TEEGES

Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article (2022) 1(2):77-88

Effect of Reactive Power Static Compensator on Transient Stability in Power Systems

S. Mohammadali Zanjani[1,2], *Assistant Professor*, Ghazanfar Shahgholian[1,2], *Associate Professor*, Mehdi Mahdavian[3], *Instructor*, Farhad Mesrinejad[4], *Assistant Professor*

[1]*Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*
[2]*Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*
[3]*Department of Electrical Engineering, Naein Branch, Islamic Azad University, Naein, Iran*
[4]*Department of Electrical Engineering, Tiran Branch, Islamic Azad University, Tiran, Iran*

Abstract:

With the rapid progress of semiconductors in the level of voltage and power of the power system as well as the progress of control systems, compensators with high flexibility and performance range have been designed and built to increase the flexibility of energy transmission systems. to be These compensators installed in power systems are called flexible ac transmission systems (FACTS). One of the most important advantages of FACTS devices in the transmission system is to increase the transient stability margin of the power system by controlling the active and reactive power of the line during the occurrence of a fault in the system. In this article, the effect of one FACTS device with parallel connection, i.e. static compensator, on transient stability is investigated. The studied system is a two-machine power system including a hydropower plant and a local power plant. The simulation results show the effect of the compensator on the damping of electric power angle fluctuations. Also, the simulation results show the lack of influence of the compensator on the transmission active power in the transmission line. The simulation results have been obtained using Simulink MATLAB software.

Keywords: Static compensator, transient stability, reactive power, FACTS devices

Received: 17 March 2022
Revised: 2 June 2022
Accepted: 18 July 2022
Corresponding Author: Mehdi Mahdavian, meh_mahdavian@yahoo.com
DOI: http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1962742.1020

فناوری‌های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله پژوهشی

تاثیر جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو بر پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت

سیدمحمدعلی زنجانی[۱و۲]، *استادیار*، غضنفر شاهقلیان[۱و۲]، *دانشیار*، مهدی مهدویان[۳]، *مربی*، فرهاد مصری‌نژاد[۴]، *استادیار*

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳- گروه برق، واحد نائین، دانشگاه آزاد اسلامی، نائین، ایران

۴- دانشکده فنی و مهندسی، واحد تیران، دانشگاه آزاد اسلامی، تیران، ایران

چکیده: با پیشرفت سریع نیمه هادی‌ها در سطح ولتاژ و توان سیستم قدرت و نیز پیشرفت سیستم‌های کنترلی، جبران‌سازهایی با انعطاف‌پذیری و محدوده عملکرد بالا طراحی و ساخته شده تا بر انعطاف‌پذیری سیستم‌های انتقال انرژی افزوده شود. این جبران‌سازها که در سیستم‌های قدرت نصب می‌شوند را سیستم‌های انتقال ac انعطاف‌پذیر (FACTS) می‌نامند. یکی از مهم‌ترین مزایای ادوات FACTS در سیستم انتقال افزایش حاشیه پایداری گذرای سیستم قدرت با کنترل توان اکتیو و راکتیو خط در طول رخ دادن خطا در سیستم است. در این مقاله تاثیر یکی از ادوات FACTS با اتصال موازی یعنی جبران‌کننده وار استاتیکی بر روی پایداری گذرا بررسی می‌شود. سیستم مورد مطالعه یک سیستم قدرت دو ماشینه شامل یک نیروگاه آبی و یک نیروگاه محلی است. نتایج شبیه‌سازی تاثیر جبران‌کننده را بر روی میرایی نوسانات زاویه توان الکتریکی نشان می‌دهد. همچنین نتایج شبیه‌سازی عدم تاثیر جبران‌کننده را بر روی توان اکتیو انتقالی در خط انتقال نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از سیمولینک نرم‌افزار متلب به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: جبران‌ساز استاتیکی، پایداری گذرا، توان راکتیو، اداوات FACTS

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۷

نویسنده‌ی مسئول: مهدی مهدویان، meh_mahdavian@yahoo.com

DOI: http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.1962742.1020

CC BY

۱- مقدمه

انرژی یک نیاز اساسی برای استمرار توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت جامعه است. از مسائل مهم می‌توان به گستردگی نیاز انسان به منابع انرژی اشاره کرد به‌طوریکه تلاش برای دستیابی به منابع دائمی انرژی از اهداف دیرینه انسان محسوب می‌شود. در طول سال‌های متمادی منابع انرژی از مهمترین عوامل حیات اقتصادی صنعتی و علمی کشورها محسوب می‌شود و امنیت ملی و پایداری نظام‌های حکومتی نیز تا حد بسیاری در گرو دسترسی به منابع انرژی است. نیاز جهان به انرژی در طی سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است و منابع انرژی‌های فسیلی پاسخگوی این نیاز برای تکامل و توسعه در آینده نیستند [۱-۶]. گسترش روز افزون صنعت همراه با افزایش بارهای مصرفی و حفظ پایداری دینامیکی همزمان با تامین سطح مجاز ولتاژ باعث ایجاد محدودیت انتقال توان در سیستم قدرت شده است. سیستم انرژی الکتریکی مدرن، شبکه پیچیده‌ای از ماشین‌های سنکرون، خطوط انتقال و بارها است که مشخصه‌های سیستم با تغییرات موجود در بار و برنامه‌های تولید تغییر می‌کند. احداث خطوط انتقال جدید برای افزایش ظرفیت انتقال با افزایش هزینه بهره‌برداری همراه است، لذا برای تامین بار شبکه از جبران‌کننده جهت بهبود وضعیت خطوط موجود استفاده می‌شود. وسایل جبران‌کننده در یک سیستم قدرت نقش اساسی در تثبیت ولتاژ در محدوده مورد نظر را دارند [۷-۹]. پیشرفت سریع الکترونیک قدرت و ساخت نیمه هادی‌های توان زیاد امکانات شگفت‌انگیزی برای توسعه تجهیزات جدید در زمینه‌ی جبران‌سازهای سیستم قدرت فراهم آورده‌است. تاکنون ادوات کنترلی فراوانی تحت عنوان فناوری سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب ۱ (FACTS) برای شبکه‌های انتقال و توزیع طراحی و تکمیل شده‌اند [۱۰-۱۵]. از کاربرد ادوات FACTS می‌توان به کنترل پخش بار و حداقل کردن تلفات خطوط انتقال، افزایش پایداری دینامیکی، تقویت پایداری گذرا، قابلیت اطمینان ۲ یا امنیت، بهبود کیفیت توان ۳ و بهبود نمایه ولتاژ اشاره کرد [۱۶-۱۹]. ادوات FACTS مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت متشکل از تجهیزات استاتیکی برای بهبود کنترل‌پذیری و توسعه ظرفیت انتقال توان در شبکه به‌کار می‌روند [۲۰،۲۱]. فناوری FACTS یک کنترل‌کننده الکترونیک قدرت تکی نیست و از تعدادی کنترل‌کننده تشکیل شده است که می‌توانند بصورت تکی و یا مجتمع با یکدیگر برای کنترل پارامترهای سیستم قدرت استفاده شوند. بر اساس نظر انجمن مهندسان برق و الکترونیک ٤ (IEEE)، ادوات FACTS به این صورت تعریف می‌شوند: "سیستم بر اساس ادوات الکترونیک قدرت و دیگر تجهیزات استاتیکی که کنترل یک یا چندین پارامتر سیستم انتقال انرژی جریان متناوب را برای بهبود کنترل‌پذیری و افزایش توانایی انتقال قدرت الکتریکی محقق می‌سازد." در حقیقت سیستم‌های FACTS پارامترها و مشخصه‌های خطوط انتقال مانند امپدانس موازی، امپدانس سری، زاویه فاز که محدودیت اصلی در برابر افزایش ظرفیت شبکه هستند، را کنترل می‌کنند. بنابراین ادوات FACTS دارای نقش اساسی در افزایش انعطاف‌پذیری انتقال توان و امنیت پایداری دینامیکی سیستم قدرت را از طریق فعال سازی عناصر و اجزای آن را دارد. کنترل‌کننده‌های FACTS امکانات و قابلیت‌های زیادی برای سیستم قدرت فراهم سازند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۲-۲۶]:

الف- کنترل جریان توان اکتیو برای کنترل انتقال و مقدار آن در مسیرهای دلخواه.

ب- کنترل بارگیری خطوط انتقال تا نزدیکی ظرفیت حرارتی خطوط برای جلوگیری از اضافه بار با استفاده از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال که باعث کاهش ذخیره تولید در سیستم در اثر افزایش توانایی انتقال بین نواحی می‌شود.

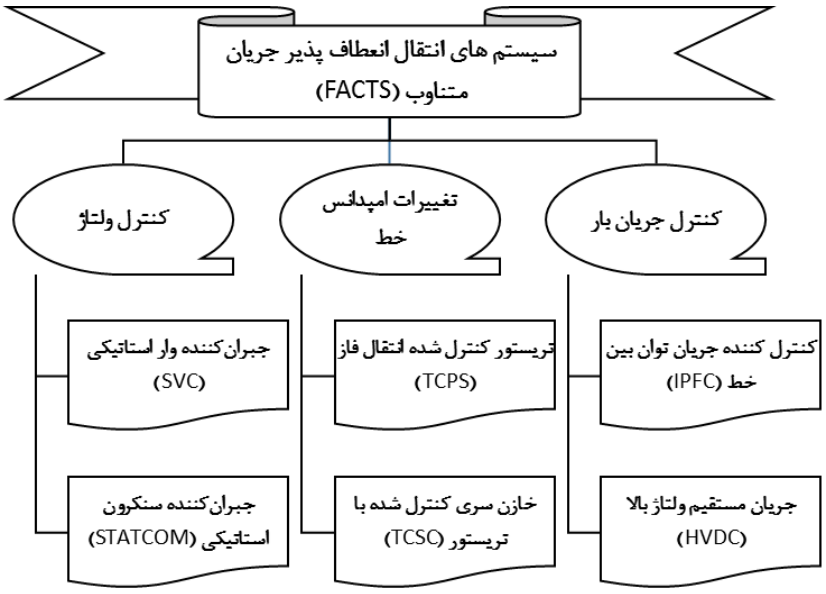
ج- میرایی نوسانات توان که عدم میرایی آنها باعث صدمه زدن به تجهیزات و محدود کردن ظرفیت انتقال خطوط می‌شوند.

د- محدود کردن اثر خطاها و معیوب شدن تجهیزات که باعث جلوگیری از توسعه و گسترش حوادث و خروج پی در پی تجهیزات می‌شوند.

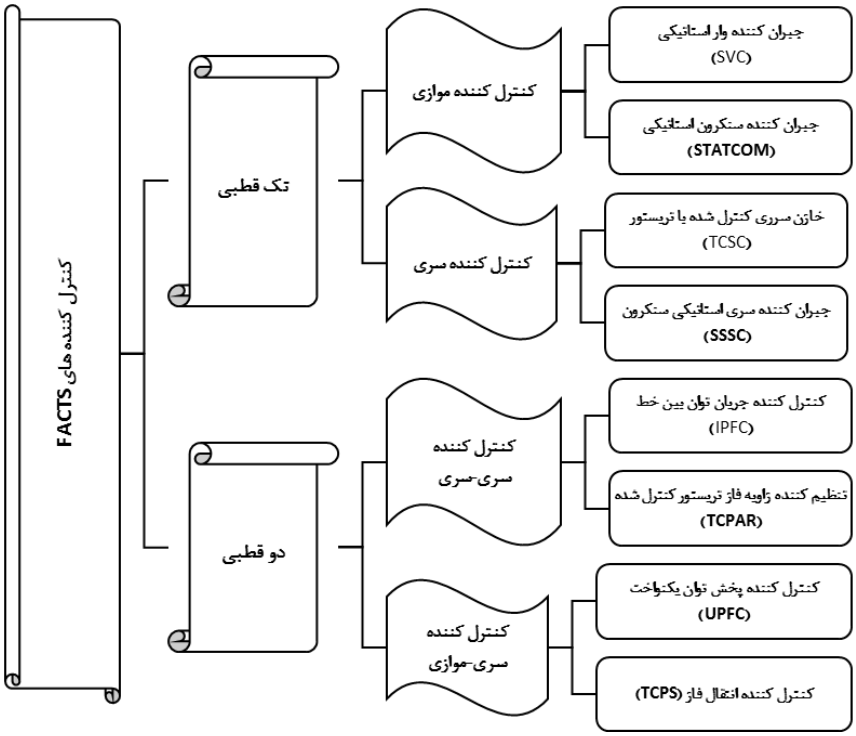
در این مقاله تاثیر جبران‌کننده وار استاتیکی در یک سیستم قدرت دو ماشینه نشان داده می‌شود. همچنین تاثیر جبران‌کننده پس از وقوع خطای سه فاز در خط انتقال بررسی شده است. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. پس از بیان اهمیت تحقیق در قسمت مقدمه، در قسمت دوم به تقسیم‌بندی اداوات FACTS اشاره می‌شود که دو نوع تقسیم‌بندی در این قسمت بیان شده است. در قسمت سوم نمای سیستم‌های کنترلی سیستم قدرت نشان داده شده است. در قسمت چهارم ساختار جبران‌کننده وار استاتیکی بیان شده است. در قسمت پنجم سیستم مورد مطالعه که دارای یک نیروگاه آبی و یک نیروگاه محلی است اشاره شده است. در قسمت ششم نتایج شبیه‌سازی سیستم و تاثیر جبران‌کننده استاتیکی نشان داده شده و درنهایت در قسمت هفتم نتیجه‌گیری مقاله بیان شده است.

۲- تقسیم بندی انواع اداوات FACTS

ادوات FACTS بر اساس حالت عملکرد به دو گروه ادوات بر اساس امپدانس راکتیو و ادوات بر اساس منبع ولتاژ تقسیم‌بندی می‌شوند. سیستم‌های انتقال ac انعطاف‌پذیر در یک تقسیم‌بندی دیگر مطابق شکل (۱) به سه گروه ادوات FACTS کنترل شده با تریستور، ادوات FACTS بر پایه‌ی مبدل منبع ولتاژ و ادوات هیبرید تقسیم‌بندی می‌شوند. از نظر نوع اتصال کنترل‌کننده‌های FACTS مطابق شکل (۲) به چهار نوع a) کنترل‌کننده سری مانند خازن سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC) [۲۷] و جبران‌کننده سری استاتیکی سنکرون (SSSC) [۲۸،۲۹]، b) کنترل‌کننده موازی مانند جبران‌کننده وار استاتیکی (SVC) [۳۰] و جبران‌کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) [۳۱،۳۲]، c) کنترل‌کننده سری–سری مانند کنترل‌کننده جریان توان بین‌خط (IPFC) [۳۳،۳۴] و تنظیم‌کننده زاویه فاز تریستور کنترل‌شده (TCPAR) [۳۵] و d) کنترل‌کننده سری–موازی مانند کنترل‌کننده پخش توان یکنواخت (UPFC) [۳۶،۳۷] تقسیم می‌شوند.



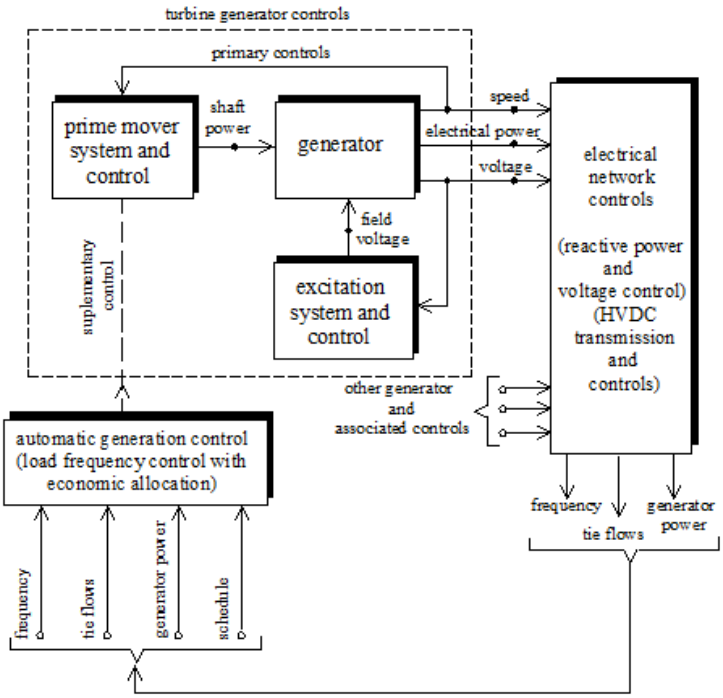
شکل (۱): تقسیم‌بندی سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب بر اساس عملکرد



شکل (۲): تقسیم‌بندی سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب بر اساس نوع اتصال

۳- سیستم‌های کنترلی سیستم قدرت

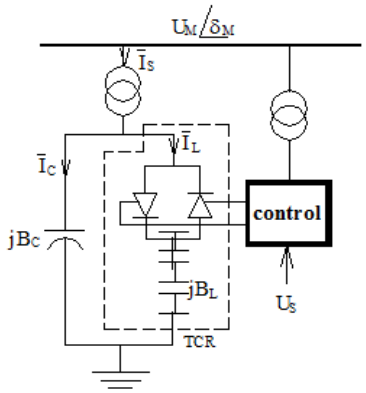
شکل (۳) زیر سیستم‌های یک سیستم قدرت و کنترل‌های مربوطه را نشان می‌دهد. اهداف کنترل‌کننده بستگی به شرایط کاری و بهره‌برداری از سیستم قدرت دارد. هدف همه‌ی سیستم‌ها تامین توان لازم مصرف‌کننده در فرکانس و ولتاژ مورد نظر است. نقش سیستم‌های کنترلی از بین بردن سریع نوسانات گذرا و آرام کردن سیستم در صورت بروز اغتشاش و یا هرگونه تغییر شرایط در سیستم قدرت است. سیستم‌های کنترلی در یک سیستم قدرت شامل سیستم‌های کنترلی در یک نیروگاه (کنترل دور روتور توربین و ماشین سنکرون با گاورنر، کنترل ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون با تنظیم‌کننده خودکار ولتاژ، پایدارساز سیستم قدرت) و سیستم‌های کنترلی در خطوط انتقال (کنترل‌کننده‌های بار فرکانس و کنترل‌کننده‌های ولتاژ و توان راکتیو) است [۳۸،۳۹]. کنترل‌کننده‌های محرک اولیه عبارتند از: کنترل اولیه (گاورنر سرعت)، کنترل ثانویه (توان خطوط ارتباطی و فرکانس) و کنترل ثالثیه (پخش بار اقتصادی). از کنترل-کننده‌های ولتاژ و توان راکتیو در خطوط انتقال می‌توان به کندانسور سنکرون، جبران‌کننده توان راکتیو، تغییردهنده‌ی تپ (تپ چنجر)، تغییر دهنده‌ی فاز و سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب اشاره کرد.



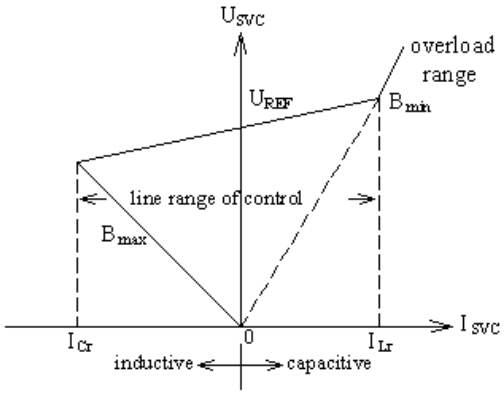
شکل (۳): کنترل‌کننده‌های تکمیلی و اولیه سیستم قدرت

۴- جبران‌کننده وار استاتیکی

جبران‌کننده وار استاتیکی (SVC) یکی از ادوات جبران‌کننده توان راکتیو است که به صورت شنت در سیستم قدرت قرار می‌گیرد. در این جبران‌ساز از کلیدهای تریستوری برای قطع و وصل سریع راکتورها و یا خازن‌های موازی استفاده می‌شود. از SVC برای میرایی نوسانات توان، بهبود پایداری گذرا، کاهش توان تلفاتی و محدودکردن تغییرات ولتاژ استفاده می‌شود و توانایی کنترل توان اکتیو را ندارد. شکل (۴) ساختار جبران‌کننده وار استاتیکی را نشان می‌دهد. جبران‌کننده SVC معمولاً از ترکیب دو قسمت خازن سوئیچ‌شده با تریستور (TSC) و راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR) تشکیل شده است. دو تریستور به صورت موازی و به طور معکوس قرار گرفته و هر یک از آنها به‌ترتیب در نیم سیکل متوالی فرکانس تغذیه هدایت می‌کنند. شکل (۵) مشخصه ولتاژ- جریان جبران‌کننده را نشان می‌دهد. عملکرد SVC در هر دو ناحیه خازنی و سلفی امکان‌پذیر است. جبران‌کننده به صورت موازی در باس یا وسط خط انتقال به سیستم متصل‌می‌شود و جریان خروجی آن تابعی از ولتاژ خط انتقال در محل اتصال است [۴۰،۴۱].



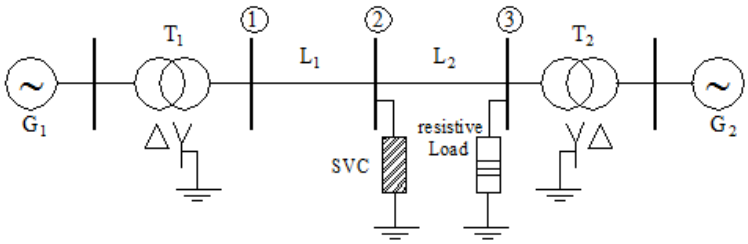
شکل (۴): ساختار جبران‌کننده وار استاتیکی



شکل (۵): مشخصه ولتاژ – جریان جبران‌کننده وار استاتیکی

۵- سیستم مورد مطالعه

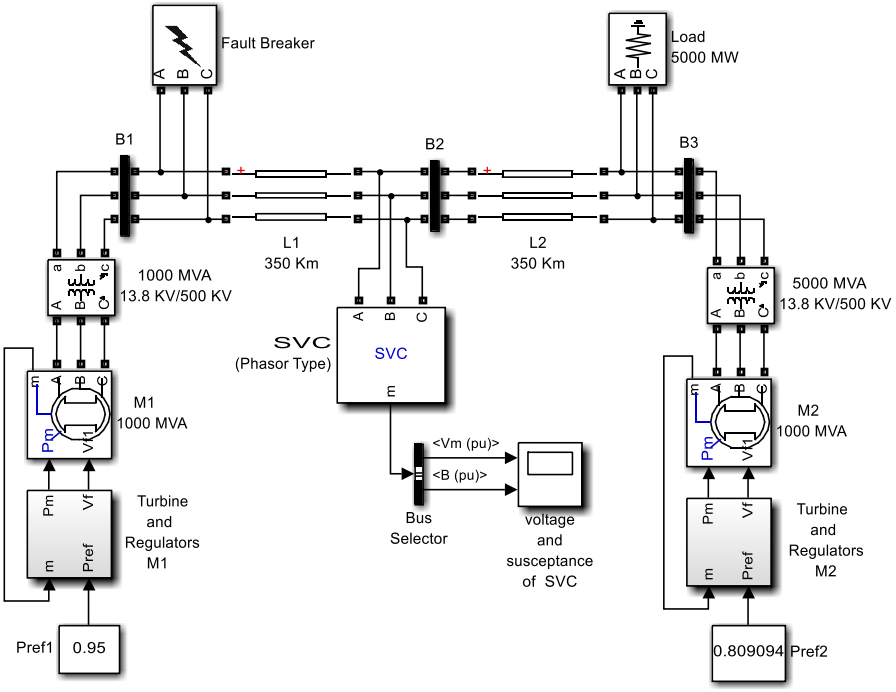
شکل (۶) نمودار تک خطی یک سیستم قدرت دو ماشینه را نشان می‌دهد که شامل یک نیروگاه آبی ۱۰۰۰ مگاوات (G_1) و یک نیروگاه محلی ۵۰۰ مگاوات (G_2) و یک بار مقاومتی ۵۰۰۰ مگاوات است. در حالت دائمی ماشین‌های یک و دو به ترتیب ۹۵۰ و ۴۰۴۶ مگاوات تولید می‌کنند و از خط انتقال توان ۹۴۴ مگاوات عبور می‌کند. در این سیستم ساده جبران‌کننده بین دو ناحیه به‌هم پیوسته و در وسط آنها قرار می‌گیرد. جبران‌کننده SVC در باس دو قرار دارد. ماشین‌ها دارای گاورنر، سیستم تحریک و پایدارساز سیستم قدرت است.



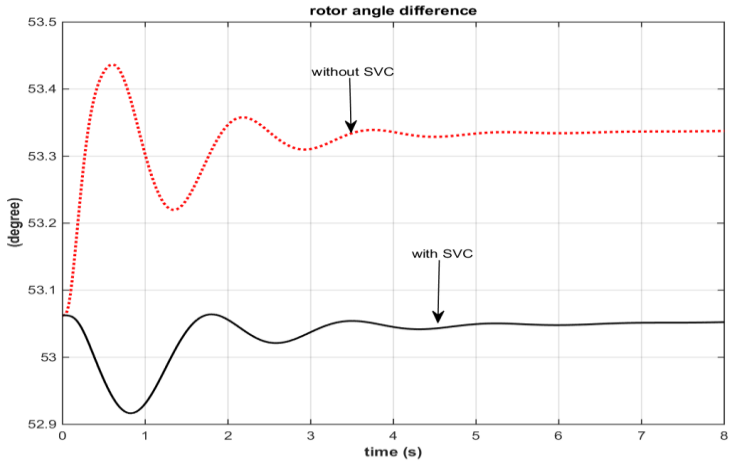
شکل (۶): نمودار تک خطی سیستم قدرت دو ماشینه

۶- نتایج شبیه‌سازی

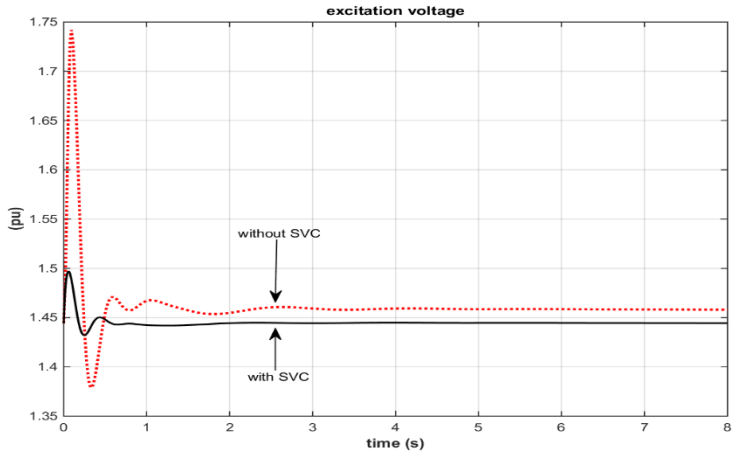
شکل (۷) شمای سیستم قدرت در محیط سیمولینک متلب را نشان می‌دهد. تاثیر SVC بر اختلاف زاویه بار دو ماشین (δ_{12}) در شکل (۸) و اثر آن بر ولتاژ تحریک ماشین یک در شکل (۹) نشان‌داده شده است. شکل (۱۰) توان اکتیو در خط انتقال را نشان می‌دهد که جبران‌کننده تاثیری بر روی آن ندارد.



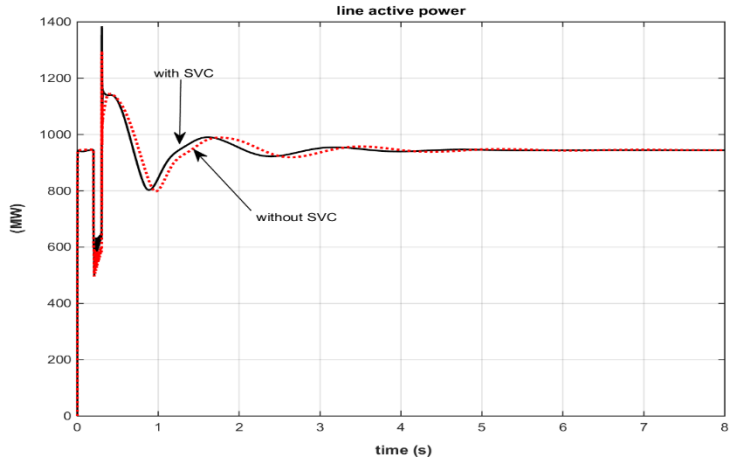
شکل (۷): مدل سیستم قدرت در سیمولینک متلب



شکل (۸): تاثیر جبران‌کننده بر اختلاف زاویه بار دو ماشین

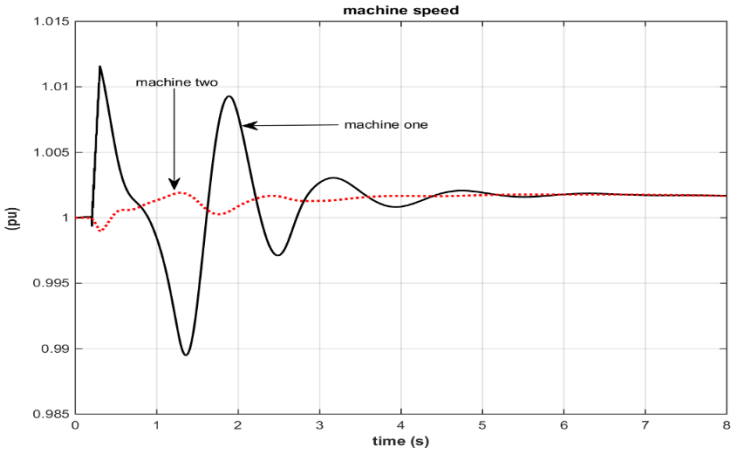


شکل (۹): تاثیر جبران‌کننده بر ولتاژ تحریک ماشین یک

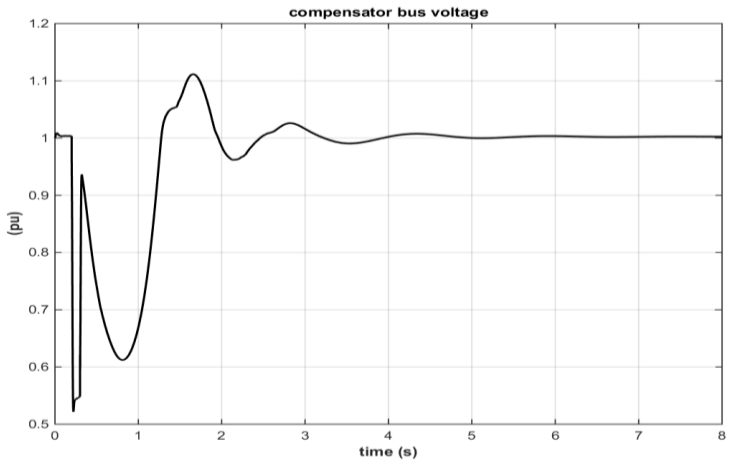


شکل (۱۰): عدم تاثیر جبران‌کننده بر توان اکتیو انتقالی در خط انتقال

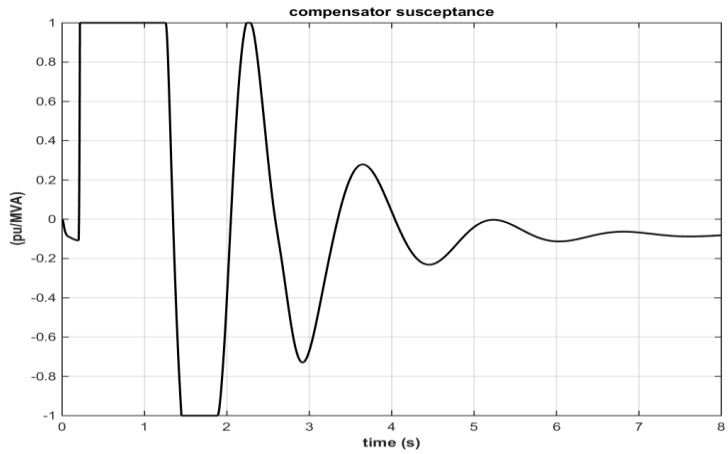
اتصال کوتاه سه‌فاز متقارن در باس یک در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۱) سرعت ماشین‌ها را تحت اتصال کوتاه سه‌فاز و شکل (۱۲) ولتاژ باس جبران‌کننده را بعد از اتصال کوتاه سه‌فاز نشان می‌دهد. شکل (۱۳) تغییرات سوسپتانس جبران‌کننده، شکل (۱۴) ولتاژ تحریک ماشین‌ها و شکل (۱۵) توان مکانیکی ماشین یک را بعد از اتصال کوتاه به ترتیب نشان می‌دهند.



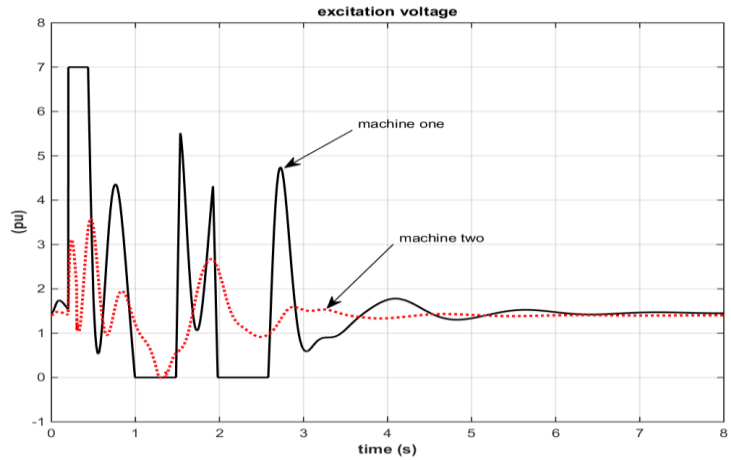
شکل (۱۱): سرعت ماشین‌ها تحت اتصال کوتاه سه‌فاز



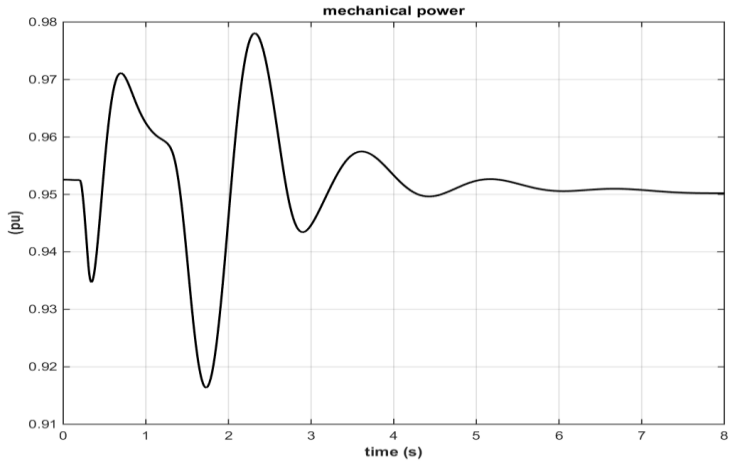
شکل (۱۲): ولتاژ باس جبران‌کننده پس از اتصال کوتاه سه‌فاز



شکل (۱۳): سوسپتانس جبران‌کننده پس از اتصال کوتاه سه‌فاز



شکل (۱۴): ولتاژ تحریک ماشین‌ها پس از اتصال کوتاه سه‌فاز



شکل (۱۵): توان مکانیکی ماشین یک پس از اتصال کوتاه سه‌فاز

۷- نتیجه‌گیری

پایداری گذرا بر خلاف پایداری حالت ماندگار تابعی از اغتشاش است و دارای اهمیت زیادی برای حفظ امنیت سیستم قدرت است. دو عامل موثر بر پایداری گذرا نوع اتصال کوتاه و محل وقوع اتصال کوتاه است. محل قرار گرفتن ادوات FACTS به هدف از کاربرد آن بستگی دارد که می‌توان به افزایش باردهی سیستم، حداقل کردن هزینه تولید و افزایش پایداری ولتاژ اشاره کرد. در این مقاله هدف بررسی تاثیر یکی از اداوات FACTS به نام جبران‌کننده وار استاتیکی در سیستم قدرت بود. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از سیمولینک

نرم‌افزار متلب تاثیر SVC را بر رفتار دینامیکی ژنراتورها نشـــان داد. همچنین نتایج عدم تاثیر این جبران‌کننده در انتقال توان اکتیو در خط انتقال نشان داد.

مراجع

[1] S. Farhang, G. Shahgholian and B. Fani, “Dynamic behavior improvement of control system in inverter-based island microgrid by adding a mixed virtual impedance loop to voltage control loop”, *International Journal of Smart Electrical Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 27-34, March 2022, dor: 20.1001.1.22519246.2022.11.1.4.0.

[2] R.M. Elavarasan et al., "A comprehensive review on renewable energy development, challenges, and policies of leading indian states with an international perspective", IEEE Access, vol. 8, pp. 74432-74457, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988011.

[3] A. Ahmadpour, S. Seyed Shenava, A. Dejamkhooy, E. Mokaramian, “Electromagnetic force analysis of transformer on the ferroresonance due to consecutive 3–phase short–circuit faults using finite element method (FEM)”, Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 11, no. 41, pp. 47-60, June 2020.

[4] G. Shahgholian, “A brief review on microgrids: Operation, applications, modeling, and control”, International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31, no. 6, Article Number. e12885, June 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12885.

[5] A. Tabatabaeifar, M. Shafieian, H. Banizaman, S. Torab, “Design and implementation of a web-based greenhouse remote monitoring system with zigbee protocol and GSM network”, *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 19, pp. 71-79, Dec. 2014.

[6] T. Oliveira da Silva Alfonso, R. Augusto Cassel, J. C. Mairesse Siluk, B. Porto da Silva and S. Ferigolo Venturini, "Analysis of critical factors for energy efficiency in productive systems: A systematic review", IEEE Latin America Transactions, vol. 19, no. 8, pp. 1347-1356, Aug. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9475865.

[7] A. Motaghi, M. AaLIzadeh, M. Abbasian, “Reactive power compensation and reducing network transmission losses by optimal placement of parallel and series FACTS devices with fuzzy-evolutionary method”, Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 9, no. 35, pp. 27-38, December 2019, dor: 20.1001.1.23223871.1397.9.35.4.7.

[8] C. Chang, R. Fang and C. Wang, "Bended differential transmission line using compensation inductance for common-mode noise suppression", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 2, no. 9, pp. 1518-1525, Sept. 2012, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2192439.

[9] S. Ghasemi, E. Gholipoor, “Reactive power optimization in the presence of FACTS devices using evolutionary algorithms based on fuzzy logic”, Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 6, no. 23, pp. 45-54, December 2015, dor: 20.1001.1.23223871.1394.6.23.6.4.

[10] J. Segundo-Ramirez, A. Bayo-Salas, M. Esparza, J. Beerten and P. Gómez, "Frequency domain methods for accuracy assessment of wideband models in electromagnetic transient stability studies," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 1, pp. 71-83, Feb. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2927171.

[11] H. Parastvand, O. Bass, M.A.S. Masoum, A. Chapman and S. Lachowicz, "Cyber-security constrained placement of FACTS devices in power networks from a novel topological perspective", IEEE Access, vol. 8, pp. 108201-108215, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3001308.

[12] M. A. Kamarposhti, H. Shokouhandeh, I. Colak, S.S. Band and K. Eguchi, "Optimal location of facts devices in order to simultaneously improving transmission losses and stability margin using artificial bee colony algorithm", IEEE Access, vol. 9, pp. 125920-125929, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2-021.3108687.

[13] H. Barati, R. Saki, S. Mortazavi, “Intelligent control of UPFC for enhancing transient stability on multi-machine power systems”, *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 3-12, Feb, 2010, dor: 20.1001.1.23223871.1389.1.1.1.0.

[14] G. Bone, M. Pantoš and R. Mihalič, "Newtonian steady state modeling of FACTS devices using unaltered power-flow routines", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 34, no. 2, pp. 1216-1226, March 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2876407.

[15] B. Liu, Q. Yang, H. Zhang and H. Wu, "An interior-point solver for ac optimal power flow considering variable impedance-based FACTS devices", IEEE Access, vol. 9, pp. 154460-154470, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3128035.

[16] B. Saleem, R. Badar, A. Manzoor, M.A. Judge, J. Boudjadar and S. U. Islam, "Fully adaptive recurrent neuro-fuzzy control for power system stability enhancement in multi machine system," IEEE Access, vol. 10, pp. 36464-36476, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3164455.

[17] F. Haghighatdar Fesharaki, A. Haghshenas, "STATCOM controller design with using of improved robust backstepping algorithm based on PSO to reduce large signal disturbances in power systems", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 10, no. 37, pp. 3-12, May 2019, dor: 20.1001.1.23223871.1398.10.37.1.5.

[18] X. Fang, J.H. Chow, X. Jiang, B. Fardanesh, E. Uzunovic and A. Edris, "Sensitivity methods in the dispatch and siting of FACTS controllers", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 713-720, May 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2016531.

[19] R.K. Pandey and D.K. Gupta, "Integrated multi-stage LQR power oscillation damping FACTS controller", CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 4, no. 1, pp. 83-91, March 2018, doi: 10.17775/CSEEJPES.2016.00510.

[20] A. Behdan, B. Fani, E. Adib, "Reliability evaluation of power system SVC types using a markov chain", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, no. 22, pp. 13-22, Summer 2015, dor: 20.1001.1.23223871.1394.6.22.2.8.

[21] G. Shahgholian, J. Faiz, B. Fani, M. R. Yousefi, "Operation, modeling, control and applications of static synchronous compensator: A review", Proceeding of the IEEE/IPEC, Singapore, pp. 596-601, Oct. 2010, doi: 10.1109/IPECON.2010.5697064.

[22] X. Jiang, J. H. Chow, A. Edris, B. Fardanesh and E. Uzunovic, "Transfer path stability enhancement by voltage-sourced converter-based FACTS controllers", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 2, pp. 1019-1025, April 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2034895.

[23] V. V. G. Krishnan, S. C. Srivastava and S. Chakrabarti, "A robust decentralized wide area damping controller for wind generators and FACTS controllers considering load model uncertainties", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 1, pp. 360-372, Jan. 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2552233.

[24] H.A. Mohammadpour, M.M. Islam, E. Santi and Y.J. Shin, "SSR damping in fixed-speed wind farms using series FACTS controllers", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 31, no. 1, pp. 76-86, Feb. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2464323.

[25] G. Shahgholian, S. Eshtehardiha, H. Mahdavinasab, M.R. Yousefi, "A novel approach in automatic control based on the genetic algorithm in STATCOM for improvement power system transient stability", Proceeding of the IEEE/ICIS, vol. 1, pp.14-19, Varna, Sept. 2008, doi: 10.1109/IS.20-08.4670419.

[26] P. Singh, N. Senroy and R. Tiwari, "Guaranteed convergence embedded system for SSSC and IPFC", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 36, no. 3, pp. 2725-2728, May 2021, doi: 10.1109/TPWRS.-2021.3053146.

[27] D.K. Ibrahim, G.M. Abo-Hamad, E.E.D.M.A. Zahab and A.F. Zobaa, "Comprehensive analysis of the impact of the TCSC on distance relays in interconnected transmission networks", IEEE Access, vol. 8, pp. 228315-228325, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046532.

[28] F. A. L. Jowder, "Influence of mode of operation of the SSSC on the small disturbance and transient stability of a radial power system", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 935-942, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846121.

[29] H.V.G. Rao, N. Prabhu and R.C. Mala, "Adaptive distance protection for transmission lines incorporating SSSC with energy storage device", IEEE Access, vol. 8, pp. 156017-156026, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019173.

[30] L. Wang, C. Lam and M. Wong, "Multifunctional hybrid structure of SVC and capacitive grid-connected inverter (SVC//CGCI) for active power injection and nonactive power compensation", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 66, no. 3, pp. 1660-1670, March 2019, doi: 10.1109/TI-E.2018.2838085.

[31] R.K. Varma and R. Salehi, "SSR mitigation with a new control of PV solar farm as STATCOM (PV-STATCOM)", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 8, no. 4, pp. 1473-1483, Oct. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2691279.
[32] P. Rao, M.L. Crow and Z. Yang, "STATCOM control for power system voltage control applications", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1311-1317, Oct. 2000, doi: 10.1109/61.891520.
[33] Y. Zhang, Y. Zhang and C. Chen, "A novel power injection model of IPFC for power flow analysis inclusive of practical constraints", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, no. 4, pp. 1550-1556, Nov. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.882458.
[34] S. Mishra, P.K. Dash, P.K. Hota and M. Tripathy, "Genetically optimized neuro-fuzzy IPFC for damping modal oscillations of power system", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no. 4, pp. 1140-1147, Nov. 2002, doi: 10.1109/TPWRS.2002.804958.
[35] M.I. Alomoush, "Multicriteria optimal location of TCPAR in a competitive energy market using ELECTRE III", Proceeding of the IEEE/UPEC, pp. 1-5, Glasgow, UK, Sept. 2009.
[36] S. An, J. Condren and T.W. Gedra, "An ideal transformer UPFC model, opf first-order sensitivities, and application to screening for optimal UPFC locations", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 22, no. 1, pp. 68-75, Feb. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2006.889141.
[37] M. Pereira and L. C. Zanetta, "A current based model for load flow studies with UPFC", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 677-682, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2206409.
[38] K. Fruhauf, P. Grafoner and K. Signer, "An Integrated Software System for Power System Operation-Control and -Planning," IEEE Power Engineering Review, vol. PER-2, no. 1, pp. 36-36, Jan. 1982, doi: 10.1109/MPER.1982.5519695.
[39] X. Zhou, W. Zhong, Y. Ma, K. Guo, J. Yin and C. Wei, "Control Strategy Research of D-STATCOM Using Active Disturbance Rejection Control Based on Total Disturbance Error Compensation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50138-50150, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069293.
[40] A. Kazemi-Zahrani, M. Parastegari, "Designing PSS and SVC Parameters simultaneously through the improved quantum algorithm in the multi-machine power system", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 8, no. 31, pp. 68-75, Dec. 2017, dor: 20.1001.1.23223871.1396.8.31.6.4.
[41] S. Zanjani, Z. Azimi, M. Azimi, "Assesment and analyze hybride control system in distribution static synchronous compensator based current source converter", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 2, no. 7, pp. 59-67, Dec. 2011, dor: 20.1001.1.23223871.1390.2.7.7.5.

زیرنویس‌ها

[1] transient stability enhancement
[2] security
[3] power quality improvement
[4] institute of electrical and electronics engineers