. FACTS cihazlarının dahil edildiği güç sisteminde, optimal konumun tespiti PSO sezgisel algoritmaları tarafından çözülmüştür. Başlangıçta, temel durum yük akışı gerçekleştirilmiş ve güç akışlarının, bara gerilimlerinin ve hat kayıplarının karşılık gelen değerleri gözlemlenmiştir. Test sistemi 19 iletim hattı, 8 generatör ve 21 adet yük barasını, iletim hatlarına bağlı transformatör, baralara bağlı şönt ekipman içermektedir. Güç sistemine ait hat ve yük parametreleri, 1 nolu bara salınım barası, 2, 4, 5, 6, 10, 13, 15, ve 16, numaralı baralar generatör barası olarak ifade edilmektedir. Tüm baralar için gerilim sınır değerleri 0.95 p.u. ile 1.05 p.u. olarak alınmıştır. Güç sistemindeki ilk bara, iletim şebekesinden gelen elektrik enerjisinin besleyicisi olarak kabul edilmiştir. Diğer baralar FACTS cihazlarının muhtemel konumları olarak değerlendirilmiştir. Temel şebeke değerleri 400 kV (1 p.u.) ve bu sistemin aktif ve reaktif güç yükleri 4974 MW ve 1184 MVAr 'dır. Kullanılan PSO sezgisel algoritmanın etkinliğini göstermek için güç sistemi, acil durum uygulama senaryosunda test edilmiştir. Bir hat kesintisi göz önünde bulundurularak beklenmedik durum ve normal çalışma (beklenmedik durum olmadan) durumudur. Bu çalışmada, popülasyon boyutu 20'ye ve maksimum yineleme sayısı 100' e ayarlanmıştır. Optimizasyon işlemi başladığında, her parçacığın konumu, durma kriterlerine ulaşana kadar sürekli olarak güncellenmiştir.

Enterkonnekte güç sisteminde FACTS cihazlarının optimal konumun tespiti, bara gerilim seviyeleri ve aktif güç kayıpları incelenmiştir. Yük akışı analizinde generatör ve yük ile ilgili aktif ve reaktif güçleri ile her bir baradaki gerilim büyüklüğü hesaplanmıştır (Şekil 4.14-b). Hattaki kayıplar ise gönderici ve alıcı uçlardaki güç akışı arasındaki farka dayanarak hesaplanmıştır. Sistemin optimizasyon sonrası bara gerilimleri incelediğinde en düşük gerilime sahip 7 numaralı (Kuzey) barasının olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu baraya SVC ve STATCOM cihazları eklenerek gerilimlerinin 1 p.u. değerine getirilmesi amaçlanmıştır. FACTS cihazlarını optimum konuma yerleştirerek ve reaktif güç değerini hesaplayarak voltaj stabilitesini arttırmak için PSO sezgisel tabanlı algoritma denenmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen stratejinin en düşük reaktif güç desteğini gerektirdiğini, net voltaj sapmalarını en aza indirdiğini, sistem kayıplarını azalttığını, daha iyi bir voltaj profili sunduğunu ve en düşük hesaplama süresini aldığını göstermiştir. FACTS kontrolörlerin yüksek maliyeti nedeniyle, PSO ile optimum konumları hem statik hem de dinamik voltaj stabilitesini artıracak şekilde olmuştur.



Şekil 4.14. (b) PSO Optimizasyon öncesi ve sonrası iletim hattı bara gerilim seviyeleri

Sezgisel yöntemler GA ve PSO algoritmaları ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda elde edilen FACTS cihazlarının optimal konumun ve boyutları belirlenmiştir (Çizelge 4.8). FACTS cihazlarının optimal konumun ve boyutların seçili baralarda konumlandırılması ile sistem kayıplarının azaltılması bakımından en iyi sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.8. Optimizasyon sonrası FACTS cihazlarının konumları ve boyutları

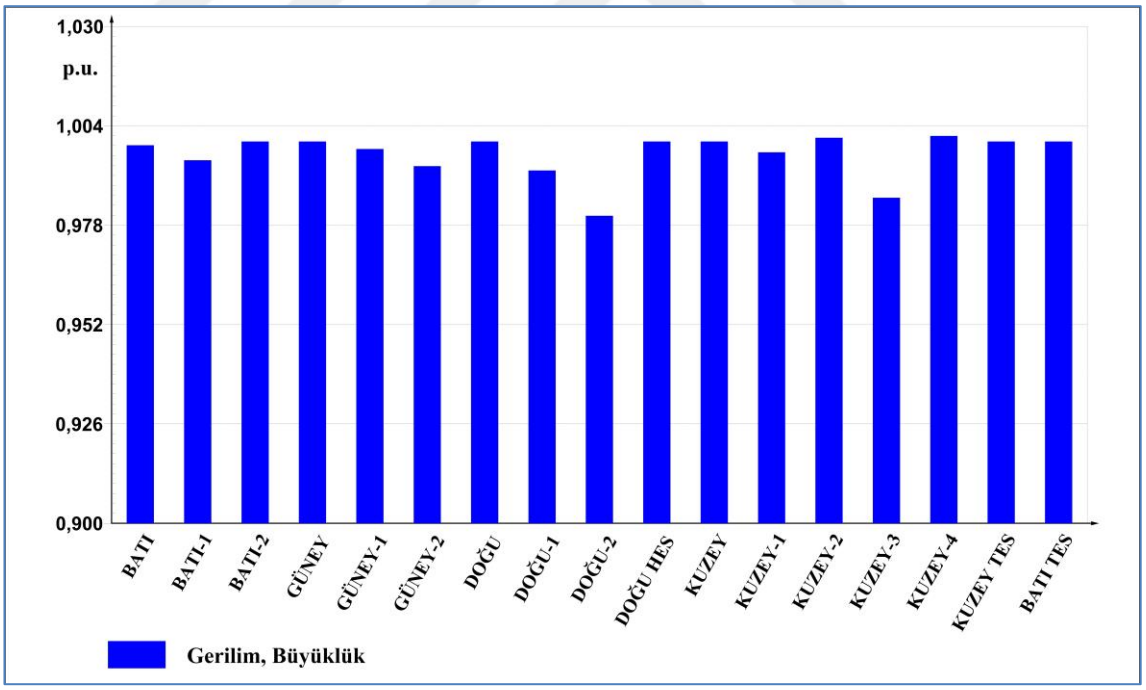
Sezgisel Yöntem	**Konum 1**	**Konum 2**	**Konum 3**	**TOPLAM (MVAr)**
GA	Kuzey	Güney-2	Güney-1	255.206
PSO	Kuzey	Güney-2	Güney-1	268.088

Sezgisel yöntemleri kullanarak sistemi optimize etmenin birçok avantajı vardır. Bu avantajlardan en önemlileri güç aktarım kapasitesini artırmak ve kayıpları azaltmaktır. FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarını belirledikten sonra bu noktalara FACTS cihazları SVC ve STATCOM kontrolörleri bağlanarak güç sistemi için güç akışı ve hat akışı simülasyonları, Dig-SILENT Power Factory programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Güç akışı sonucunda FACTS cihazlarının konumlandırıldığı baralardaki gerilim profili seviyesinin birim değere ulaştığı gözlemlenmiştir. Sezgisel yöntemler ile elde edilen GA ve PSO algoritmaları kayıpların azaltılması bakımından literatürdeki diğer algoritmalara göre daha iyi bir performans sergilemiştir. Birden fazla FACTS cihazı kullanıldığında gerilim seviyesi, sistemde tek bir FACTS cihazı kullanımına göre daha iyi bir performans göstermesine karşın, FACTS cihazların bileşenlerinin sayısının artması nedeniyle maliyet de doğru orantılı olarak artacaktır. Sezgisel yöntemler ile elde edilen GA ve PSO algoritmaları sırasıyla her bir yöntemin bütün baralar için elde ettiği toplam sistem kayıplarının en iyi, en kötü ve ortalama değerlerine bakıldığında bazı baraların değerleri yakın çıkmıştır. Bu sonuçlar bu baraların generatör barası olmasından dolayı, FACTS cihazların bu baralara bağlanması güç üretimi yapabilen bu baralardaki reaktif güç ve gerilim değerlerin değişimini etkilememektedir.

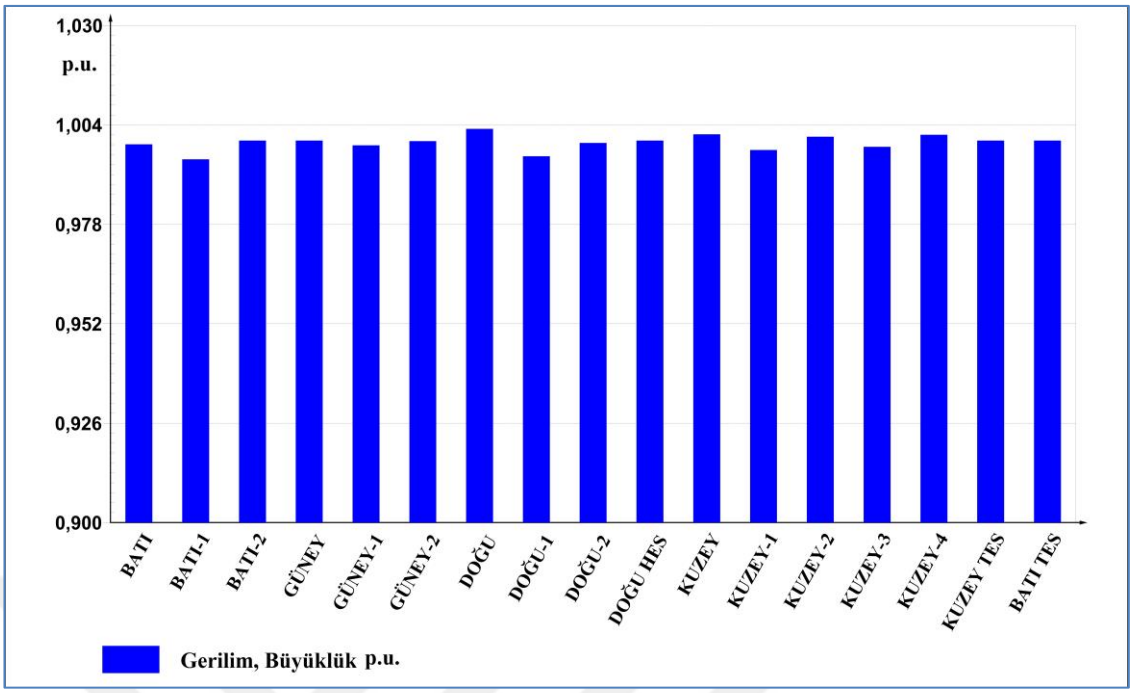
Genel olarak Sezgisel yöntemler ile elde edilen GA ve PSO algoritmaların söz konusu problemin çözümlerinde tutarlılık görülmektedir. Bütün sezgisel yöntemler, güç sisteminin Kuzey barasını en uygun bara olarak bulmuş ve FACTS cihazların tepkin güç çıkışı değerinin 1.0p.u. civarında olduğu görülmüştür. Elde edilen FACTS cihazların tepkin güç çıkış değerlerinin ve buna bağlı olarak şebeke kayıplarının değerlerinin bulunmasında çeşitli farklılıklar bulunmaktadır. Farklı sezgisel yöntemlerin optimizasyon teknikleri kullanarak FACTS cihazların gerilim kararlılığına ve sistem kayıplarının azaltılmasına olan etkisi gösterilmiştir. Kullanılan GA ve PSO algoritmaların tamamında sistemin gerilim profilinin artırıldığı ve kayıpların azaltılmasına bağlı olarak sistem yüklenebilirliğinin artırılabileceği gözlemlenmiştir.

4.2.2. Optimize edilmiş FACTS elemanları kullanılarak gerilim ve reaktif güç regülasyonu

Modellenen güç sisteminde FACTS cihazlarının kullanıldığı durumlarda kayıplar ve bara gerilim seviyeleri analiz edilmiştir. FACTS cihazlarının şebekeye dahil edilmeden önce güç sisteminin bara gerilim seviyelerinin işletme limitlerinin altında olduğu ve bazı baralarda gerilim çökmesi riski yaşandığı görülmüştür. Kritik noktalar olan baralara FACTS cihazlarının ilave edilmesiyle, bara gerilimlerinin ortalama değerleri SVC bağlı durumda 0.996 p.u., STATCOM bağlı durumda ise 0.999 p.u. olmuştur. Gerilim seviyelerinde önemli derecede düzelmeler meydana gelmiş olup gerilim değerleri 1p.u. değerine yakınsamıştır (Şekil 4.15, Şekil 4.16).

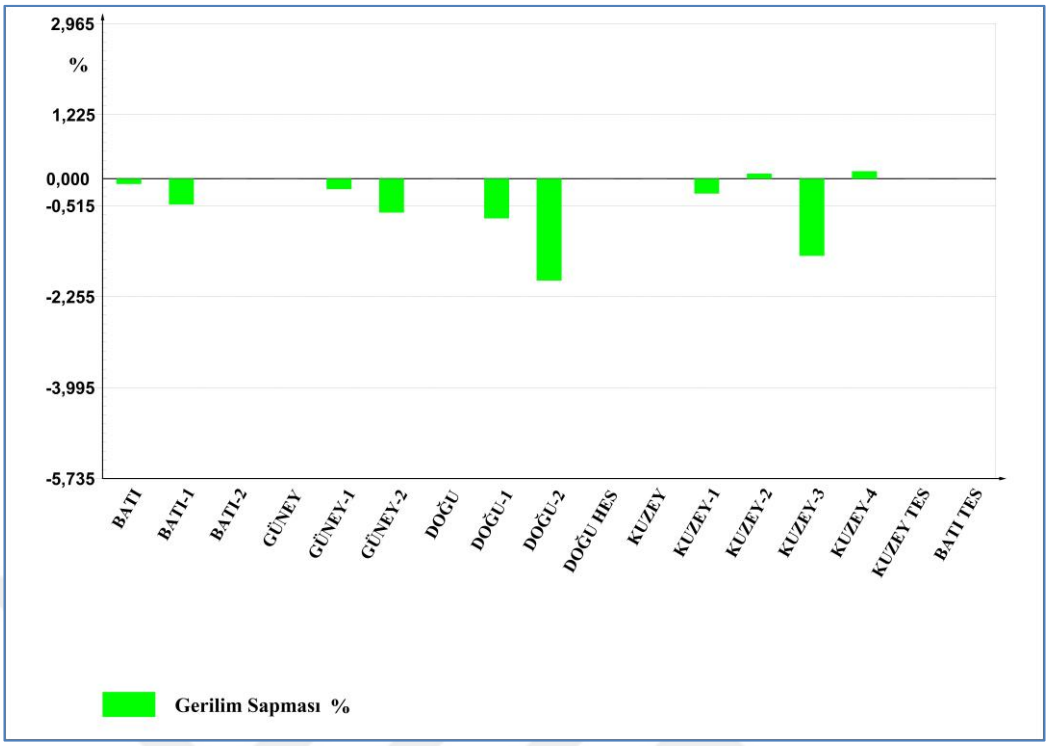


Şekil 4.15. SVC bağlı durumda bara gerilim değerleri

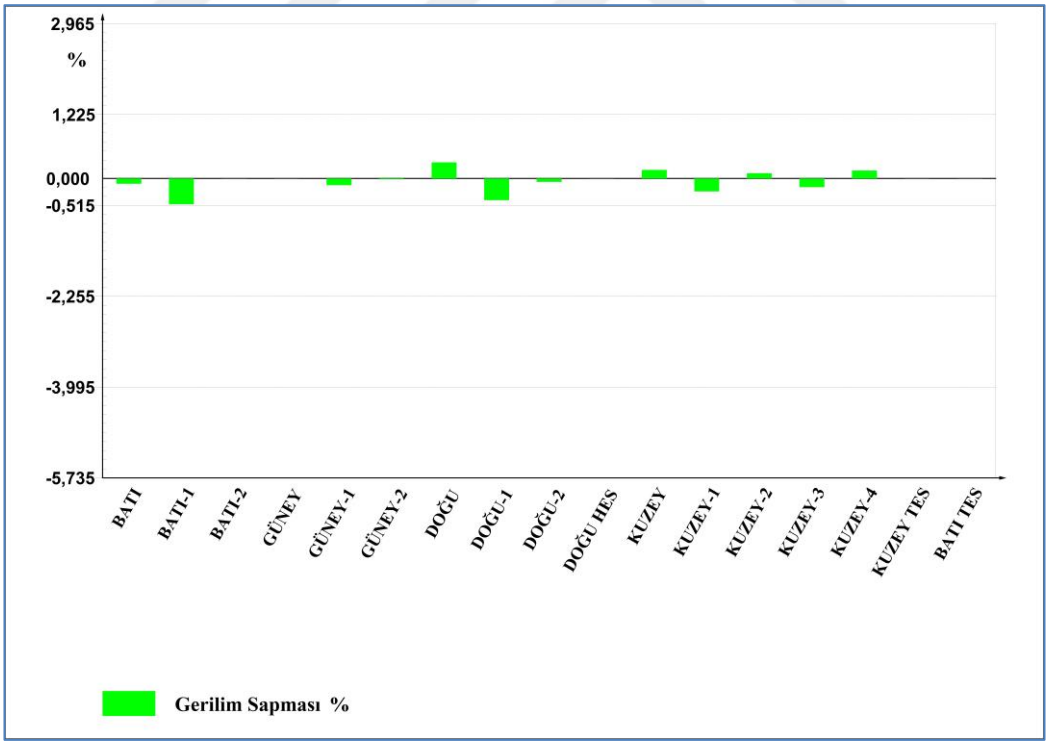


Şekil 4.16. STATCOM bağlı durumda bara gerilim değerleri

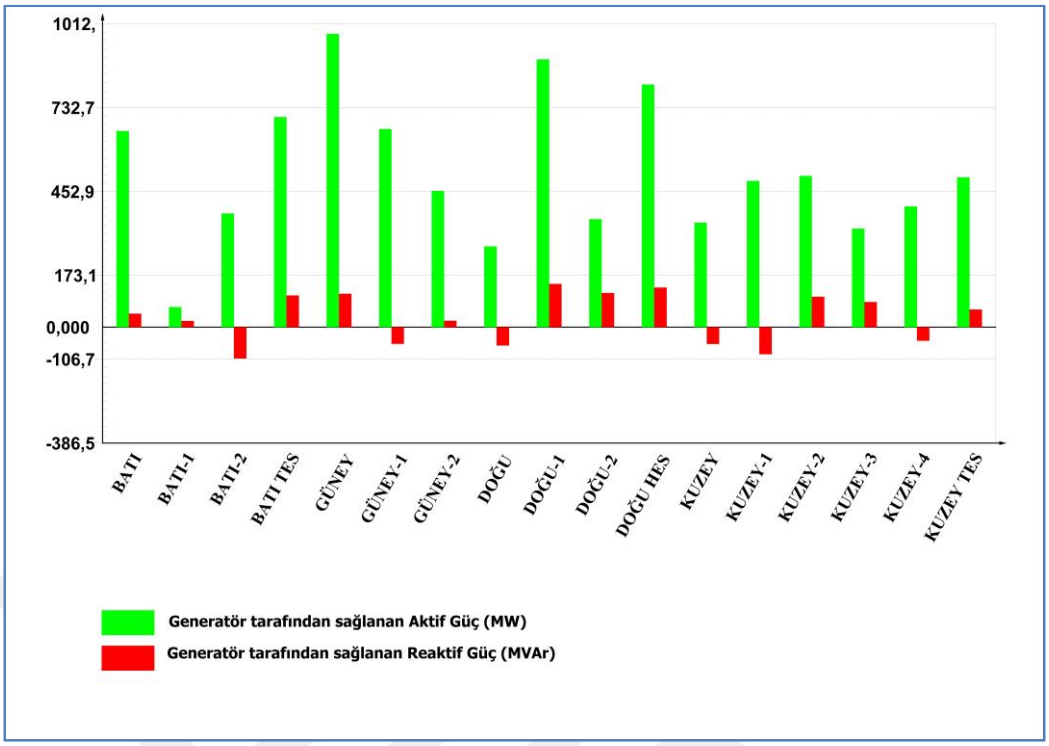
Modellemesi gerçekleştirilen güç sisteminde gerilim salınımı problemi olan en kritik baralar için gerilim sapma eğrileri incelenmiştir. (Şekil 4.17, Şekil 4.18) Gerilim sapmalarında STATCOM kontrolörünün SVC kontrolüne göre daha başaralı olduğu, gerilim salınımlarını %0.5 seviyelerinde tutabildiği ve işletme gerilim değerlerini daha kararlı hale getirdiği görülmüştür. Güç sistemine SVC ve STATCOM kontrolörleri yerleştirildiğinde, reaktif güce olan katkıları incelenmiştir. Aktif ve reaktif güç akışının, elektrik iletim hattındaki kritik güç sistemi parametrelerinden olan toplam iletim kaybı değişimleri araştırılmıştır. SVC ve STATCOM kontrolörleri karşılaştırıldığında, en düşük reaktif güç gereksiniminin STATCOM cihazı kullanıldığında meydana geldiği görülmüştür. Simülasyon çalışmalarında, baralarda oluşabilecek gerilim yükselmeleri, hat ve transformatörlerde oluşan yüklenmeler, yön değiştirebilecek güç akışları, üretim tesisinin reaktif güç kapasitesi gibi birçok konu araştırılmıştır. SVC ve STATCOM kontrolörlerinin reaktif güç kayıplarını, reaktör ve kapasitor gibi şönt banklarından daha fazla azalttığı görülmektedir (Şekil 4.19, Şekil 4.20).



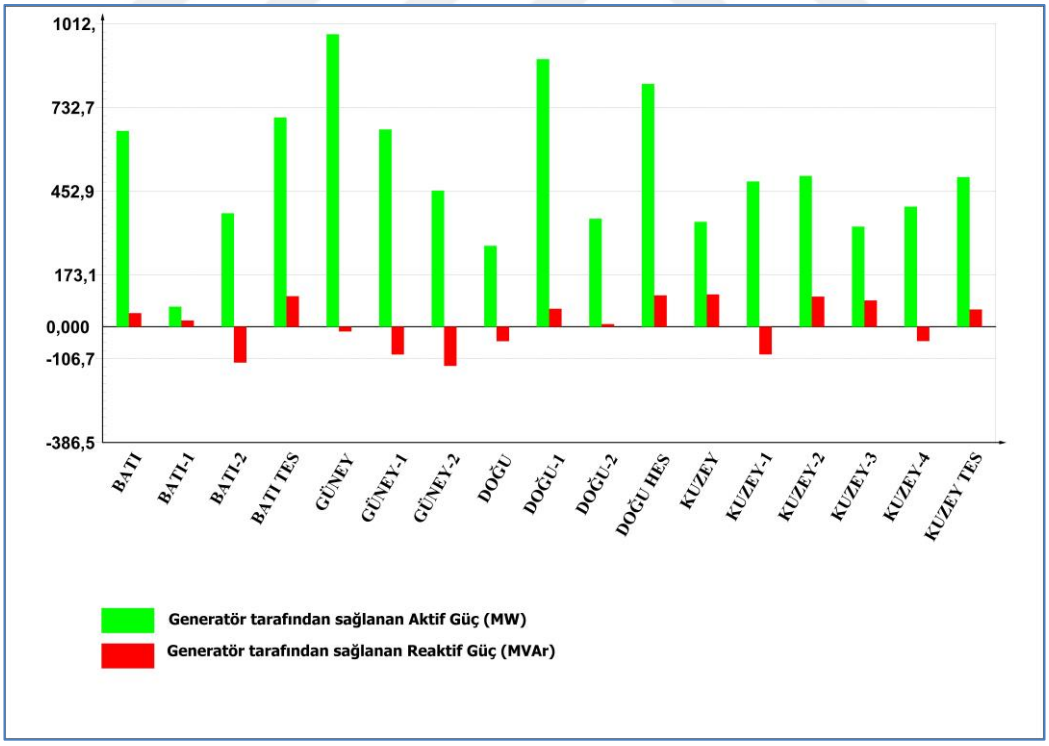
Şekil 4.17. SVC kullanımında bara gerilim değişimleri



Şekil 4.18. STATCOM kullanımında bara gerilim değişimleri



Şekil 4.19. SVC bağlı durumda güç sisteminde Aktif ve Reaktif güç alışverişi



Şekil 4.20. STATCOM bağlı durumda güç sisteminde Aktif ve Reaktif güç alışverişi

FACTS cihazların optimum yerleşiminden sonra hat yüklenmeleri incelenerek, SVC ve STATCOM denetleyicilerinin hat yüklenme kararlılığına etkisi gösterilmiştir. Hat kayıpları, FACTS cihazların konumuna bağlı olarak çeşitli işletme senaryosu teknikleri ile incelenmiştir. FACTS cihazların güç sistemine dahil edilmesi ile sistem yüklenebilirliğinde önemli derecede artışlar olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Optimum konuma yerleştirilen FACTS cihazları sonrası enerji iletim hattı yüklenmeleri

Enerji İletim Hattı	SVC	STATCOM
	Hat Yüklenme [%]	Hat Yüklenme [%]
SANAL HAT - DOĞU	16.00152	15.84187
BATI TES - GÜNEY-1	23.13759	23.02828
BATI TES Harici Şebeke(1) HAT	17.46533	17.38043
BATI-2 - KUZEY-1	4.339021	4.26681
BATI-BATI TES HAT1	5.44578	5.434948
BATI-BATI TES HAT2	4.346264	4.33778
BATI-BATI-1 HAT	3.260221	3.255522
BATI-BATI-1 HAT_a	6.23807	6.237409
DOĞU - DOĞU-2 HAT	8.276547	5.310391
DOĞU - DOĞU-2 HAT_a	3.394085	5.367211
DOĞU HES - SANAL HAT	15.93721	15.79088
DOĞU-1 - DOĞU HES HAT	18.6552	18.43721
DOĞU-1 - GÜNEY-2 HAT	4.25081	8.149477
GÜNEY- BATI-2 HAT1	12.05925	12.64092
GÜNEY- BATI-2 HAT1_a	10.59658	10.33862
GÜNEY- BATI-2 HAT2	11.60658	11.35366
GÜNEY- DOĞU-1 HAT	41.26074	40.65101
GÜNEY- GÜNEY-1 HAT	19.38216	19.15896
GÜNEY- GÜNEY-2 HAT	28.12311	27.91885
KUZEY - KUZEY-1 HAT	34.54663	34.40248
KUZEY - KUZEY-3 HAT	5.702085	3.091765
KUZEY - KUZEY-3_a HAT	11.32761	5.833233
KUZEY TES - BATI -1	8.061332	8.069452
KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_a	10.92239	10.88802
KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_b	10.40463	10.32456
KUZEY-DOĞU HES HAT	9.263471	9.104409
KUZEY-GÜNEY HAT	6.791964	6.614231
KUZEY-KUZEY-1 HAT	18.23236	18.15416
KUZEY-KUZEY-1 HAT_a	15.91837	15.61177
KUZEY - KUZEY-4 HAT	18.44938	19.52242

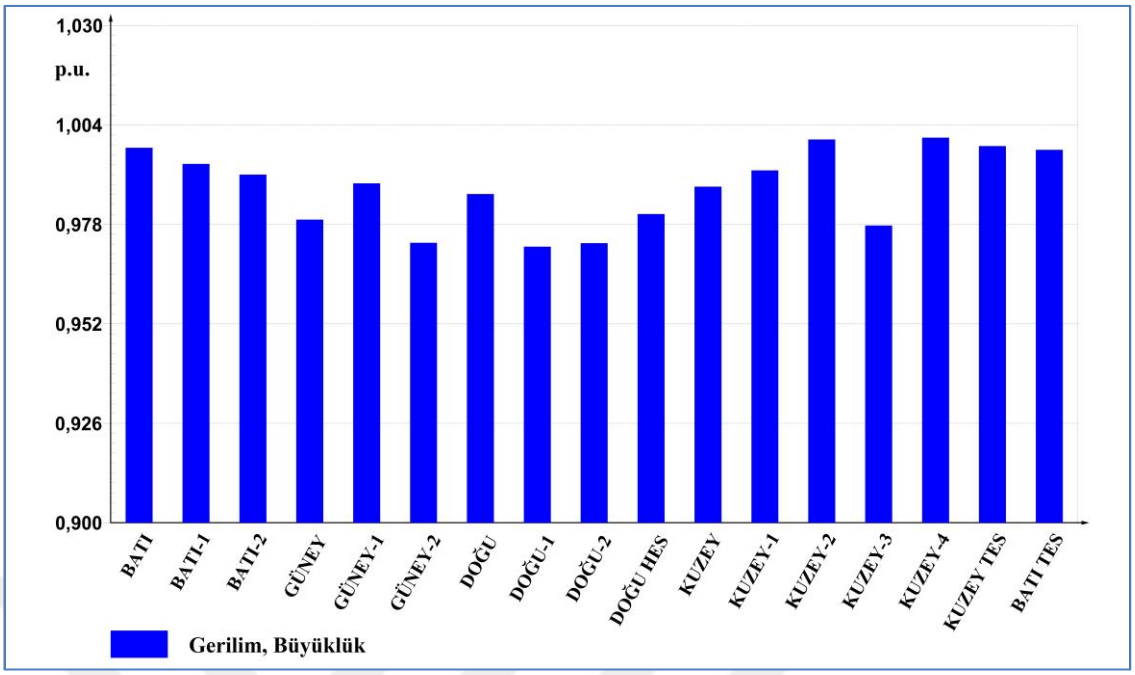
4.2.3. Hat arızası sonrası FACTS elemanları kullanılarak gerilim ve reaktif güç regülasyonu

SVC ve STATCOM denetleyicilerinin, güç sisteminde meydana gelen gerilim çökmelerine karşı kararlılık limitleri üzerindeki etkisi incelenmiş, hata ve arıza durumlarında gerilim salınımlarının ortadan kaldırılması durumları değerlendirilmiştir. Hat ve bara gerilim stabiliteleri, FACTS cihazlarının yardımıyla gerilim salınımlarını sönümlediği görülmüştür. Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde gerçekçi olarak modellemesi yapılan enerji iletim sistemi için SVC ve STATCOM kontrolörlerinin kullanımı sonucunda, model şebekenin gerilim kararlılığı gözlemlenmiş, bir hattın ya da bir sistemin aşırı yüklenmesi durumunda gerilim kararlılığında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Ayrıca farklı yük karakteristiklerine sahip bir enerji iletim sisteminde gerilim kararsızlıklarında nasıl bir rol oynadığı enerji iletim sistem üzerinde gözlemlenmiştir. Hatların kararlılık değerleri ve baralara ait gerilim kararlılık limit değerleri hesaplanmıştır.

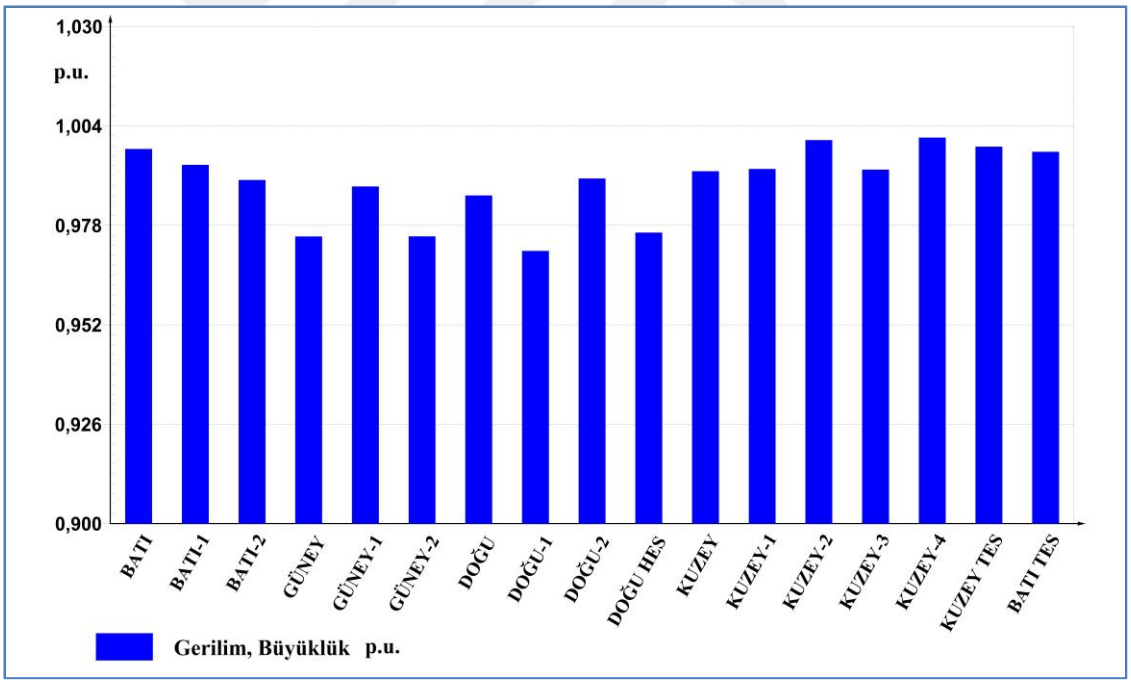
Modellenen güç sisteminde üç tip işletme senaryosu tasarlanmıştır, Simülasyon çalışması kapsamında, gerçekçi olarak tasarlanan güç şebekesi modeli için gerilim düşümü, anlık enerji üretimi/tüketimi gibi çeşitli işletme senaryosu durumları için analizler gerçekleştirilmiştir. Hatların kararlılık değerleri ve baralara ait gerilim kararlılık limit değerleri belirlenmiştir. İşletme senaryosu-1 durumunda sistem çökmesi açısından en kritik baraları besleyen üretim santrallerinin bağlı olduğu, doğu ve batı irtibat hatlarının devre dışı kalması sonucu, şebeke modeli doğu ve batı olmak üzere iki bölgeye ayrılmaktadır. Amaç doğu ve batı irtibat hatlarının paralelindeki hatlarda meydana gelen aşırı yüklenmeleri incelemek ve gerilim salınımlarını incelemektir. İşletme senaryosu-2 durumunda iletim hatlarının tüm kısa devre durumlarını incelemek, gerilim regülasyonlarını ve reaktif yük akışlarını göstermektir. Son olarak işletme senaryosu-3 durumunda güç şebekesi modeli için en kritik acil durum senaryosudur. Üretim kapasitesi en yüksek olan santralin barasında kısa devre arızası oluşturulmuştur. Kısa devre sonrasında şebekede ani üretim kaybına bağlı yük ve gerilim salınımları incelenerek aktif ve reaktif yük akışlarının kontrolü sağlanmıştır.

4.2.3.1. İşletme senaryosu-1

Modellenen güç sisteminde Kuzey-Güney ve Kuzey-Doğu Hes arasındaki hatta 3 faz kısa devre arıza senaryosu tasarlanmış olup, mevcut hat arızadan dolayı devre dışı kalmıştır. Toplam simülasyon süresi içerisinde (24sn) 5. saniyede karşılıklı olarak Kuzey bara ait hücre 11 nolu kesici ve Doğu Hes bara ait hücre 2 nolu kesiciler ve 7. saniyede Kuzey- Güney arasındaki hatlarda Kuzey bara ait hücre 10 nolu kesici ve Güney bara ait hücre 2 nolu kesiciler açma eylemi gerçekleştirmiştir. Arızadan dolayı hatların devre dışı kalma durumları için analizler gerçekleştirilmiş ve arıza durumunda da enerji iletim sistemi şebeke modelinin tüm kenar ekipman değerleri incelenmiştir (Ek-3).



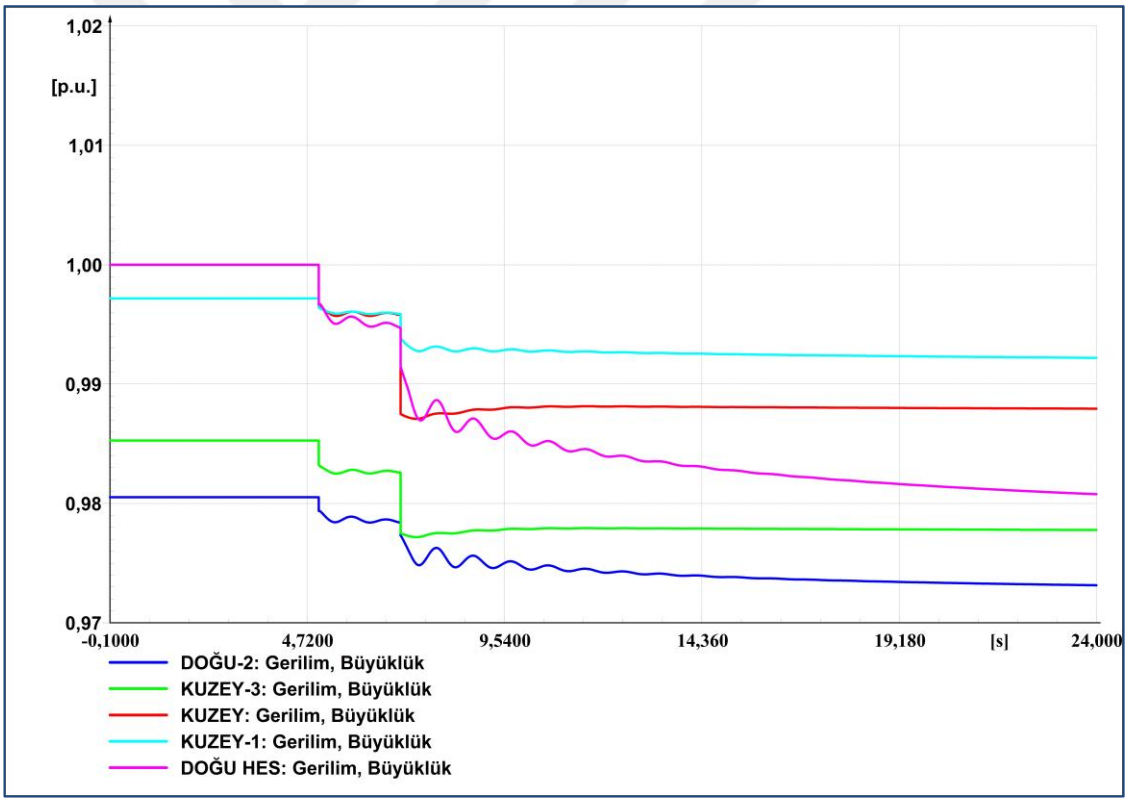
Şekil 4.21. 3 faz hat arızası sonrası SVC bağlı durumda bara gerilimler değerleri



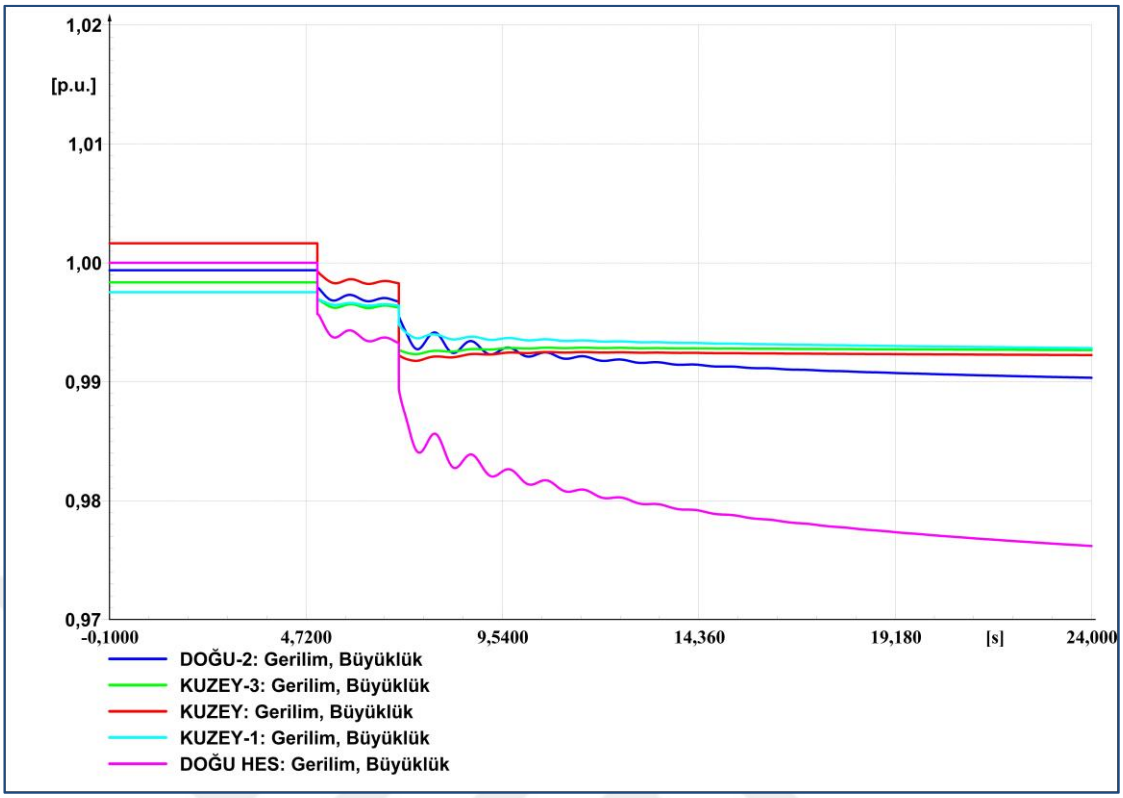
Şekil 4.22. 3 faz hat arızası sonrası STATCOM bağlı durumda bara gerilimler değerleri

Modellenen güç sisteminde, gerilim sorunu yaşayan en kritik baralar için gerilim-yüklenme parametresi eğrilerini değerlendirerek bu baralara SVC ve STATCOM denetleyicileri bağlandığında, güç sistem gerilimlerine olan katkıları incelenmiştir. Sistemin kritik baralarını besleyen hatların devre dışı kalmaları durumunda, kritik baralara eklenen SVC ve STATCOM kontrolörlerinin kritik baranın işletme gerilim sınırlarını ne ölçüde artırdığına bakılıp, sürekli hal güç akışı analizi yapılarak, sistemde

farklı bozucu etkiler olması durumunda sistemin güç akışı sonucu en kritik baraların bara gerilimlerinin ortalama değerleri SVC bağlı durumda 0.986 p.u., STATCOM bağlı durumda ise 0.990 p.u. olmuştur. Gerilim seviyelerinde önemli derecede düzelmeler meydana gelmiş olup gerilim değerleri 1p.u. değerine yakınsamış, gerilim kararlılığının değişimi gösterilmiştir (Şekil 4.21, Şekil 4.22). STATCOM kontrolörlerinin SVC cihazlarından daha iyi performans gösterdiği ve işletme gerilimlerini daha kararlı tuttukları görülmüştür. Gerilim seviyesi işletme limit birim değerlere ulaşmıştır. STATCOM kontrolörleri ile aktif ve reaktif güç transferlerinin daha verimli sağladığı, reaktif güç kompanzasyonunun daha hızlı sağladığı, reaktif yüklerde sistemi daha kararlı tutabildiği görülmektedir. SVC kontrolörlerine göre gerilim çökmesine, bara gerilimi değerinin ani yük değişimleri ve farklı yük karakterlerine rağmen istenen referans değerini sağlayabildiği görülmüştür. STATCOM' un bu işlemi SVC cihazlarından çok daha hızlı ve daha istikrarlı bir şekilde otomatik olarak gerçekleştirdiği ve böylece kayıpları en aza indirdiği, modellenmiş iletim sisteminin çalışma sınırlarını artırdığı görülmektedir. FACTS cihazların gerilim salınımlarında güç sistemi performansını artırdığı, ayrıca gerilimde meydana gelen dalgalanmanın sönümlenerek sistemin kararlı hale geçtiği gözlemlenmiş olup gerilim osilasyonlarının giderilmesine karşı etkileri de değerlendirilmiştir.



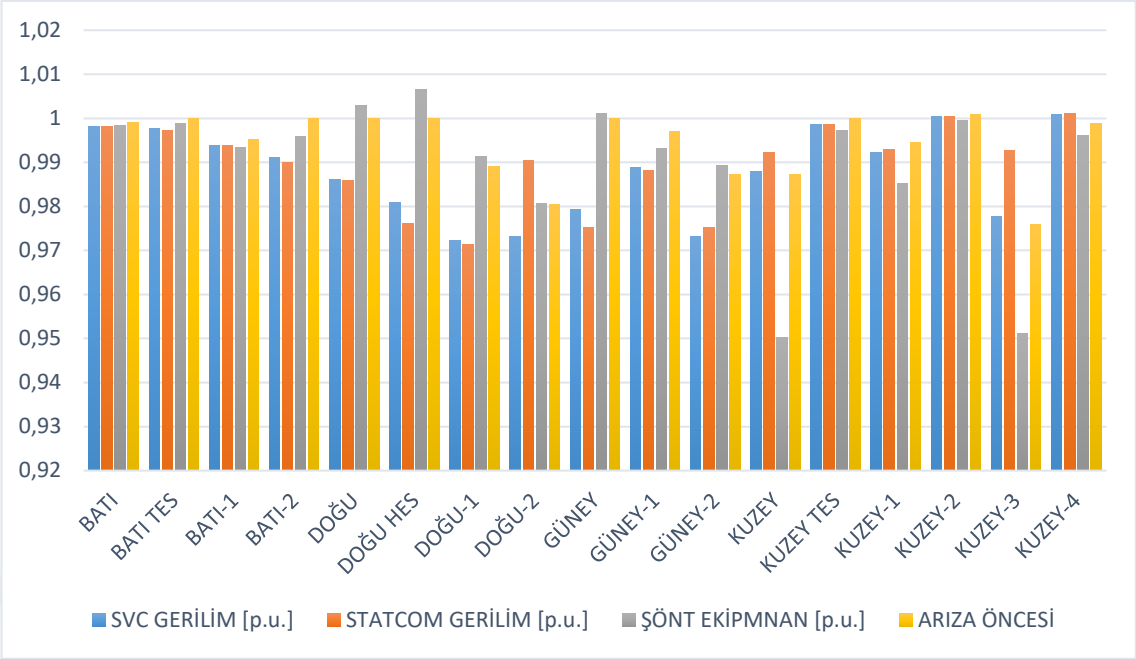
Şekil 4.23. SVC bağlı durumda 3 faz kısa devre sonrası kritik bara gerilimleri



Şekil 4.24. STATCOM bağlı durumda 3 faz kısa devre sonrası kritik bara gerilimleri

Güç sisteminde gerilim stabilitesi SVC ve STATCOM denetleyicilerinin kullanımı ile sağlanmıştır. Sistemin aşırı yüklenmesi veya arızası durumunda gerilim üzerindeki dalgalanmalar analiz edilmiş ve enerji iletim modeli için baraların gerilim kararlılık değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.23, Şekil 4.24). SVC kontrolörlerinin optimal konumlandırılmaları ile gerilim profilinin kademeli olarak düzeldiği tespit edilmiştir. STATCOM kontrolörleri sürekli güç akışı sonucunda konumlandırıldığında, gerilim seviyelerinin birim değer aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

Bara gerilimleri, güç sistemi arıza hatalarından sonra şönt ekipman bankları, SVC ve STATCOM kontrolörleri kullanılarak elde edilmiş, güç sistemi baralarının gerilim seviyesi gösterilmiştir. Sonuçlardan görülebileceği üzere, optimizasyon öncesi bara gerilim değerlerinin oldukça düşük ve işletme limitlerine yakın olduğu görülmektedir. STATCOM kontrolörleri, işletme gerilimini SVC kontrolörleri ve şönt ekipman bankalarından çok daha iyi nominal değerlere yaklaştırmaktadır. Bara gerilimlerinin STATCOM kontrolörleri kullanımı durumunda, arıza ve hatalardan daha az etkilendiği görülmüştür. Simülasyon sonuçlarından FACTS cihazların optimizasyon sonrası belirlenen noktalara yerleştirilmesi ile gerilim seviyesinin geliştirildiği gözlemlenmiş ve gerilim seviyelerinin çoğu baralarda birim değere (1p.u.) ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25. 3 faz kısa devre sonrası güç sistemi bara gerilim değerleri

Gerilim kararlılığı analizi, güç sistemindeki en çok reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duyan alanı belirlemek için yapılmaktadır. Simülasyon sonuçları, güç sisteminin çok fazla yük bulunması nedeniyle, reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

SVC ve STATCOM kontrolörlerinin aktif ve reaktif güce katkıları arşatırılmış ve enerji iletim hatların arızalanması durumunda, sistemin yükleme sınırlarını ne ölçüde artırdığı incelenmiştir. Arıza durumunda yük akışı çalışması yapılmış, aktif ve reaktif güç akışının ve iletim hattındaki toplam iletim kaybı gibi kritik güç sistemi parametrelerinin etkileri hesaplanmıştır. Şönt ekipman bağlı iken toplam iletim kaybı, 21.622 MW, SVC kontrolörleri kullanımında toplam iletim kaybı 18.546 MW, STATCOM kontrolörleri kullanımında toplam 17.876 MW iletim kaybı meydana gelmiştir. SVC kullanımı ile toplam iletim kaybı % 16.57 düşürülürken, STATCOM ile %20.95 düşürülmüştür (Çizelge 4.10). Esnek bir çalışma yapısına sahip olan STATCOM kontrolörleri, kayıpları azaltmada SVC kontrolörlerinden daha etkili olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.10. FACTS cihazların optimizasyonu sonrası enerji iletim hattı kayıpları

Enerji İletim Hattı	ŞÖNT EKİPMAN		SVC		STATCOM	
	Kapasitif Kayıplar [MVAr]	**Hat Kayıpları [kW]**	**Kapasitif Kayıplar [MVAr]**	**Hat Kayıpları [kW]**	**Kapasitif Kayıplar [MVAr]**	**Hat Kayıpları [kW]**
SANAL HAT - DOĞU	5.2706	80.7046	5.09153	66.13751	5.09034	63.7116
BATI TES - GÜNEY-1	82.897	2208.91	82.4297	1821.135	82.3657	1741.32
BATI TES Harici Şebeke(1)	27.57	263.23	27.5225	227.116	27.5115	219.543
BATI-2 - KUZEY-1	125.593	117.858	125.85	40.79343	125.79	35.2392
BATI-BATI TES HAT1	84.8467	23.744	84.73	14.95522	84.7014	13.4972
BATI-BATI TES HAT2	102.306	23.1721	102.165	14.59497	102.131	13.1721
BATI-BATI-1 HAT	0.57661	0.12563	0.5773	0.153041	0.57731	0.15573
BATI-BATI-1 HAT_a	94.0628	8.06949	94.0952	5.903159	94.0895	5.68025
BATI-Harici Şebeke(1)	19.2093	114.607	19.2016	108.5452	19.1993	107.357
BATI-Harici Şebeke(2)	7.99005	246.314	7.98659	239.3637	7.98553	237.838
DOĞU - DOĞU-2	120.481	329.755	117.493	150.7827	119.595	95.7985
DOĞU - DOĞU-2 HAT_a	1.12898	2.03013	1.11142	1.436972	1.15143	1.26985
DOĞU HES - SANAL	101.946	1485.42	97.5997	1260.44	97.1389	1240.42
DOĞU-1 - DOĞU HES	52.8496	704.771	50.5195	645.0414	50.2185	638.21
DOĞU-1 - GÜNEY-2	14.8578	12.0549	14.359	10.15252	14.3518	32.6525
DOĞU-2 Harici Şebeke(1) HAT	75.4223	1972.09	74.6498	1740.093	75.9072	1537.36
GÜNEY- BATI-2 HAT1	0.70649	5.12427	0.70009	4.845703	0.69936	5.09841
GÜNEY- BATI-2 HAT1_a	16.9091	108.626	16.75	96.30132	16.7223	91.5457

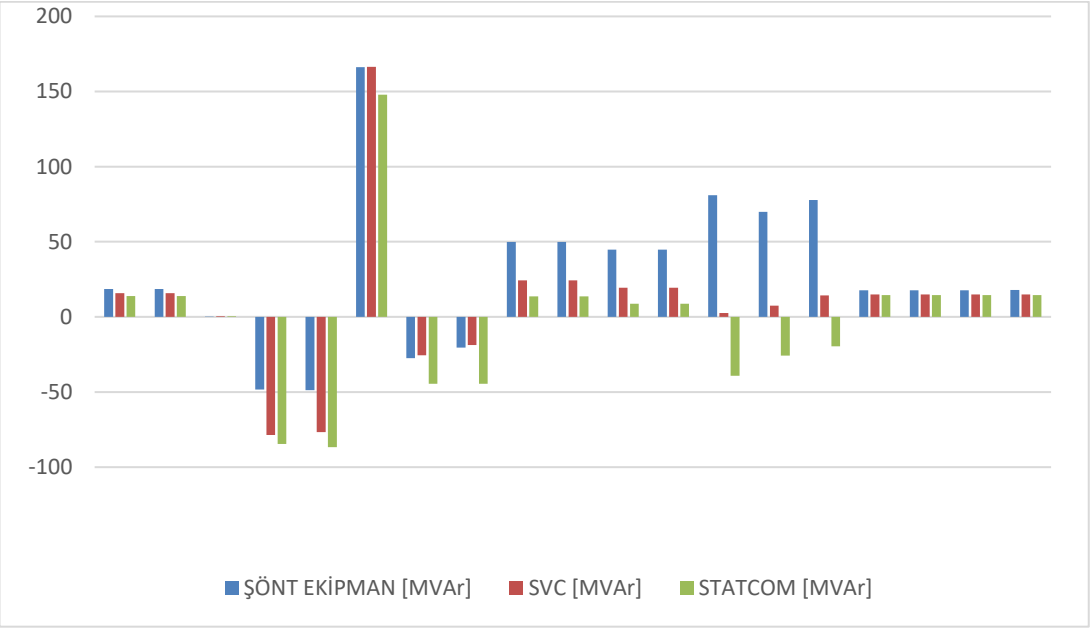
Çizelge 4.10' un devamı

GÜNEY- BATI-2 HAT2	17.0157	126.571	16.856	112.2833	16.8284	107.173
GÜNEY-DOĞU-1	23.1401	1708.94	22.2094	1553.13	22.0871	1508.75
GÜNEY-GÜNEY-1	107.927	2950.11	105.092	2180.728	104.613	2059.35
GÜNEY-GÜNEY-2	35.7394	1231.93	34.4279	1096.367	34.318	1080.84
KUZEY - KUZEY-1	63.6068	2079.64	64.1287	1959.378	64.1747	1924.01
KUZEY - KUZEY-3	0.52485	0.14737	0.56725	0.110638	0.57224	0.25942
KUZEY - KUZEY-3_a	51.0327	8.63924	54.6716	36.50585	55.6191	6.52655
KUZEY TES - BATI -1	72.4951	96.4943	72.6278	96.78813	72.6345	97.1132
KUZEY TES Harici Şebeke(1) HAT	33.1701	11.604	33.231	12.45058	33.2349	13.2502
KUZEY TES Harici Şebeke(2) HAT	25.3507	13.7821	25.3993	14.81695	25.4024	15.7491
KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_a	0.69522	2.67089	0.70499	2.713804	0.70589	2.67531
KUZEY-1 - KUZEY-2 HAT_b	150.006	509.997	151.175	455.2676	151.283	441.722
KUZEY-3 ŞEBEKE1	148.43	2532.28	154.642	2386.75	158.456	2392.57
KUZEY-4 ŞEBEKE1	22.9458	118.551	23.0843	122.4986	23.0941	122.37
KUZEY-4 ŞEBEKE2	34.2524	60.4205	34.4462	61.4552	34.4594	61.5704
KUZEY-4 ŞEBEKE3	33.4792	64.0018	33.676	65.48364	33.6897	65.4632
KUZEY-DOĞU HES	0	0	0	0	0	0
KUZEY-GÜNEY HAT	0	0	0	0	0	0
KUZEY-KUZEY-1	102.911	483.443	107.674	250.1545	108.208	245.059
KUZEY-KUZEY-1 HAT_a	0.26318	0.60779	0.28445	0.977459	0.28692	0.86447

Çizelge 4.10' un devamı

BATI TES Harici Şebeke(2)	24.2872	294.763	24.2445	256.8083	24.2346	248.689
KUZEY - KUZEY-4	0.52641	3.44711	0.569	5.01407	0.57394	4.73202
KUZEY - KUZEY-4_a	0.57825	3.37478	0.58381	4.56536	0.58414	4.70567
KUZEY - KUZEY-4_b	0.52664	7.15173	0.56925	4.991859	0.57418	4.71085
KUZEY - KUZEY-4_c	188.46	1228.46	196.678	1049.074	197.574	1020.37
KUZEY - KUZEY-4_d	0.52698	7.27455	0.56951	5.076954	0.57443	4.79096

Simülasyon çalışmasında, hat arızalarının generatör yüklerinde kritik artışlara neden olduğu tespit edilmiş olup meydana gelen bu aşırı yüklenmelerin reaktif güç yükleri, şönt ekipman bankları, SVC ve STATCOM kontrolörleri kullanılarak azaltıldığı görülmüştür. Hat arızalarından sonra generatörlerin şönt ekipman bankları, SVC ve STATCOM kontrolörleri için güç şebekesinin hat arızalarından önce ve sonra en düşük reaktif güç gereksiniminin STATCOM kontrolörleri kullanıldığında meydana geldiği görülmüştür. Generatörlerin rotor açısı ve rotor hızı salınımları incelendiğinde, generatör gerilim stabilitesini artırdığı ve güç sisteminin güvenilirliğini ve kapasitesini artırdığı görülmüştür. STATCOM kontrolörleri kullanımı ile güç sistemine endüktif ve kapasitif güç verilerek sistemin daha kararlı çalışması sağlanmıştır. Aktif ve reaktif güç yüklerinde ve reaktif güç kayıplarında şönt ekipman bankları, SVC ve STATCOM kontrolörleri gibi reaktif kompanzasyon cihazlarının karşılaştırması gösterilmiştir (Şekil 4.26).

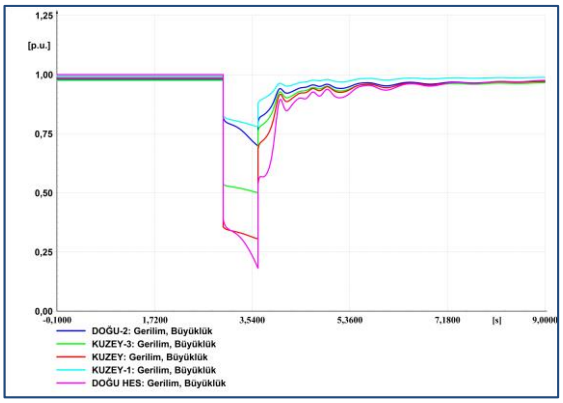


Şekil 4.26. Güç sisteminde 3 faz kısa devre sonrası generatör reaktif üretiminin şönt ekipman, SVC ve STATCOM kullanımı durumlarının karşılaştırılması

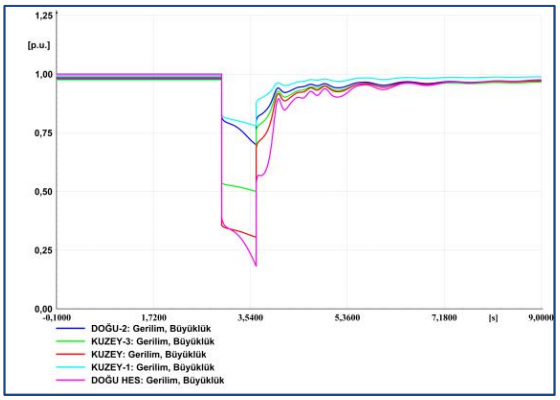
İşletme senaryosu dahilinde gerçekleştirilen analizler sonucunda, sürekli hal ve arıza durumlarında FACTS cihazlarının gerilim regülasyonu ve sistem kararlılığı açısından diğer reaktif güç ekipmanlarına göre çok daha yüksek performans gösterdikleri görülmektedir.

4.2.3.2. İşletme senaryosu-2

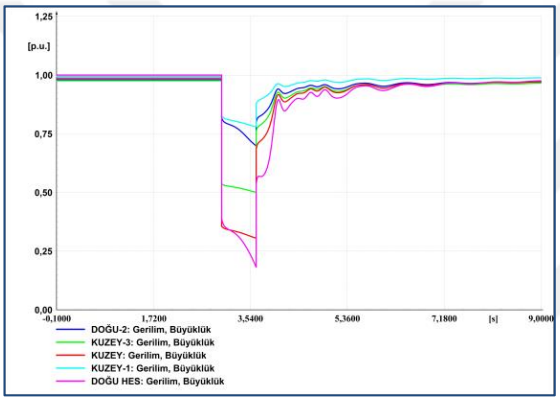
Modellenen güç sisteminde Kuzey-Doğu Hes arasındaki hatta kısa devre tekrar kapama arıza senaryosu oluşturulmuştur. Toplam simülasyon süresi içerisinde 3. saniyede Kuzey – Doğu Hes baralar arasındaki hat ayrı ayrı sırası ile 3 faz kısa devre, 2 faz kısa devre, 1 faz toprak kısa devre, 2 faz toprak kısa devre arızaları meydana gelmiş 3.65 saniyede kısa devre arızası temizlenmiştir. Kısa devre arızasından dolayı hattın arıza temizleme durumları, şönt ekipman bankları, SVC ve STATCOM kontrolörleri ile güç şebekesinin hat kısa devre arızalarından önce ve sonra güç sistemi gerilim kararlılığı durumları için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş, kısa devre arıza durumunda da enerji iletim sistemi şebeke modelinin gerilim değerleri incelenmiştir. Güç sistemi kısa devre arızası için gerilim düşümü analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçların sistemin güvenilirliğini ve kararlılığını arttırma da ve kısa devre arıza ve donanım hatalarının etkilerini sınırlama üzerindeki etkinlikleri araştırılmıştır. Gerilimde meydana gelen dalgalanmanın sönümlenerek sistemin kararlı hale geçtiği gözlemlenmiştir. SVC ve STATCOM kontrolörleri, sistemin gerilim çökmelerine karşı güvenilirliğini önemli ölçüde artırmıştır. STATCOM kontrolörleri ile güç sistemine endüktif ve kapasitif güç verilerek sistemin daha kararlı çalışması sağlanmış olup kritik baralar için istenen referans (işletme gerilim limitleri) gerilim değerinin sağlandığı görülmüştür. Güç sistemi gerilim düşümlerinde gerilim alt aralığında 0,95p.u. ile1.0p.u. arasında sistemi dengede tutabilmiştir. Şebeke üzerinde gerçekleşen 9 saniyelik bir arıza durumunda, STATCOM kontrolörleri bulunduğu baralarda ani reaktif güç değişimlerine ve gerilim düşümlerine simülasyon süresinin %1 inden daha düşük bir sürede 340 mili saniyede anahtarlama yaparak cevap vererek ve simülasyon süresinin %5 ’inden daha düşük bir sürede sistemi kararlı hale getirmiştir (Şekil 4.27- Şekil 4.38).



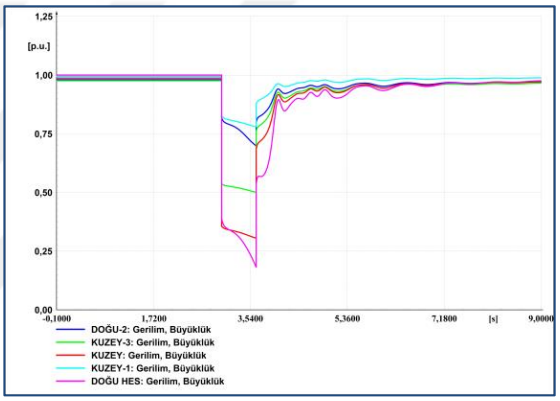
Şekil 4.27. Şönt ekipman bağlı durumda 3 faz kısa devre kritik bara gerilimleri



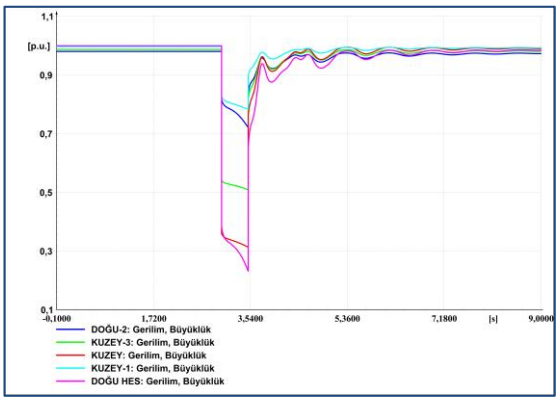
Şekil 4.30. Şönt ekipman bağlı durumda 2 faz kısa devre kritik bara gerilimleri



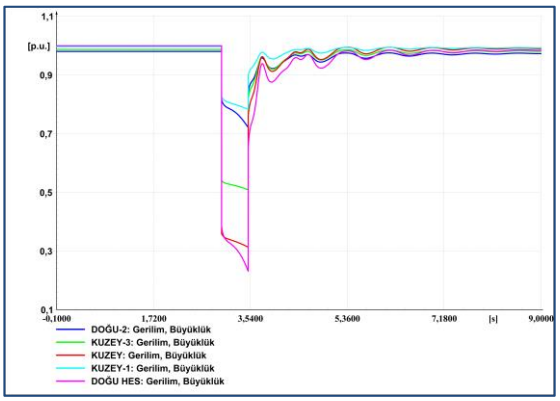
Şekil 4.28. Şönt ekipman bağlı durumda faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri



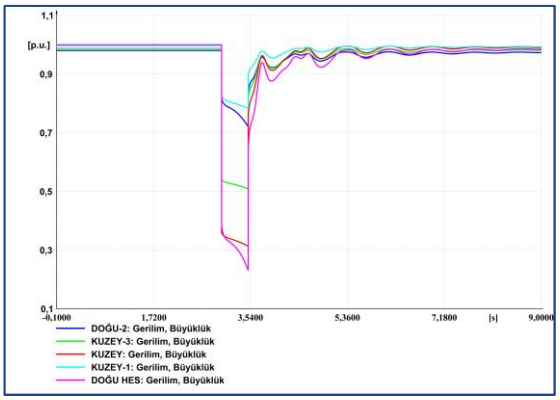
Şekil 4.31. Şönt ekipman bağlı durumda 2 faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri



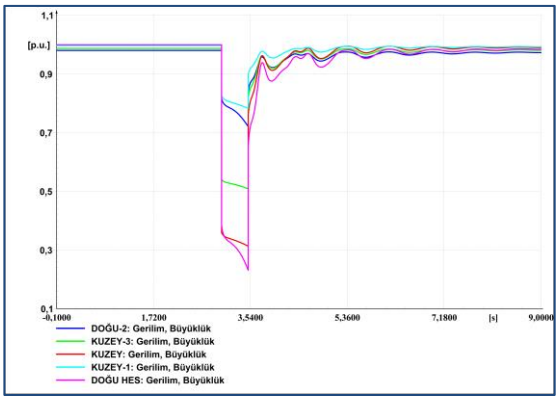
Şekil 4.29. SVC bağlı durumda 3 faz kısa devre kritik bara gerilimleri



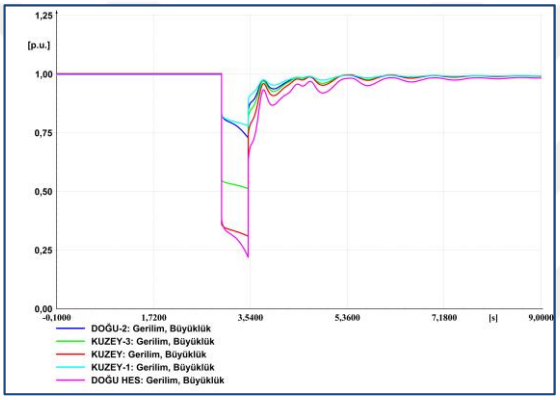
Şekil 4.32. SVC bağlı durumda 2 faz kısa devre kritik bara gerilimleri



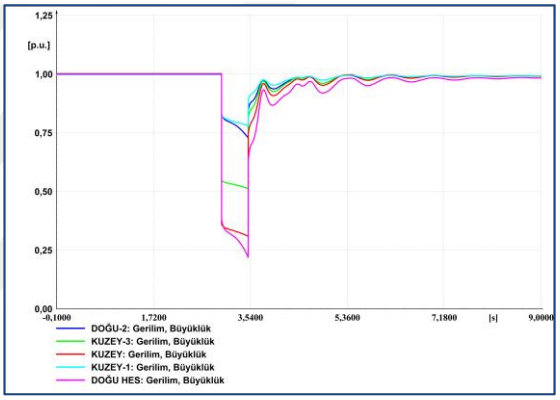
Şekil 4.33. SVC bağlı durumda faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri



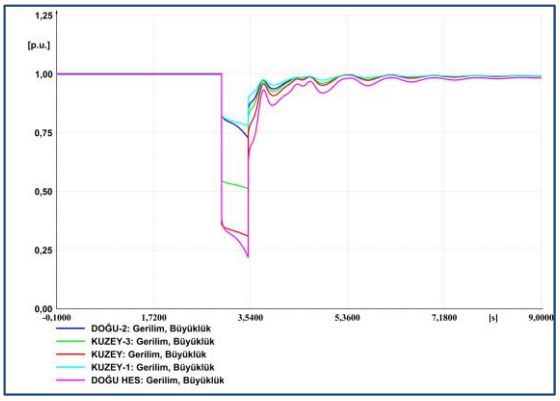
Şekil 4.36. SVC bağlı durumda 2 faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri



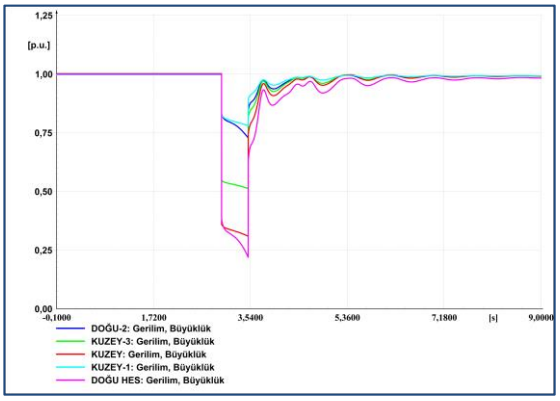
Şekil 4.34. STATCOM bağlı durumda 3 faz kısa devre kritik bara gerilimleri



Şekil 4.37. STATCOM bağlı durumda 2 faz kısa devre kritik bara gerilimleri



Şekil 4.35. STATCOM bağlı durumda faz toprak kısa devre kritik bara gerilimleri

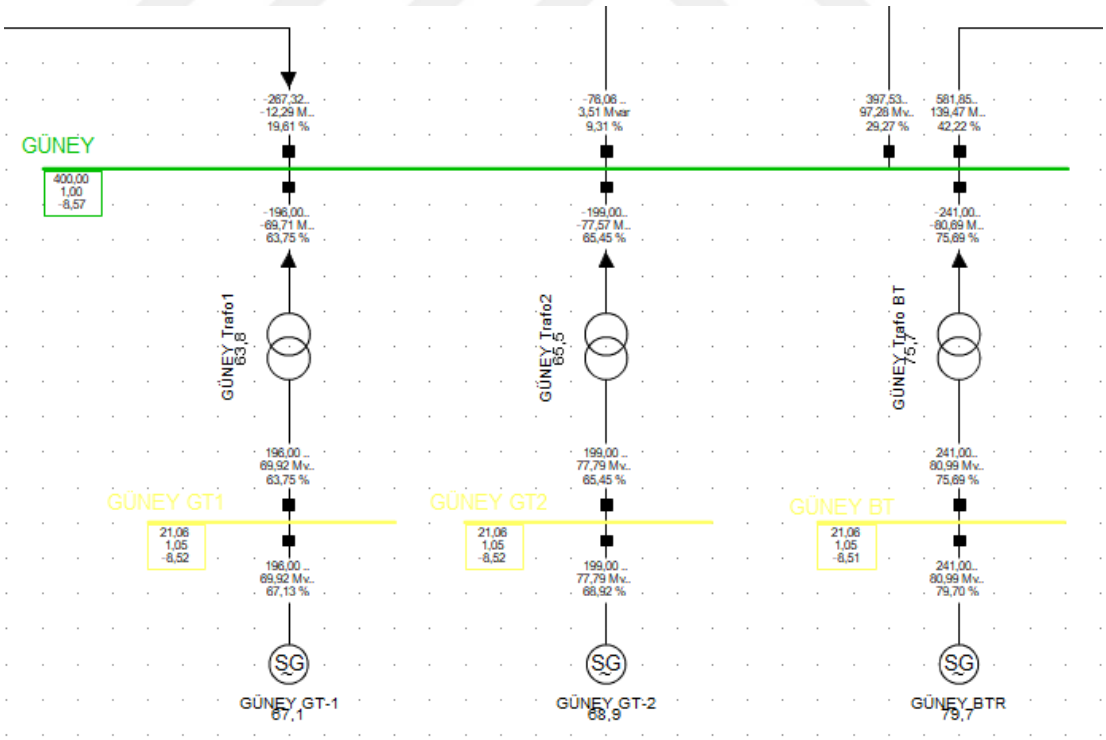


Şekil 4.38. STATCOM bağlı durumda 2 faz toprak kısa devre kritik bara

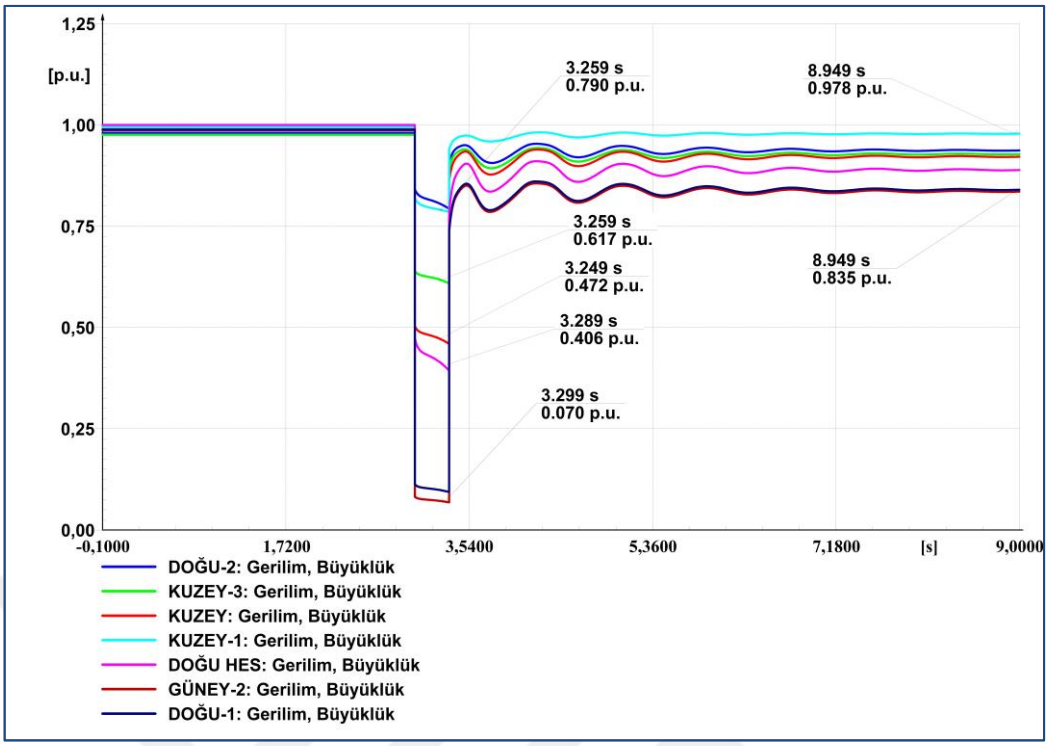
Güç sistemi simülasyon çalışmaları, ortaya çıkabilecek en ciddi sistem arızasının, bir bağlantı devre kesicisinin açılamadığı üç fazlı bir kısa devre arızası olduğunu ortaya koymaktadır. STATCOM kontrolörleri çok hızlı tepki süresine sahip olduğu reaktif güç çıkışını toplamda -155 MVAr dan +100 MVAr 'a çıkarmak üzere ayarlanmıştır. STATCOM kontrolörlerinin tepki süresi 5 milisaniyeden az olduğu göz önüne alındığında, reaktif güç çıkışını yaklaşık 15 msn 'de -100 MVAr 'dan +100 MVAr 'a çıkabildiği görülmüştür. STATCOM kontrolörleri, benzer bir tepki derecelendirmeye sahip bir SVC kontrolörlerine kıyasla, tipik olarak 20 msn aralığında daha hızlı bir geçici ve dinamik tepkiye sahiptirler.

4.2.3.3. İşletme senaryosu-3

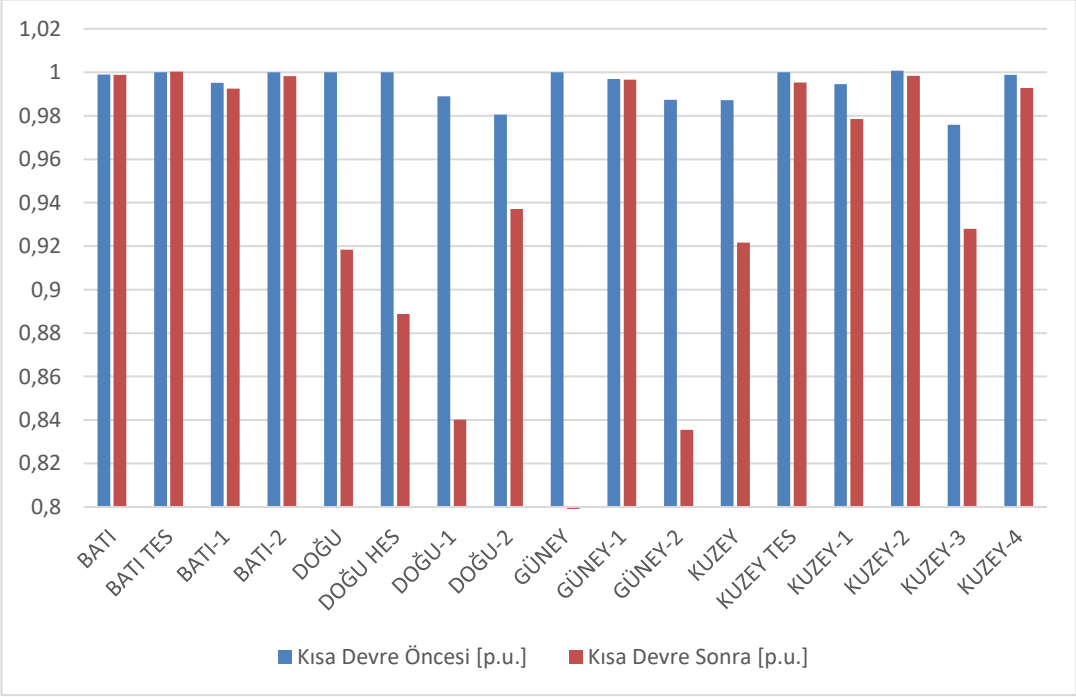
Modellenen güç sisteminde Güney bara da meydana gelecek kısa devre arıza senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan arıza senaryosunda Güney bara enerjisiz kalmış olup, generatörlerde toplamda 621 MW ve 84 MVAr üretim kaybı yaşanmıştır (Şekil 4.39). Toplam simülasyon süresi içerisinde 3. saniyede Güney bara kısa devre, arızası meydana gelmiş ve 3.34 saniyede kısa devre arızası sebebi ile baraya ait tüm kesici hücreleri açmıştır. Kısa devre arızasından dolayı şönt ekipman bankları, SVC ve STATCOM kontrolörleri ile güç şebekesinin kısa devre arızasından önce ve sonra gerilim kararlılığı durumları için simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve bara kısa devre arıza durumunda enerji iletim sistemi şebeke modelinin gerilim değerleri incelenmiştir (Ek-4).



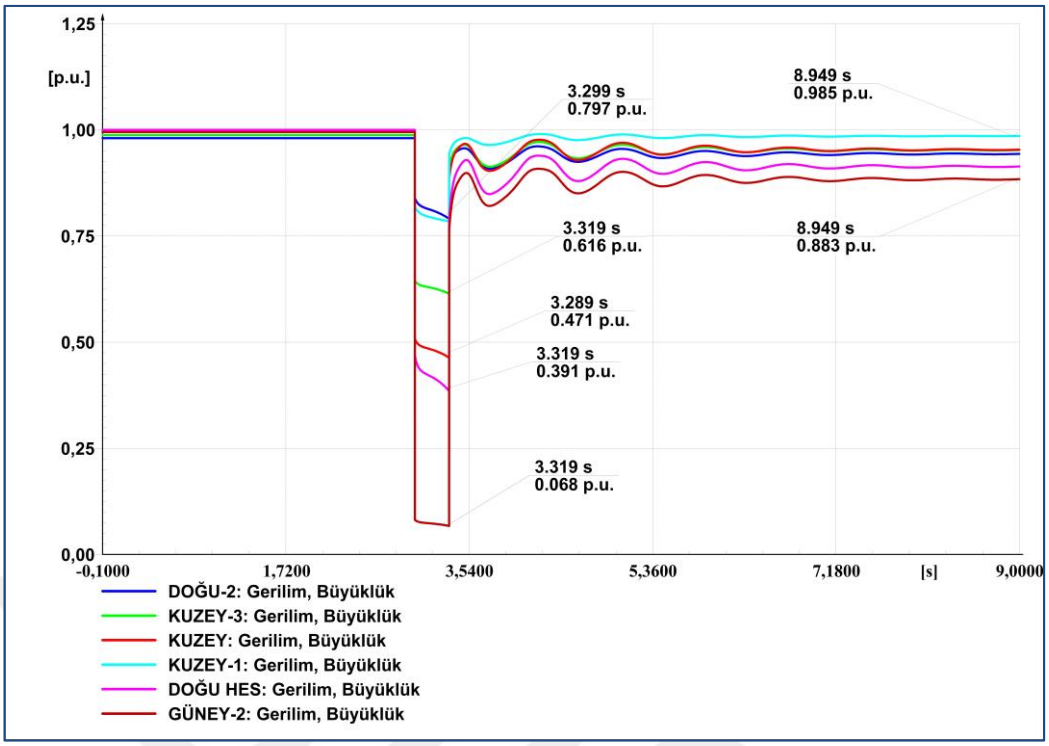
Şekil 4.39. Modellenen güç sisteminde güney bara kısa devre arızası öncesi yük akış durumu



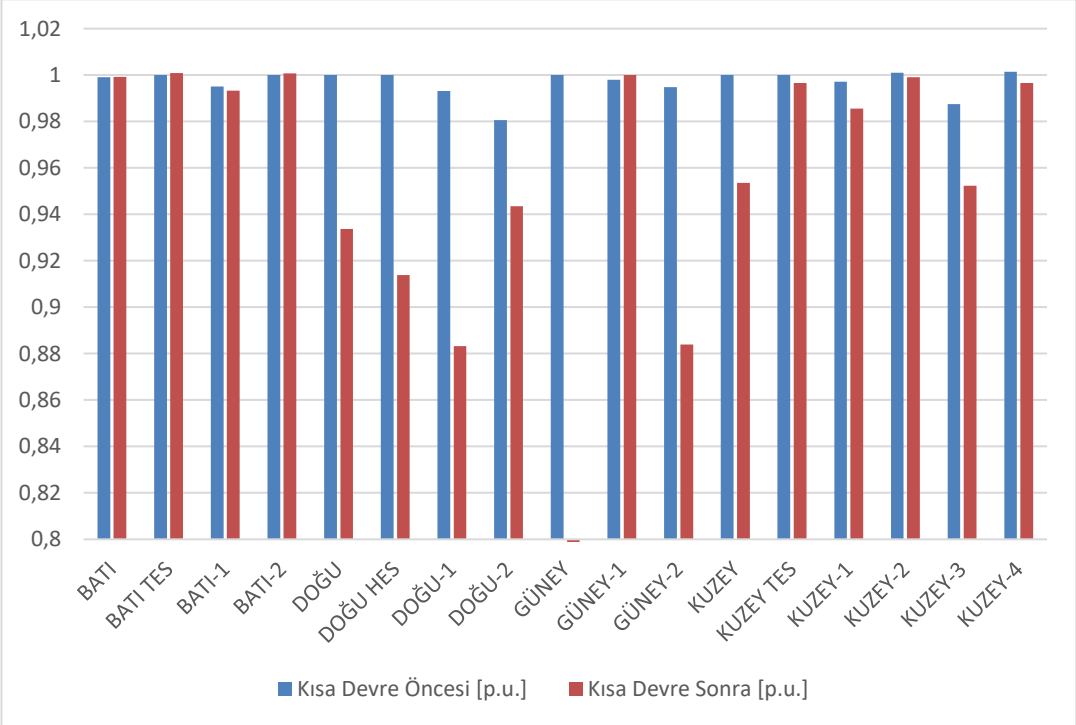
Şekil 4.40. Geçici hal (transient) şönt ekipman bankları bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası kritik bara gerilim salınımları



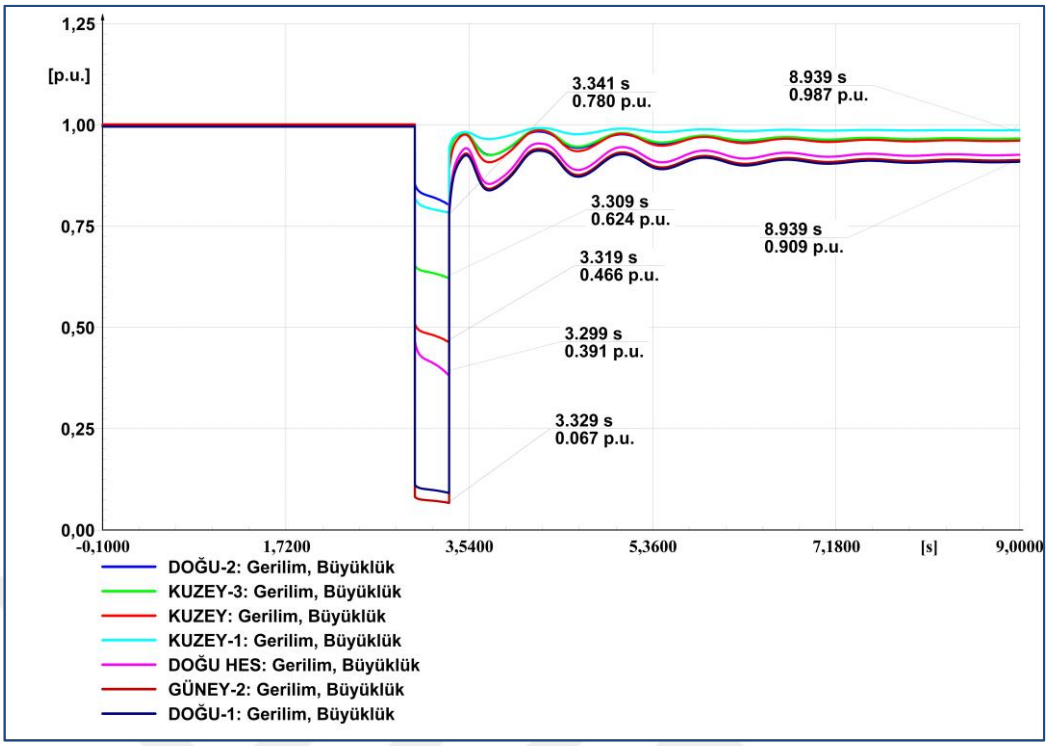
Şekil 4.41. Sürekli hal (steady-state) şönt ekipman bankları bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası bara gerilimleri



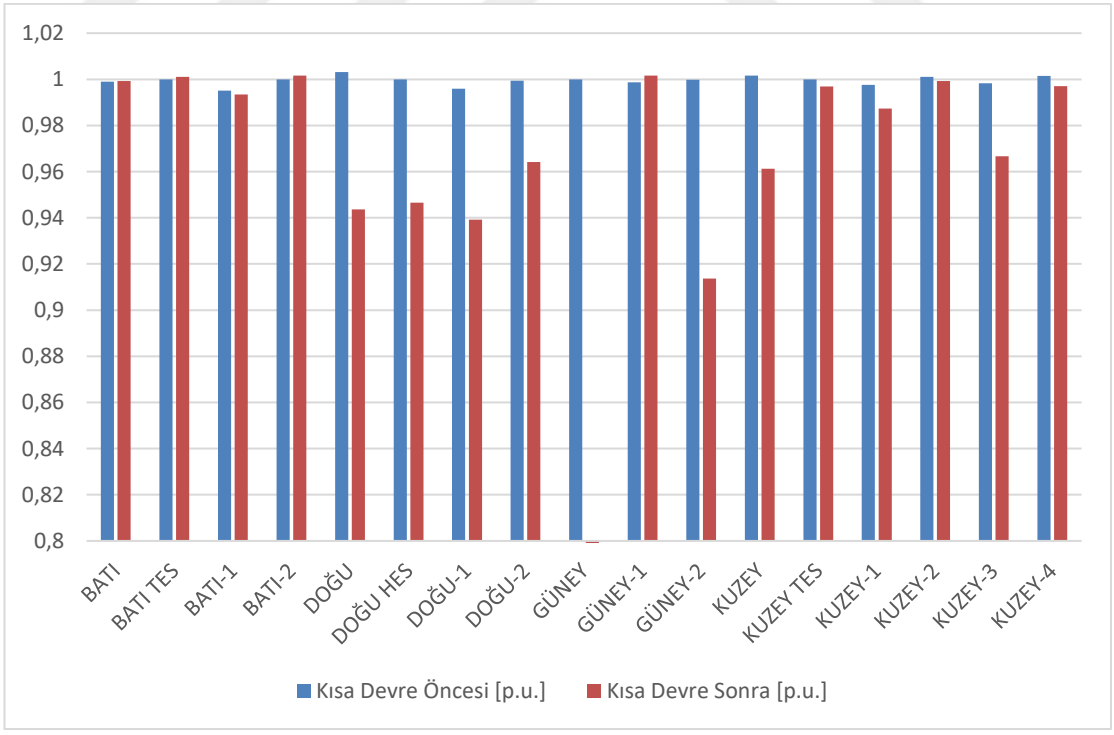
Şekil 4.42. Sürekli hal (steady-state) SVC bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası kritik bara gerilim salınımları



Şekil 4.43. Sürekli hal (steady-state) SVC bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası bara gerilimleri

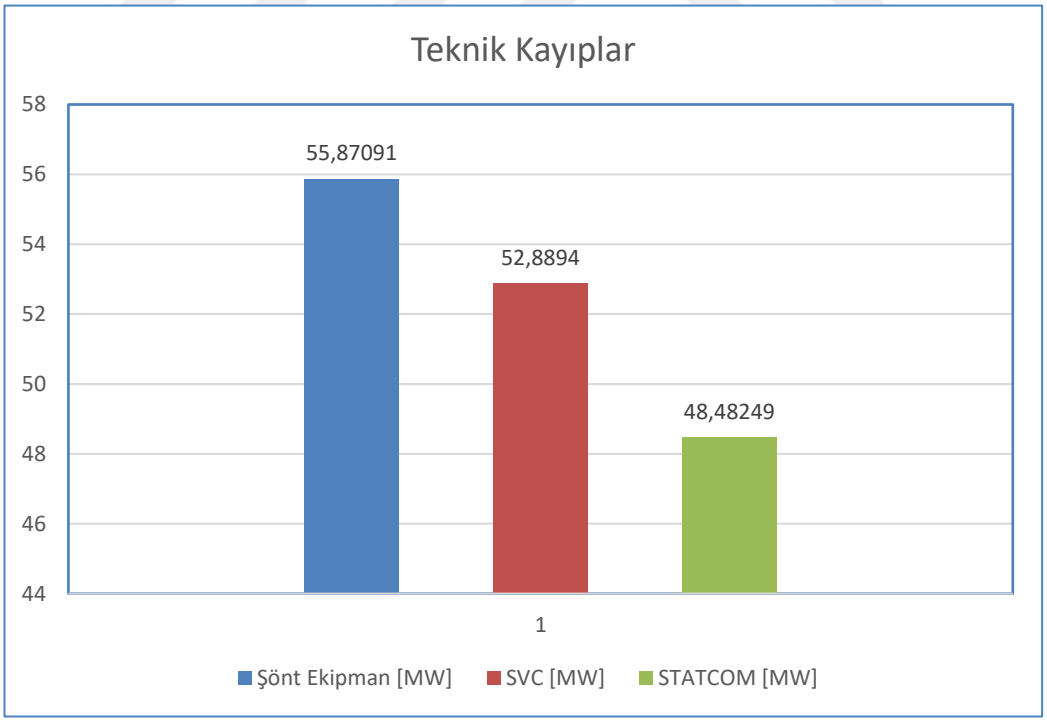


Şekil 4.44. Sürekli hal (steady-state) STATCOM bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası kritik bara gerilim salınımları



Şekil 4.45. Sürekli hal (steady-state) STATCOM bağlı durumdayken meydana gelen güney bara kısa devre arızası sonrası bara gerilimleri

Bara kısa devre sonrasında güç sisteminde meydana gelen gerilim düşümleri incelenmiştir. Gerilimde meydana gelen dalgalanmanın sönümlenerek sistemin kararlı hale kısmen geçtiği ve şönt ekipman bağlı iken bara gerilim seviyelerinin en düşük 0.83p.u. değerlerine düşerek işletme limitleri altında kaldığı görülmüştür (Şekil 4.40, Şekil 4.41). SVC ve STATCOM kontrolörleri, kullanıldığında sistemin gerilim çökmelerine karşı güvenilirliği önemli ölçüde artarak ile en düşük 0.90p.u. ve 0.93p.u. değerlerinde oldukları görülmüştür (Şekil 4.42, Şekil 4.44). STATCOM kontrolörleri ile güç sisteminin daha kararlı çalışması sağlanmıştır kritik baralar için istenen referans (işletme gerilim limitleri) gerilim değerinin sağlandığı görülmüştür. Güç sistemi gerilim düşümlerinde gerilim alt aralığında 0,95p.u. ile1.0p.u. arasında sistemi dengede tutmaktadır. Optimizasyon çalışması sonucunda ihtiyaç duyulan baralara paralel bağlanan SVC ve STATCOM kontrolörleri ilave edilerek, gerilim regülasyonunun sağlanması sonucu sistemin gerilim çökmesine uğradığı noktalar tespit edilip FACTS cihazlarının bu noktadaki etkinliğinin karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan SVC ve STATCOM kontrolörlerinin, gerilim çökmesi olayına karşı sistemin güvenilirliğini artırdığı tespit edilmiştir. STATCOM kontrolörlerinin reaktif yük değerinde sistemin en kararlı çalıştığı, aktif ve reaktif güç değerlerinin en iyi güç transferi sağladığı, gerekli reaktif güç kompanzasyonunun hızlı bir şekilde sağlandığı ve SVC kontrolörlerine göre gerilim çökmesine, bara gerilimi değerinin ani yük değişimleri ve farklı hat arıza karakterlerine rağmen istenen referans değerini aldıkları görülmüştür. Gerilim salınımlarını bastırarak, generatör gerilim kararlılığını iyileştirmiş olup sistemin güvenilirlik ve kapasitesini artırmıştır. Sonuç olarak modellenen sisteme endüktif ve kapasitif enerji verilerek, sistemin çok daha kararlı çalışması sağlanmıştır.



Şekil 4.46. Güç sisteminde reaktif kompanzasyon şönt ekipman, SVC ve STATCOM kontrolörleri vasıtasıyla gerçekleştirilen reaktif güç kompanzasyonu sonucu düşürülen teknik kayıpların karşılaştırılması

Simülasyon çalışmaları tüm ilgili (N-1) durumu göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. FACTS cihazlarının şönt ekipmanlarına göre iletim, trafo ve ek ekipman bağlantı teknik kayıpları karşılaştırılmıştır. STATCOM kontrolörlerinin SVC' ye göre iletim kayıplarını daha etkin bir şekilde minimize ederek mevcut iletim sisteminin çalışma sınırlarını genişlettiği görülmüştür. Enerji iletim sistemindeki 55.87 MWh olan toplam teknik kayıpları SVC kontrolörleri 52.88 MWh' e ve STATCOM kontrolörleri ile 48.48 MWh' e düşürülmüştür. Teknik Kayıpların azaltılmasında en yüksek performansı kayıpları %13.22 azaltarak STATCOM kontrolörünün olduğu tespit edilmiştir. SVC denetleyicileri ise teknik kayıpların % 5.33 azaltıldığı görülmektedir (Şekil 4.45).

FACTS cihazları özellikle uzu mesafeli iletim hatlarında güç kayıpları azaltarak enerji iletim kapasitesini artırmakta ve şebekeyi daha kontrollü hale getirerek elektrik kesintisi riskini en aza indirgemektedir.

4.3 FACTS Cihazlarında Yatırım Maliyet Analizi

FACTS cihazlarının sağlamış oldukları avantajların yanında en büyük dezavantajı maliyetlerinin çok yüksek olmasıdır ve bu nedenle bu tür kontrolörlerin kurulması için yatırım maliyeti, cihazların ekonomik uygulanabilirliğini açısından analiz edilmiştir. Toplam maliyet, kontrolör cihazlarının primer ve sekonder teçhizat olarak sabit ve kontrol kısmının büyüklüğüne de bağlıdır. FACTS cihazları ekipman maliyeti toplam proje maliyetlerinin yarısını oluşturmaktadır. İnşaat yapı işleri, cihaz kurulumu, devreye alma-test, sigorta, mühendislik ve proje yönetimi gibi diğer maliyetler, proje maliyetinin diğer yarısını oluşturmaktadır. FACTS cihazlarının kullanılmasında üstünlüklerine bakıldığında, enerji iletim kapasitesini geliştirme, planlanan diğer yatırımların iptali ya da ertelenmesi veya azaltılması olarak da düşünülebilir. FACTS cihazlarına yapılan yatırım, yalnızca kullanılan kontrolör cihazların maliyetlerini değil, aynı zamanda FACTS bileşenleri, trafo binaları, coğrafi bölge zorlukları, arazi, yardımcı tesis, ekipman ve kontrol üniteleri, mühendislik ve araştırma gibi sabit maliyetleri de içerdiği görülmüştür (Habur ve O'Leary 2004).

FACTS cihazlarının maliyeti iki ana bileşene sahiptir: ilk kurulum maliyeti ve işletme ve bakım maliyetidir. İlk kurulum maliyeti, cihazların kontrolör maliyetini teslimat ve kurulum ücretlerini ve satış vergisini içerir. Toplam kurulum maliyeti genellikle FACTS cihazlarının nominal elektrik kapasitesinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Diğer maliyet bileşeni, işletme ve bakım maliyeti, sistemin ömrü boyunca süre gelen işletme maliyetleri bakım, servis, sigorta ve vergiler harçlarını içermektedir. Yıllık faaliyet yaklaşık tahmini ilk sistem maliyetinin %5 ile %10 ' dur. FACTS cihazı için tipik bir ilk kurulum maliyeti yapısı şu şekilde ortaya konabilir donanım, %55; mühendislik ve proje yönetimi, %15; sivil işleri, %12; kurulum, %10; sigorta, %4; ve devreye alma, %4 olarak ortaya konulabilir (Grünbaum vd. 2000).

Şönt ekipmanlar FACTS cihazlara göre nispeten ucuzdur ve bunları güç sisteminde ihtiyaç duyuldukları noktalarda kullanmak gerilim stabilitesini arttırır. Bununla birlikte, gerilim düzenlemeleri ile büyüyen güç sistemleri için çok yetersiz ve istikrarlı bir çalışma noktasına ulaşılamaz. Ayrıca, bir şönt ekipman tarafından verilen reaktif güç, terminal gerilimin karesi ile orantılı olacağından gerilim düşümü koşullarında reaktif desteği düşeceğinden, güç sisteminde gerilim problemini daha çok arttıracaktır.

Çizelge 4.11. FACTS cihazlarının yatırım maliyetleri

	Maliyet ($/MVAr)			
Tip	**100MVAr**	**200MVAr**	**300MVAr**	**400MVAr**
Şönt Ekipman	20	16	12	10
SVC	100	80	70	60
STATCOM	130	115	110	100

Optimizasyonun temel amacı, FACTS cihazlarının kurulum maliyetlerini ve güç sistemlerinde güç kayıplarını en aza indirmek ve sistem yük kapasitesini arttırmaktır. FACTS cihazların kurulum maliyeti Siemens veri tabanından alınmıştır (Cai 2004).

FACTS cihazlarının en uygun kurulum maliyeti,

$$IC = C \times s \tag{4.1}$$

IC: minimum kurulum maliyeti,
C: kurulum maliyetinin fonksiyonu,
s: FACTS cihazlarının kapasitesi; ile hesaplanabilir.

SVC ve STATCOM kontrolörlerin kurulum maliyeti denklemleri;

$$C_{SVC} = 0.0003s^2 - 0.305s + 127.38 \tag{4.2}$$

$$C_{STATCOM} = 0.0008s^2 - 0.155s + 120 \tag{4.3}$$

Denklemlerde kullanılan "s" FACTS cihazlarının çalışma kapasitesi ve

$$s=|Q_2| - |Q_1| \tag{4.4}$$

Q_1: FACTS cihazlarını optimizasyon önce MVAr cinsinden iletim hattındaki reaktif güç,
Q_2: FACTS cihazını optimizasyon sonra MVAr cinsinden iletim hattındaki reaktif güç,
ile tanımlanmıştır (Tabatabaei vd. 2011).

Fayda açısından yeterli getirinin bir yatırım yapılmasından kaynaklanıp kaynaklanmadığını belirlemek için maliyet-fayda analizi yapılmalıdır. Bu net bugünkü değer (NPV) karar kuralı kullanılarak yapılır. Bu kural, hangi yatırım seçeneğinin dikkate alınanların en yüksek getirisini verdiğini belirlemeye yardımcı olmak için de kullanılabilir. NPV, bir yatırımın ekonomik değerinin bir ölçüsü olmuştur. Pozitif bir NPV, yatırımın verilen iskonto oranında ekonomik olarak faydalı olduğunu ve NPV ne kadar yüksek olursa, faydalar o kadar büyük olacak veya maliyetler o kadar düşük olacaktır. Bu nedenle, yatırımlar arasındaki seçim NPV 'ye göre yapılmalıdır. Maliyet-fayda analizi ile araştırılan senaryoların aralığını yansıtacak şekilde bir dizi NPV zaman hesaplanmalıdır. En iyi yatırımın hangisi olduğuna karar verirken finansal, sosyal ve çevresel değerlendirme sonuçlarını dikkate almak da önemli olacaktır (Harral vd. 2011). Net bugünkü değer, maliyetleri düşürdükten ve borcun geri ödenmesinden sonra bir

yatırım tarafından üretilen gelirdir. NPV, beklenen gelecekteki nakit akışlarının toplam bugünkü değeri ile yatırımın maliyeti eksi olarak verilir.

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+R)^t} \tag{4.5}$$

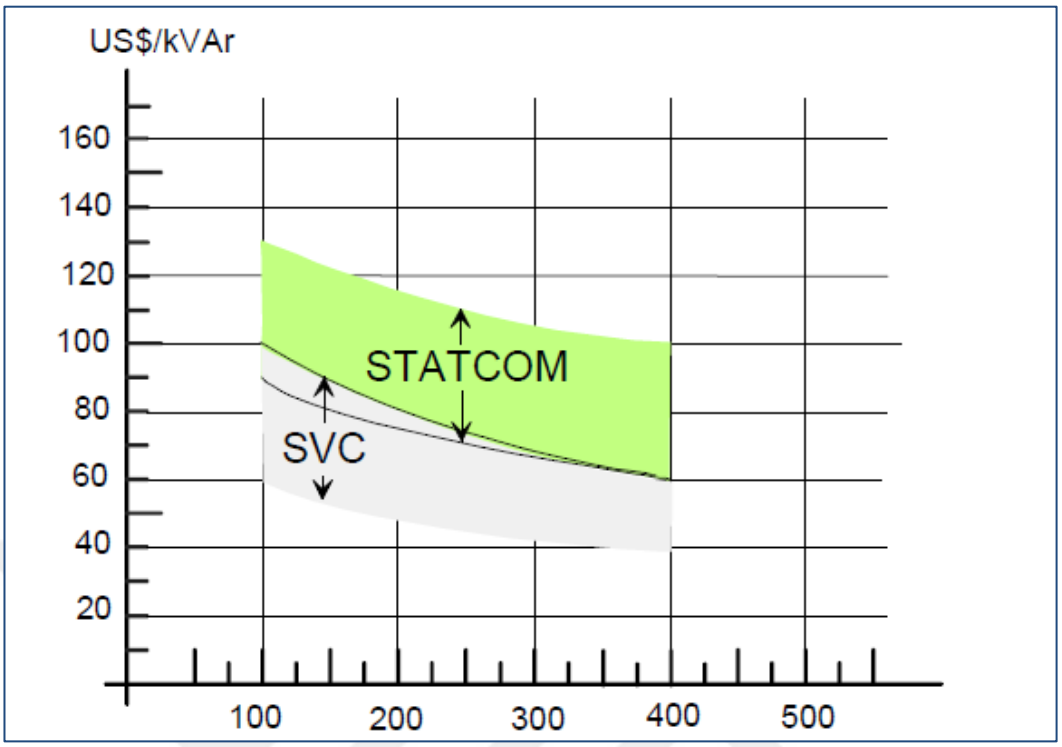
I_o: İlk yatırım,
CF_t : yıllık işletme nakit akışı
R: faiz oranı
n: proje ömrü (yıl)

Bu durumda yatırım tamamen bu yıl 0 üzerinde yapılır ve nakit akışları ilk yıldan başlar ve n yıl sürer.

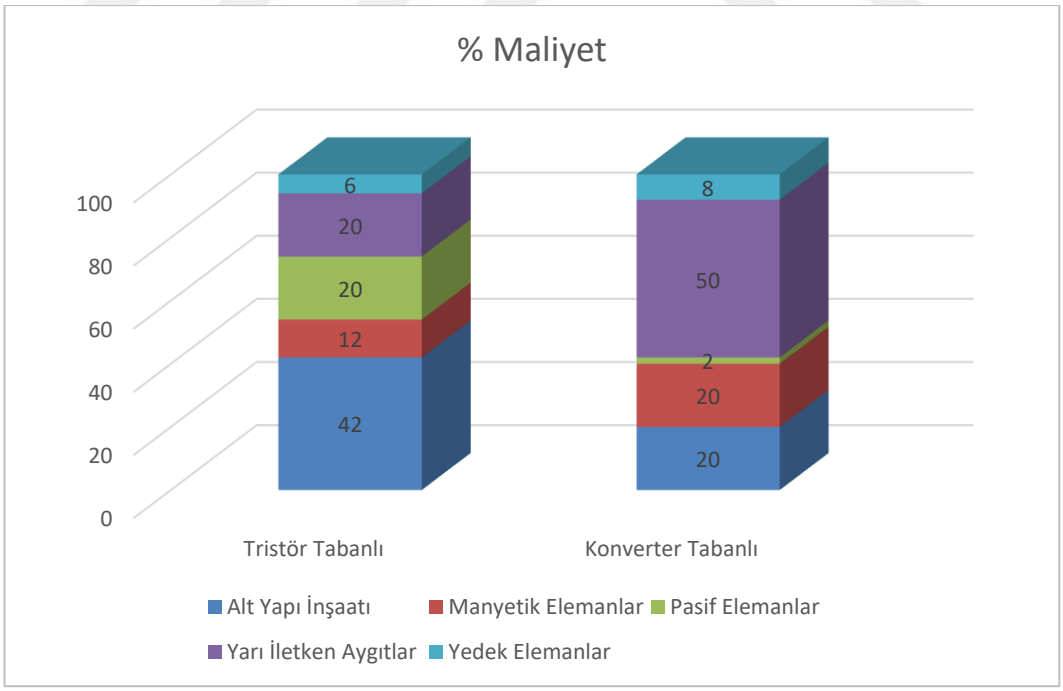
NPV pozitif ise, yani iskonto edilmiş nakit akışları yatırım maliyetlerini aşarsa, yatırım yapılmalıdır. İki veya daha fazla yatırımı karşılaştırırken, yatırımların eşit bir yıl aralığı için dikkate alınması durumunda etkili sonuçlar vermesine rağmen, NPV kriterinin en yaygın olanı olduğu belirtilmelidir. Daha sonra, bu koşullarda, daha fazla yatırım arasında en yüksek NPV değerine sahip olanı seçilmelidir (UCTE Union Coordination Transmission Electricity). NPV Avrupa liberal güç sistemine FACTS cihazların optimizasyonu tekno-ekonomik olarak değerlendirmek için kullanılır. FACTS cihazların optimizasyonundan kaynaklanan ekonomik faydaları değerlendirmek için, nakit gelirleri, ithal güç sisteminde daha ucuz bir enerji akışının artmasıyla elde edilen tasarruf olarak hesaplanır. Bu gelirler bu durumda ifade edilebilir (ETSO European Transmission System Operators). Çok düşük derecelendirmeler için maliyetler daha yüksek olabilir ve çok yüksek güç derecelendirmeleri için maliyetler belirtilenden daha düşük olabilir. Gösterilen toplam yatırım maliyetleri, vergiler ve harçlar hariç, açıklanan faktörlere bağlı olarak -%10 ile + %30 arasında değişebilir. Farklı ülkeler arasında önemli ölçüde farklılık gösteren vergi ve harçlar dahil olmak üzere, FACTS cihazları için toplam yatırım maliyetleri daha da değişebilir.

SVC ve STATCOM kontrolörleri için maliyet alanlarının alt limiti donanım maliyetleri, üst limiti ise alt yapı maliyetlerini de içeren toplam yatırım maliyetleri gösterilmiştir (Şekil 4.47). SVC ve STATCOM kontrolörleri için düşük güçlerde maliyet çok daha yüksek olurken, yüksek güç limit değerlerinde ise maliyetin çok daha düşüktür. FACTS cihazlarının geleneksel şönt ekipman donanıma göre oldukça maliyetli olduğu görülmüş fakat geleneksel şönt ekipman donanımında dinamik davranışları sınırlı olduğundan ve gerilim kararlılığında büyüyen güç sistemleri için çok yetersiz ve istikrarlı bir çalışma noktasına ulaşılamamıştır (Habur ve O'Leary 2004).

FACTS cihazlarının kurulumlarında tristör ve konverter dönüştürücü tabanlı sistemler için maliyet dağılımını analizleri şekil 4.48' de gösterilmektedir. Konverter dönüştürücü tabanlı kurulumlarda cihaz maliyeti toplam maliyetin %50'sinden fazladır (Tolbert vd. 2005). Bu kontrolör maliyetlerini düşürmek, FACTS cihazlarını kurulum aşamasında başlangıç ilk kurulum maliyet harcamalarını azaltacak daha ekonomik bir yapıya dönüştürecektir.



Şekil 4.47. SVC ve STATCOM için yatırım maliyetleri (Habur ve O'Leary 2004).



Şekil 4.48. FACTS cihazlarının maliyet dağılımı (Tolbert vd. 2005)

FACTS cihazları kontrolörleri, güç sistemlerimde görülen gerilim dalgalanmalarını, güç kararlılığı ve harmonik bozulmaları yanı sıra sabit durumdaki güç artışları, geçici ve dinamik kararlılık ve eş zamansız rezonans problemleri için dünya çapında kullanılmaktadır. Dünyadaki FACTS cihazların tasarım, yapım ve kurulum maliyetlerine bakıldığında;

ABB, Suudi Arabistan'da FACTS cihazları teknolojisini kurmak için 90 milyon$ değerinde anahtar teslim bir sözleşme imzalamıştır. Kurulum, 400 kV enerji iletim hattı koridorunun iletim kapasitesini %80 artıracağı düşünülmektedir. Riyad bölgesinde elektrik kesintilerinin önlenmesine yardımcı olacak ve hızla büyüyen güç sisteminin sermayeye maliyetli yeni iletim hatları veya enerji üretim tesisleri inşa etme ihtiyacını ortadan kaldıracaktır. Özellikle, ABB, Riyad'ı doğu bölgesine bağlayan 400 kV hatlarının gerilim osilasyonları için SVC kontrolörü olarak adlandırılan şönt tipi FACTS cihazlarının doğu, orta ve güney bölgeye teslimatları için ABB ile sözleşme yapılmıştır.

Windsor, Maine yakınlarındaki Coopers Mill trafo merkezi, Avangrid'in New York, Maine ve New England' ın diğer bölgelerine hizmet veren elektrik güç şebekesini daha güvenli, daha kontrollü ve New England elektrik şebekesi boyunca elektrik güç akışını ve gerilimlerini sürekli olarak izlemek için STATCOM kontrolleri projesini başlatmıştır. Projenin toplam maliyeti 50 milyon$ olarak belirlenmiş ve STATCOM kontrolleri bu miktarın yarısına mal olmuştur.

İngiltere ulusal şebekesi türünün ilk örneği STATCOM kontrolleri planına enerji vermiştir. General Elektrik yenilenebilir enerji'nin şebeke çözümleri ile Birleşik Krallıktaki ulusal şebeke için dinamik reaktif kompansatör projesini başlatmıştır Bu proje, 975 MVAr güç aralığı sunan, Avrupa'daki en büyük şebeke sınıfı STATCOM kontrolleri projesi olmuştur. İngiltere'nin güneydoğusundaki enerji iletim şebekesi boyunca üç ayrı trafo merkezi üzerinde kurulumu sağlanmış ve koordine edilmiştir. Kasım 2019 'un sonlarında, üç trafo merkezi alanına enerji verilmiştir. Avrupa ile yüksek gerilim doğru akım (HVDC) ara bağlantılarını destekleyen operasyonel ve ticari olarak bağlanmıştır. Hibrit STATCOM teknolojisi uygulanmış, Bolney, Ninfield ve Richborough trafo merkezleri artık National Grid'in alternatif akım ağının güç kararlılığını desteklemiş ve İngiltere-Belçika HVDC ara bağlantısı için bölgesel gerilim kararlılığını arttırmıştır. İki bölge güç sistemi arasında 1 GW 'dan fazla çift yönlü güç akışı sağlayacak iki ülke 90 msn 'den daha kısa tepki süresiyle, üç ayrı hibrit STATCOM konrolör ünitesi -300 MVAr endüktif + 675 MVAr kapasitif ile dinamik reaktif güç aralığı sunmaktadır.

Siemens, Hindistan Güç Şebeke İşletmesi (PGCIL) için SVC Plus serisinde STATCOM kontrolörünü reaktif güç kompanzasyon sistemleri sunmak için yaklaşık 78 milyon€ değerinde sipariş aldığını açıklamıştır. Teslimat, planlama ve mühendislik hizmetlerinin yanı sıra ekipmanın Hindistan enerji sağlayıcısının dört alt istasyonuna kurulması ve devreye alınmasını da içermektedir. Ranchi, Rourkela, Kishenganj ve Jeypore trafo merkezleri Hindistan'ın Bihar, Jharkhad ve Odisha eyaletlerinde bulunmaktadır. Siemens sistemleri bu bölgelerdeki güç kaynağının dengelenmesine yardımcı olacaktır. Siemens böylece 400 kV voltaj seviyesinde dünyanın en büyük reaktif güç kompanzasyon projelerinden birini hayata geçirmiştir. Geliştirilmiş STATCOM üzerine inşa edilen SVC Plus sistemleri, 1.250 MVAr mekanik olarak değiştirilmiş bileşenlere ek olarak toplam 2.000 MVAr dinamik çalışma aralığıyla

çalışmaktadır. Sistemlerin hızlı tepki süreleri sayesinde, enerji tüketicileri, sabit bir elektrik gücü, sabit bir hat gerilimi ve frekansından faydalanacaktır.

Genel pazardaki en popüler ürün olarak, IGBT tabanlı STATCOM kontrolörleri olduğu görülmüştür. 2024 yılı sonunda, bu FACTS kontrolörün dünya pazarında %88,8'lik bir paya sahip olması bekleniyor. IGBT tabanlı STATCOM kontrolörünün etkileyici büyümesi, aktif ve reaktif güç taleplerindeki artıştan kaynaklanmıştır.

Tez çalışması ile modellenen güç sistemi için FACTS cihazlarda 255 MVAr kapasiteyle STATCOM ve SVC kontrolörleri için maliyet araştırması ile ilgili olarak teknik şartname için V / I eğrisi, P / Q eğrisi, LVRT, performans, HVRT performans, kesintisiz çalışma aralığı, arazi kapsam sınırı, ekipman, bir binada veya konteynerle kurulacak ekipmanlar, sistem yedekleme kapsamı, ayrı ayrı fiyatlandırılmaktadır. Modellenen sistemin maliyeti çalışma kapsamına bağlı olarak SVC ve STATCOM kontrolörleri için yaklaşık 6 milyon$ ve 12 milyon$ arasında olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca güç sistemi iletim şebekelerindeki FACTS cihazlarına yatırım yapılması yeni enerji iletim hattı yatırımlarını, enerji iletim hat kayıplarından kaynaklı maliyetleri, senkron generatörler sistemi kullanımları, sistem belirsizlikleri altında güç iletim sistemindeki toplam kayıp maliyetlerini de düşürecektir. Bunlara ek olarak, yatırımların risk profilleri analiz edilmiştir. FACTS cihazları yatırım maliyetlerinin uygun bir şekilde koordine edilmiş bir sistemin olması koşuluyla; etkili bir kısa-orta vadeli çözüm olarak değil, aynı zamanda yeni iletim hatlarının inşası ile entegre edilmiş daha uzun vadeli seçenekler olarak düşünülmelidir.

SVC kontrolörünün ana argümanları harici şönt ekipman ve filtre bankları olduğu için kurulum inşası önemli miktarda geniş bir alan veya dağıtılmış uygulama sahasına ihtiyaç vardır. STATCOM kontrolörleri SVC kontrolörlerinden çok daha az yer kaplayan ve daha fazla avantaj sağlayan sistemlerdir. STATCOM kontrolörünün kentsel ortamda SVC kontrolörlerine göre harici şönt ekipman ve filtre bankları gereksinimini ortadan kaldırılması nedeniyle kapladığı alanı azalmıştır. Şönt reaktörlerin ortadan kaldırılması arazi kurulum maliyetini düşürdüğü gibi FACTS cihazlarının yatırım maliyetlerininde azaltabilir.

Genel olarak güç sistemleri ve özellikle enerji iletim hatları aşırı yük koşulları altında çalıştırılma eğilimindedirler. Bu çalışma koşulu sadece sürekli ve önemli yük büyümesi nedeniyle değil, aynı zamanda enerji piyasalarının büyük değişiklikleri ve yeniden yapılandırılmasından kaynaklanmaktadır. Aşırı yüklenmiş enerji iletim hatları, yüksek aktif ve reaktif güç kayıpları nedeniyle aktif ve reaktif güç iletimi kabiliyetine daha az sahiptir. Verici ve alıcı uçları arasında gerilim farkına sahip, uzun enerji iletim hatlarında reaktif yüklenmeleri sınırlı olacaktır. Bu yüzden güç sistemine yeni enerji iletim hatları yapılmalıdır. 300 km uzunluğunda bir 400 kV çift devre demet iletken 1272 MCM enerji iletim hattının tesis yatırım maliyetleri (kamulaştırma hariç) yaklaşık olarak 200 bin $/km enerji iletim direk maliyeti ile birlikte toplamda 50,5 milyon$ olarak hesaplanmıştır. Bir FACTS Cihazının 18 milyon$ için kurulması, böyle bir yatırım en az 5 yıl önlenebileceği veya geciktirilebileceği için ekonomik olarak katkısı da olabilir.

Aktif enerji üretim maliyetleri, coğrafi ve iklim koşulları, politik durum ve uygulanan ekipman teknolojisi, trafo merkezi ve benzeri durumlara bağlı olarak geniş bir yelpazeye sahiptir. Türkiye 'de aktif enerji üretiminin ortalama maliyetleri yaklaşık olarak 52 $/MWh üretime bağlı değişken işletme maliyetlerinden kaynaklanmıştır (EPİAŞ). Türkiye enerji iletim kaybı toplam iletim kapasitesinin %1.93 olup buna karşılık gelen enerji iletim kayıp bedeli de 96 $/MWh olarak hesaplanmıştır (TEİAŞ). Modellenmiş güç sisteminde iletim sisteminin çalışma sınırları arasında toplam tüketim değeri 4974 MW olup enerji iletim kaybı toplam iletim kapasitesinin şönt ekipmanlar için %1.12, SVC kontrolörleri için %1.06, ve STATCOM kontrolörlerinin için %0.97, olarak hesaplanmıştır. Modellenmiş güç sistemi enerji iletim kaybının Türkiye enerji iletim kaybı ile örtüştüğü görülmektedir. FACTS cihazları kullanılarak, enerji iletim hattının kapasitesi arttırıldığı ve iletim kayıplarının azaltıldığı takdirde, eşdeğer iletim kayıp bedel maliyeti olarak gerçekleştirilen enerji satışları ile yatırım maliyetleri azaltılabilir. Enerji iletim kayıp bedelinin 96 $/MWh olarak alındığında, yıllık 6.3 milyon$ ek elektrik satışı elde edilmiş olacak ve bu ölçüde FACTS cihazlarının yatırım maliyetleri de azaltılabilecektir.

Gerilimleri işletme limit aralıklarında tutmak, sistemin reaktif güç kaynaklarının uygun şekilde planlanmasını, yönetilmesini ve kontrolünü gerektirir. Bir iletim sistemi boyunca stratejik aralıklarla kurulan senkron kompansatörler, akımın şebekeye dengeli bir şekilde akmasını sağlamak için reaktif güç üreten veya tüketen, genellikle aşırı uyarma modunda bir ana taşıyıcı veya mekanik yük olmadan çalışan senkron generatörlerdir. Bu generatörler tarafından üretilen veya tüketilen reaktif güç miktarı, alan uyarma akımını kontrol ederek kontrol edilir. Senkron kompansatörler; gerilim osilasyonlarına anlık tepki göstermesi, sistem gerilim seviyelerine bakılmaksızın sabit reaktif güç üretme yeteneği ve maksimum çıkış reaktif güç limitleri aşması gibi avantajlara sahiptir. Ancak, senkron kompansatörlerin ana dezavantajı yüksek kurulum ve işletme maliyetleridir.

Reaktif güç kontrolü hizmetine ilişkin TEİAŞ ile yan hizmet anlaşması bulunan üretim tesislerinin senkron kompansatör olarak çalışması sırasında sistemden çektikleri aktif elektrik enerjisi maliyetleri ile senkron kompanzasyon hizmeti sunulmasına ilişkin yatırım, işletme, bakım ve sistem kullanım ve işletim bedeli maliyetlerini karşılamak üzere ödenecek ücret "Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği" 45 inci madde hükümleri çerçevesinde hesaplanmıştır. Reaktif güç kontrolü hizmetine ilişkin TEİAŞ ile yan hizmet anlaşması bulunan tüzel kişilerin adlarına kayıtlı bulunan üretim tesislerinin senkron kompansatör olarak çalışmak suretiyle sağladığı reaktif güç kontrolü hizmeti için üretim faaliyeti gösteren tüzel kişilere ödenecek senkron kompanzasyon tutarı aşağıdaki formül (4.6) uyarınca hesaplanır;

$$SKT_{p,d} = \sum_{u=1}^{l}\left(\sum_{s=1}^{m}(\max(NPTF_{d,s}, SMF_{d,s}) \times (1+k) \times AEEÇM_{p,u,d,s}) + SKHB_{p,u,d}\right) \quad (4.6)$$

$SKT_{p,d:}$ Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı üretim tesislerinin "d" döneminde senkron kompansatör olarak çalışmasından dolayı tahakkuk ettirilecek alacak tutarı (TL),

$SMF_{d,s}$: Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği uygulamaları uyarınca hesaplanarak, "d" döneminin "s" saatine ilişkin dengesizliklerin uzlaştırılmasında esas alınan saatlik dengesizlik fiyatı (TL/MWh),

$NPTF_{d,s}$: Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği uygulamaları uyarınca hesaplanarak, "d" döneminin "s" saatine ilişkin nihai piyasa takas fiyatını (TL/MWh),

$AEEÇM_{p,u,d,s}$: Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı "u" üretim tesisinin "d" döneminin "s" saatindeki aktif elektrik enerjisi çekiş miktarını (MWh),

$SKHB_{p,u,d}$: Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı "u" üretim tesisi için "d" döneminde geçerli olan senkron kompanzasyon hizmet bedelini (TL),

k: Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği uygulamaları çerçevesinde, "d" döneminin "s" saatine ilişkin dengesizliklerin uzlaştırılmasında esas alınmak üzere Kurul tarafından değeri "0" ile "1" arasında belirlenen negatif enerji dengesizliği halinde kullanılan katsayıyı,

l: "Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı üretim tesisi sayısını,

m: "d" döneminde yer alan saat sayısını ifade eder.

Senkron kompanzasyon hizmeti sunulmasına ilişkin yatırım, işletme, bakım ve sistem kullanım ve işletim bedeli maliyetlerini yansıtan aylık senkron kompanzasyon hizmet bedeli aşağıdaki formül (4.7) uyarınca hesaplanır;

$$SKHB_{p,u,d} = \left(\sum_{s=1}^{m} (\max(NPTF_{d,s}, SMF_{d,s}) \times (1+k) \times AEEÇM_{p,u,d,s}) \right) \times h + TSKB_{p,u,d} \qquad (4.7)$$

$SKHB_{p,u,d}$: Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı "u" üretim tesisi için "d" döneminde geçerli olan senkron kompanzasyon hizmet bedelini (TL),

$SMF_{d,s}$: Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği uygulamaları uyarınca hesaplanarak, "d" döneminin "s" saatine ilişkin dengesizliklerin uzlaştırılmasında esas alınan saatlik sistem marjinal fiyatını (TL/MWh),

$NPTF_{d,s}$: Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği uygulamaları uyarınca hesaplanarak, "d" döneminin "s" saatine ilişkin nihai piyasa takas fiyatını (TL/MWh),

$AEEÇM_{p,u,d,s}$: Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı "u" üretim tesisinin "d" döneminin "s" saatindeki aktif elektrik enerjisi çekiş miktarını (MWh),

$TSKB_{p,u,d}$: Üretim faaliyeti gösteren "p" tüzel kişisinin adına kayıtlı "u" üretim tesisinin "d" döneminde Senkron Kompanzasyon Hizmetini sağlaması durumunda ödenecek olan, "d" döneminde sistemden çekilen aktif elektrik enerjisinden kaynaklanan ve üretim faaliyeti gösteren tüzel kişi tarafından TEİAŞ'a ödenen tüketim (alış) sistem kullanım ve işletim bedelini (TL),

h: Uygulamada yeknesaklığın sağlanması ve eşit taraflar arasında ayrım gözetilmemesini teminen TEİAŞ tarafından her yıl 1 Ocak tarihinden itibaren geçerli olmak üzere belirlenen katsayıyı,

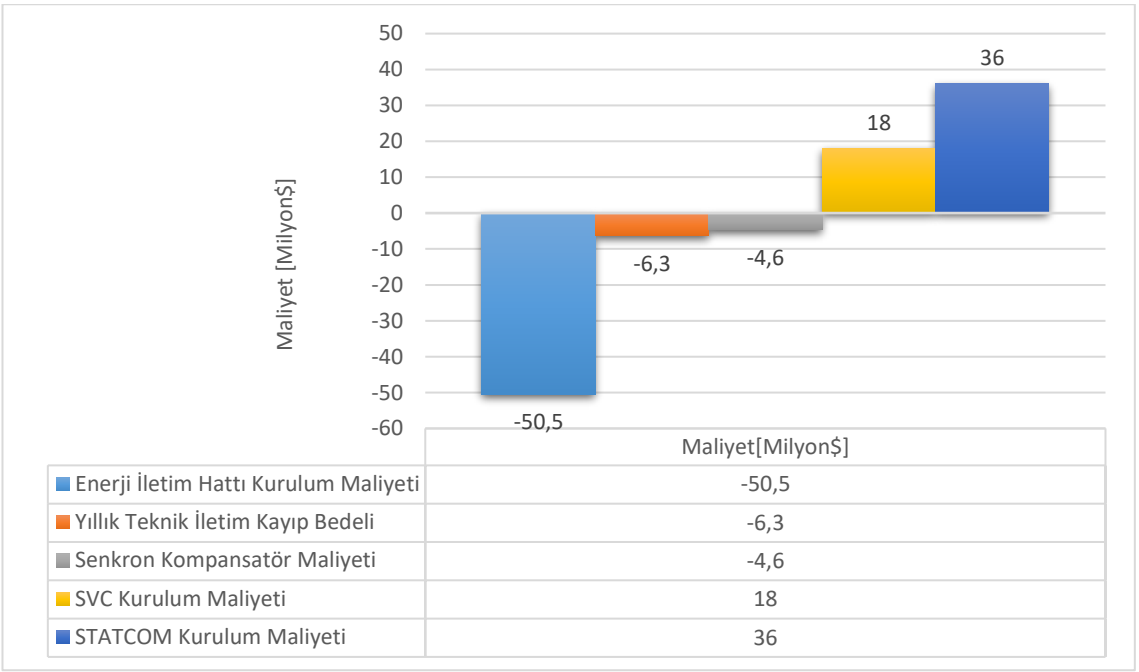
k: Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği uygulamaları çerçevesinde, "d" döneminin "s" saatine ilişkin dengesizliklerin uzlaştırılmasında esas alınmak üzere Kurul tarafından değeri "0" ile "1" arasında belirlenen negatif enerji dengesizliği halinde kullanılan katsayıyı,

m: "d" döneminde yer alan saat sayısını ifade eder. (EPDK)

Yan hizmet anlaşması bulunan üretim tesislerinin senkron kompansatör olarak çalışması durumunda sistemden çektikleri aktif elektrik enerjisi maliyetleri ile senkron kompanzasyon hizmeti sunulmasına ilişkin sistem kullanım ve işletim bedeli maliyetlerini karşılamak üzere ödenecek ilave ücret yaklaşık olarak 5.2 $/MWh olarak hesaplanmıştır. Güç sistemi modelinde gerilim kararlılığını sağlamak için kullanılan 100 MW' lık senkron generatör (Doğu Hes) için kullanım ve işletme bedeli olarak yıllık 4.6 milyon$ ek ücret ödenmesi gerekir ki bu da FACTS cihazlarına yapılacak olan yatırım maliyetlerini azaltabilir.

$$Q = \sum_{t=1}^{t} p \; x \; c \; x \; \Delta t \tag{4.8}$$

$Q =$ Yıllık senkron generatör üretim maliyeti
$p =$ Senkron generatör kapasite (MW)
$c =$ Sistem kullanım ve işletim bedeli($/MWh)
$\Delta t =$ Senkron generatör yıllık çalışma aralığı (h)



Şekil 4.49. FACTS cihazlarının yatırım maliyet karşılaştırması

FACTS teknolojilerine yapılan yatırımlar, SVC ve STATCOM kontrolörleri için MVAr başına maliyet fonksiyon değerleri verilmiştir. STATCOM kontrolörlerinin daha fazla yüklenme kapasitesi ve esneklik özelliklerine sahip olup, SVC kontrolörlerinden kurulum maliyeti daha yüksektir. Yukarıdaki maliyet analizlerine dayanarak, FACTS cihazların fiyatının geniş bir yelpaze aralığında değiştiği sonucuna varılmıştır. Optimum tasarım için mevcut kontrolör seçeneklerinin çeşitliliği nedeniyle, FACTS cihazları kurulumu proje uygulama süreleri çok daha hızlı ve yatırım maliyetleri daha fazladır. İletim hattı veya yeni enerji üretim tesisleri inşa etme alternatifinden önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.49). Güç sisteminin güvenilirliğini ve verimliliğini korumak için uygun maliyetli ve hem mevcut hem de yeni altyapılara entegre edilmesi kolay olduğu, yeni ağ şebeke uzantıları oluşturmak için gereken yatırımı azalttığı görülmektedir. FACTS cihazlarının kullanım amacı sadece kâr gütmek olmayıp, aynı zamanda sistem güvenilirliğini de önemli ölçüde artırmaktadır. Türkiye enterkonnekte Batı Akdeniz İletim sisteminde, FACTS cihazlarının maliyet analizlerine dayanarak 6 yıl ile 8 yıl arasında yatırım maliyetlerini karşılayabileceği ön görülmektedir.

5. SONUÇLAR

FACTS kontrolörlerinin tanımlanması ve sınıflandırılması ele alınarak Batı Akdeniz Bölgesi elektrik enerji iletim sistemi için gerçekçi değerlerle pilot bir güç sistemi modellemesi gerçekleştirilmiştir. Güç Sistemi Analiz ve Simülasyon programı Dig-SILENT Power Factory kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda, pilot bölge modeli için gerilim düşümü, anlık enerji üretimi, bir yükün ya da bir sistemin aşırı yüklenmesi, hat arıza, kısa devre durumları için analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile gerçekçi verilerle oluşturulmuş olan şebeke modeli üzerinden gerilim regülasyonu üzerine fizibilite analizi gerçekleştirilmiştir.

Güç sistemlerinde SVC ve STATCOM kontrolörleri ile gerilim ve reaktif güç kontrolü gerçekleştirilmesi ile teknik kayıpların azaltıldığı ve FACTS cihazlarının kullanılmasıyla elektrik enerjisinin kararlı, kontrollü ve en ekonomik şekilde iletilebildiği görülmüştür. Şönt ekipmanlara göre STATCOM ile teknik kayıplar % 13.22 daha fazla düşürülürken, SVC ile % 5.33 oranında daha fazla düşürülebilmiştir. Ayrıca, STATCOM kontrolörlerinin bulunduğu baralarda, gerilim düşümlerine ve ani reaktif güç değişimlerine simülasyon süresinin %1 inden daha düşük bir sürede anahtarlama yaparak cevap verdiği ve simülasyon süresinin % 5 ’inden daha düşük bir sürede de sistemin kararlı hale geldiği görülmektedir. Gerilim ve reaktif güç kontrolü hassasiyeti artarak ve üretim ve tüketim dengesi daha istikrarlı hale gelmektedir. Modellenen pilot bölgede, enerji iletim sistemi maksimum yük anı, yüksek gerilim osilasyonu çalışma ve gerilim düşümü açısından değerlendirildiğinde; FACTS cihazlarının, sürekli olarak çalışan şönt ekipman bankalarından, sistemi daha yüksek oranda dengede tuttuğu görülmüştür.

Enerji iletim sistemi şebeke ağındaki hatlardan birinin arızalanması durumunda, FACTS cihazlarının bara geriliminde, generatör rotor hızlarında ve rotor açılarında meydana gelen salınımlı çalışmaları bastırabileceği tespit edilmiştir. STATCOM ve SVC kontrolörlerinin güç sistemlerin maksimum yüklenme sınırlarını artırdığını, güç sistemi üzerinde hata veya arıza olması durumunda, kararlılık sınırlarını iyileştirdiğini ve aşırı yüklenme koşullarında şebeke geriliminin düşmesini önlediği görülmektedir. Simülasyon çalışması sonucunda modellemesi gerçekleştirilen pilot bölgede, reaktif güç kayıplarının, SVC ve STATCOM kontrolörleri ile azaltılabildiği gösterilmiştir. STATCOM kontrolörlerinin, mevcut bölge için enerji üretim ve tüketim dengesini sağlanmasında SVC kontrolörlerine kıyasla daha yüksek performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. FACTS cihazlarının sistemin kararlılığını artırdığı görülmüş, paralel bağlı kompanzatörlerin bağlandıkları noktada reaktif güç sağlayarak bara gerilimlerini istenilen işletme limit değerlerinde sabit tutabildikleri, FACTS cihazlarının gerilim çökmesine karşı sistemin en yüksek yüklenebilme noktasını manuel sistemlere (mevcut durum) göre daha üst noktaya çıkartabildikleri görülmektedir. Enerji iletim hattının maksimum taşıyabileceği güç kapasitesinin artırıldığı ve toplam sistem kayıplarının minimize edildiği tespit edilmiş olup, önerilen sistemle reaktif güç kompanzasyonu yapılarak aşırı yük koşullarında gerilim çökmesinin engellenip engellenemeyeceği durumları incelenmiştir. Sistemin kritik barasını besleyen hatların devre dışı kalmaları durumunda, kritik baraya eklenen STATCOM ve SVC kontrolörlerinin kritik baranın yüklenme sınırlarını ne ölçüde artırdığı incelenmiş ve gerilim osilasyonları ve reaktif güç değişimleri ve gerekli çözüm önerileri sunulmuştur.

Modellenen pilot bölgede, STATCOM ve SVC kontrolörleri kullanımı sonucunda analiz edilerek model şebekenin gerilim kararlılığı gözlemlenmiş ve meydana gelen değişimler incelenmiştir. Ayrıca farklı yük karakteristiklerine sahip bir enerji iletim sisteminde, FACTS elemanlarının gerilim kararsızlığında nasıl bir rol oynadığı araştırılmıştır. Şönt ekipmanlar sürekli devrede iken en kötü acil durum senaryosu üretim barası kısa devre durumunda, bara gerilimlerinin ortalama 0.86 p.u. seviyelerine düştüğü ve kararlı hale daha geç bir sürede kısmi olarak gelebildiği, FACTS cihazlarının bağlı olduğu durumda ise 0.95 p.u. işletme limit değerleri içerisinde tuttuğu tespit edilmiştir. Mevcut enerji iletim sistemi için gerçekleştirilen analizlerde bara geriliminin işletme limit değerlerine yakın olduğu, sistem arızalarında kritik noktalarda gerilim çökmelerinin olduğu tespit edilmiştir. Elektrik güç sistemlerine FACTS cihazları entegre edilmesinin, güç sistemlerinin kararlılıklarını ve maksimum yüklenme aralıklarını artırdığı ve gerilim değerlerini alt ve üst limitler arasında tuttuğu gösterilmiştir. Enerji iletim sistemlerinde gerilim kararlılığının sağlanmasında en etkin yöntemlerden birisinin de sisteme uygun noktalardan FACTS cihazlarının entegre edilmesi olduğu mevcut çalışma ile ortaya konulmuştur. Çalışmada STATCOM ve SVC sistemlerinin, dinamik bir sistem olan güç sistemlerinde, anlık ihtiyaçlara bağlı olarak sisteme reaktif güç basıp sistemden çekebilen, reaksiyon süresi oldukça yüksek olan, nisbi olarak kapasitesine bağlı geniş bir aralıkta çalışabilen, güvenli ve işletme esnekliğine sahip sistemler olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen maliyet analizi ile modellemesi gerçekleştirilen pilot bölgede, FACTS cihazlarının kendilerini yaklaşık 6 ile 8 yıl aralığında amorti edecekleri ve ilave iletim hatlarının ve üretim ünitelerinin de tesis edilme gereksinimlerini de belirli bir süre öteleyeceği sonucuna varılmıştır.

Pilot bölge olan Batı Akdeniz bölgesi elektrik enerji iletim sistemi için gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon çalışması sonucunda, Türkiye enterkonnekte sistemine FACTS cihazlarını entegre ederek gerilim kontrolü yapılması sayesinde güç sistemi üzerindeki kayıplar azaltılarak, elektrik enerjisinin güvenli, kontrollü ve en ekonomik şekilde iletilmesi sağlanarak ülke ekonomisine önemli ölçülerde katkılar sağlanabileceği düşünülmektedir. Pilot bölge olarak seçilen ulusal bir elektrik enerji iletim sistemini, FACTS teknolojisi kullanılarak gerçekçi değerlerle modelleyip fizibilite çalışmasının gerçekleştirilmesi ile elde edilen sonuçlar ışığında Türkiye enterkonnekte sistemi için gerilim ve reaktif güç kontrolünün hassasiyetini artırarak, üretim ve tüketim dengesini daha kararlı hale getirmek suretiyle teknik olarak enerji iletim maliyetinin düşürülmesine katkıda bulunulabileceği ön görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

Abdelsalam, A.A., Desouki, M.E. and Sharaf, A.M. 2013. Power quality improvement using FACTS power filter compensation scheme. *Journal of Electrical Systems*, 9, (1): 73-83.

Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Perez, H. and Angeles-Camacho, C. 2004. FACTS: modelling and simulation in power networks. John Wiley & Sons, s.

Agüero, E.D., Cepeda, J.C. and Colomé, D.G. 2014. FACTS models for stability studies in DIgSILENT Power Factory. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), ss. 1-6,

Ali, I. 2017. Optimal location of SSSC based on PSO to improve voltage profile and reduce iraqi grid system losses. *Engineering and Technology Journal*, 35, (4 Part (A) Engineering): 372-380.

Anderson, P.M. and Fouad, A.A. 1977. Power system control and stability, Vol. 1. s.

Ara, A.L., Kazemi, A. and Niaki, S.N. 2011. Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27, (2): 481-490.

Arifoğlu, U. 2002. Güç sistemlerinin bilgisayar destekli analizi. Alfa, s.

Barrios-Martínez, E. and Ángeles-Camacho, C. 2017. Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection. *Journal of applied research and technology*, 15, (1): 36-44.

Beltran-Valle, O., Pena-Gallardo, R., Segundo-Ramirez, J. and Muljadi, E. 2016. A comparative study of the application of facts devices in wind power plants of the southeast area of the mexican electric system. 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), ss. 1-6,

Bhattacharyya, B., Gupta, V.K. and Kumar, S. 2014. UPFC with series and shunt FACTS controllers for the economic operation of a power system. *Ain Shams Engineering Journal*, 5, (3): 775-787.

Bhattacharyya, B. and Kumar, S. 2016. Loadability enhancement with FACTS devices using gravitational search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 470-479.

Cai, L.J. Erlich, I. 2004. Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market using Genetic Algorithms, IEEE Conference (0-7803- 8718-x/04),

Canizares, C.A. and Faur, Z.T. 1999. Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14, (1): 158-165.

Carlak, H.F. and Kayar, E. Volt/VAR Regulation in Energy Transmission Systems Using SVC and STATCOM Devices. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7, (4): 424-433.

Cheng, H., Chen, S. and Yin, X. 2004. DC-link voltage control and performance analysis of StatCom. 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ss. 1179-1184,

Choi, D.-H., Lee, S.H., Kang, Y.C. and Park, J.-W. 2016. Analysis on special protection scheme of korea electric power system by fully utilizing STATCOM in a generation side. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32, (3): 1882-1890.

Crow, M. 2004. Power quality enhancement using custom power devices [Book Review].

Darabian, M. and Jalilvand, A. 2017. A power control strategy to improve power system stability in the presence of wind farms using FACTS devices and predictive control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 85, 50-66.

Dwivedi, A.K. and Vadhera, S. 2019. Reactive Power Sustainability and Voltage Stability with Different FACTS Devices Using PSAT. 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), ss. 248-253,

Elmitwally, A. and Eladl, A. 2016. Planning of multi-type FACTS devices in restructured power systems with wind generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 33-42.

Fadaee, M. and Radzi, M. 2012. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, (5): 3364-3369.

Ghahremani, E. and Kamwa, I. 2012. Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28, (2): 764-778.

Grünbaum, R., Sharma, R. and Charpentier, J.-P. 2000. Improving the efficiency and quality of AC transmission systems. *ABB Power Systems-Joint World Bank,*,

Gyugyi, L. 1988. Power electronics in electric utilities: Static VAR compensators. *Proceedings of the IEEE*, 76, (4): 483-494.

Gyugyi, L. 2000. Application characteristics of converter-based FACTS controllers. PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 00EX409), ss. 391-396,

Habur, K. and O'Leary, D. 2004. FACTS-flexible alternating current transmission systems: for cost effective and reliable transmission of electrical energy. *Siemens-World Bank document–Final Draft Report, Erlangen*, 46.

Harral, C., Smith, G., Paterson, W. and Queiroz, C. 2011. Maintaining road assets. *A Fresh Look at The World Bank's 1988 Policy Paper "Road Deterioration In Developing Countries"; p. viii*,

Hasanovic, A. 2000. Modeling and Control of The Unified Power Flow Controller (UPFC). Citeseer, s.

Hingorani, N.G. 1993. Flexible AC transmission. *IEEE Spectrum*, 30, (4): 40-45.

Hingorani, N.G. 2007. FACTS technology-state of the art, current challenges and the future prospects. IEEE Power Engineering Society General Meeting, ss.

Hoballah, A.A.-R.A.-E. 2011. Power System Stability Assessment and Enhancement using Computational Intelligence.

Idris, R.M., Khairuddin, A. and Mustafa, M. 2009. A multi-objective Bees Algorithm for optimum allocation of FACTS devices for restructured power system. TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference, ss. 1-6,

Jumaat, S.A., Musirin, I. and Baharun, M.M. 2017. A voltage improvement of transmission system using static var compensator via matlab/simulink. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 6, (2): 330-337.

Kalair, A., Abas, N., Kalair, A., Saleem, Z. and Khan, N. 2017. Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152-1187.

Karthik, M. and Arul, P. 2013. Optimal Power Flow Control Using FACTS Devices. *International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE) ISSN: 2319*, 6378,

Kheirizad, I., Mohammadi, A. and Varahram, M.H. 2008. A novel algorithm for optimal location of FACTS devices in power system planning. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 3, (2): 177-183.

Kumar, B.V. and Srikanth, N. 2017. A hybrid approach for optimal location and capacity of UPFC to improve the dynamic stability of the power system. *Applied Soft Computing*, 52, 974-986.

Kundur, P., Balu, N.J. and Lauby, M.G. 1994. Power system stability and control. McGraw-hill New York, s.

Laifa, A. and Boudour, M. 2010. Optimal placement and parameter settings of unified power flow controller device using a perturbed particle swarm optimization. 2010 IEEE International Energy Conference, ss. 205-210,

Liu, L., Li, H., Xue, Y. and Liu, W. 2014. Reactive power compensation and optimization strategy for grid-interactive cascaded photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30, (1): 188-202.

Lu, Z., Li, M., Tang, W. and Wu, Q. 2007. Optimal location of FACTS devices by a bacterial swarming algorithm for reactive power planning. 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, ss. 2344-2349,

Mahela, O.P., Shaik, A.G. and Gupta, N. 2015. A critical review of detection and classification of power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 495-505.

Makkar, C.R. and Dewan, L. 2010. Transient Stability Enhancement using Robust FACTS Controllers-A Brief Tour. *Canadian Journal on Electrical & Electronics Engineering*, 1, (7): 150-154.

Mathad, V.G., Ronad, B.F. and Jangamshetti, S.H. 2013. Review on comparison of FACTS controllers for power system stability enhancement. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3, (3): 2250-2315.

Mithulananthan, N., Sode-Yome, A., Acharya, N. and Phichaisawat, S. 2005. Application of FACTS controllers in Thailand power systems. *Asian Institute of Technology*,

Mohammadi, A. and Jazaeri, M. 2007. A hybrid particle swarm optimization-genetic algorithm for optimal location of SVC devices in power system planning. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, ss. 1175-1181,

Mondal, D., Chakrabarti, A. and Sengupta, A. 2011. PSO based location and parameter setting of advance SVC controller with comparison to GA in mitigating small signal oscillations. 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, ss. 1-6,

Musa, U., Bakare, G., Mati, A., Mohammed, A. and Umar, A. 2018. Radial distribution network enhancement with D-STATCOM using bacterial foraging algorithm. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 14, (2): 249.

Navani, J., Sharma, N. and Sapra, S. 2012. Technical and non-technical losses in power system and its economic consequence in Indian economy. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 1, (2): 757-761.

Nwohu, M.N. 2010. Optimal Location of Unified Power Flow Controller (UPFC) in Nigerian Grid System. *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 4, (2): 147-153.

Öztürk, A., Bozali, B. and Tosun, S. 2016. Güç Sistemi Kararlılığını İyileştirecek Facts Cihazlarının Bağlantı Noktasının Belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, (2):

Paserba, J.J. 2003. How FACTS controllers-benefit AC transmission systems. 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495), ss. 949-956 vol.943, 7-12 Sept. 2003,

Paserba, J.J. 2004. How FACTS controllers benefit AC transmission systems. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004., ss. 1257-1262,

Paserba, J.J., Reed, G.F., Takeda, M. and Aritsuka, T. 2000. FACTS and custom power equipment for the enhancement of power transmission system performance and power quality. SEPOPE Conference, ss.

Pezzini, P., Gomis-Bellmunt, O. and Sudrià-Andreu, A. 2011. Optimization techniques to improve energy efficiency in power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, (4): 2028-2041.

Preethi, V., Muralidharan, S. and Rajasekar, S. 2011. Application of genetic algorithm to power system voltage stability enhancement using facts devices. 2011 International Conference On Recent Advancements In Electrical, Electronics And Control Engineering, ss. 333-338,

Ramesh, P. and Reddy, M.D. 2013. Loss reduction through optimal placement of unified power-flow controller using firefly algorithm. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2, (10): 4657-4667.

Rao, V.S. 2017. Optimal placement of STATCOM using two stage algorithm for enhancing power system static security. *Energy Procedia*, 117, 575-582.

Sadaiappan, S., Renuga, P. and Kavitha, D. 2010. Modeling and simulation of series compensator to mitigate power quality problems. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, (12): 7385-7394.

Salman, G. A. 2015. Implementation SVC and TCSC to Improvement the Efficacy of Diyala Electric Network (132 kV), *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol/issue: 4(5), pp. 163-170,

Saoji, B. P. and Vaidya A. P. 2013. Hypothetical Study For Selection Of Optimal Location Of Multiple FACTS Devices Under Contingent Condition Using Different Objective Functions, *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)*, vol/issue: 2(4), pp. 71-86,

Sarker, J. and Goswami, S. 2014. Solution of multiple UPFC placement problems using Gravitational Search Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 531-541.

Schauder, C. and Mehta, H. 1993. Vector analysis and control of advanced static VAR compensators. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), ss. 299-306,

Shaheen, H., Rashed, G. and Cheng, S. 2007. Optimal location and parameters setting of unified power flow controller based on evolutionary optimization techniques. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, ss. 1-8,

Sharaf, A. and Khaki, B. 2012. Novel switched capacitor-filter compensator for smart grid-electric vehicle charging scheme. 2012 International Conference on Smart Grid (SGE), ss. 1-5,

Sharaf, A.M. and Gandoman, F.H. 2015. A switched hybrid filter-DVS/green plug for smart grid nonlinear loads. 2015 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), ss. 1-6,

Sheeba, R., Jayaraju, M., Shanavas, T. and Sundareswaran, K. 2011. Identification of optimal location of SVC through artificial intelligence techniques. ISGT2011-India, ss. 149-154,

Shokri-Ghaleh, H. and Alfi, A. 2014. A comparison between optimization algorithms applied to synchronization of bilateral teleoperation systems against time delay and modeling uncertainties. *Applied Soft Computing*, 24, 447-456.

Singh, B., Sharma, N. and Tiwari, A. 2010. A comprehensive survey of optimal placement and coordinated control techniques of FACTS controllers in multi-machine power system environments. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 5, (1): 79-102.

Song, Y.-H. and Johns, A. 1999. Flexible ac transmission systems (FACTS). IET, s.

Suresh, V. and Sreejith, S. 2017. Power flow analysis incorporating renewable energy sources and FACTS devices. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7, (1): 452-458.

Tabatabaei, N., Aghajani, G., Boushehri, N. and Shoarinejad, S. 2011. Optimal location of FACTS devices using adaptive particle swarm optimization mixed with simulated annealing. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 7, 60-70.

Tolbert, L., et al. 2005. Power electronics for distributed energy systems and transmission and distribution applications. *ORNL/TM-2005/230, UT-Battelle, LLC, Oak Ridge National Laboratory*, 8,

Tosun, S. 2011. Güç sistemlerinde gerilim karalılığının sezgisel yöntemlerle incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, s.

Tous, S.I., Salimi, E. and Hasanpour, S. 2012. Optimal placement of UPFC for voltage drop compensation. 13th International Conference on OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT, Romania, ss.

Vlachogiannis, J. G., Lee, K. Y. 2006. A comparative study on particle swarm optimization for optimal steady-state performance of power systems, IEEE Transactions on Power Systems, 21(4): 1718-1728,

Yang, Z., Shen, C., Zhang, L., Crow, M.L. and Atcitty, S. 2001. Integration of a StatCom and battery energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16, (2): 254-260.

Yaşar, C., Aslan, Y. and Biçer, T. 2010. BİR DAĞITIM TRANFORMATÖRÜ BÖLGESİNDEKİ KAYIPLARIN İNCELENMESİ. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (022): 9-22.

Yildiz, A.R. and Solanki, K.N. 2012. Multi-objective optimization of vehicle crashworthiness using a new particle swarm based approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, (1-4): 367-376.

Zhang, X.-P., Rehtanz, C. and Pal, B. 2012. Flexible AC transmission systems: modelling and control. Springer Science & Business Media, s.

Zhao, B., Guo, C. X., Cao, Y. J. 2005. A multi-agent based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch, IEEE Transactions on Power Systems, 20(2): 1070-1078,

Anonim 1: https://www.teias.gov.tr/ [Son erişim tarihi: 27.05.2020].

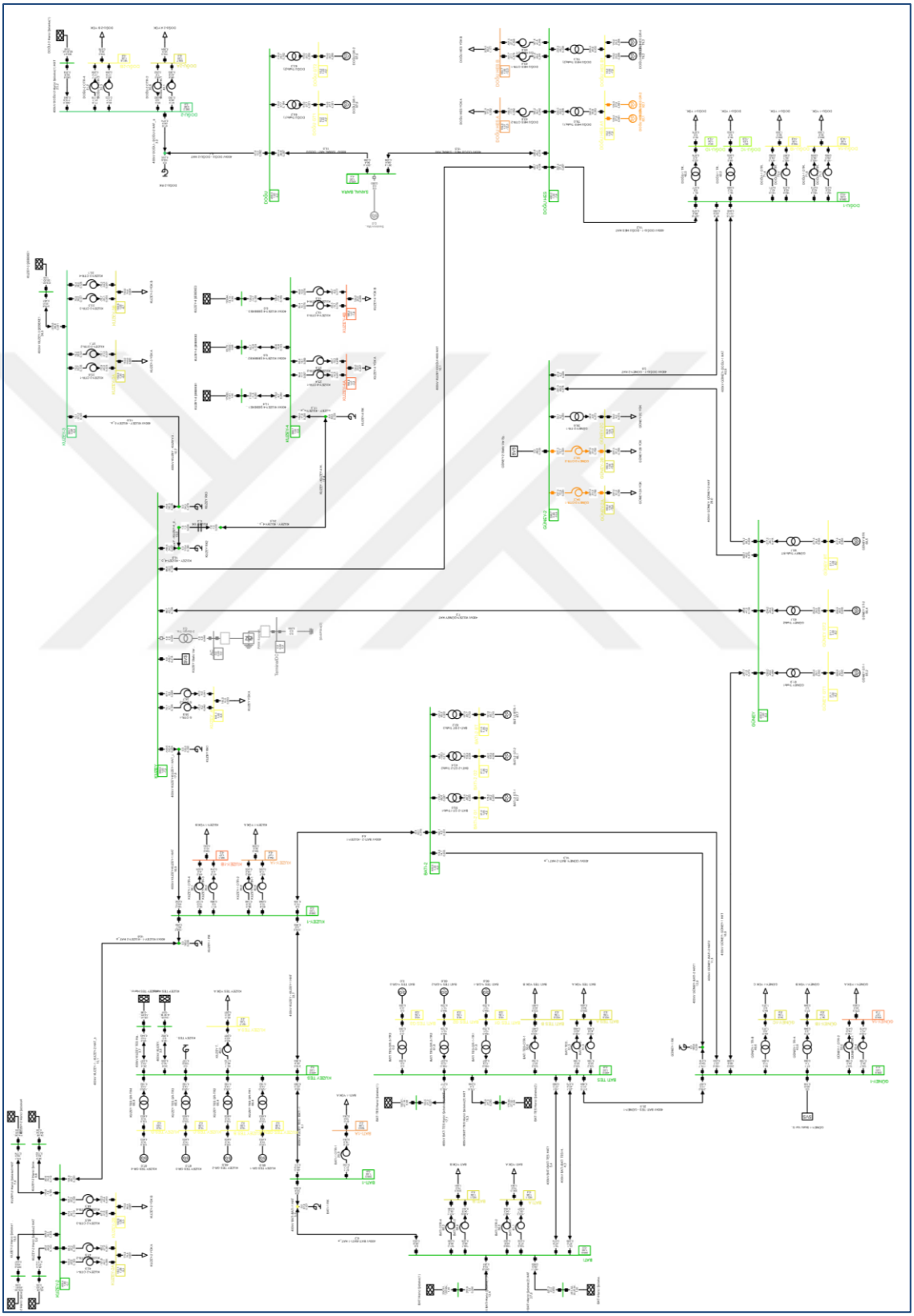
Anonim 2: https://www.epias.com.tr/ [Son erişim tarihi: 27.05.2020].

Anonim 3: https://www.epdk.org.tr/ [Son erişim tarihi: 27.05.2020].

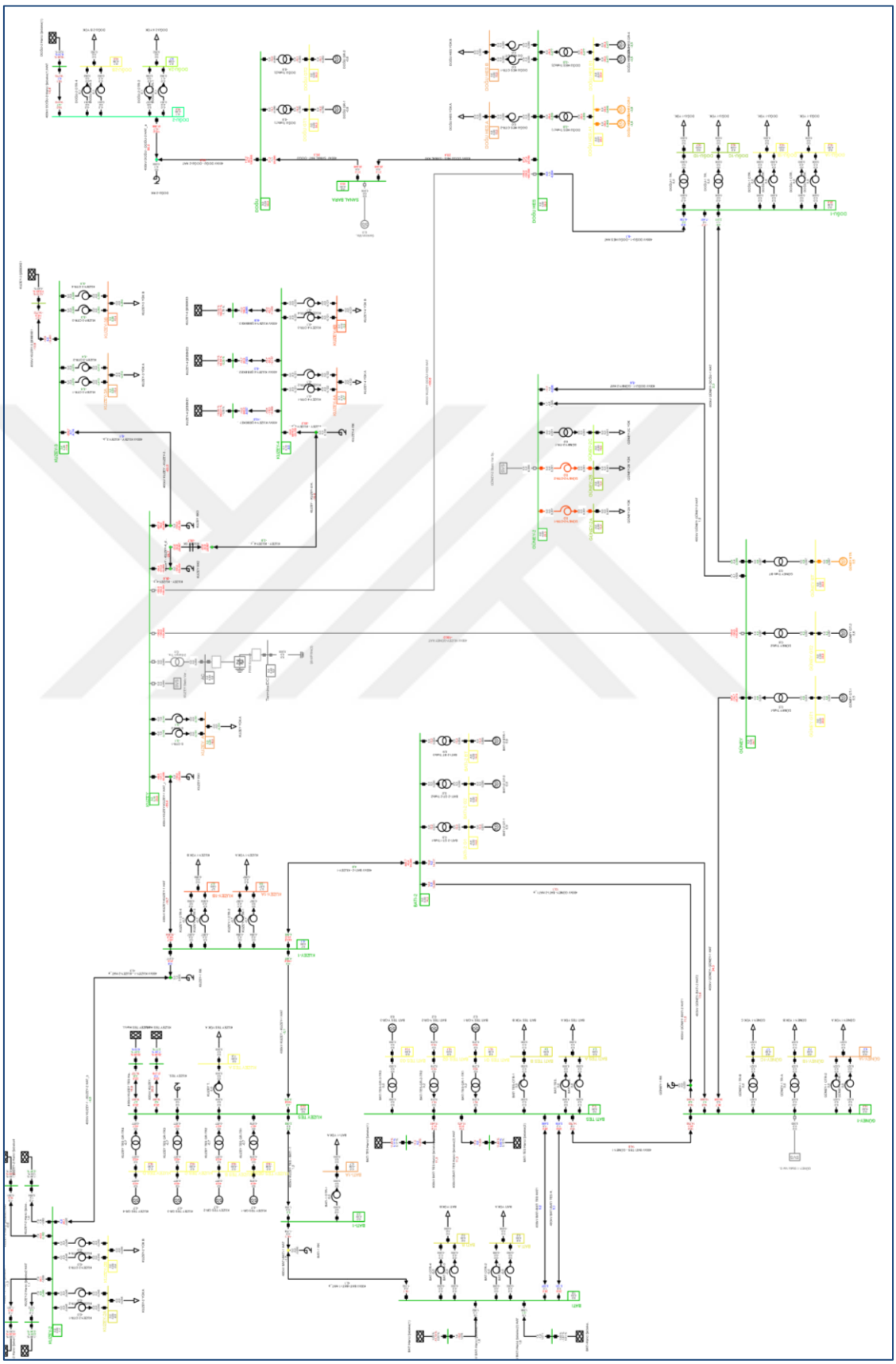
Anonim 4: https://www.tdworld.com/ [Son erişim tarihi: 27.05.2020].

8. EKLER

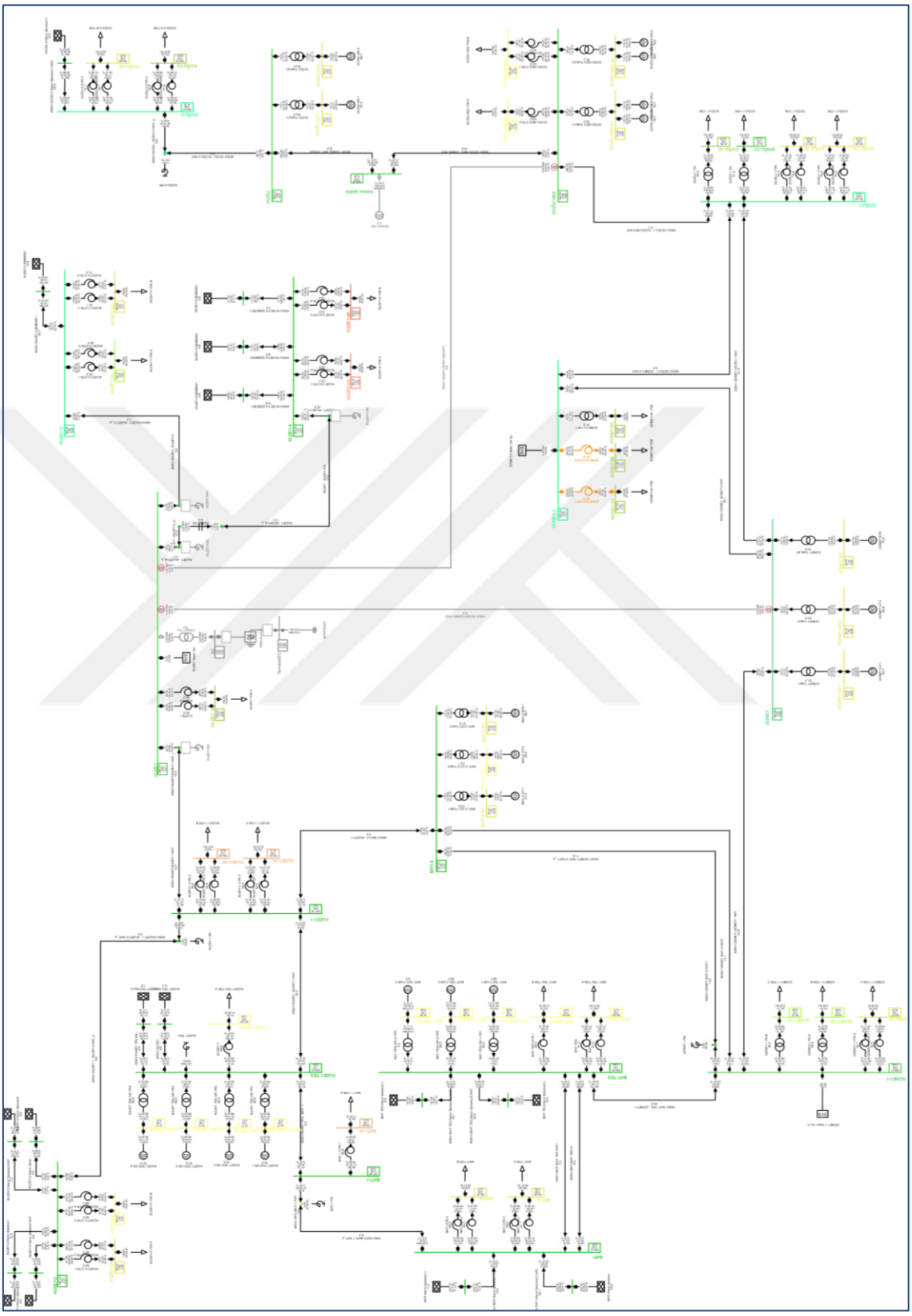
Ek-1



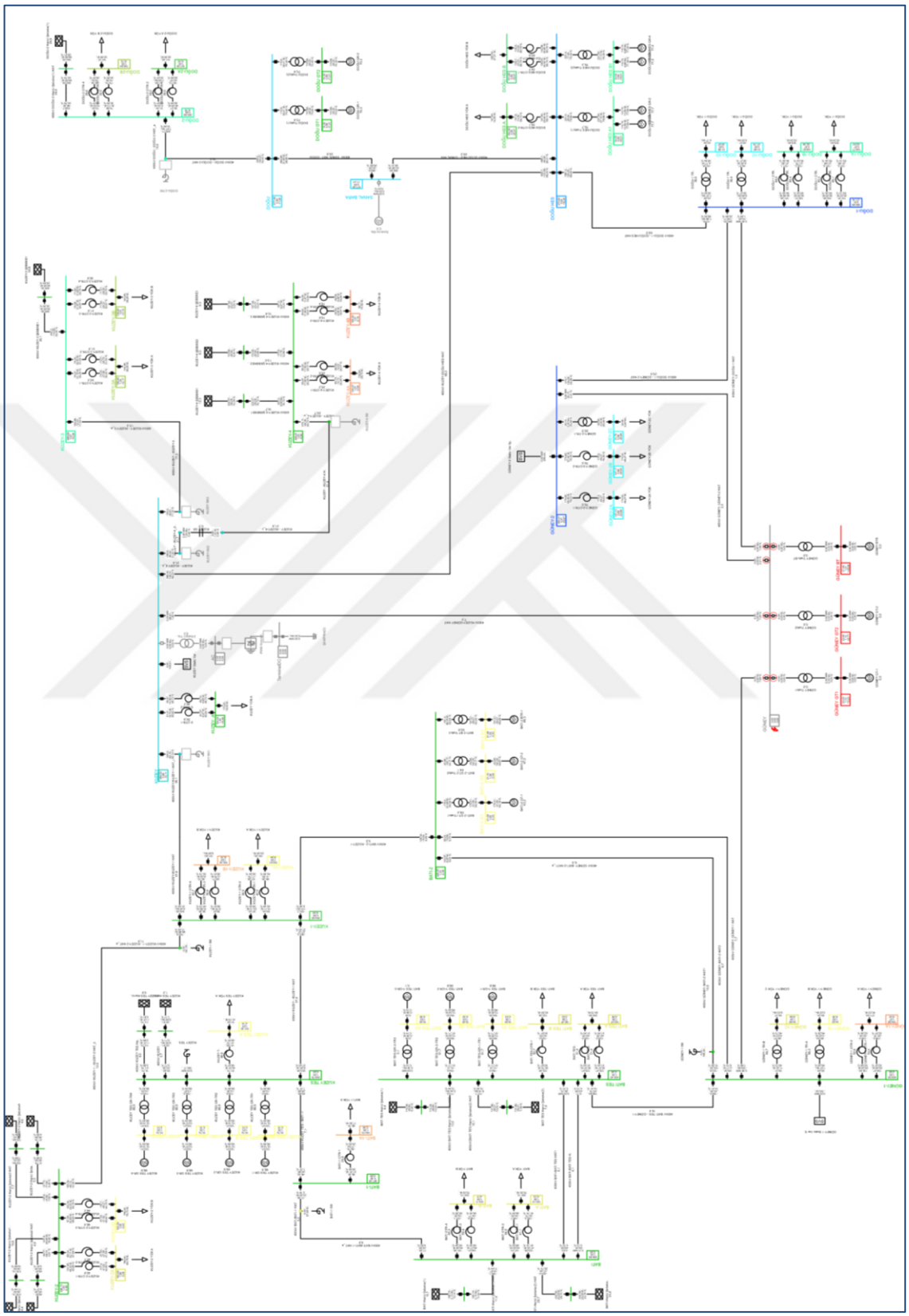
Ek-2



Ek-3



Ek-4



ÖZGEÇMİŞ



ERGİN KAYAR

erginkayar07@gmail.com

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017-(Devam Ediyor)	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Antalya
Lisans 2013-2017	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Elektrik Mühendisi 2011-(Devam Ediyor)	Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) Batı Akdeniz Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- H. Feza Carlak, E Kayar, “Volt/VAR Regulation in Energy Transmission Systems Using SVC and STATCOM Devices”, Balkan Journal Of Electrical and Computer Engineering,” Vol. 7, No. 4, October 2019, pp.424-433.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Carlak H.F., Kayar E., "Voltage Regulation Analysis in Energy Transmission Systems Using STATCOM", 2019 IEEE East- West Design & Test Symposium (EWDTS), Batum, GURCISTAN, 13-16 Eylül 2019, pp.450-456

2- H. Feza Carlak, E. Kayar, “TCR-TSC SVC Sistemler Kullanılarak Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Regülasyonu Analizi”, 4th International Mediterranean Science and Engineering Congress IMSEC Alanya, TÜRKİYE 2019, pp.476-481.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- Kayar E., Carlak H.F., “Enerji İletim Sistemlerinde STATCOM Kullanımı ile Reaktif Güç Kontrolü”, IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, İzmir, TÜRKIYE, 16-19 Ekim 2019, ss.89-98

2- Kayar E., İl N., Carlak H.F., “Türkiye Elektrik Enerjisi Görünümü ve Yenilenebilir Enerjinin Global Ölçekte Mevcut Konumu”, 10. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, ANTALYA, TÜRKIYE, 12-14 Aralık 2019, ss.436-447