

# ارزیابی دینامیکی قابلیت‌های SIPC و بررسی تاثیر آن بر پایداری گذرای سیستم قدرت

جواد پورحسین<sup>۱</sup>

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد- گناباد- ایران

[J\\_Pourhossein@iau-gonabad.ac.ir](mailto:J_Pourhossein@iau-gonabad.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله، ضمن ارزیابی دینامیکی قابلیت‌های کنترل کننده توان میان فاز استاتیک (Static Inter phase Power Controller) SIPC، نحوه تاثیر گذاری آن بر پایداری گذرای یک سیستم قدرت نمونه بررسی و علاوه تکنیکی مبتنی بر کنترل ناپیوسته آن جهت بهبود پایداری سیستم ارائه شده است. روش تحقیق مبتنی بر حل محاسباتی معادلات دینامیک سیستم، تکرار مراحل شبیه سازی، محاسبه زمان بحرانی رفع خطا (CCT) و تعیین اوج اضافه جهش ایجاد شده در زوایای روتور ماشین‌ها ناشی از یک خطای اتصال کوتاه سه فاز متقارن می باشد. برای این منظور، سیستم و تجهیز مربوطه در محیط نرم افزار دیگسایلنت شبیه سازی و مسائل تحقیق با طرح سناریوهای متعددی دنبال شد. در این راستا، ابتدا تمامی قابلیت‌های تجهیز در حوزه زمان تأیید گردید و سپس حد پایداری گذرای سیستم با و بدون آن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت که نتایجاً منجر به یک افت نسبی در حد پایداری گذرای سیستم گردید. سرانجام به منظور اعمال تکنیک مذکور، کنترل اصلی دستگاه به کنترل دیگری بنام کنترل گذرا منتقل گردید تا از این طریق، توان انتقالی از ماشین‌های شتاب گرفته در بازه زمانی بعد از رفع خطا بیشینه گردد که نهایتاً نتیجه منتهی به یک بهبودی نسبی در حد پایداری گذرای سیستم گردید.

**واژه‌های کلیدی:** FACTS (Flexible AC Transmission System)، SIPC (Static Inter phase Power Controller)، کنترل کننده سیلان توان، پایداری گذرا، کنترل ناپیوسته

**نوع مقاله:** پژوهشی

**DOI:** 10.52547/jiaeee.19.1.341

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۶/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر جواد پورحسین

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - خراسان رضوی - گناباد - میدان بسیج - خیابان دانشگاه - دانشگاه آزاد اسلامی - دانشکده‌ی برق

## ۱- مقدمه

امروزه، بطور گسترده‌ای از تجهیزات<sup>۱</sup> FACTS جهت بهبود عملکرد سیستم قدرت در سرتاسر دنیا استفاده می‌شود. این ادوات که مبتنی بر مدارات الکترونیک قدرت یا تجهیزات استاتیکی دیگر می‌باشند، قادراند کنترل سریع، مکرر و همزمان یک یا چند متغیر از سیستم انتقال AC را فراهم کنند [۱]. این دستگاه‌ها دارای انواع و کاربردهای متفاوتی هستند و به طرق متعددی به سیستم انتقال متصل می‌شوند [۲]. در این میان، ادواتی نیز وجود دارند که از قابلیت کنترل سیلان توان برخوردارند. چنین کنترل کننده‌هایی قادراند برخی از ضروری‌ترین مسائل موجود در شبکه‌های انتقال امروزی را (از نظر استفاده از شبکه) مدیریت کنند [۳]. مشکلاتی از قبیل تراکم روزافزون شبکه، جریان جاری در مسیرهای موازی و حلقه‌ها، محدودیت‌ها و تنگناها در تسهیلات انتقال موجود و عدم وجود یک قابلیت کنترل سیلان توان با کفایت از جمله چالش‌های مهمی هستند که حل آنها به فوریت نیاز دارد و با استفاده از این نوع ادوات، می‌توان آنها را بطرز موثری مدیریت کرد که حاصل آن ارتقاء قابلیت اعتماد شبکه، کاهش قیمت‌های انرژی و استفاده بهینه از سرمایه‌های انتقال موجود می‌باشد. فوریت رفع چنین مسائلی از یکسو و عواید حاصل از آن از سوی دیگر سبب شده تا بیش از پیش توجه بهره‌برداران بسوی این دسته از ادوات متمایل شود [۴-۵، ۶]. بعنوان نمونه‌هایی از کنترل کننده‌های سیلان توان، میتوان به کنترل کننده شارش توان یکپارچه<sup>۲</sup> (UPFC) [۷]، کنترل کننده سری سنکرون استاتیک<sup>۳</sup> (SSSC) [۸]، کنترل کننده قدرت میان فاز استاتیک<sup>۴</sup> (SIPC) [۹] و کنترل کننده قدرت میان فاز یکپارچه<sup>۵</sup> (UIPC) [۱۰] اشاره کرد. همه این تجهیزات از نوع پیشرفته (مبتنی بر مبدل‌های منبع ولتاژ<sup>۶</sup> (VSC)) و اغلب چند-وظیفه‌ای هستند. در این میان، SIPC و UIPC با قابلیت‌های همزمانی همچون کنترل سیلان توانهای اکتیو و راکتیو، محدود سازی جریان خطا و ایزوله سازی ولتاژ و ولتاژ باسهای ورودی-خروجی، هر دو نسخه‌های متفاوتی از کنترل کننده قدرت میان فاز<sup>۷</sup> (IPC) [۱۱] هستند که اخیراً به جمع خانواده ادوات FACTS اضافه گردیده‌اند. بدون تردید ارائه چنین قابلیت‌هایی آنهم توسط یک دستگاه، بخصوص در محیط‌های رقابتی‌ای همچون بازار برق می‌تواند بسیار جذاب باشد [۱۲]. هر یک از این دستگاه‌ها دارای دو جابجا کننده‌ی فاز<sup>۸</sup> (PS) مبتنی بر VSC هستند که باس‌های DC مبدل‌های آنها به هم مشترک شده‌اند اما تجهیزات مربوط به کنترل ولتاژ باس DC در آنها متفاوت است و همین می‌تواند بطور قابل توجهی عملکرد PSها و نتیجتاً دستگاه‌ها را بخصوص در طی شرایط دینامیکی از هم متمایز کند. در UIPC، حمایت ولتاژ باس DC از طریق یک مبدل سومی که بطور موازی به باس محلی دستگاه متصل است، فراهم می‌گردد در صورتیکه در دستگاه دیگر (SIPC) این عمل از طریق اتصال مستقیم یک باتری ایده‌آل به باس DC انجام می‌شود. این می‌رساند که ولتاژ باس DC در UIPC دارای دینامیک ولی SIPC خالی از دینامیک است و لذا هر چند ممکن است در طی

شرایط استاتیکی عملکرد مشابهی از خود نشان دهند ولی مطمئناً در طی شرایط دینامیکی می‌توانند عملکرد متفاوتی داشته باشند. از طرف دیگر توجه به ادبیات پژوهشی این دو تجهیز نشان می‌دهد که کیفیت ارزیابی قابلیت‌ها در ارتباط با SIPC تنها محدود به مطالعات استاتیکی (مطالعات پخش بار و اتصال کوتاه) است و به جنبه دینامیکی قضیه توجهی نشده‌است در صورتیکه در خصوص UIPC، علاوه بر اینکه به این جنبه نیز توجه شده، مسئله تاثیر آن بر پایداری گذرای سیستم قدرت نیز از طریق مقایسه میزان فراجش ایجاد شده در زوایای روتور ماشین‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌است [۱۰]. این در حالی است که توجه به جنبه دینامیکی ارزیابی قابلیت‌ها می‌تواند از جوانب مختلف از جمله استفاده‌های دینامیکی از این تجهیز که در تکنیک پیشنهادی این تحقیق نیز وارد شده، حائز اهمیت باشد. از همین رو، در این تحقیق، تمرکز اصلی بر ارزیابی دینامیکی قابلیت‌های SIPC و تاثیر آن بر پایداری گذرای سیستم قدرت معطوف گردیده‌است، اما در اینجا بر خلاف [۱۰] از روش مبتنی بر محاسبه زمان بحرانی رفع خطا<sup>۹</sup> (CCT) (CCT) جهت تعیین حد پایداری گذرا استفاده شده‌است، ضمن اینکه تکنیکی مبتنی بر کنترل ناپیوسته دستگاه نیز جهت بهبود حد پایداری گذرای سیستم ارائه شده‌است. علاوه بر اینها، در اینجا بررسی جامع-تری در ارتباط با قابلیت کنترل سیلان توان (از طریق تغییرات پله‌ای توان‌های اکتیو و راکتیو) صورت گرفته‌است. لازم به ذکر است که امروزه بطور گسترده‌ای از کنترل ناپیوسته تجهیزات FACTS جهت بهبود عملکرد دینامیکی سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. بر اساس این عملکرد کنترلی، دستگاه دارای دو نوع کنترل اصلی و گذرا می‌باشد. در طی عملکرد عادی، کنترل دستگاه با کنترل اصلی است اما بدنبال اتفاق یک اغتشاش، کنترل دستگاه برای بازه‌ی زمانی کوتاهی در دوره بعد از رفع خطا به کنترل گذرا واگذار می‌شود. در این بازه از قابلیت‌های دینامیکی تجهیز که مبتنی بر سرعت بالای ذاتی این ادوات است جهت کمینه سازی عواقب بعد از خطا استفاده می‌شود [۱۳-۱۴]. از سوی دیگر در بحث پایداری گذرای یک سیستم قدرت، موضوع توانائی سیستم در حفظ سنکرونیزم به هنگام اغتشاش‌های بزرگ مطرح است. یکی از متغیرهای مهم در این زمینه، تعیین CCT می‌باشد. این زمان که اغلب با  $t_{cr}$  نشان داده می‌شود حداکثر زمانی است که اگر کلیدها پس از اغتشاش شدید تا آن زمان عمل نکنند، سیستم حالت سنکرونیزم خود را از دست خواهد داد. مقدار  $t_{cr}$  به نوع و محل خطا و همینطور پارامترها و آرایش سیستم قدرت وابسته است. روش‌های مختلفی جهت تعیین  $t_{cr}$  ارائه شده است که از جمله میتوان به روش شبیه‌سازی زمانی و حل معادلات دینامیک سیستم [۱۵]، روش مبتنی بر تابع انرژی لیاپانف [۱۶] و روش‌های ترکیبی مشتق از این دو اشاره کرد [۱۷-۱۸]. در این مطالعه از روش حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی سیستم که مطمئن‌ترین راه در تعیین  $t_{cr}$  است، استفاده شده‌است [۱۹]. برای این منظور، ابتدا سیستم مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار دیگسایلنت و با استفاده از تابع محاسباتی «شبیه‌سازی

با توجه به این شکل، هر فاز این دستگاه شامل دو شاخه موازی است که در هر یک، یک PS نوع ولتاژ با یک راکتانس (یکی سلفی و دیگری خازنی) سری شده‌است. با توجه به شکل (۱)، دامنه و فاز ولتاژ تزریقی هر VSC که از طریق ترانس کوبلاژ مربوطه به شاخه متناظر تزریق می‌شود، بگونه‌ای تعیین می‌شود که منجر به ایجاد یک جابجایی فاز ایده‌آل در ولتاژ باس ورودی SIPC می‌گردد. در اینجا، میزان جابجایی فاز PS های شاخه‌های سلفی و خازنی، بترتیب با متغیرهای  $\varphi_1$  و  $\varphi_2$  مشخص شده‌است. اینها، متغیرهای کنترلی اصلی SIPC هستند و از آنها برای کنترل سیلان توان‌های اکتیو و راکتیو خطی که به خروجی دستگاه متصل شده، استفاده می‌شود. روابط ارتباط دهنده توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی دستگاه با متغیرهای کنترلی مربوطه در زیر داده شده است [۹]:

$$P_r = -2V_s V_{eq1} \sin(\alpha) \cos(\delta_{sr} - \beta) \quad (1)$$

$$Q_r = 2V_s V_{eq1} \sin(\alpha) \sin(\delta_{sr} - \beta) \quad (2)$$

در اینجا  $\alpha$  و  $\beta$  متغیرهای کنترلی مستقل جدیدی هستند که بر مبنای متغیرهای کنترلی اصلی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\beta = 1/2(\varphi_2 + \varphi_1), \alpha = 1/2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (3)$$

همین‌طور  $\delta_{sr}$  و  $B_{eq1}$  بترتیب زاویه الکتریکی دو سر دستگاه و سوپرتانس معادل شاخه سلفی است. برای آنکه SIPC بتواند میزان مشارکت خود را به یک خطای اتصال کوتاه محدود کند بایستی مقادیر مربوط به راکتانس‌های معادل دو شاخه در فرکانس سیستم قدرت (با احتساب اثرات راکتانس نشی ترانس کوبلاژ هر شاخه) برابر در نظر گرفته شوند. بفرم ریاضی یعنی  $|X_{eq1}| = |X_{eq2}|$  که در آن  $X_{eq1} = X_{T1} + X_L$  و  $X_{eq2} = X_{T2} + X_L$  می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، باس DC هر دو VSC مشترکاً به یک انبار انرژی متصل شده‌است. این باعث می‌شود تا مسیری جهت مبادله‌ی توان اکتیو مورد نیاز هر VSC جهت عملیاتی شدن در مد یک PS ایده‌آل فراهم شود.

## ۲-۲- مدل سازی و استراتژی کنترل SIPC

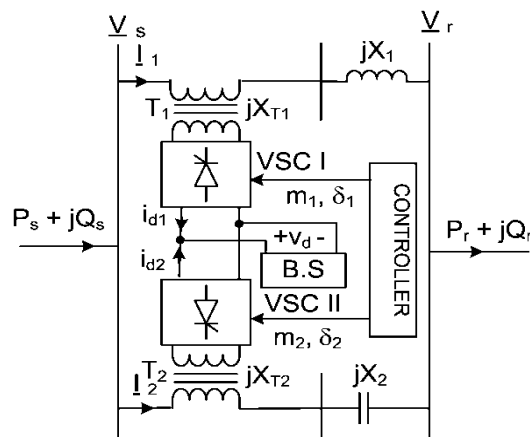
هر VSC در شکل (۱) دارای یک کنترل کننده مدلاسیون پهنای پالس (PWM)<sup>۱۳</sup> است که وظیفه‌ی تولید پالس‌های آتش شیرهای مبدل را بر اساس ورودی‌های مرجع آن بر عهده دارد. مطابق شکل (۱) این ورودی‌ها شامل شاخص مدلاسیون دامنه  $m_k$  و شاخص مدلاسیون فاز  $(\delta_k)$  می‌باشند ( $k=1, 2$ ). معمولاً، این ورودی‌ها همان‌طور که در شکل (۱) نیز مشخص شده، خروجی‌های مدار کنترل مبدل می‌باشند. تحت شرایط ولتاژ لینک DC ثابت و استفاده از یک الگوی کلید زنی استاندارد مانند PWM، هر مبدل یک ولتاژ سینوسی با فرکانس سیستم قدرت به شاخه متناظرش تزریق می‌کند که دامنه آن به ولتاژ DC و شاخص دامنه  $m_k$  و فاز آن به شاخص فاز  $\delta_k$  وابسته است. بر همین اساس مدلی که برای هر VSC در این مطالعه در نظر

شده شبیه سازی و آنگاه از طریق اجراء مکرر برنامه‌ی شبیه‌سازی، مقدار  $t_{cr}$  و همین‌طور مقدار اوج فراجهش<sup>۱۴</sup> ظاهر شده در زوایای روتور ماشینها، تعیین گردیده‌است. در این ارتباط، سه سناریوی مجزا (با و بدون حضور دستگاه) تعریف شده و در هر سناریو خطای سه فاز متقارن یکسانی در لحظه‌ی معینی به باس مشخصی از سیستم اعمال و زمان پاک سازی خطا در گامهای کوچک تا رسیدن به مرز ناپایداری افزایش داده شده‌است. قابل ذکر است که ناپایداری گذرای مشاهده شده در این سیستم مطالعه (دو ناحیه‌ای) بدنبال یک اغتشاش بزرگ از نوع نوسانی است. نهایتاً به منظور اعمال تکنیک پیشنهادی، درست در لحظه‌ی پاک شدن خطا، کنترل دستگاه از مد کنترل اصلی به مد کنترل گذرا منتقل و سپس در یک سرعت منفی مناسب روتور به مد کنترل اصلی برگردانده شده‌است. عمل انتقال می‌تواند از طریق یک سیگنال تریگر کننده‌ی مناسب مثل جریان یا ولتاژ انجام شود. در مد کنترل گذرا، کنترل دستگاه بگونه‌ای هدایت شده‌است تا توان انتقالی از ماشینهای با شتاب بالاتر (موجود در یک ناحیه) به سمت ناحیه دیگر بشینه گردد. به منظور افزایش دقت در نتایج شبیه‌سازی، ژنراتورها با مدلی از درجه هشت شامل اثرات گذرای سریع، رگولاتور ولتاژی از نوع استاندارد ESAC4A و بارها با مدلی از نوع امپدانس ثابت مدل‌سازی گردیده‌اند. نهایتاً با تحلیل نتایج حاصل از شبیه سازی مشخص گردید که تمامی قابلیت‌های تأیید شده در حوزه استاتیکی (برای SIPC) در حوزه دینامیکی نیز برقرار اند ضمن اینکه تأثیر آن بر پایداری گذرای سیستم نمونه با یک اثر منفی نسبتاً قابل ملاحظه‌ای نمایان گردید که البته با اعمال تکنیک پیشنهادی به یک بهبودی نسبی منجر شد.

## ۲-۲- مروری بر SIPC

### ۲-۱- ساختار، توصیف و روابط

SIPC یک نسخه پیشرفته‌ای از کنترل کننده قدرت میان فاز نوع تنظیم شده<sup>۱۱</sup> (TIPC) است که در آن بجای ترانس‌های جابجا کننده فاز<sup>۱۲</sup> (PST) از PS های مبتنی بر VSC استفاده شده است. ساختار تک فازی از آن در شکل (۱) نشان داده شده‌است. این PS ها در شکل (۱) با VSC های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند.



شکل (۱): ساختار SIPC [9]

### ۳- تکنیک پیشنهادی

همانطور که در مقدمه بیان شد تکنیک اعمالی جهت بهبود پایداری گذرای سیستم مبتنی بر کنترل ناپیوسته‌ی SIPC است. بر همین اساس دستگاه دارای دو کنترل اصلی و گذرا است. در شرایط عادی، اداره‌ی دستگاه با کنترل اصلی است. در این حالت، دستگاه بر طبق استراتژی کنترلی که در بخش (۲-۲) ارائه شده، بگونه‌ای کنترل میشود که توانهای اکتیو و راکتیو جاری در خط متصل به خروجی آن به مقدار مطلوب تنظیم شوند. زمانی که یک خطای اتصال کوتاه رخ می‌دهد همچنان کنترل دستگاه با کنترل اصلی ادامه می‌یابد تا اینکه خطا پاک شود، درست در این لحظه است که کنترل دستگاه به کنترل گذرا واگذار میشود. این کار بگونه‌ای که در شکل (۳) نشان داده شده، از طریق تغییر موقعیت دو سوئیچ دو ورودی-تک خروجی انجام می‌شود. عمل تغییر وضعیت سوئیچ‌ها نیز از طریق یک سیگنال کنترلی (تریگر کننده) که مدیریت وضعیت سوئیچ‌ها را بر عهده دارد، انجام می‌شود. سیگنال تریگر کننده می‌تواند یک سیگنال از نوع جریان خطا باشد که البته بایستی به اندازه زمان عملکرد بریکر به تاخیر بیفتد. در این حالت، کنترل گذرا دستگاه را بگونه‌ای کنترل می‌کند که انتقال توان اکتیو از ناحیه‌ی خطا (شامل ماشین‌های پر شتاب) به سمت ناحیه دیگر بیشینه گردد. برای این منظور و بر طبق استراتژی کنترل، بایستی توان ظاهری خروجی دستگاه بیشینه و توان راکتیو آن کمینه گردد که بترتیب متناظر با شرایط  $\alpha = \alpha_{max}$  و  $\beta = \delta_{sr}$  می‌باشد. این ماموریت تا لحظه‌ای که تغییرات سرعت روتور به صفر برسد، ادامه می‌یابد و بعد از آن کنترل دستگاه به کنترل اولیه برگردانده می‌شود. میزان کارایی تکنیک فوق به طول این بازه زمانی بستگی دارد. در این تحقیق، این بازه زمانی از لحظه‌ی  $t=1/1$  ثانیه آغاز و تا حدود  $t=1/63$  ثانیه ادامه می‌یابد که با توجه به ثوابت زمانی کنترل کننده‌ها ( $0.10$  ثانیه) زمان قابل توجهی است. با توجه به توضیحات اخیر دو گزینه برای اعمال تکنیک وجود دارد. گزینه اول متناظر با سوئیچ سیگنال‌های  $\alpha$  و  $\beta$  به مقادیر توصیف شده بالا می‌باشد. این موضوع بطور ترسیمی در آرایش کلی مدار کنترل دستگاه که در شکل (۳) نشان داده شده، برجسته شده‌است. در این شکل، سوئیچ‌های SW1 و SW2 در ابتدا (تحت شرایط عملکرد عادی سیستم) در وضعیت I1 قرار دارند. این آرایش از مدار کنترل متناظر با کنترل اصلی است. بدنبال یک خطای اتصال کوتاه، این سوئیچ‌ها در لحظه‌ی پاک شدن خطا به موقعیت I2 تغییر مکان می‌یابند. آرایشی که در این لحظه شکل می‌گیرد، متناظر با مدار کنترل گذرا خواهد بود. گزینه دومی که برای اعمال تکنیک وجود دارد و در این تحقیق نیز اجرا شده مبتنی بر تغییر مقادیر توان‌های ظاهری و راکتیو مرجع کنترل کننده‌ها بترتیب به مقادیر بیشینه و کمینه در لحظه‌ی پاک سازی خطا می‌باشد. نهایتاً با صفر شدن تغییرات سرعت روتور، این مقادیر به مقادیر حالت عادی بر گردانده می‌شوند. نکته‌ای که قابل به ذکر است این است که مقدار  $\alpha_{max}$  به ظرفیت دستگاه وابسته است و برای یک ظرفیت حدود ۴۰۰ مگا ولت-

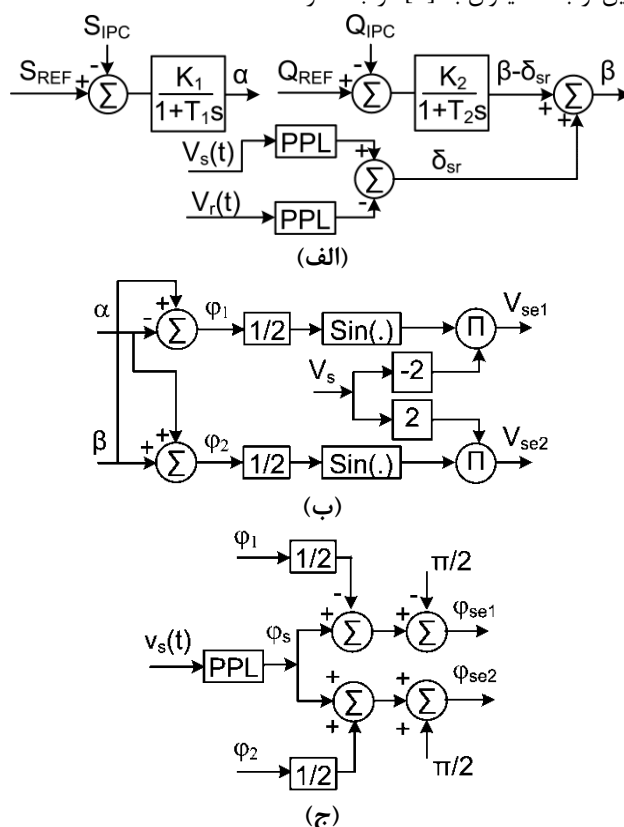
گرفته شده، یک منبع ولتاژ AC وابسته به ولتاژ DC است که دامنه و فاز آن برای VSC‌های ۱ و ۲ از روابط زیر بدست می‌آیند [۲۰]:

$$V_{rek} = k_0 m_k V_d \angle \delta_k \quad \text{for } k=1,2 \quad (4)$$

در اینجا، ثابت  $k_0$  به نوع مدولاسیون بستگی دارد و برای مدولاسیون

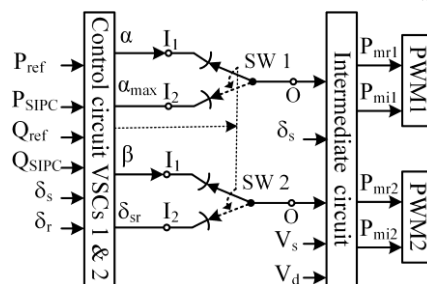
نوع PWM مقدار آن طبق رابطه  $k_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$  بدست می‌آید. علاوه

بر این، همانطور که در بخش (۱) نیز بیان شد باس DC این تجهیز مستقیماً به یک باتری ایده‌آل متصل می‌شود [۹]، بر این اساس مدلی که برای آن در این تحقیق در نظر گرفته شده، مدل یک منبع ولتاژ DC ایده‌آل است که فاقد هر نوع دینامیکی می‌باشد. همینطور بر اساس استراتژی کنترل SIPC، توان ظاهری خروجی دستگاه تنها به پارامتر  $\alpha$  و نسبت مولفه‌های توان راکتیو به توان اکتیو فقط به پارامتر  $\beta$  بستگی دارد. بر این اساس با کنترل همزمان متغیرهای  $\alpha$  و  $\beta$ ، توان ظاهری دستگاه و همینطور یکی از مولفه‌هایش مثلاً توان راکتیو می‌تواند کنترل شود. از طرف دیگر با توجه به رابطه‌ای که بین توان ظاهری و مولفه‌هایش برقرار است، پر واضح است که توان اکتیو نیز به مقدار مرجع کنترل خواهد شد. دیاگرام کنترل بلوکی مربوط به این استراتژی در شکل (۲) نشان داده شده‌است. برای جزئیات بیشتر در این ارتباط، میتوان به [۹] مراجعه کرد.



شکل (۲): دیاگرام بلوکی سیستم کنترل SIPC [9]

آمپر نزدیک به ۶۹ درجه است. همینطور یادآوری شود که در شکل (۳) بجای شاخص ترکیبی  $m_k < \delta_k$  از مولفه‌های حقیقی و موهومی آن یعنی  $P_{mik}$  و  $P_{mrk}$  ( $k=1, 2$ ) استفاده شده است.

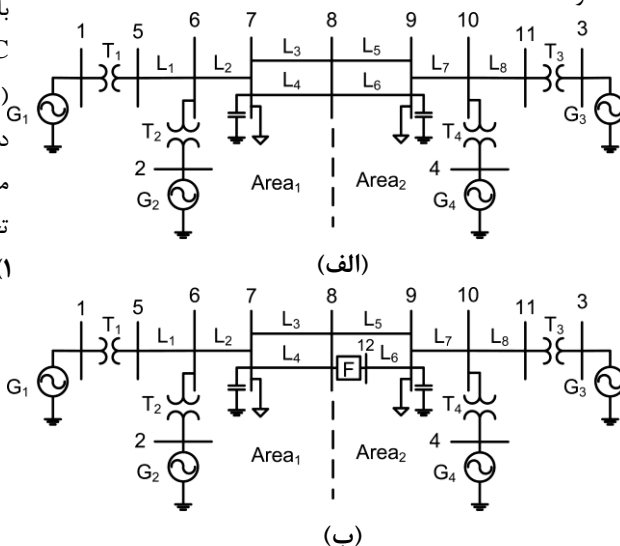


شکل (۳): آرایش کلی مدار کنترل SIPC

## ۴- سیستم تست و شرایط شبیه سازی

### ۴-۱- سیستم تست و حالات مطالعه

سیستم تست مورد استفاده در مطالعات شبیه سازی، یک سیستم به هم پیوسته دو ناحیه‌ای چهار ماشینه است که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است [۱]. شکل (۴-ب)، این سیستم را در حضور تجهیز FACTS نشان می‌دهد. به منظور انجام فرآیند شبیه سازی، SIPC در محلی بین باس‌های ۸ و ۱۲ سیستم که در شکل (۴-ب) با بلوک F (محل نصب کنترل کننده FACTS) نشان داده شده، شبیه سازی تا از آن جهت کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو ابتدای خط ۶، استفاده شود.



شکل (۴): سیستم تست (الف) سیستم مبنا (ب) سیستم تست با حضور SIPC

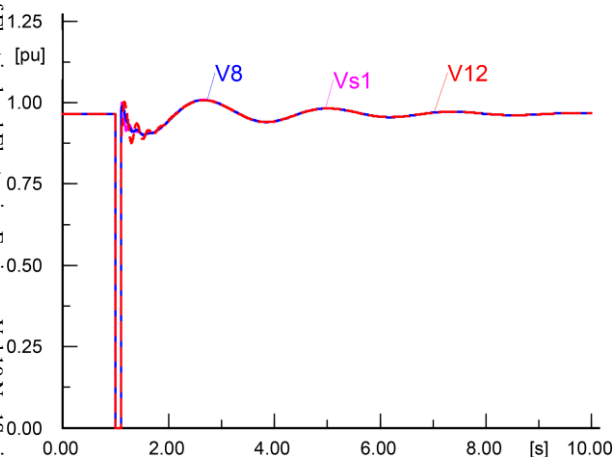
دو حالت مطالعه، بترتیب متناظر با دو موضوع تحقیق، در این مقاله در نظر گرفته شده است. در حالت مطالعه ۱، موضوع ارزیابی قابلیت‌های دستگاه و در حالت مطالعه ۲، مسئله حد پایداری گذرای سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت مطالعه ۱، مسئله از طریق طرح چهار سناریو (شامل سناریوهای ۱، ۲، ۳ و ۴) و در حالت مطالعه ۲ از طریق سه سناریو (شامل سناریوهای ۵، ۶ و ۷) پیگیری

شده است. بجز سناریوهای ۱ و ۵ که متناظر با سیستم مبنا و بدون حضور کنترل کننده FACTS می‌باشند در سایر سناریوهای ۲-۴، ۶ و ۷ کنترل کننده در سیستم و در محل مورد اشاره قرار دارد. در همه سناریوهای ۱-۷ بجز سناریوی ۴، یک خطای یکسانی از نوع سه فاز متقارن در لحظه ۱ ثانیه اتفاق و ۰/۱ ثانیه بعد پاک شده است. محل این خطا در سناریوهای ۱ و ۲، باس ۸ (باس ورودی SIPC)، در سناریوی ۳، باس ۱۲ (باس خروجی SIPC) و در سناریوهای ۵، ۶ و ۷، باس ۷ می‌باشد. سناریوی ۷ تکرار سناریوی ۶ است با این تفاوت که تکنیک پیشنهادی در آن اعمال شده است. بالاخره، سناریوی ۴ متناظر با وضعیتی است که در آن توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع SIPC بطور مجزا و بترتیب در پله‌های ۵۰ مگاواتی و ۵۰ مگاوار تغییر داده می‌شوند. در مرحله تغییر توان اکتیو، توان راکتیو مرجع در صفر مگاوار و در مرحله تغییر توان راکتیو، توان اکتیو مرجع در مقدار ۱۵۰ مگاوات ثابت نگه داشته شده است. سایر اطلاعات لازم از قبیل داده‌های مربوط به ثوابت SIPC و همینطور کنترل کننده‌های آن در پیوست داده شده است.

### ۴-۲- نتایج شبیه سازی و تحلیل آن

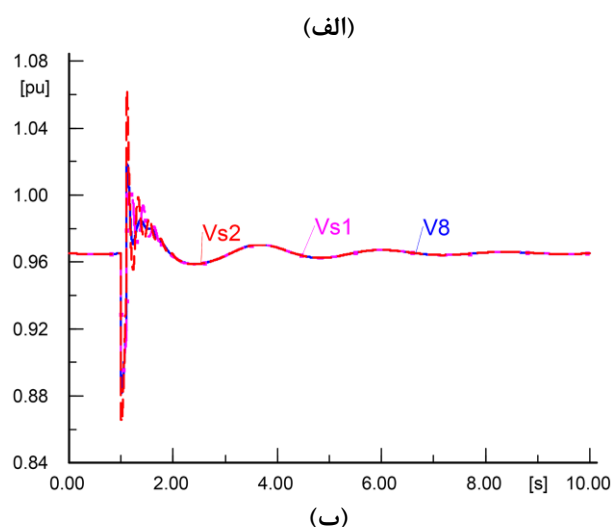
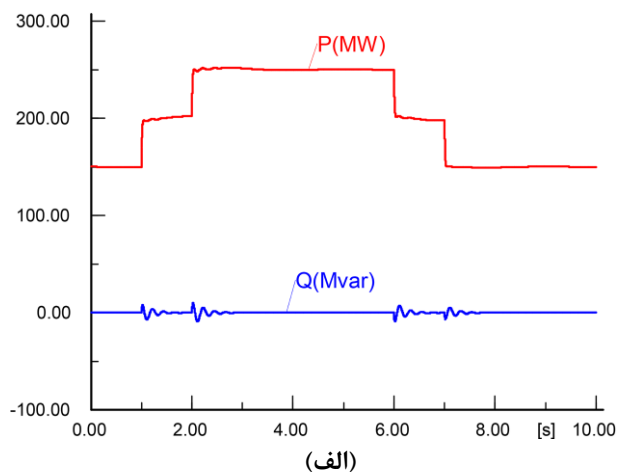
نتایج شبیه سازی بصورت داده‌هایی در جدول (۱) و همینطور منحنی‌هایی از زمان در اشکال (۵) تا (۱۲) داده شده‌اند. در این اشکال،  $I_{con,12}$ ،  $I_{con,8}$ ،  $I_{sc,base}$ ،  $V_{12}$ ،  $V_8$ ،  $V_{s2}$ ،  $V_{s1}$  بترتیب دامنه ولتاژ باس خروجی PS‌های ۱ و ۲، دامنه ولتاژ باسهای ورودی و خروجی SIPC، میزان مشارکت خط ۶ به جریان خطای باس ۸ در سناریوی ۱ (یا بطور معادلی میزان مشارکت باس ۸ به جریان خطای ابتدای خط ۶ در سناریوی ۱)، میزان مشارکت SIPC به جریان خطای باس ۸ و میزان مشارکت SIPC به جریان خطای باس ۱۲ می‌باشند. تحلیل نتایج شامل نکات مهم زیر است:

۱- اولین نکته در خصوص ارزیابی عملکرد درست SIPC، حصول اطمینان از عملکرد درست PS‌های آن می‌باشد. به همین منظور، دامنه ولتاژ باس‌های ورودی و خروجی هر دو PS برای هر دو سناریوی ۲ و ۳ بترتیب در اشکال (۵-الف) و (۵-ب) نشان داده شده است.

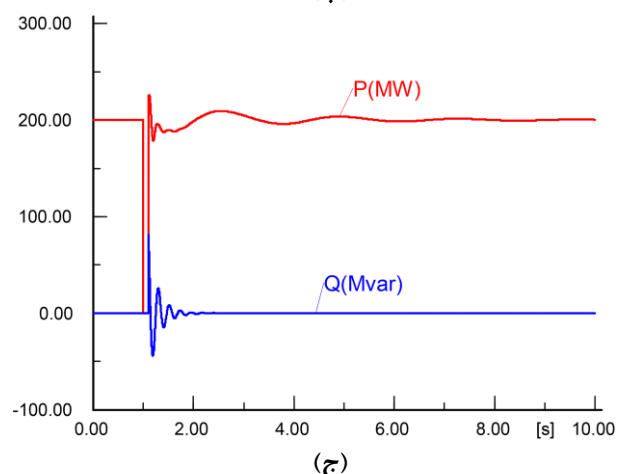
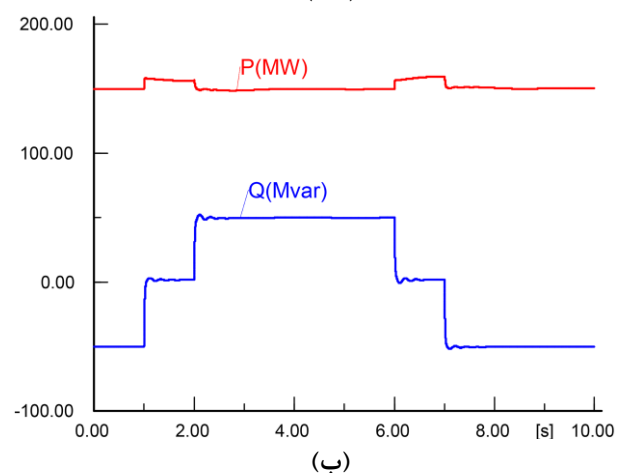




این اشکال بخوبی نشان می‌دهند که SIPC قادر است توان اکتیو و راکتیو خروجی خود یا بطور معادلی توانها در ابتدای خط ۶ را دقیقاً در مقادیر مرجع داده شده، بطور لحظه‌ای تنظیم کند. علاوه بر این، هیچ خطای حالت دائمی در هیچکدام از توان‌ها در هیچ حالتی دیده نمی‌شود.



شکل (۵): دامنه ولتاژ باس‌های ورودی-خروجی PS ها (الف) سناریوی ۲ و (ب) سناریوی ۳

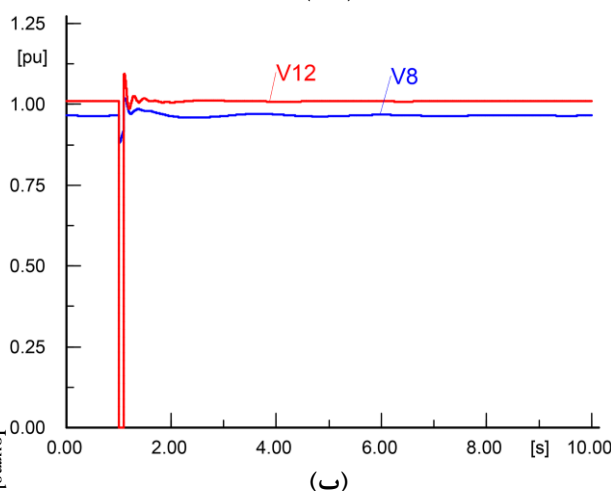
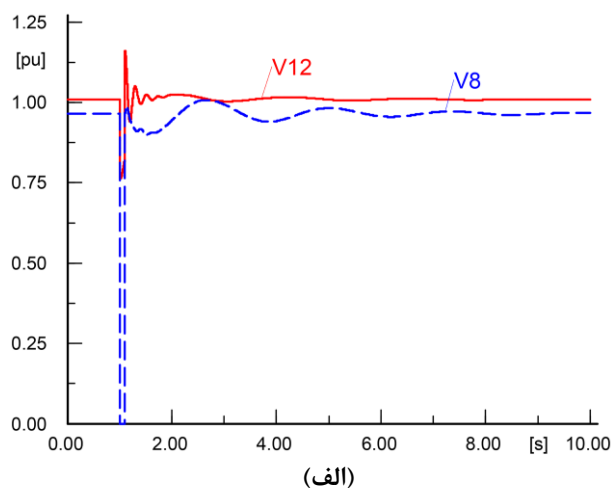


شکل (۶): توان‌های اکتیو و راکتیو خط ۶ (سناریوی ۴) (الف) با توان راکتیو ثابت صفر، (ب) با توان اکتیو ثابت ۱۵۰ مگاوات، (ج) با توان اکتیو و راکتیو ثابت (سناریوی ۲)

با مشاهده این اشکال، واضح است که دامنه ولتاژ باس‌های ورودی و خروجی هر دو PS در هر دو سناریوی ۲ و ۳ حتی در طی شرایط دینامیکی با هم برابراند. این، یعنی PS ها یک جابجایی فاز ایده‌آل ارائه می‌دهند. از آنجا که هیچ محدودیتی در میزان جابجایی فاز ارائه شده توسط این PS های پیشرفته وجود ندارد، نتیجتاً محدودیتی در بازه کنترل سیلان توان SIPC بر خلاف TIPC وجود ندارد. علت آنکه این ولتاژها بر خلاف سناریوی ۳ در سناریوی ۲ و در طی بازه حضور خطا مساوی صفراند آنست که با توجه به معادلات (۳) و (۴) دامنه ولتاژ تزریقی هر دو مبدل با دامنه ولتاژ باس ورودی SIPC ( $V_8$ ) متناسب است. لذا در سناریوی ۲ چون خطا روی این باس اتفاق افتاده است، این ولتاژها نیز صفر هستند. اما در سناریوی ۳ چون خطا بر روی باس ۱۲ است، این افت ولتاژ بر طبق قابلیت ایزوله‌سازی ولتاژ SIPC به باس ورودی آن منتقل نمی‌شود و تنها افت کوچکی دیده می‌شود.

(۲)-نتایج مربوط به موضوع کنترل سیلان توان SIPC (سناریوی ۴) در اشکال (۶-الف) و (۶-ب) نشان داده شده‌اند. همانطور که قبلاً بیان شد، ابتدا توان اکتیو مرجع SIPC ( $P_{ref}=150\text{MW}$ ) در پله‌های ۵۰ مگاواپی بترتیب در لحظات ۱ و ۲ ثانیه افزایش و سپس در لحظات ۶ و ۷ ثانیه به مقدار اولیه کاهش داده می‌شود. در این حالت، توان راکتیو مرجع در مقدار  $Q_{ref}=0\text{Mvar}$  ثابت نگه داشته شده‌است و نتیجه بدست آمده از شبیه‌سازی نیز در شکل (۶-الف) نشان داده شده‌است. در مرحله بعد توان اکتیو مرجع در مقدار ۱۵۰ مگاوات ثابت و این بار توان راکتیو مرجع در پله‌های ۵۰ مگاواپی با شروع از ۵۰- مگاوار بترتیب در لحظات ۱ و ۲ ثانیه ابتدا افزایش و سپس در لحظات ۶ و ۷ ثانیه کاهش داده می‌شود. نتیجه حاصله در این حالت نیز در شکل (۶-ب) نشان داده شده‌است. همینطور، شکل (۶-ج) توان‌های خروجی SIPC را به ازاء توان‌های مرجع  $P_{ref}=200\text{MW}$  و  $Q_{ref}=0\text{Mvar}$  و در حضور خطا (سناریوی ۲) نشان می‌دهد. مشاهده

(۴) - برای آنکه قابلیت ایزوله‌کنندگی ولتاژ باس‌های ورودی-خروجی SIPC آشکار شود، دامنه ولتاژ این باس‌ها تحت شرایط خطا و برای هر دو سناریوی ۲ و ۳ بگونه‌ای که در شکل (۸) نشان داده شده، در کنار هم رسم شده‌است.

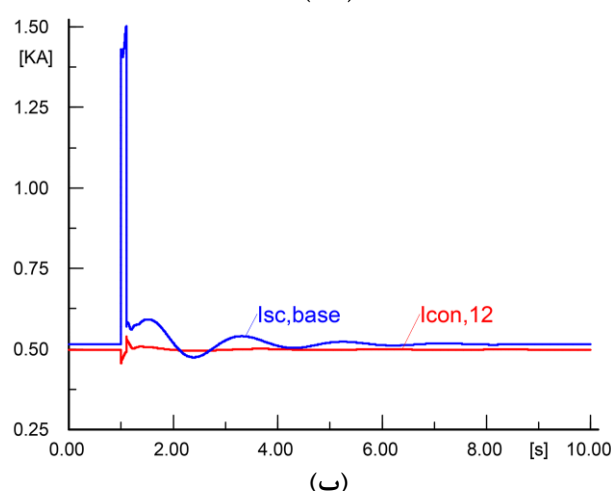
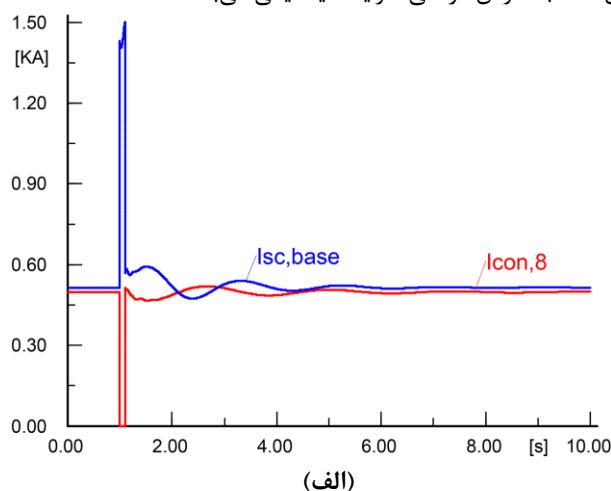


شکل (۸): دامنه ولتاژ باس‌های ورودی-خروجی SIPC (الف) سناریوی ۲ و (ب) سناریوی ۳

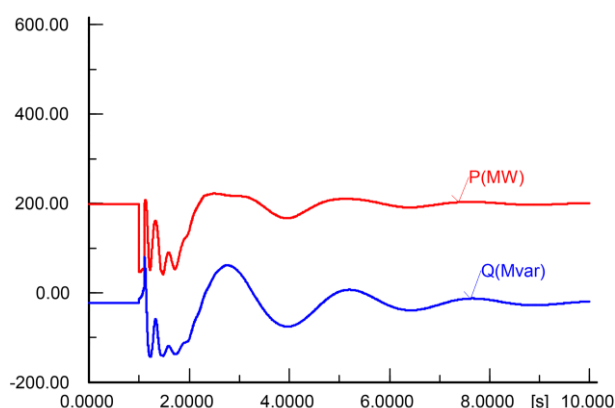
با توجه به شکل (۸-الف) می‌توان مشاهده کرد که وقتی خطا روی باس ورودی اتفاق افتاده، دامنه ولتاژ باس خروجی با یک افت اندکی (حدود ۲۱/۲۷٪) مواجه شده‌است. همانطور که از شکل (۸-ب) مشهود است، در سناریوی ۳ که خطا روی باس خروجی اتفاق افتاده، میزان افت ولتاژ در باس ورودی کمتر از ۱۰ درصد است. این، یعنی SIPC دامنه ولتاژ باس ورودی و خروجی خود را در تمام لحظات از هم ایزوله نگه می‌دارد. نتیجتاً در مواردیکه دو ناحیه AC توسط خطی شامل SIPC به هم متصل شده باشند، وجود چنین قابلیت برای SIPC می‌تواند مانع از انتشار خطا از یک ناحیه به دیگری شود.

(۵) - اضافه جهش‌های ظاهر شده در زوایای روتور ماشین‌ها ناشی از اتفاق خطا در باس ۷ (سناریوهای ۵، ۶ و ۷) در شکل (۹) نشان داده شده‌است. همانطور که از شکل (۹-الف) واضح است این خطا

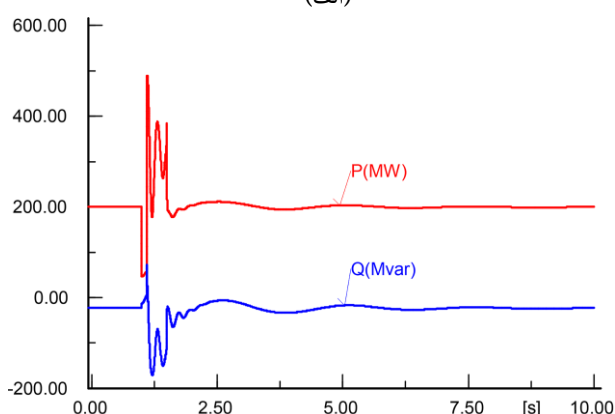
(۳) - به منظور برجسته‌سازی ویژگی محدودکنندگی جریان خطای SIPC، میزان مشارکت آن به جریان خطا در هر دو سناریوی ۲ و ۳ با میزان مشارکت آن وقتی باس‌های ورودی و خروجی‌اش به هم اتصال کوتاه باشند (حالت بدون SIPC یا همان سیستم مینا) مقایسه شده‌است. جریان خطا در سیستم مینا در شکل (۷) با  $I_{sc, base}$  نشان داده شده‌است. با توجه به شکل (۷-الف) پر واضح است که در سناریوی ۲، میزان مشارکت SIPC به خطای باس ۸ دقیقاً صفر شده است در صورتیکه در سیستم مینا میزان این مشارکت (مشارکت خط ۶) نسبت به جریان بار این خط تقریباً ۲/۸ برابر شده است. علت صفر شدن مشارکت SIPC در سناریوی ۲ (حتی کمتر از جریان بار خط ۶) این است که چون خطا در باس ۸ رخ داده بر طبق توضیحی که در بند (۱) این لیست بیان شد، ولتاژهای تزریقی دقیقاً صفر است، نتیجتاً با توجه به شکل (۲)، مدل SIPC دقیقاً مدل یک مدار تشدید موازی است که عملاً یک مدار باز است و اجازه عبور جریان را نمی‌دهد. از شکل (۷-ب) نیز مشهود است که برای خطا در باس ۱۲، میزان مشارکت SIPC به این باس به سطح جریان بار و یا حتی کمتر محدود شده‌است. این توصیفات بیان می‌کند که SIPC دارای قابلیت محدودسازی جریان خطا بخصوص در طی شرایط دینامیکی می‌باشد.



شکل (۷): میزان مشارکت SIPC به جریان خطا (الف) سناریوی ۲ و (ب) سناریوی ۳



(الف)



(ب)

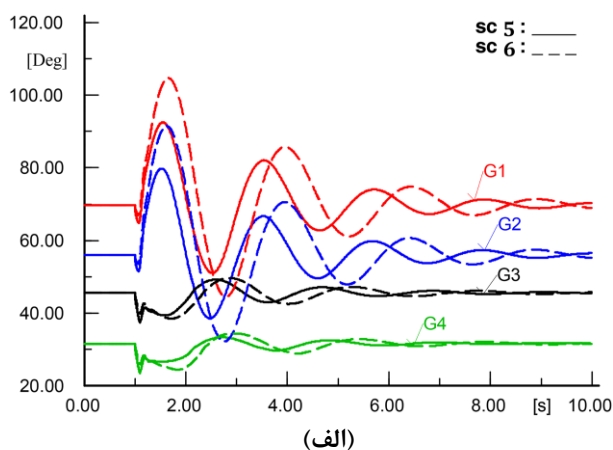
شکل (۱۰): توانهای اکتیو و راکتیو خروجی SIPC  
الف) سناریوی ۶ و ب) سناریوهای ۷

به منظور مشاهده کیفیت تاثیرگذاری تکنیک پیشنهادی بر میزان توان انتقالی (از ناحیه ۱ به ۲) در بازه بعد از خطا، توانهای خروجی SIPC برای دو سناریوی ۶ و ۷ در شکل (۱۰) رسم شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار توان انتقالی تا لحظه پاک شدن خطا ( $t=1/1s$ ) در هر دو سناریو کاملاً یکسان است اما از این لحظه به بعد مقدار این توان در سناریوی ۷ به خاطر اعمال تکنیک فوق بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

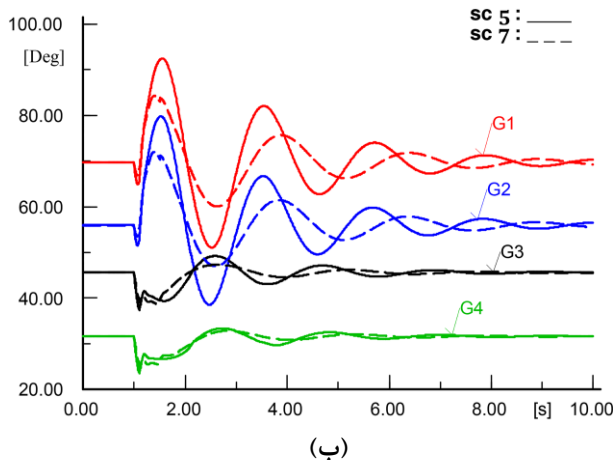
شکل (۱۱) متغیرهای مربوط به SIPC را برای سناریوی ۷ نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت تغییر توان ظاهری مرجع از مقدار عادی (حدود ۲۰۰/۵ مگا ولت-آمپر) به مقدار بیشینه (حدود ۴۰۰ مگا ولت-آمپر) در بازه بعد از خطا (بین لحظه ۱/۱ ثانیه تا لحظه ۱/۶۵ ثانیه)، سبب شده تا متغیر  $\alpha$  نیز در این بازه از مقدار حالت عادی (حدود ۱۸ درجه) به مقدار بیشینه (حدود ۶۹ درجه) تغییر یابد و نهایتاً با برگشت توان ظاهری مرجع، دوباره به حالت اولیه برگردد (شکل (۱۱-الف)). در این راستا، مقدار  $\beta$  نیز به متغیر  $\delta_{sr}$  نزدیک شده (در بازه مورد نظر) ولی در مقایسه با  $\alpha$  از حساسیت بیشتری برخوردار است.

همانطور که در بخش (۲-۲) بیان شد، باس DC دستگاه SIPC بر خلاف UIPC فاقد هر نوع دینامیک است. این موضوع در شکل

ژنراتورهای G1 و G2 (ماشینهای موجود در ناحیه ۱) را بشدت تحت تاثیر قرار داده‌است. از این شکل واضح است که حضور SIPC در سیستم (سناریوی ۶)، مقدار اضافه جهش در اولین سوئیچینگ را نسبت به حالت مبنا (سناریوی ۵) بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده که به معنای یک افت در حد پایداری گذرای سیستم تلقی می‌شود. لازم بذکر است که به منظور انجام مقایسه دقیقتر، مقادیر توانهای اکتیو و راکتیو مرجع SIPC در سناریوهای ۶ و ۷ دقیقاً مساوی توانهای اکتیو و راکتیو ابتدای خط ۶ در سیستم مبنا (سناریوی ۵) انتخاب شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل (۹): زوایای روتور ژنراتورها  
الف) سناریوهای ۵ و ۶ و ب) سناریوهای ۷ و ۸

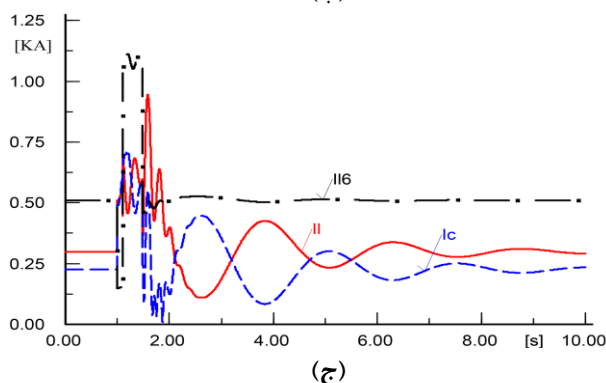
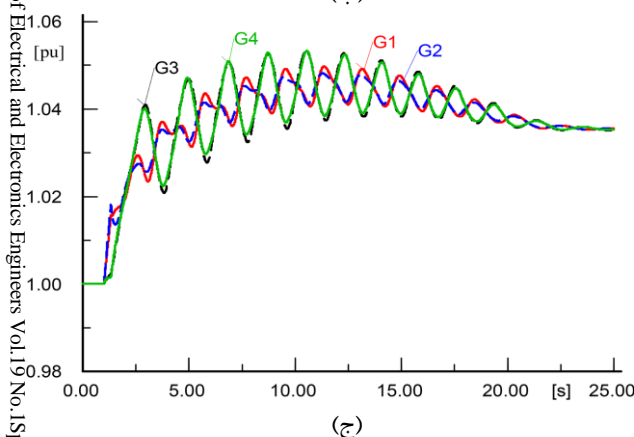
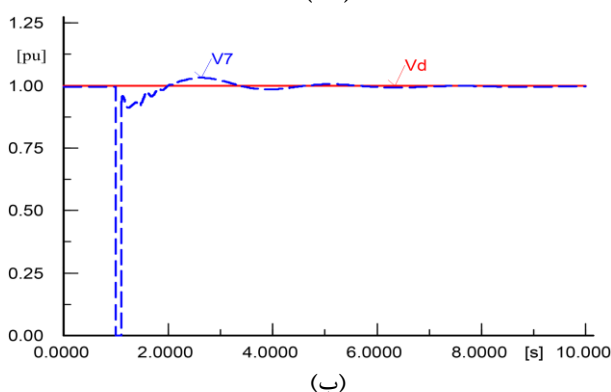
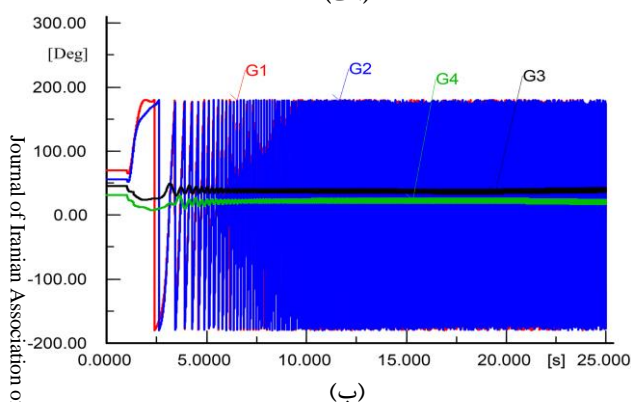
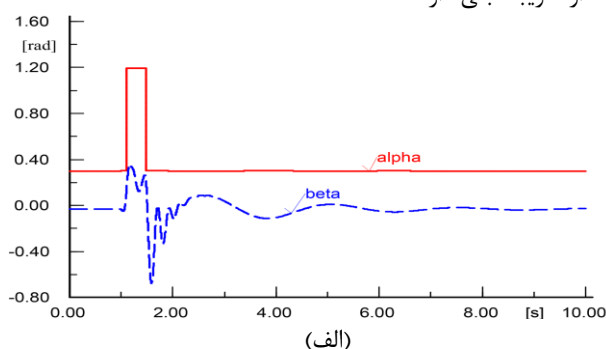
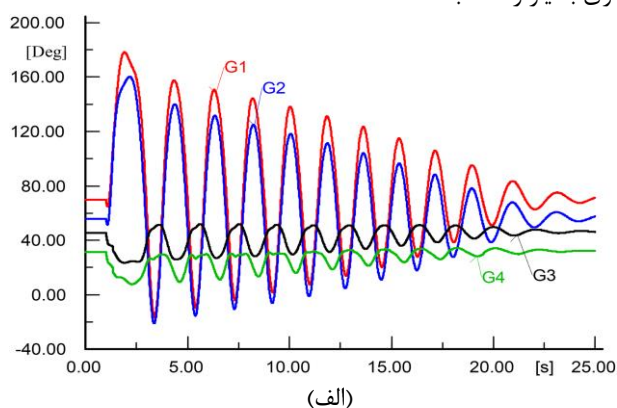
۶-زوایای روتور ماشین‌ها در حالت اعمال تکنیک پیشنهادی (سناریوی ۷) در شکل (۹-ب) نشان داده شده‌است. مقایسه‌ی نتیجه این حالت با حالت مبنا (سناریوی ۵) نشان می‌دهد که نه تنها اثر منفی دستگاه روی پایداری گذرای سیستم جبران شده بلکه همچنین یک بهبودی نسبی نیز حاصل شده‌است.



(۱۱-ب) نشان داده شده است. در این شکل، ولتاژ باس معیوب (باس ۷) نیز در کنار ولتاژ باس DC نشان داده شده است.

(۹) در شکل (۱۱-ج) نیز تغییرات مربوط به جریان خروجی دستگاه  $(I_{l6})$  و همینطور جریان هر یک از شاخه‌های آن، نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشهود است جریان خروجی دستگاه در بازه حضور خطا (لحظات بین ۱ تا ۱/۱ ثانیه) نه تنها افزایش نداشته بلکه افت اندکی نیز بدنبال داشته است و این کاملاً با قابلیت «محدود کنندگی جریان خطا» دستگاه در تطبیق است. از طرف دیگر، با افزایش توان ظاهری مرجع از لحظه  $t=1/1$  ثانیه به بعد، همانطور که در این شکل نیز نشان داده شده، جریان خروجی دستگاه متناسب با افزایش توان ظاهری، افزایش یافته است که کاملاً با بحث‌های تئوری سازگار است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که تغییرات در دامنه جریان شاخه‌ها در فاز متقابل است در حالیکه جریان در خروجی در هر بازه، مقدار تقریباً ثابتی دارد.

(۱۰-شکل ۱۲) نمودار متناظر با تغییرات زاویه و سرعت روتور ماشین‌ها را در سیستم مبنا (سناریوی ۵) و در شرایط مرزی (مرز بین پایداری و ناپایداری) نشان می‌دهد. اشکال (۱۲-الف) و (۱۲-ج) که متناظر با یک زمان پاک سازی خطای ۰/۳۲۳ ثانیه است، انتهای وضعیت حالت پایدار و اشکال (۱۲-ب) و (۱۲-د) که متناظر با یک زمان پاک سازی ۰/۳۲۴ ثانیه است، شروع وضعیت یک حالت ناپایدار در سیستم را نشان می‌دهند. بر همین اساس، زمان بحرانی رفع خطای سیستم مبنا مساوی ۰/۳۲۳ ثانیه تعیین می‌شود. در چنین مواقعی که حالت گذرای متناظر با وضعیت ناپایدار سیستم از نوع نوسانی است (شکل ۱۲-ب)، رسم نمودار تغییرات سرعت بگونه‌ای که در اشکال (۱۲-ج) و (۱۲-د) نشان داده شده، میتواند در تشخیص مرز ناپایداری بسیار ره‌گشا باشد.



شکل (۱۱): متغیرهای مربوط به SIPC (سناریوی ۷) (الف) متغیرهای  $\alpha$  و  $\beta$  (ب) ولتاژهای باس خطا (باس ۷) و باس DC (ج) جریان‌های خروجی و شاخه‌های دستگاه

گذرای سیستم نیز با یک اثر منفی منعکس گردید. نهایتاً، با اعمال تکنیک پیشنهادی یک افزایش نسبی در بهبود پایداری گذرای سیستم فراهم گردید. میزان این افزایش به زمان پاک سازی خطا وابسته است. برای زمانهای پاک سازی معمول ۰/۱ ثانیه، حاشیه پایداری گذرای سیستم در حضور SIPC بهتر از حاشیه پایداری سیستم مبناست اما برای زمانهای طولانی تر مثل زمان بحرانی رفع خطا، بر عکس حاشیه پایداری سیستم در حضور دستگاه، اندکی کمتر از سیستم مبناست.

### ضمایم

جدول (ض-۱): ثوابت SIPC و کنترل کننده‌های آن

پارامترهای کنترل کننده‌ها	$K_1$	$T_1(s)$	$K_2$	$T_2(s)$
	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱
راکتانس‌های داخلی	$X_L(\Omega)$		$X_C(\Omega)$	
	۱۵۰		۱۵۰	
توان‌های مرجع (سناریوهای ۶ و ۷)	$P_{ref}(MW)$		$Q_{ref}(MVar)$	
	۱۹۹/۲		-۲۲	

### مراجع

- [1] Chao, D., Wanliang, F., Lin, J., Shuanbao, N., "FACTS Devices Allocation via Sparse Optimization", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 31, No. 2, pp. 1308-1319, 2016.
- [2] Salehian, S. M., Hasanvand, H., Mozafari, B. "A Robust FACTS Damping Controller Design to Mitigate Interarea Oscillations in a Multi-machine Power System" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 14, No. 4, Winter 2017.

[۳] طاهر، سید عباس، رضا و علی "طراحی کنترل کننده‌های UPFC

برای کنترل همزمان توان و ولتاژ با استفاده از الگوریتم ژنتیک"،

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۶، شماره ۱، بهار و

تابستان ۱۳۸۸.

- [4] Pradeep, S., Rajive, T., "Amalgam Power Flow Controller: A Novel Flexible, Reliable, and Cost-Effective Solution to Control Power Flow", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 33, No. 3, pp. 2842-2853, 2018.
- [5] Van, D., Verboomen, J., Belmans, R., Kling, W. L., "Power Flow Controlling Devices—An Overview of Their Working Principles and Their Application Range", 2005 Int. Conf. Future Power Syst., pp. 6-6, 2005.

[۶] حجتی نجف آبادی، ابراهیم، سعید مسعود و سعید "تعیین بهینه تولید

و مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS به منظور حذف تراکم"، نشریه

مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان

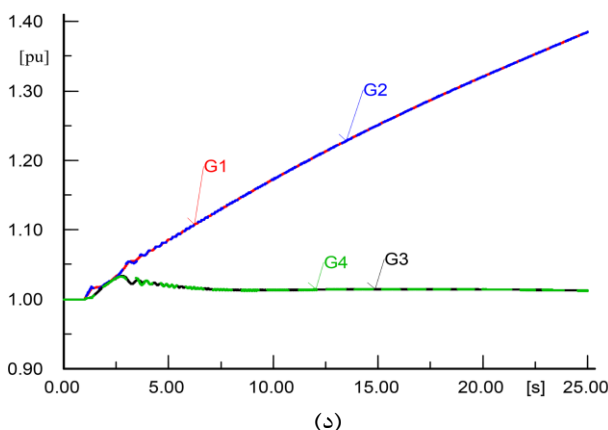
۱۳۹۴.

[۷] همتی، رضا، حمید رضا و محمد "کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع

بهبود یافته نرمالیزه شده برای UPFC"، نشریه مهندسی برق و

الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴.

- [8] Kamel, S., Jurado, F., Chen, Z., "Power Flow Control for Transmission Networks with Implicit Modeling of Static Synchronous Series Compensator", Int. J. of Elect. Power & Energy Syst., Vol. 64, pp. 911-920, 2015.
- [9] Pourhossein, J., Gharehpetian, G.B., Fathi, S.H., "Static Inter Phase Power Controller (SIPC) Modeling for Load Flow and Short Circuit Studies", Energy Conversion and Management, Vol. 64, pp. 145-151, 2012.



شکل (۱۲): تغییرات زاویه و سرعت روتور ماشین‌ها در شرایط

مرزی و برای حالت مبنا (الف) زوایای روتور (حالت پایدار)، (ب) زوایای

روتور (حالت ناپایدار)، (ج) سرعت‌های روتور (حالت پایدار) و (د)

سرعت‌های روتور (حالت ناپایدار)

(۱۱) -مقادیر زمان بحرانی رفع خطا ( $t_{cr}$ ) برای سناریوهای ۵، ۶ و ۷ و هم‌منظور درصد تغییر آنها نسبت به حالت مبنا (سناریوی ۵) در جدول (۱) داده شده‌است. این مقادیر از طریق تکرار فرآیند شبیه‌سازی و افزایش گام به گام زمان پاک سازی خطا تا رسیدن به مرز ناپایداری با یک دقتی کمتر از ۱ میلی ثانیه بدست آمده‌اند.

جدول (۱): مقادیر  $t_{cr}$  برای سناریوهای ۵، ۶ و ۷

	سناریو		
	5	6	7
$t_{cr}(s)$	۰/۳۲۳	۰/۲۳۵	۰/۲۶۸
$\Delta t_{cr}(\%)$	0	-۲۷/۲۴	-۱۷/۰۲

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله بر روی یک تجهیز FACTS کنترل کننده سیلان توان پیشرفته بنام SIPC تمرکز گردید. در این تمرکز، دو مسئله در خصوص این دستگاه مورد تحقیق قرار گرفت. در مسئله اول، موضوع ارزیابی دینامیکی قابلیت‌های دستگاه و در دومی نحوه تاثیر آن بر پایداری گذرای یک سیستم قدرت نمونه بررسی و بعلاوه تکنیکی (مبتنی بر کنترل ناپیوسته دستگاه) جهت بهبود پایداری گذرای سیستم پیشنهاد گردید. روش تحقیق مبتنی بر حل معادلات دینامیک سیستم (شبیه سازی حوزه زمان)، اجرا مکرر برنامه شبیه سازی، رسم نمودارهای زاویه-سرعت روتور و محاسبه زمان بحرانی رفع خطا ( $t_{cr}$ ) پایه‌گذاری شد. تمامی موارد شبیه سازی شامل شبیه سازی دستگاه و مدار کنترل آن، هم‌منظور سیستم قدرت در محیط نرم‌افزار آشنای دیگسایلنت و در قالب سناریوهای مختلفی اجرا و سرانجام نتایج حاصله بحث و مقایسه شدند. نتیجتاً، تحلیل نتایج منجر به تائید دینامیکی تمامی قابلیت‌های دستگاه گردید ضمن اینکه نحوه تاثیر آن بر پایداری

- [10] Pourhossein, J., Gharehpetian, G.B., Fathi, S.H., "Unified Interphase Power Controller (UIPC) Modeling and its Comparison with IPC and UPFC", IEEE Trans. Power Del., Vol. 27, No. 4, pp. 1956-1963, 2012.
- [11] Brochu, J., Inter phase Power Controller, First ed, Montreal, Canada, Polytechnic Int. Press, 1999.
- [۱۲] احسانی، الهه، محمد و آرش "کاربرد مستقیم روش تعادل نش در تحلیل بازی راهبردی بازار برق"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴.
- [13] P, Krishna Gandhi, "Transient Stability Enhancement of Single Machine Infinite Bus System", 2013 Int. Conf. on Advanced Computing and Commun. Syst., 2013.
- [14] P, Sunil Kumar, "Transient Stability Enhancement of Power System Using TCSC", Int. J. of Elect. and Comput. Eng., Vol. 2, No. 3, 2012.
- [15] Eremia, M., Shahidehpour, M., Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control, Wiley-IEEE Press, 2013.
- [16] Anghel, M., Milano, F., Papachristodoulou, A., "Algorithmic Construction of Lyapunov Functions for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Circuits and Syst. I: Regular Papers, Vol. 60, No. 9, pp. 2533-2546, 2013.
- [17] Maria, G. A., Tang, C., Kim, J., "Hybrid Transient Stability Analysis", IEEE Trans., Power Syst., Vol. 5, No. 2, pp. 384-393, 1990.
- [18] Fang, D. Z., Chung, T.S., Zhang, Y., Song, W. "Transient Stability Limit Conditions Analysis Using a Corrected Transient Energy Function", IEEE Trans., Power Syst., Vol. 15, No. 2, pp. 804-810, 2000.
- [۱۹] کربلائی، فرید، حمیدرضا و رضا "ارزیابی برون خط پایداری گذرا به وسیله تعیین دقیق CCT با استفاده از شبکه عصبی با ورودی‌های مبتنی بر توابع انرژی"، نشریه مهندسی برق دانشگاه تبریز، سال ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [20] DiGSILENT, G., Power Factory Software's User Manual; Appendix C: PWM AC/DC Converter-1DC Connection (ElmVscmono), Gomaringen, Germany, 2015.

## زیر نویس‌ها

- <sup>1</sup> Flexible AC transmission system
- <sup>2</sup> Unified power flow controller
- <sup>3</sup> Static synchronous series compensator
- <sup>4</sup> Static inter phase power controller
- <sup>5</sup> Unified inter phase power controller
- <sup>6</sup> Voltage sourced convertor
- <sup>7</sup> Inter phase power controller
- <sup>8</sup> Phase shifter
- <sup>9</sup> Critical clearing time (CCT)
- <sup>10</sup> Peak overshoot
- <sup>11</sup> Tuned inter phase power controller
- <sup>12</sup> Phase shifting transformer
- <sup>13</sup> Pulse width modulation