# BARA GERİLİM SINIRLARI VE HAT TERMAL LİMİTLERİ KULLANILARAK İDEAL SVC BOYUTUNUN BELİRLENMESİ

DETERMINING THE IDEAL SIZE OF SVC USING SECURE VOLTAGE LIMITS AND LINE THERMAL CONSTRAINTS

**Dr. Öğr. Üyesi Faruk AYDIN**

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Maltepe, İstanbul.

faruk.aydin@marmara.edu.tr

ORCID NO: 0000-0002-6738-6775

**Prof. Dr. İsmail KIYAK**

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Maltepe, İstanbul.

imkiyak@marmara.edu.tr

ORCID NO: 0000-0002-5061-6378

**Doç. Dr. Bora ACARKAN**

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul.

acarkan@yildiz.edu.tr

ORCID NO: 0000-0002-5697-3157

**Öğr. Gör. Dr. Kenan YİĞİT**

Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği Bölümü, Beşiktaş, İstanbul.

kyigit@yildiz.edu.tr

ORCID NO: 0000-0002-4165-4081

## ÖZET

Statik VAR Kompanzatör (SVC) (Static VAR Compensator) bozucu etkiye maruz kalan bir sistemin en hızlı ve en etkili şekilde kararlı hale gelmesini sağlamak amacıyla kullanılan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) (Flexible Alternating Current Transmission Systems) cihazlarından biridir. SVC en genel haliyle bir kapasitör ve tristör kontrollü bir reaktörden oluşan, şönt bağlı statik reaktif güç kompanzatörü olarak tanımlanabilir. Hatlarda meydana gelen gerilim düşüklükleri ve gerilim artışlarında yapısındaki kapasitif ve indüktif değişkenler yardımıyla gerilimi azaltıp artırabilir. Temel olarak reaktif güç kompanzasyonu,

gerilim regülasyonu ve güç faktörünü düzeltmek amacıyla kullanılan SVC, statik bir donanım olması sebebiyle sisteme hızlı bir şekilde yanıt verebilir. Reaktif gücü kontrol ederek sistemin gerilimini belirli sınırlar içinde tutabilen bu donanımlar uzun yıllardır güç sistemlerinde kullanılmaktadır. Ekonomik sebeplerden ötürü şebekedeki tüm baralara kompanzatör yerleştirmek mümkün değildir. FACTS cihazları için en uygun konumun ve ideal boyutun belirlenmesi şebeke stabilite koşullarının hesaplanmasını gerektirmekte ancak lineer olmayan güç akışı denklemleri bu problemi oldukça karmaşık hale getirmektedir. Bu çalışmada, güç sisteminde kullanılan SVC'nin ideal boyutu sistem kısıtlamaları da gözetilerek sistematik bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Bu amaçla öncelikle IEEE'nin 14 baralı şebeke modelinde her baraya aynı özellikte SVC tesis edilmiş ve sistemin yüklenebilirliği baz alınarak en uygun konum bulunmuştur. Bir sonraki aşamada ideal boyutun bulunması amacıyla basit, hızlı ve güvenilir bir sistematik yaklaşım ile kompanzatörün büyüklüğü hesaplanmıştır. IEEE'nin örnek şebeke modellerinde hat ve trafo limitleri bulunmadığından yapılan çalışmalarda bu tür sınırlamalar ihmal edilmektedir. Bununla beraber bazı araştırmacılar tarafından simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere termal limit değerleri önerilmiştir. Burada yapılan çalışmada, sürekli güç akış analizi ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda sistem temel yükünün birkaç katında dahi güvenli gerilim sınırlarında kalındığı görülmüştür. Bununla beraber herhangi bir barada güvenli gerilim sınır değerine ulaşılmadan önce bazı iletim hatlarının aşırı yüklendiği tespit edilmiştir. Bu nedenle hatların termal limitleri de dikkate alınarak en uygun boyut hesabı tekrarlanmış, kompanzasyon için gerekli reaktif güç değeri hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** SVC, FACTS, gerilim kararlılığı, reaktif güç kompanzasyonu.

## ABSTRACT

Static VAR Compensator (SVC) is one of the Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) devices used to ensure that a system exposed to disturbances stabilizes in the fastest and most effective way. SVC can be defined in its most general form as a shunt-connected static reactive power compensator consisting of a capacitor and a thyristor-controlled reactor. In case of voltage sags and voltage swells in the lines, it can reduce or increase the voltage with the help of capacitive and inductive variables in its structure. SVC, which is basically used for reactive power compensation, voltage regulation and power factor correction, can respond quickly to the system since it is a static equipment. These equipment, which can maintain the system voltage within certain limits by controlling the reactive power, have been used in power systems for many years. Due to financial reasons, it is not possible to install compensators on all buses in the grid. Determining the optimal location and ideal size of FACTS devices requires calculation of network stability conditions, but nonlinear power flow equations make this problem quite complicated. In this study, the ideal size of the SVC used in the power system was calculated with a systematic approach, taking into account the system constraints. For this purpose, first of all, in IEEE 14-bus network model, SVC with the same features was installed on each buses and the most suitable location was found based

on the loadability of the system. In the next stage, the reactive power capacity of the compensator was calculated with a simple, fast and reliable systematic approach in order to find the ideal size. Since there are no line and transformer limits in IEEE's sample network models, such constraints are ignored in the literature. However, thermal limit values have been suggested by some researchers to be used in simulation studies. In the study conducted here, as a result of the simulations carried out with continuation power flow analysis, it was observed that the system remained within secure voltage limits even at several times the base load. However, it has been determined that some transmission lines are overloaded before the secure voltage limit value is reached at any bus. For this reason, taking into account the thermal limits of the lines, the optimal size calculation was repeated, the required reactive power value for compensation was calculated and the results were compared.

**Keywords**: SVC, FACTS, voltage stability, reactive power compensation.

## GİRİŞ

Artan nüfus, sanayinin büyümesi ve teknolojideki gelişmelere paralel olarak enerji talebindeki artış güç sistemlerinin kararlılık sınırlarında çalışmasına sebep olmaktadır. (Öztürk, Bozali ve Tosun, 2016). Enterkonnekte sistemdeki bağlantı sayısının artışı, kontrol teknolojilerindeki gelişmeler ve aşırı yüklü çalışma koşulları gerilim kararlığı, frekans kararlığı, rotor açı kararlılığı gibi farklı güç sistem kararlılık türlerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Dirik, Özdemir ve Kocaman, 2006). Gerilim, akım ve frekans limit değerlerinin incelendiği güç kalitesi çalışmalarında en önemli konu gerilim kalitesidir. Bu alanda yapılan araştırmalar gerilim kaynaklı kalite problemleri arasında şebekeye en büyük zarara sebep olanın gerilim çökmeleri olduğunu göstermektedir (Lacommare ve Eto, 2004). Güç sistemindeki herhangi bir bozucu etki şebekenin küçük bir bölgesinde meydana gelmesine rağmen çok daha büyük bir alanda hatta sistemin tümünde gerilim çökmesine neden olabilir. Kesintilerin doğrudan ve dolaylı maliyeti milyarlarca dolara ulaştığından son yıllarda güç sistem mühendisleri bu alanda daha yoğun bir şekilde çalışmaktadır.

Şebekede gerilim kararlılığını etkileyen en önemli unsur reaktif güç akışı olduğundan güç sistemlerinde en sık kullanılan kontrol mekanizması iletim hatlarına seri, paralel kompanzatörlerle reaktif güç kompanzasyonu yapmaktır. Bu tip kompanzatörlere Static VAR Compensator (SVC) (Statik VAR Kompanzatör), Static Synchronous Compensator (STATCOM) (Statik Senkron Kompanzatör), Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSK), Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TKSK), Birleşik Güç Akış Denetleyicisi (BGAD) örnek olarak verilebilir. Genel olarak Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazları olarak adlandırılan bu kontrolörlerin kullanımı hızla artmaktadır (Aydın, 2021; Aydın, Gümüş, Acarkan ve Yiğit, 2022).

SVC'ler bozucu etkiye maruz kalan bir sistemin en hızlı ve en etkili şekilde kararlı hale gelmesini sağlamak amacıyla kullanılan FACTS cihazlarından biridir. Reaktif gücü kontrol ederek sistemin gerilimini belirli sınırlar içinde tutabilen bu donanımlar, STATCOM ve BGAD gibi FACTS cihazlarına göre daha düşük maliyetli olduğundan uzun yıllardır güç

sistemlerinde kullanılmaktadır (Tosun, 2011). Ancak ekonomik sebeplerden ötürü şebekedeki tüm baralara kompanzatör yerleştirmek imkânsızdır. FACTS cihazları için en uygun konumun ve ideal boyutun belirlenmesi şebeke stabilite koşullarının hesaplanmasını gerektirmektedir. Bununla beraber, lineer olmayan güç akışı denklemleri bu problemi oldukça karmaşık hale getirmektedir. FACTS cihazlarının farklı amaçlar için kullanılan birçok değişik türü olduğundan uygun lokasyon ve boyut seçimi konularında birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalar genellikle kullanılacak ekipmanların sayısını, konumunu ve büyüklüğünü hesaplamaya yöneliktir. Bu doğrultuda değişik algoritmalar kullanılarak optimizasyon uygulamalarına yoğunlaşılmıştır. Bu çalışmada ise güç sisteminde kullanılan SVC için ideal boyutun tespiti sistem kısıtlamaları da gözetilerek sistematik bir yaklaşımla bulunmaya çalışılmıştır.

## YÖNTEM

### Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri

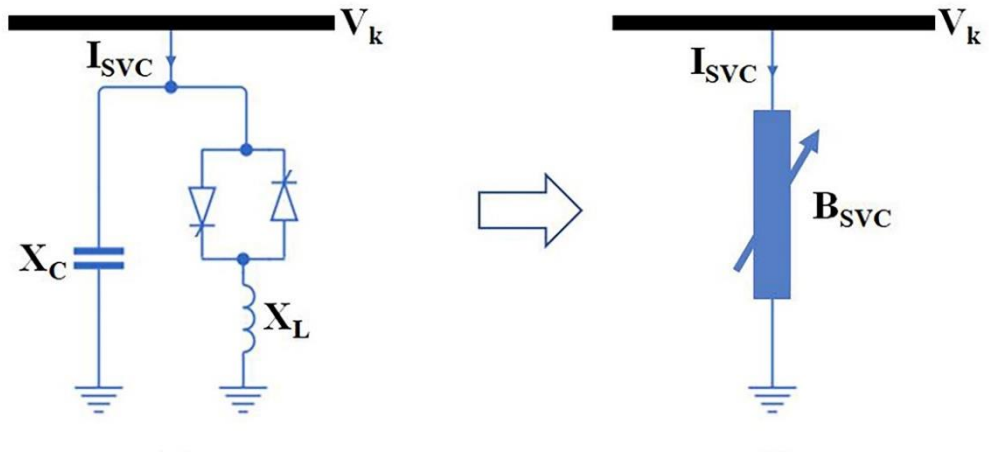
Güç sistemlerinde uzun süredir kullanılan şönt/seri reaktörler/kapasitörler, kademe ayarlı transformatörler, faz kaydırıcı transformatörler vb. yeteri kadar hızlı ve hassas değildir. Sistem dinamiklerin daha hızlı ve daha güvenli şekilde karşılanması amacıyla, güç elektroniği tabanlı FACTS cihazlarının mekanik kontrol elemanlarının yerini almasıyla birlikte şebeke kapasitesinde ve kontrol edilebilirliğinde artış sağlanmıştır (Çifci, 2015). Güç elektroniği alanındaki ilerlemeler neticesinde değişik amaçlar için farklı türde FACTS cihazlarını geliştirilmesiyle bu donanımları sınıflandırma ihtiyacı doğmuştur. Teknolojik özelliklerine göre gerilim kaynaklı anahtarlamalı çevirici ve tristör kontrollü FACTS cihazları olmak üzere iki grupta sınıflandırma yapılmaktadır. Şebeke bağlantı türüne göre seri, paralel, seri-seri ve seri-paralel bağlı olmak üzere dört farklı yapı mevcuttur (Çifci, 2015).

Kompanzasyon seviyesine bağlı olarak, seri kompanzatör kullanımı güç transferi kapasitesini artırmak için en uygun seçimdir. Tristör Anahtarlamalı Seri Kompanzatör, Tristör Kontrollü Seri Kapasitör, Tristör Kontrollü Seri Reaktör ve Statik Senkron Seri Kompanzatör bu donanımlara örnek olarak verilebilir. Şönt kompanzatörler ise kararlılık sınırını artırmak için en uygun seçenektir. İletim hattına paralel olarak bağlanıp sisteme akım enjekte ederek bağlandıkları nokta ve çevresinde gerilimi kontrol etmek için kullanılan bu donanımlara SVC ve STATCOM örnek olarak verilebilir. Birleşik Güç Akış Denetleyicisi ise bu iki kompanzatörü de yapısında bulunduran eksiksiz bir kontrolördür (Aydın, 2021).

### SVC

SVC en genel haliyle bir kapasitör ve tristör kontrollü bir reaktörden oluşan, şönt bağlı statik reaktif güç kompanzatörü olarak tanımlanabilir. Hatlarda meydana gelen gerilim düşüklükleri ve gerilim artışlarında yapısındaki kapasitif ve indüktif değişkenler yardımıyla gerilimi azaltıp artırabilir. Temel olarak reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu ve güç faktörünü düzeltmek amacıyla kullanılan SVC, statik bir donanım olması sebebiyle sisteme hızlı bir şekilde yanıt verebilir. STATCOM ve BGAD'ye kıyasla daha düşük kurulum maliyetine

sahip bu donanımların bakım maliyeti düşük, kontrolü ise basittir. Operasyonel kayıpların azaltılması, geçici kararlılığın artırılması, harmoniklerin kontrol altına alınması güç kalitesinin iyileştirilmesi diğer olumlu özellikleridir. SVC'nin teorik hesaplamalarda kullanılan eşdeğer devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir (Bakır, 2018).



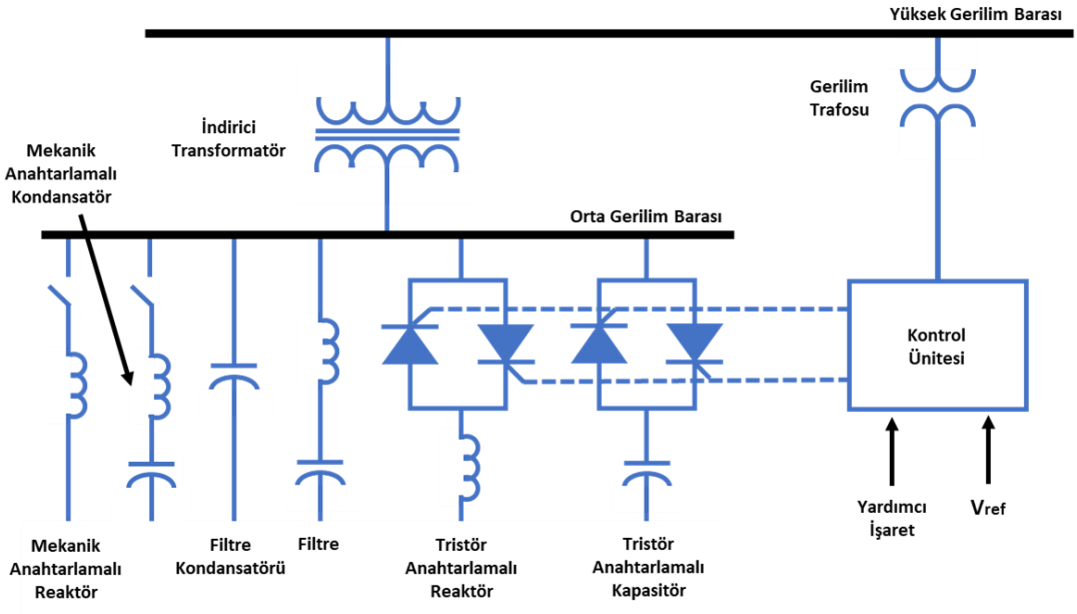

Şekil 1. SVC eşdeğer devre modeli

Şekil 1.'de görülen k barası için verilen akım ve reaktif güç değerleri Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) ile hesaplanmaktadır.

$$I_{SVC} = jB_{SVC} \cdot V_k \quad (1)$$

$$Q_{SVC} = B_{SVC} \cdot V_k^2 \quad (2)$$

Buradaki $I_{SVC}$ ve $Q_{SVC}$ sırasıyla sisteme verilen veya sistemden alınan reaktif akım ve reaktif gücü belirtmektedir. $B_{SVC}$ suseptans değerini, $V_k$ ise SVC'nin bağlı olduğu baranın gerilimini vermektedir. Şekil 2'de SVC'nin genel bağlantı yapısı sunulmuştur (Çifci, 2015).




Şekil 2. SVC'nin genel bağlantı yapısı

## Gerilim Kararlılığı

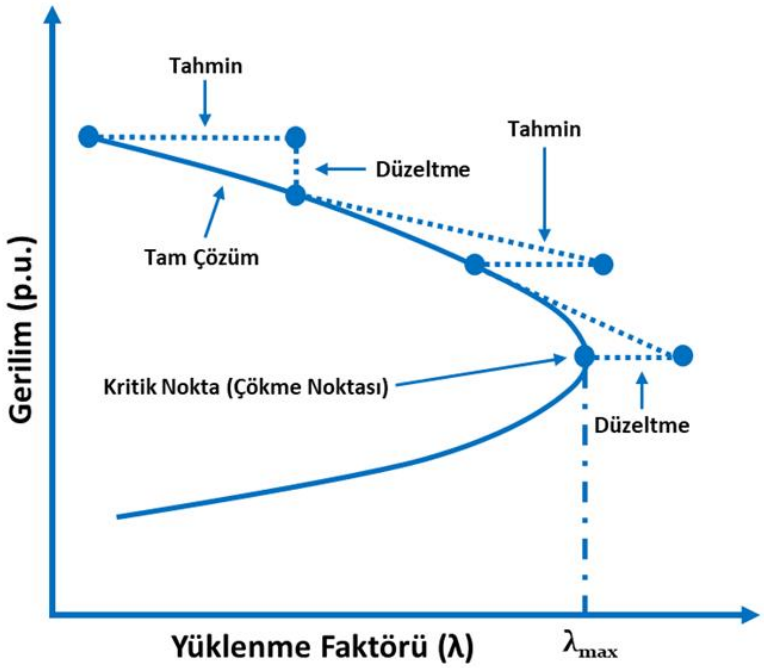
Güç sistemlerinde kararlılık, belirli şartlarda çalışan şebekenin fiziksel bir bozulmaya maruz kaldıktan sonra yeniden stabil operasyon koşullarına dönebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Şebeke bağlantılarındaki artış, yeni kontrol sistem ve teknolojilerinin devreye alınması, aşırı yüklü çalışma koşulları sistem kararsızlığının değişik türlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu doğrultuda, değişik tiplerde ve farklı büyüklükte bölgeleri etkileyen kararsızlık olayları üç alt kategoriye ayrılmıştır (Tosun, 2011). Bunlar rotor açı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığıdır.

Gerilim kararlılığı, normal çalışma koşullarında ve herhangi bir bozucu etki sonrası tüm sistem baralarının güvenli sınırlar dahilinde kalabilmesidir. Gerilim kararsızlığı, yük baralarındaki talebin karşılanamaması sonucu şebekede art arda meydana gelen kesintiler şeklinde kendini gösterir. Şebekenin çok büyük bir kısmında veya tamamında kesintiye neden olan olaylar süreci ise gerilim çökmesi olarak tanımlanmaktadır. Bozucu etki sonrası yük baralarındaki gerilimlerin kritik değerlerden daha düşük olması güç sisteminin gerilim çökmesine doğru ilerlediği şeklinde yorumlanmaktadır (Demircioğlu, 2006). Güç istemindeki arızalar, iletim hatlarının aşırı yüklenmesi, üretim ve yük baraları arasındaki uzun mesafeler, kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyon bozukluğu, kaynak gerilimlerinin çok düşük olması, reaktif güç kompanzasyonun yetersizliği vb. faktörler gerilim kararsızlığının temel nedenleridir (Tosun, 2011).

Gerilim kararlılığı analizlerinde tüm bara gerilimlerinin işletme limitleri içerisinde kalıp kalmadığı tespit edilip, çalışma noktasının çökme noktası olarak da bilinen kritik noktaya olan uzaklığı hesaplanır. Bu amaçla yapılan çalışmalar zaman eksenli simülasyonları baz alarak yapılan dinamik gerilim kararlılığı analizi ve güç akışı çözümlerini baz alan statik gerilim kararlılığı analizidir. Yapılan analizler neticesinde gerilim çökme noktaları, iletilen aktif/reaktif güçler açısından zayıf bölgeler, baraların maksimum yüklenme sınırları ve sistemde kullanılması düşünülen kompanzatörlerin boyutu belirlenebilir. Sistemin yüklenebilirlik kapasitesinin incelendiği statik gerilim kararlılığı analizinde, şebekenin analiz programlarıyla modellenip ardışık güç akışı hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Kritik noktaya kadar devam eden hesaplamalar sonucunda sistemin gerilim sınırları belirlenmiş olur (Poyraz, 2019). Bu amaçla en çok PV eğrisi, QV eğrisi, Jacobian matrisin determinantı ve L-indisi yöntemi kullanılmaktadır. PV eğrisi yönteminde, güç akış analizleri ile elde edilen sonuçlar kullanılarak bara gerilimlerinin aktif güce göre değişimi çizdirilmektedir. Eğri üzerindeki kararlı çalışma noktasının kritik gerilim noktasına (çökme noktası) olan mesafesi ise Gerilim Kararlılığı Marjı (Yüklenme Marjı, Yüklenme Faktörü) olarak adlandırılır. Güç sisteminde gerilim çökmesi riski, sistem gerilimi maksimum güce karşılık gelen kritik gerilim noktasından ne kadar uzaksa o kadar azdır (Ova, 2017).

Newton-Raphson, Gauss-Seidel gibi yöntemlerin kullanıldığı güç akışı çalışmalarında yüklenebilirlik sınırlarının bulunması sırasında birtakım hesaplama problemleri ortaya çıkmaktadır. PV eğrisinin kararsız olduğu bölgelerdeki değerlere ulaşmak amacıyla, güç akışı

eşitlikleri içerisinde bilinmeyenler için ilave denklemlerin kullanıldığı sürekli güç akışı yöntemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan PSAT programı da sürekli güç akışı yöntemini kullanarak PV eğrilerini çizdirmektedir. Sürekli güç akışı yöntemi iki adım tekniğine (tahmin etme ve düzeltme) dayanmakta olup sistemin sınırları Şekil 3'de gösterildiği gibi kolaylıkla elde edilebilmektedir. Sistemin gerilim kararsızlığına ne kadar yakın olduğunu gösteren bu yöntemin özellikle büyük güç sistemlerindeki kısa hesaplama süresi ve diğer güç akışı tekniklerinden farklı olarak çökme noktasından (kritik nokta) sonra bile eğrinin tamamını elde edebilmesi avantajlı yönleridir. Bu yöntemde şekilde verilen yüklenme faktörü (λ) normal başlangıç yük koşullarını göstermek üzere, gerilim çökme noktasına karşılık gelen, maksimum yüklenebilirlik marjı (λmax) olarak adlandırılan değer hesaplanmaktadır (Aydın, 2021; Aydın ve Gümüş, 2021).

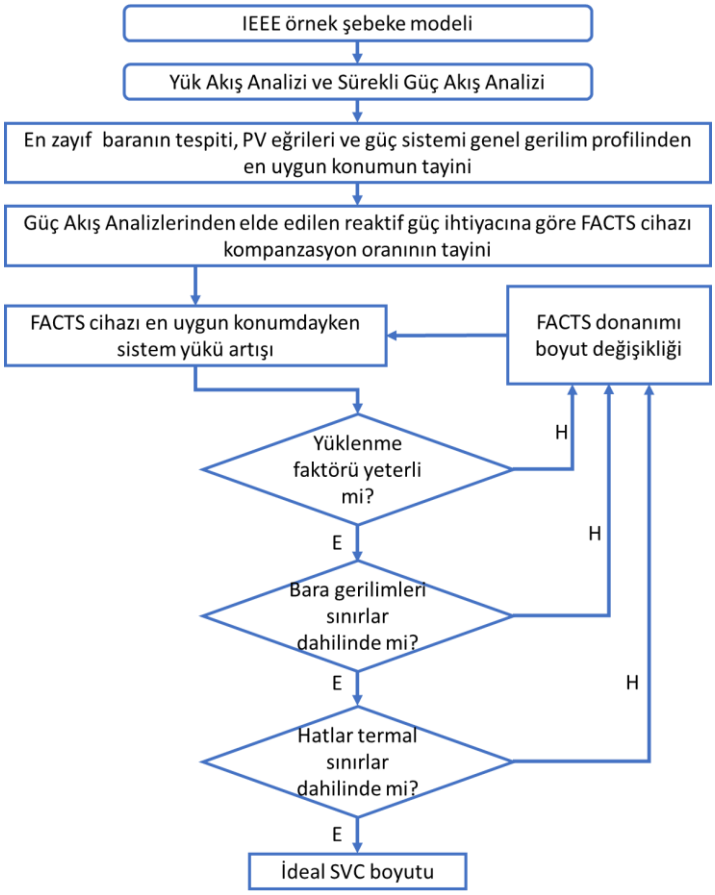



Şekil 3. Sürekli güç akışı yöntemi ile elde edilen PV eğrisi

**FACTS Cihazının Optimal Boyutunun Hesaplanması**

Güç sistemlerinde kullanılacak FACTS donanımları için optimal konum ve ideal boyutun tespit edilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada sistemin yüklenebilirliği baz alınarak en uygun konumu bulunan SVC'nin baralardaki gerilim güvenlik sınırları ve hat termal limitleri kullanılarak ideal boyutu belirlenmiştir. Bu doğrultuda örnek şebeke modelinde her baraya aynı özellikte SVC tesis edilmiş ve maksimum yüklenebilirlik marjının en yüksek olduğu konum belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada ideal boyutun bulunması amacıyla basit, hızlı ve güvenilir bir sistematik yaklaşım ile kompanzatörün büyüklüğü hesaplanmıştır (Telang ve Bedekar, 2016). American National Standards Institute (ANSI) tarafından yayınlanan C84.1 standardına göre Kuzey Amerika için şebeke gerilim toleransı ±0.05 p.u. olarak belirlenmiştir (Summers, Johnson, Zamora, Hansen, Anandan ve Showalter, 2020). Danimarka ve Almanya gibi ülkelere benzer şekilde ülkemizde de 0,9 – 1,1 p.u.

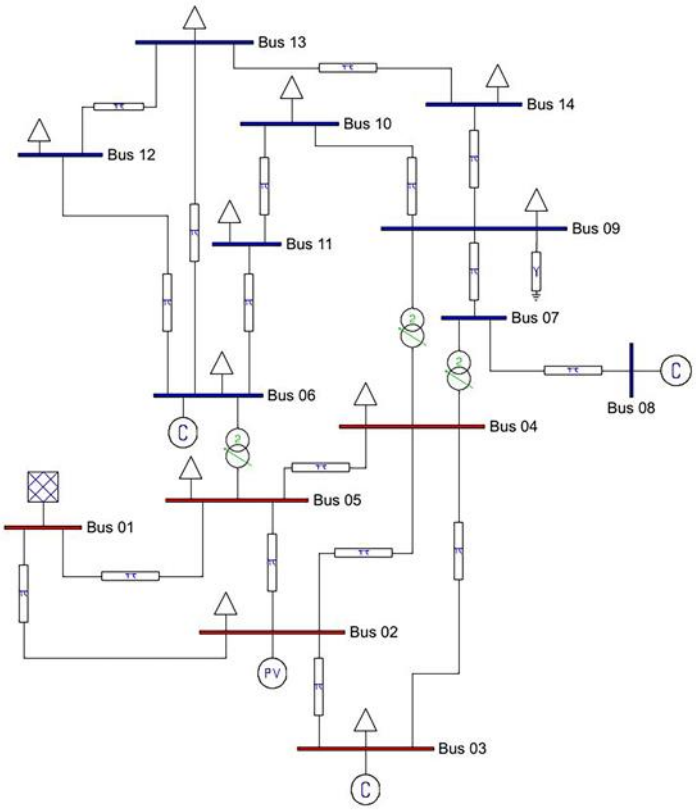
arasındaki gerilim dalgalanmaları kabul edilebilir seviyededir (İmpram, 2019). Bu çalışmada kabul edilebilir bara gerilim sınırları sürekli hal çalışma koşulları için 0,9 – 1.1 p.u. olarak belirlenmiştir. PV eğrisinde görüldüğü gibi yüklenmeyle beraber her baranın gerilimi düşmeye başlayacaktır. Herhangi bir baranın gerilim değeri güvenli gerilim sınırı olarak belirlenen 0,9 p.u. değerinin altına düştüğü anda kompanzatör eklenen baranın gerilimi kullanılarak en uygun boyut hesaplanabilir. Yapılan incelemeler neticesinde herhangi bir bara gerilimi güvenli gerilim sınır değerine ulaşmadan önce bazı iletim hatlarının aşırı yüklendiği görülmüştür. Dolayısıyla hatların termal limitleri de dikkate alınarak ve yine kompanzatör eklenen baranın gerilimi kullanılarak en uygun boyut hesabı tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4'de ideal boyutun hesaplaması için gerekli akış şeması görülmektedir.




Şekil 4. İdeal boyut tespitinde kullanılan akış şeması

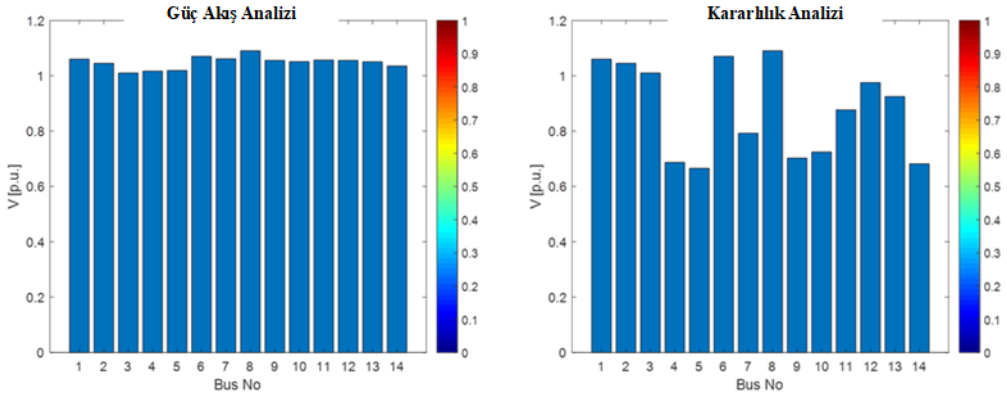
## BULGULAR VE TARTIŞMA

Yöntem bölümünde FACTS, gerilim kararlılığı, PV eğrisi yöntemi, optimal boyut hesabı vb. konularda gerekli bilgiler verilip çalışmanın teorik altyapısı oluşturulmuştur. Bu bölümde öncelikle şebekede gerilim kararlılığını sağlamak amacıyla FACTS cihazı için en uygun konum belirlenecektir. Bu doğrultuda IEEE'nin 14 baralı test sisteminde FACTS donanımı olarak SVC seçilmiş ve her barada aynı özellikte kompanzatörün kullanılmasıyla maksimum yüklenebilirlik marjının en yüksek olduğu konum belirlenmiştir. Şekil 5'de PSAT programıyla modellenen IEEE 14 baralı şebeke modeli görülmektedir (Aydın, 2021).




Şekil 5. PSAT programıyla modellenen IEEE 14 baralı test sistemi

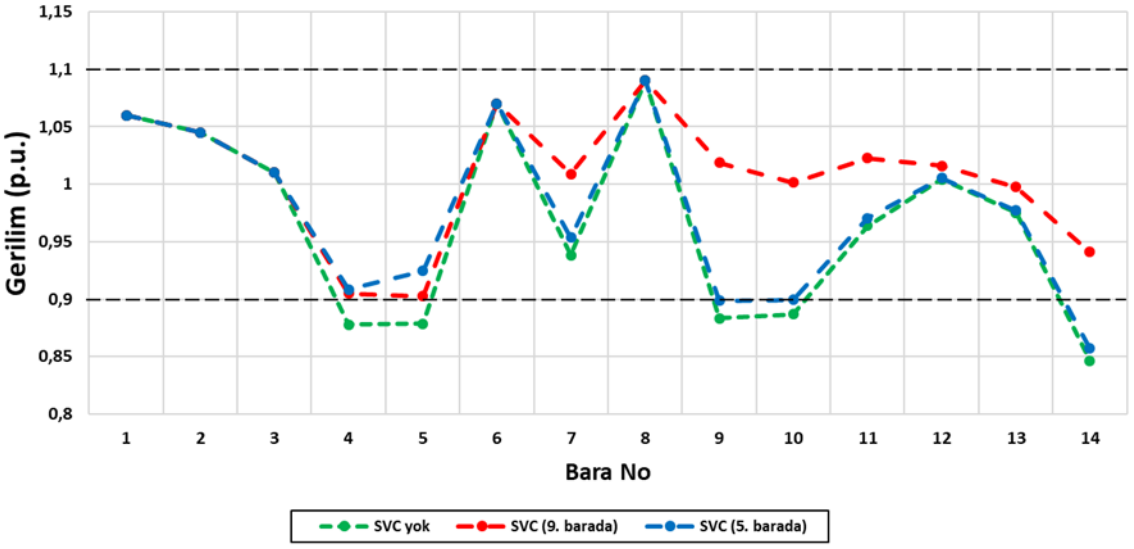
Örnek sistemde 2 generatör, 3 senkron kapasitör, 20 iletim hattı bulunmaktadır. 11'i yük barası olmak üzere toplam 14 baradan oluşan sistemdeki aktif ve reaktif yüklerin toplamı sırasıyla 259 MW ve 77,4 MVAR'dır. Örnek şebeke modelinde öncelikle güç akış analizi ile sürekli güç akış analizi yapılmış ve elde edilen bara gerilim değerleri Şekil 6'da sunulmuştur.




Şekil 6. 14 baralı test sistemi gerilim profili

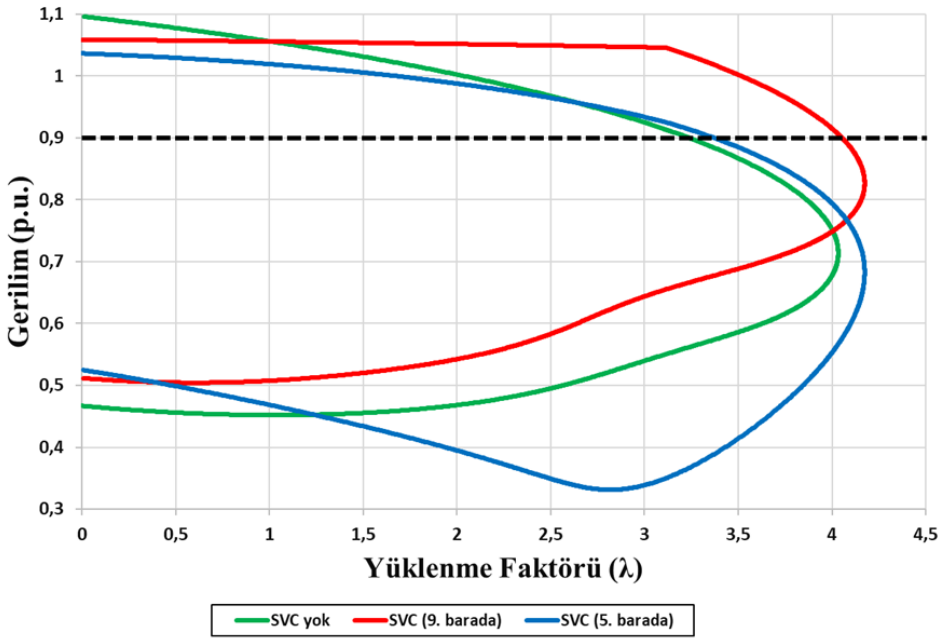
Şönt kompanzatörlerin kurulumu için en uygun konumun sistemdeki en zayıf bara olduğu genel kabul gören bir uygulama şeklidir. Örnek test sisteminde sürekli güç akışı değerlerinin kullanıldığı kararlılık analizi grafiği incelendiğinde 5. baranın en kötü olan gerilim değerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada SVC'nin anma değeri 100 MVAR alınmış olup tüm yük baralarında kompanzasyon sonrasındaki değerler karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de 5. ve

9. baraya SVC eklenmesi durumları karşılaştırılmakta olup gerilim değerleri incelendiğinde en zayıf bara olan 5. bara yerine 9. baraya kompanzasyon yapılması halinde sistemin genel gerilim profilindeki iyileşme açıkça görülmektedir.




Şekil 7. SVC olmayan, 5. ve 9. barada SVC olması durumları için sistem gerilim profili

Şekil 8'deki PV eğrileri incelendiğinde sürekli güç akış analizi sonucunda herhangi bir kompanzasyonun yapılmadığı durumda yüklenme marjının 4,03 değerinde olduğu görülmektedir. Bu grafik sistem yükü temel yükün 4,03 katına çıktığında gerilim çökmesinin meydana geleceğini ifade eder. En zayıf bara olan 5. baraya SVC tesis edilmesi halinde bu değerin 4,13'e çıktığı tespit edilmiştir. En uygun konum olan 9. baraya SVC tesis edildiğinde ise bu değer 4,17'ye yükselmiştir. Sistemin genel gerilim profilinde olduğu gibi PV eğrilerinde de kararlılık açısından en uygun konumun 9. bara olduğu anlaşılmaktadır.




Şekil 8. 14 baralı test sisteminde PV eğrileri

Bu çalışmanın son aşamasında optimal konumu bulunan kompanzatörün boyutu hesaplanmıştır. 14 baralı sistemde en iyi konum 9. bara olduğundan, Şekil 4'deki akış şemasında açıklanan sistematik yaklaşımla, SVC bu baradayken sistem yükü artırılmıştır. Tablo 1'de görüldüğü gibi yüklenmeyle beraber her baranın gerilimi düşmeye başlamaktadır. Herhangi bir baranın gerilim değeri (burada 5. bara) yüklenebilirlik sınırı olan 0,9 p.u. değerinin altına düştüğü anda kompanzatör eklenen baranın (9. bara) gerilimi kullanılarak en uygun boyut Eşitlik (2) yardımıyla hesaplanabilmektedir. Elde edilen tüm reaktif güç değerlerinde 9. baranın başlangıç gerilimi (1,05566 p.u.) referans alınmıştır. Tablo 1'de sistem temel yükünün katları ve beşinci bara gerilim değerinin tam 0,9 p.u.'in altına düşeceği noktadaki gerilim değerleri verilmiştir. Yapılan hesaplama neticesinde FACTS cihazının optimal boyutu 93 MVAR bulunmuştur.

**Tablo 1.** Örnek test sistemi için optimal boyut tespitinde elde edilen değerler (λ, Vm)

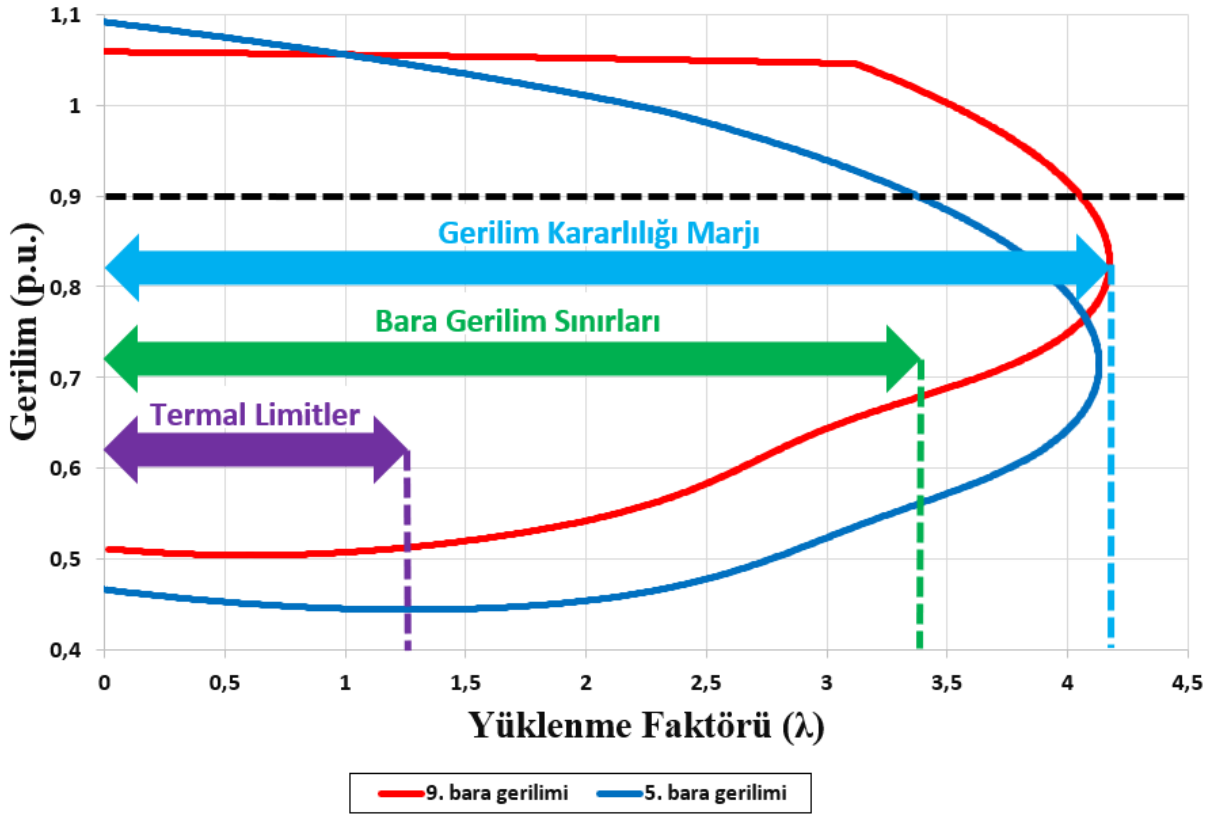
| **Bara No.** | SVC 9. baradayken gerilim değerleri | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bara 04** | 1,01700 | 1,01081 | 0,98630 | 0,93604 | 0,90483 | 0,80564 | 0,70673 |
| **Bara 05** | 1,01924 | 1,01309 | 0,98781 | 0,93359 | 0,90055 | 0,79376 | 0,68296 |
| **Bara 07** | 1,06122 | 1,05894 | 1,04988 | 1,03144 | 1,00884 | 0,92960 | 0,85785 |
| **Bara 09** | 1,05566 | 1,05476 | 1,05163 | 1,04638 | 1,01872 | 0,91476 | 0,82682 |
| **Bara 10** | 1,05074 | 1,04817 | 1,03979 | 1,02755 | 1,00133 | 0,90769 | 0,83074 |
| **Bara 11** | 1,05677 | 1,05461 | 1,04764 | 1,03765 | 1,02279 | 0,97199 | 0,93153 |
| **Bara 12** | 1,05514 | 1,05159 | 1,04023 | 1,02418 | 1,01594 | 0,99589 | 0,98457 |
| **Bara 13** | 1,05030 | 1,04572 | 1,03094 | 1,00994 | 0,99770 | 0,96545 | 0,94520 |
| **Bara 14** | 1,03530 | 1,02821 | 1,00517 | 0,97176 | 0,94123 | 0,84500 | 0,77236 |
| **λ** | **1,00** | **1,24** | **2,00** | **3,00** | **3,37** | **4,00** | **4,17** |

Örnek test sisteminde yapılan kompanzasyonun amacı kararlılığa katkı sağlayıp sistemin yüklenebilirliğini mümkün olduğu kadar artırmaktır. Bununla beraber artması istenilen değerlerden biri de güvenli gerilim sınırı olarak belirlenen 0,9 p.u. değerine ulaşılan yüklenme değeridir. Beklendiği üzere yüklenme marjında da kompanzasyon yapılmadan önceki duruma göre artış olmuş, yüklenme faktörünün değeri 2,88'den 3,37'ye çıkmıştır.

Şekil 8'deki PV eğrileri ve Tablo 1'deki değerler incelendiğinde sistem temel yükünün birkaç katında dahi güvenli gerilim sınırlarında kalındığı görülmektedir. Bununla beraber bu yüklenme değerleri için sistemi oluşturan iletim hatlarının taşıma kapasitelerinin de incelenmesi zorunludur. IEEE örnek şebeke modellerinde hat ve trafo limitleri bulunmamakla beraber yazarlar tarafından simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere termal limit değerleri belirlenmiştir (Jobanputra ve Kotwal, 2021; Verma, Saha ve Mukherjee, 2017). Örnek şebeke sisteminde trafolar da iletim hattı gibi modellenmiş olup Souag ve Benhamida (2014) tarafından yapılan yayındaki termal limit değerleri kullanılmıştır. Sürekli güç akış analizi sırasında herhangi bir hattın termal sınırına ulaşmasıyla beraber sistem yükü daha fazla artırılamayacağı için o andaki yüklenme faktörü ve kompanzatör eklenen baranın (9. bara) gerilimi kullanılarak en uygun boyut Eşitlik (2) yardımıyla hesaplanabilmektedir. Yapılan hesaplama neticesinde ilk önce 1. ve 2. baralar arasındaki iletim hattının maksimum yük taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüş ve FACTS cihazının optimal boyutu 99,8 MVAR olarak bulunmuştur. Kompanzatör reaktif güç kapasitesinin neredeyse tamamını kullanmasına

rağmen yüklenme faktörünün değeri 1,24'e ulaştığında 1. ve 2. baralar arasındaki iletim hattı aşırı yüklenmeye başlamıştır. Bu hat, yük taşıma kapasitesi en yüksek olan iletim hattı olmasına karşın salınım barasından aldığı gücü transfer ettiği için sistemdeki en büyük yükü taşımaktadır. Benzer şekilde, maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşan bir sonraki hat 1. ve 5. baralar arasındaki iletim hattı olup yine salınım barasından beslenmektedir.

Bara gerilim sınırları ve hat termal limitleri dikkate alınmayıp PV eğrilerindeki sistemin çökmeye gittiği kritik noktadaki gerilim değeri (yüklenme faktörünün 4,17'ye ulaştığı anda 9. bara gerilimi 0,82682 p.u.) kullanılırsa FACTS cihazının optimal boyutu 61,3 MVAR olarak hesaplanacaktır. Sisteme verilen reaktif güç değeri bara gerilimlerinin karesi ile değiştiğinden özellikle kritik nokta civarındaki düşük gerilimlerde bu şekilde bir sonuç normal karşılanmaktadır. PV eğrileri üzerinde termal limitler, bara gerilim sınırları ve gerilim kararlılığı marjına karşılık gelen yüklenme faktörü değerleri Şekil 9'da sunulmuştur.




Şekil 9. Sistem kısıtlılıklarına karşılık gelen yüklenme faktörü değerleri

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, güç sistemlerindeki gerilim kararsızlığını gidermek amacıyla kullanılacak FACTS donanımı için ideal boyut hesaplanmaya çalışılmıştır. Çevresel ve ekonomik kısıtlamaların yeni iletim hatlarının yapılmasını engellemesi nedeniyle FACTS cihazları için en uygun konumun ve ideal boyutun bulunması zorunludur. Bu doğrultuda simülasyonların gerçekleştirilebilmesi için öncelikle IEEE'nin 14 baralı test sistemi PSAT programı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra FACTS cihazının en uygun konumu şebekenin genel

gerilim profili ve PV eğrilerindeki yüklenebilirlik değerleri gözetilerek bulunmuştur. Son olarak ideal konumunun 9. bara olduğu bulunan kompanzatörün boyutu sistematik bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Bara gerilim sınırlarının ve hat termal limitlerinin dikkate alınmadığı durumda, PV eğrisinde sistemin çökmeye gittiği kritik nokta için FACTS cihazının ideal boyutu 61,3 MVAR olarak hesaplanmıştır. Baraların gerilim sınırları dikkate alınarak yapılan hesaplamada ise SVC için ideal boyut 93 MVAR olarak bulunmuştur. Örnek şebeke modelindeki iletim hatlarının termal sınırları dikkate alındığında ise FACTS cihazının ideal boyutu 99,8 MVAR olarak hesaplanmıştır.

Şebekedeki şönt kompanzasyon uygulamalarının amacı kararlılığa katkı sağlayıp sistemin yüklenebilirliğini mümkün olduğu kadar artırmaktır. En zayıf barada yapılan kompanzasyon uygulamasının en iyi sonucu vereceği tahmin edilmesine rağmen başka barada daha iyi neticeler alınabilmektedir. Bu durum, FACTS donanımlarının konum ve boyut hesaplamalarında ayrıntılı inceleme yapılmasının ve birçok çalışma koşulunun da araştırılmasının gerekliliğini göstermektedir. Özellikle ideal boyut hesabında bara gerilim sınırları ve hat termal limitleri mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Sistemin çökmeye gittiği kritik noktalardaki düşük bara gerilimleri nedeniyle çok daha küçük boyutlarda SVC'nin kompanzasyon için yeterli olduğu izlenimi oluşmakta ve sonuçlar yanıltıcı olabilmektedir. Bununla beraber, IEEE 14 baralı test sistemi için araştırmacıların önerdiği hat termal limitlerinin yetersiz kaldığı düşünülmekte olup güç taşıma kapasiteleri için daha yüksek değerler belirlenmesi uygun olacaktır. İleride yapılacak çalışmalarda burada önerilen yöntemin kullanılabilirliği daha büyük şebeke modelleri ve gerçek bir güç sistemi için de tekrarlanabilir. STATCOM, BGAD gibi farklı kontrolörlerin kullanıldığı, FACTS kurulum maliyetinin azaltılması, düşük güç kayıpları gibi hedeflerin de dikkate alındığı çalışmalar gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR


Aydın, F. (2021). Gerilim kararlılığının sağlanması için statik var kompanzatör konumunun çok kriterli karar verme teknikleriyle tespiti. Doktora tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Diyarbakır.

Aydın, F., & Gümüş, B. (2021). Determining optimal SVC location for voltage stability using multi-criteria decision making based solution: Analytic Hierarchy Process (AHP) approach. IEEE Access, 9, 143166-143180.

Aydın, F., Gümüş, B., Acarkan, B., & Yiğit, K. (2022). Effect of distributed generation facilities on optimal location of flexible alternating current transmission system controllers. IV. Hagia Sophia International Conference on Multidisciplinary Scientific Studies, İstanbul.

Bakır H. (2018). Güç sistemlerinde FACTS cihazlarının optimal yerleşim noktalarının belirlenmesi. Yüksek Lisans tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Düzce.

Çifci A. (2015). FACTS cihazları kullanılan elektrik güç sistemlerinde enerji fonksiyonu ile gerilim kararlılığı analizi. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

Demircioğlu S.B. (2006). Enerji sistemlerinde gerilim kararlılığı sınırlarının yerel bara parametreleri kullanılarak gerçek zamanlı değerlendirilmesi. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

Dirik, H., Özdemir, M., & Kocaman, Ç. (2006). STATCOM ve SSSC denetleyicilerinin gerilim çökmesine karşı etkisinin incelenmesi. ELECO 2006, Bursa.

İmpram S. (2019). Değişken yenilenebilir enerji penetrasyonu artışının Türkiye güç sistemine etkisi. Yüksek Lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Jobanputra, J., & Kotwal, C. Power flow management analysis using compensating techniques for managing congestion within electrical energy network. SN Applied Sciences, 3, 237.

Lacommare, K., & Eto, J. (2004). Understanding the cost of power ınterruptions to U.S. electricity consumers. University of California Berkeley, USA.

Ova A. (2017). Güç sistemlerinde PV-QV eğrisi yöntemi ile statik gerilim kararlılığı analizi. Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.

Öztürk, A., Bozali, B., & Tosun, S. (2016). Güç sistemi kararlılığını iyileştirecek FACTS cihazlarının bağlantı noktasının belirlenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4(2), 812-825.

Poyraz İ. (2019). Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı indekslerinin uç öğrenme algoritması ile tahmini. Yüksek Lisans tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elâzığ.

Souag, S., & Benhamida, F. Secured economic dispatch algorithm using GSDF matrix. Leonardo Journal of Sciences, 13, 1-14.

Summers, A., Johnson, J., Zamora, R.D., Hansen, C., Anandan, J., & Showalter, C. (2020). A Comparison of DER voltage regulation technologies using real-time simulations. Energies, 13(14), 3562.

Telang, A.S., & Bedekar, P.P. (2016). Application of voltage stability indices for proper placement of STATCOM under load increase scenario. International Journal of Energy and Power Engineering, 10(7), 998-1003.

Tosun S. (2011). Güç sistemlerinde gerilim kararlılığının sezgisel yöntemlerle incelenmesi. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.

Verma, S., Saha S., & Mukherjee, V. A novel symbiotic organisms search algorithm for congestion management in deregulated environment. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 29(1), 5979.