

بررسی تاثیرات STATCOM بر عملکرد حفاظت قطع تحریک ژنراتور سنکرون با استفاده از یک مدل واقع گرایانه

عباس حسنی^۱، دانشجوی دکتری، فرهاد حق‌جو^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
A_hasani@sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی - تهران- ایران
F_haghjoo@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، تاثیرات جبران‌ساز سنکرون استاتیکی^۱ (STATCOM) بر عملکرد رله امپدانسی حفاظت قطع تحریک^۲ (LOF) ژنراتور سنکرون مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انجام یک مطالعه دقیق و جامع، یک مدل واقع گرایانه برای سیستم تحریک ژنراتور در نظر گرفته شده است. این سیستم با استفاده از مدل حوزه فاز^۳ (PD) ژنراتور سنکرون که در شبیه‌ساز زمان واقعی دیجیتال^۴ (RTDS) در دسترس می‌باشد، ایجاد شده است. با استفاده از چنین سیستمی، مطالعات LOF ژنراتور به صورت واقع گرایانه و مبتنی بر استاندارد IEEE Standard C37.102-2006 قابل انجام می‌باشد. در این راستا، انواع مختلفی از خطاها قطع تحریک کامل^۵ (CLOF) و جزئی^۶ (PLOF) بر ژنراتور اعمال شده و رفتار دینامیکی آن به همراه عملکرد رله امپدانسی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که STATCOM می‌تواند دو اثر عمدی بر عملکرد رله مذکور داشته باشد که عبارتند از: ۱) اعمال تاخیر بر عملکرد رله در تشخیص خطاها LOF و ۲) احتمال دستیابی ژنراتور به یک نفطه کار پایدار جدید^۷ (NSOP). زمانیکه سیستم کنترل ولتاژ از حالت اتوماتیک به حالت دستی تغییر وضعیت می‌دهد. هر دو اثر مذکور و عواقب محتمل ناشی از آن‌ها بر عملکرد ژنراتور مورد مطالعه قرار گرفته و راهکارهایی به منظور مواجهه با این اثرات پیشنهاد شده است. این راهکارها مشتمل بر ۱) استفاده از رله اضافه‌دار ژنراتور به منظور جلوگیری از اثرات گرمایی بر سیم‌پیچ استاتاتور به دلیل افزایش زمان عملکرد رله LOF و ۲) ارائه طرحی به منظور پایش NSOP هایی که ممکن است ژنراتور تجربه کند. هدف از این طرح، جلوگیری از اثرات مخربی است که ژنراتور ممکن است به دلیل کارکرد بلندمدت در حالت زیرتحریک متحمل شود.

واژه‌های کلیدی: ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک ژنراتور، حفاظت قطع تحریک، جبران‌ساز سنکرون استاتیکی، شبیه‌ساز زمان واقعی دیجیتال.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶

نام نویسنده‌ی مسئول: فرهاد حق‌جو

نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور، دانشکده برق.

۱- مقدمه

از طرف دیگر و با پیشرفت روزافزون تکنولوژی، استفاده از تجهیزات مبتنی بر الکترونیک قدرت به منظور تنظیم و کنترل هرچه بهتر شارش توان در سیستم افزایش یافته است. این تجهیزات تحت عنوان سیستم‌های انتقال جریان متابوب انعطاف‌پذیر^۱ (FACTS) مطرح می‌شوند. ادوات FACTS به صورت اتصال سری، موازی و یا ترکیب اتصال سری و موازی در نقاط مورد نظر به سیستم قدرت متصل می‌شوند^[۱۲].

اگرچه ادوات FACTS مزایای بسیاری از قبیل کاهش تلفات و بهبود پایداری را برای سیستم قدرت به همراه دارند، اما این تجهیزات ممکن است در شرایط دینامیک سیستم، کمیت‌های الکتریکی مورد استفاده رله‌های حفاظتی را تغییر داده و از این‌رو بر عملکرد صحیح آن-ها تاثیر منفی بگذراند. به عنوان نمونه، در سال‌های اخیر، تاثیر ادوات FACTS بر عملکرد رله‌های دیستانس خطوط انتقال بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات انجام شده در رابطه با این موضوع نشان می‌دهد که حضور این ادوات موجب ایجاد اختلال در عملکرد رله‌های دیستانس می‌شود. از جمله این اختلالات می‌توان به تاخیر در تشخیص خطا، خطا در انتخاب فاز^۱ و کاهش یا افزایش دسترسی^{۱۱} رله اشاره کرد^[۱۳-۱۶].

در سال‌های اخیر، تاثیر ادوات FACTS بر عملکرد رله امپدانسی حفاظت LOF ژنراتور سنکرون نیز مورد توجه قرار گرفته است^[۲۰-۲۷]. مولفان در مرجع [۱۷] برای اولین بار به این موضوع پرداخته و تاثیرات STATCOM بر عملکرد این رله را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این مرجع دو اختشاش به عنوان خطاهای LOF در نظر گرفته شده‌اند:

- وقوع اتصال کوتاه در سیم‌پیچ تحریک به عنوان یک خطای CLOF
- کاهش ناگهانی ولتاژ تحریک به عنوان یک خطای PLOF
- عملکرد رله LOF در مواجهه با دو خطای فوق مورد بررسی قرار گرفته و دو نتیجه عمده زیر به عنوان تاثیرات STATCOM بر عملکرد رله مذکور مطرح شده است:

 - حضور STATCOM موجب افزایش زمان عملکرد رله در تشخیص خطاهای LOF می‌شود.
 - حضور STATCOM می‌تواند موجب کاهش دسترسی رله در مواجهه با برخی خطاهای PLOF گردد.

- سایر مراجع باقیمانده^[۱۸-۲۰] نیز دو اختشاش مذکور را در بررسی تاثیر سایر ادوات FACTS بر حفاظت LOF مورد توجه قرار داده‌اند و نتایج کلی ارائه شده در آن‌ها معادل با نتایج فوق در مرجع [۱۷] می‌باشد. به عنوان توضیح بیشتر، مراجع^[۱۸] به بررسی تاثیرات STATCOM و جبرانساز سری سنکرون استاتیکی^{۱۲} (SSSC) بر عملکرد رله LOF پرداخته است. همچنین مراجع^[۱۹-۲۰] به ترتیب به بررسی تاثیرات STATCOM و کنترل کننده شارش توان بین خطی تعیین یافته^{۱۳} (GIPFC) یکی از تجهیزات FACTS است که مشکل از STATCOM و SSSC می‌باشد) بر عملکرد رله LOF

پدیده LOF یکی از انواع شرایط غیرعادی است که یک ژنراتور سنکرون ممکن است در حین عملکرد خود تجزیه نماید که این پدیده به نوبه خود می‌تواند اثرات منفی بر عملکرد ژنراتور و سیستم قدرت به همراه داشته باشد [۱-۳]. برخی از این اثرات منفی عبارتند از: اضافه‌بار در سیم‌پیچ‌های آرمیچر، گرمایش غیرعادی ناحیه انتهایی هسته استاتور، گرم شدن روتور در اثر القای جریان‌های گردآبی در سطح آن، آسیب‌های مکانیکی ناشی از نوسان گشتاور و در نهایت افت ولتاژ در سیستم قدرت و احتمال وقوع خاموشی ناحیه‌ای یا سراسری در آن [۱-۳]. بنابراین، ضروری است که از طرح‌های حفاظتی مطمئن، سریع و با امنیت بالا به منظور تشخیص پدیده LOF در ژنراتورهای نیروگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

امروزه حفاظت LOF در ژنراتورهای سنکرون نیروگاهی عمدتاً بر مبنای استفاده از رله‌های امپدانسی انجام می‌پذیرد. این رله‌ها غالباً از یک یا دو ناحیه حفاظتی دایروی با آفست منفی که در صفحه امپدانسی (R-X) تعریف می‌شوند، استفاده می‌کنند. زمانی که امپدانس اندازه‌گیری شده در پایانه ژنراتور وارد نواحی عملکردی مذکور می‌شود، رله بر مبنای تأخیرهای زمانی از پیش تعیین شده، فرمان قطع ژنراتور را صادر می‌نماید [۴].

سرعت پایین در تشخیص خطاهای LOF و همچنین امنیت پایین در مواجهه با حالت‌های گذراي سیستم، از جمله نقاط ضعف رله‌های امپدانسی می‌باشند. بهبود این نقاط ضعف، همواره به عنوان انجیزه مهم محققان این حوزه مطرح بوده و در این راستا، کارهای تحقیقاتی ارزشمندی در سال‌های اخیر ارائه شده است [۱۱-۱۵].

در مرجع [۵] استفاده از تغییرات کمیت‌های مختلف ژنراتور به منظور تشخیص پدیده LOF مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت شاخصی مبتنی بر تغییرات ولتاژ پایانه، توان راکتیو خروجی ژنراتور و زاویه روتور برای این منظور معرفی شده است. در مرجع [۶] شاخصی LOF مبتنی بر مشتق دوم جریان خروجی استاتور به منظور تشخیص LOF ارائه شده است. روش حفاظت تفاضلی دیگری [۷] از تخمین جریان تحریک و مقایسه آن با جریان اندازه‌گیری شده خروجی سیستم تحریک به منظور محاسبه یک شاخص برای قطع تحریک استفاده نموده است. مراجع [۸-۱۰] از اندازه‌گیری یا تخمین شار پیوندی تحریک به منظور تشخیص LOF استفاده کرده‌اند. در این میان، مرجع [۸] با استفاده از حسگرهای نصب شده در شیارهای استاتور، شار فاصله‌هایی را اندازه‌گیری نموده و مراجع [۹-۱۰] با استفاده از سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در پایانه ژنراتور، شار پیوندی سیم‌پیچ تحریک را تخمین زده اند. در نهایت در مرجع [۱۱] با روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مبتنی بر توابع شعاعی^۸ (RBF) و با استفاده از کمیت‌هایی نظیر تغییرات ولتاژ و توان راکتیو به منظور آموزش شبکه عصبی، به تشخیص LOF پرداخته شده است.

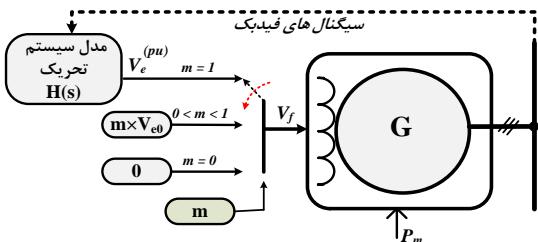
حاصل به ترتیب در بخش‌های سوم و چهارم ارائه می‌شود. در نهایت بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری مقاله می‌باشد.

۲- مطالعات واقع‌گرایانه پدیده LOF

به منظور انجام مطالعات دقیق پدیده LOF، لازم است مدل واقع‌گرایانه‌ای از ژنراتور و سیستم تحریک آن مورد استفاده قرار گیرد. ژنراتور سنکرون به طور عمده در قالب دو مدل اصلی dq و PD در نرم‌افزارهای متداول سیستم قدرت موجود می‌باشد که در این میان مدل dq شناخته شده‌تر است. این مدل در تمامی نرم‌افزارهای شناخته شده سیستم قدرت نظری PSCAD، MATLAB، DIGSILENT و EMTP موجود و برای انجام مطالعات پایداری سیستم قدرت بسیار مناسب می‌باشد. اما این مدل محدودیت‌های عمدۀ ای جهت مدل‌سازی خطاهای داخلی و پدیده LOF دارد [۲۱]. از طرف دیگر، مدل PD که در سال‌های اخیر در تکنولوژی RTDS در دسترس قرار گرفته است [۲۲]، مدل بسیار مناسبی به منظور انجام مطالعات LOF و خطاهای داخلی ژنراتور می‌باشد. در ادامه این بخش نحوه انجام مطالعات LOF با استفاده از دو مدل مذکور تشریح می‌گردد.

۲-۱- مطالعات LOF با استفاده از مدل dq

همان‌طور که ذکر شد، مراجع اخیر [۱۷-۲۰] از مدل dq ژنراتور به منظور بررسی تاثیر ادوات FACTS بر حفاظت LOF ژنراتور استفاده کرده‌اند. در مدل dq دو پارامتر ولتاژ تحریک (V_f) و توان مکانیکی (P_m) ورودی‌های اصلی مدل می‌باشند. لذا در این مدل، پدیده LOF تنها با استفاده از کنترل V_f قابل مدل‌سازی می‌باشد. شکل (۱) ساختار کلی مدل dq و نحوه مدل‌سازی خطاهای LOF با استفاده از این مدل را نشان می‌دهد. در این مدل V_e ولتاژ خروجی (بر مبنای واحد pu) سیستم تحریک ژنراتور می‌باشد. پارامتر m نیز نوع خطای LOF را نشان می‌دهد، به طوریکه که مقادیر 1 ، $m = 0$ و $0 < m < 1$ به ترتیب نشان‌دهنده شرایط عملکرد عادی، خطای CLOF (اتصال کوتاه مدار تحریک) و خطای PLOF را نشان می‌دهند. مشخص است که تنها یک نوع خطای CLOF قابل اعمال است و به طور کلی، از نظر نویسنده‌گان چنین مدل‌سازی واقع‌گرایانه نمی‌باشد.



شکل (۱): نمایش ساختار کلی مدل dq ژنراتور و نحوه اعمال خطاهای LOF در آن

پرداخته‌اند و راه حل‌هایی به منظور مقابله با تاثیرات منفی تجهیزات فوق ارائه داده‌اند. این راه حل‌ها مبتنی بر استفاده از اطلاعات محل اتصال ادوات مذکور می‌باشند که باستفاده از کانال‌های مخابراتی به محل رله حفاظت LOF ارسال گردند. با استفاده از این اطلاعات ارسالی، امپدانس دیده شده توسط رله اصلاح می‌شود و تاثیر حضور ادوات مذکور بر امپدانس دیده شده رله حذف می‌شود. شایان ذکر است که در مرجع [۱۱] عملکرد روش ارائه شده مبتنی بر شبکه عصبی RBF در سیستم جبران شده با کنترلر یکپارچه شارش توان [۱۴] (UPFC) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه تمامی کارهای تحقیقاتی فوق [۱۱ و ۱۷-۲۰] ارزشمند هستند، اما می‌توان یک نقص کلی را بر آن‌ها وارد دانست و آن این است که پدیده LOF در این مراجع به صورت واقع‌گرایانه مورد مطالعه قرار نگرفته است.

برمبانی استاندارد [۲] IEEE Standard C37.102-2006 ممکن است به دلایل متفاوتی نظیر وقوع اتصال کوتاه خطاهای CLOF در مدار تحریک، مدار باز شدن مدار تحریک ژنراتور، باز شدن ناگهانی کلید تحریک و قطع شدن منبع اصلی تغذیه سیستم تحریک ژنراتور رخ دهد [۲]. همچنین استاندارد بیان می‌کند که شرایط PLOF ممکن است در اثر ایجاد اخلال در سیستم تنظیم خودکار ولتاژ (AVR) (AVR) و یا زمانی که تنظیم ولتاژ ژنراتور از حالت تنظیم دستی (MVR) (تغییر می‌کند، رخ دهد. با این وجود همان‌طور که ذکر شد، تنها دو مورد اغتشاش به عنوان خطاهای LOF در مراجع ذکر شده [۱۸-۲۰] مورد بررسی قرار گرفته است که نمی‌توان آن را یک مطالعه واقع‌گرایانه تلقی کرد. مهمترین دلیل این موضوع این است که مراجع فوق [۱۸-۲۰] از مدل دو محوری (dq) ژنراتور سنکرون برای انجام مطالعات خود استفاده کرده‌اند، در حالی که این مدل به صورت ایده‌آل برای انجام مطالعات واقع‌گرایانه پدیده LOF مناسب نمی‌باشد [۲۱].

در این مقاله تاثیر STATCOM بر روی حفاظت LOF ژنراتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. دلیل انتخاب STATCOM این است که این تجهیز یکی از پرکاربردترین ادوات FACTS بوده که موارد متعددی از نصب و بهره‌برداری آن در سراسر جهان گزارش شده است [۲۲]. به همین دلیل، اکثر مراجع در این زمینه از جمله مراجع [۱۹-۲۲] نیز STATCOM را برای بررسی تاثیر آن بر حفاظت LOF انتخاب کرده‌اند. برای رسیدن به این هدف، از مدل PD ژنراتور که در RTDS در دسترس می‌باشد [۲۳]، استفاده می‌شود. با استفاده از مدل PD می‌توان سیستم تحریک ژنراتور را به صورت واقع‌گرایانه‌ای مدل کرد و پدیده LOF را منطبق بر استاندارد IEEE مورد مطالعه قرار داد.

سازماندهی بخش‌های بعدی این مقاله به این صورت است که در بخش دوم مدل‌سازی پدیده LOF با استفاده از مدل‌های dq و ژنراتور سنکرون تشریح می‌گردد. مطالعات شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

درستی عملکرد AVR را دنبال کند، این احتمال وجود دارد که در شرایط تغییر حالت کنترل ولتاژ از حالت AVR به MVR شرایط R_x دهد [۲۶]. در این مقاله خطاهای نوع اول تا سوم به عنوان خطاهای CLOF و خطای نوع چهارم به عنوان خطای PLOF در نظر گرفته می‌شود [۲۶].

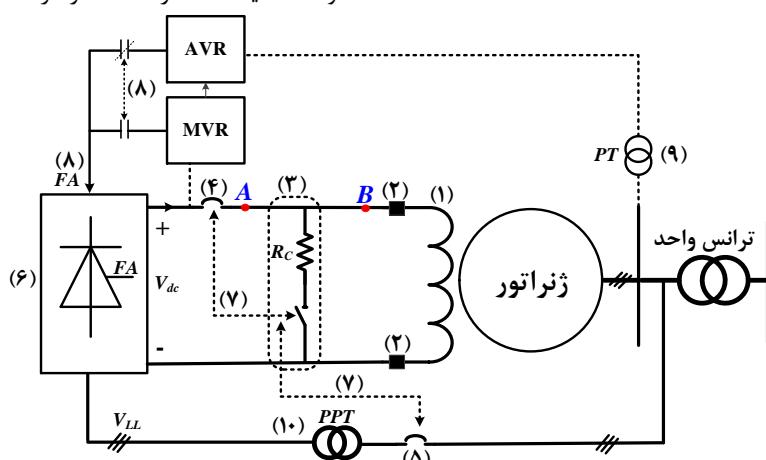
به عنوان یک نتیجه از بخش دوم، می‌توان گفت که مدل PD ژنراتور در مقایسه با مدل dq آن ابزار مناسب‌تری جهت انجام مطالعات دقیق و واقع‌گرایانه پدیده LOF می‌باشد.

۲- مطالعات شبیه‌سازی

۲-۱- سیستم مورد مطالعه

شکل (۳) دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد. این سیستم مشکل از یک ژنراتور سنکرون می‌باشد که با استفاده از یک ترانسفورماتور واحد و یک خط انتقال بلند به یک سیستم خارجی متصل شده است. همچنین یک STATCOM با ظرفیت ۲۰۰ مگاوات آمپر به نقطه میانی خط انتقال متصل شده است. اطلاعات کامل و جزئی در مورد سیستم قدرت مورد مطالعه در ضمیمه ارائه شده است. سیستم‌های مشابهی در مراجع [۱۷-۱۸] مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل (۴)- چپ) منحنی قابلیت ژنراتور^(۱) (GCC) مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۱]. همچنین شکل (۴)- راست) مشخصه رله LOF امپدانسی متداول را به همراه منحنی GCC (نگاشت شده از صفحه P-Q) را در صفحه R-X نشان می‌دهد. در این شکل X_d و X_d' به ترتیب راکتانس سنکرون و گذرای طولی ژنراتور می‌باشند. تاخیرهای زمانی مربوط به عملکرد رله در نواحی اول و دوم به ترتیب معادل ۰/۱ و ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند [۲-۳].



(۶): بکسوساز سه فاز کنترل شونده تریستوری

(۷): مکانیزم قفل داخلی

(۸): زاویه آتش (Firing Angle)

(۹): ترانسفورماتور ولتاژ

(۱۰): کلید سه فاز سمت تغذیه بکسوساز، ACCB

(۱): سیم پیچ تحریک

(۲): نماد حلقه‌های لفزان

(۳): سیستم کروبار شامل کلید و مقاومت R_c

(۴): کلید سمت تحریک، DCCB

(۵): کلید سه فاز سمت تغذیه بکسوساز

شکل (۲): مدل واقع‌گرایانه از یک واحد تولیدی و سیستم تحریک آن به منظور انجام مطالعات LOF

۲-۲- مطالعات LOF با استفاده از مدل PD

برخلاف مدل dq، مدل PD تماش واقع‌گرایانه‌تری از ساختار ژنراتور برای مطالعات پدیده LOF ارائه می‌دهد. به طور دقیق‌تر این مدل امکان دسترسی به دو سر سیم پیچ روتور ژنراتور را فراهم می‌کند. لذا کاربر قادر است با استفاده از المان‌های الکتریکی، ساختار دلخواهی از مدار و سیستم تحریک ژنراتور را ایجاد کند. در این مقاله، با استفاده از مدل PD ژنراتور سنکرون، یک واحد تولیدی که سیستم تحریک آن یک نمونه متداول و واقع‌گرایانه است، توسعه داده شده است. شکل (۲) ساختار این واحد را نشان می‌دهد که سیستم تحریک آن شامل یک بکسوساز استاتیکی کنترل شونده سه‌فاز، MVR و AVR می‌باشد. چنین سیستم تحریکی به طور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده می‌گیرد [۲۴-۲۵].

با استفاده از سیستم ارائه شده در شکل (۲)، انواع مختلفی از خطاهای LOF به صورت زیر قابل مدل‌سازی می‌باشند:

- نوع اول: موقع اتصال کوتاه در مدار تحریک، به عنوان نمونه در نقطه A یا در امتداد حلقه‌های لفزان روتور.
- نوع دوم: مدار باز شدن مدار تحریک، به عنوان نمونه در نقطه B.
- نوع سوم: باز شدن یکی از کلیدهای DCCB یا ACCB و عملکرد سیستم کروبار^(۷) بواسطه مکانیزم ارتباط داخلی^(۸).
- نوع چهارم: اختلال در عملکرد سیستم AVR و فعال شدن نامناسب سیستم MVR.

در رابطه با خطاهای نوع چهارم لازم به ذکر است که چنین اختلالاتی در عملکرد AVR توسط روش‌های تشخیص خطای داخلی AVR شناسایی می‌شوند. از طرف دیگر MVR وظیفه دنبال کردن خروجی AVR را بر عهده دارد که در صورت نیاز و بعد از خارج شدن AVR از مدار، وارد عمل شود [۱]. در صورتی که MVR نتواند به

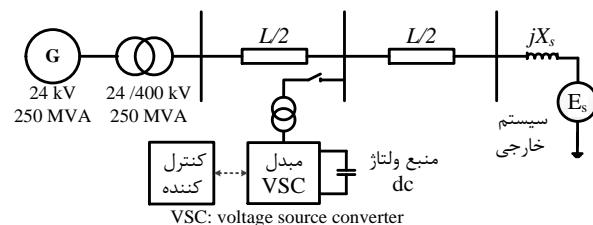
خطاهای CLOF به صورت سناریوهای جدا و در لحظه $t = 0\text{ s}$ بر ژنراتور اعمال می‌شوند. مشابه شکل (۵)، شکل (۶) تغییرات V , I , E_s عملکرد رله امپدانسی را در مواجهه با چنین خطاهایی در بارگذاری سبک ژنراتور را نشان می‌دهد.

همچنین شکل (۷) تغییرات توان راکتیو خروجی STATCOM را در مواجهه با خطاهای CLOF مذکور نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود بعد از وقوع LOF، توان راکتیو تزریقی (Q_{st}) را در مواجهه با خطاهای CLOF مذکور نشان می‌دهد. همانگونه به شبکه به منظور ثبت ولتاز نقطه اتصال، افزایش STATCOM به شکلی می‌باشد که می‌تواند این تغییرات را در مواجهه با خطاهای CLOF در بارگذاری‌های مختلف مخفی کند.

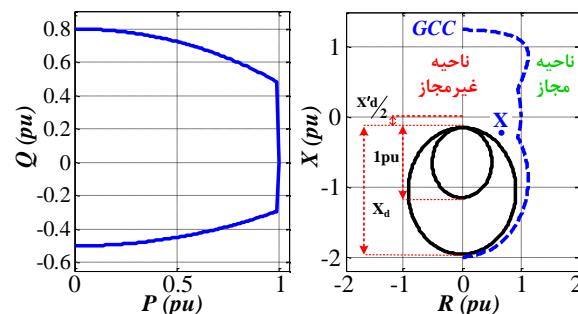
جدول (۱) خلاصه‌ای از تاثیر STATCOM بر عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با LOF اعمال شده در بارگذاری‌های مختلف ژنراتور را نشان می‌دهد.

جدول (۱): تاثیر STATCOM بر عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF در بارگذاری‌های مختلف

تاخیر عملکرد	زمان تشخیص		نوع خط	بارگذاری $P+jQ$	#
	WS	WOS			
۱/۳۳۸	۳/۹۰۶	۲/۵۶۸	اول	0.9+j0.3	۱
۰/۰۳۳	۰/۷۴۱	۰/۷۰۸	دوم		۲
۰/۱۷۱	۱/۱۱۹	۰/۹۴۸	سوم		۳
۰/۹۰۸	۵/۴۹۲	۴/۵۸۴	اول	0.6+j0.2	۴
۰/۱۲۷	۱/۰۴۸	۰/۹۲۱	دوم		۵
۰/۲۱۷	۲/۱۵۸	۱/۹۴۱	سوم		۶
۰/۷۱۸	۹/۸۸۹	۸/۹۷۱	اول	0.3+j0.1	۷
۰/۰۳۴	۰/۶۶۲	۰/۶۲۸	دوم		۸
۰/۰۰۵	۳/۰۵۴	۳/۰۴۹	سوم		۹
۰/۳۱۹	۳/۳۴۷	۳/۰۲۸	اول	0.8-j0.1	۱۰
۰/۰۴۹	۰/۸۵۰	۰/۸۰۱	دوم		۱۱
۰/۴۷۵	۱/۵۱۷	۱/۰۴۲	سوم		۱۲
۰/۰۲۱	۴/۰۲۱	۴	اول	0.6-j0.2	۱۳
۰/۱۶۴	۱/۲۲۶	۱/۰۶۲	دوم		۱۴
۰/۱۵	۱/۸۰۹	۱/۵۶۹	سوم		۱۵
۰/۱۱	۵/۲۳۳	۵/۱۲۳	اول	0.4-j0.3	۱۶
۰/۰۰۴	۱/۴۹۷	۱/۴۹۳	دوم		۱۷
۰/۱۴۹	۲/۱۲۱	۱/۹۷۲	سوم		



شکل (۳): دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه



شکل (۴): منحنی GCC ژنراتور مورد مطالعه (چپ) و مشخصه عملکردی رله امپدانسی در صفحه R-X

۲-۳- مطالعات LOF

در این قسمت رفتار دینامیکی ژنراتور به همراه عملکرد رله LOF امپدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF و PLOF در بارگذاری‌های مختلف ژنراتور و دو حالت حضور "WS" و عدم حضور "WOS" STATCOM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۳- خطاهای CLOF

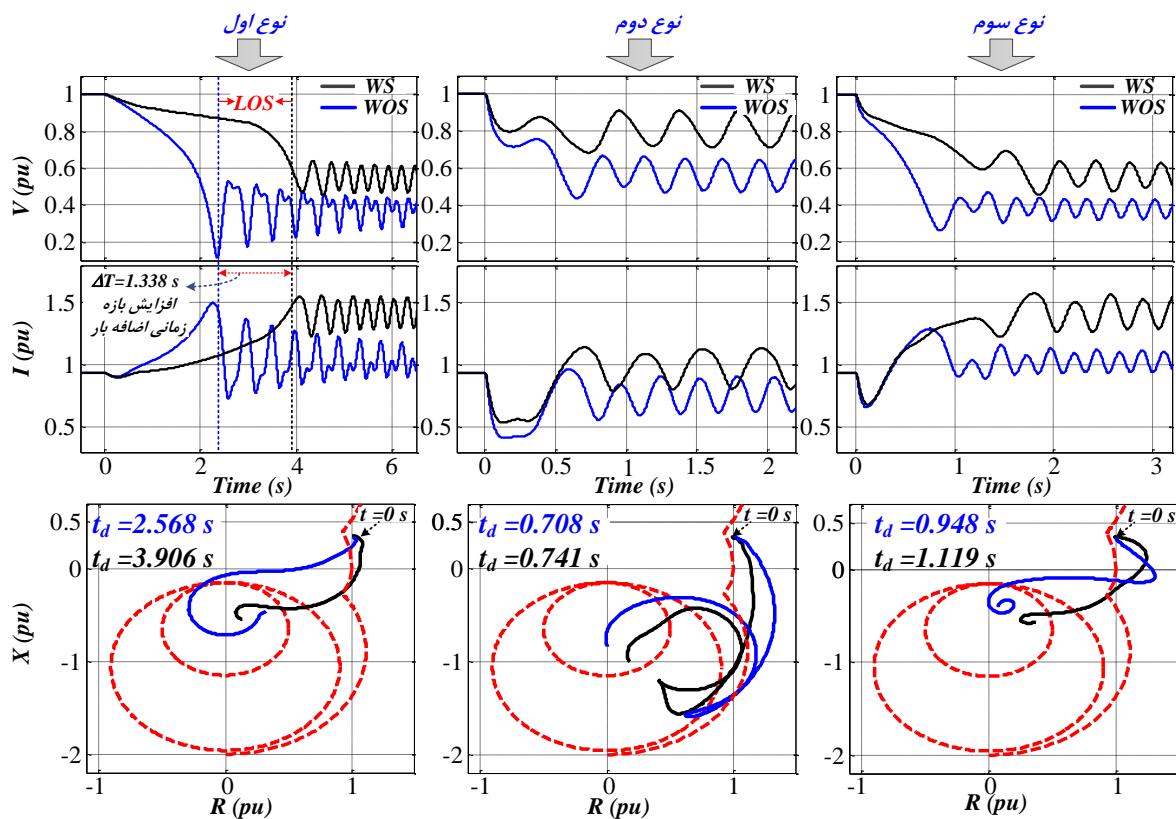
در این بخش، خطاهای CLOF سه‌گانه که در بخش (۲-۲) معرفی شدند در دو سطح بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور و در سناریوهای جداگانه بر ژنراتور اعمال می‌شوند.

❖ خطاهای CLOF در بارگذاری سنگین ژنراتور

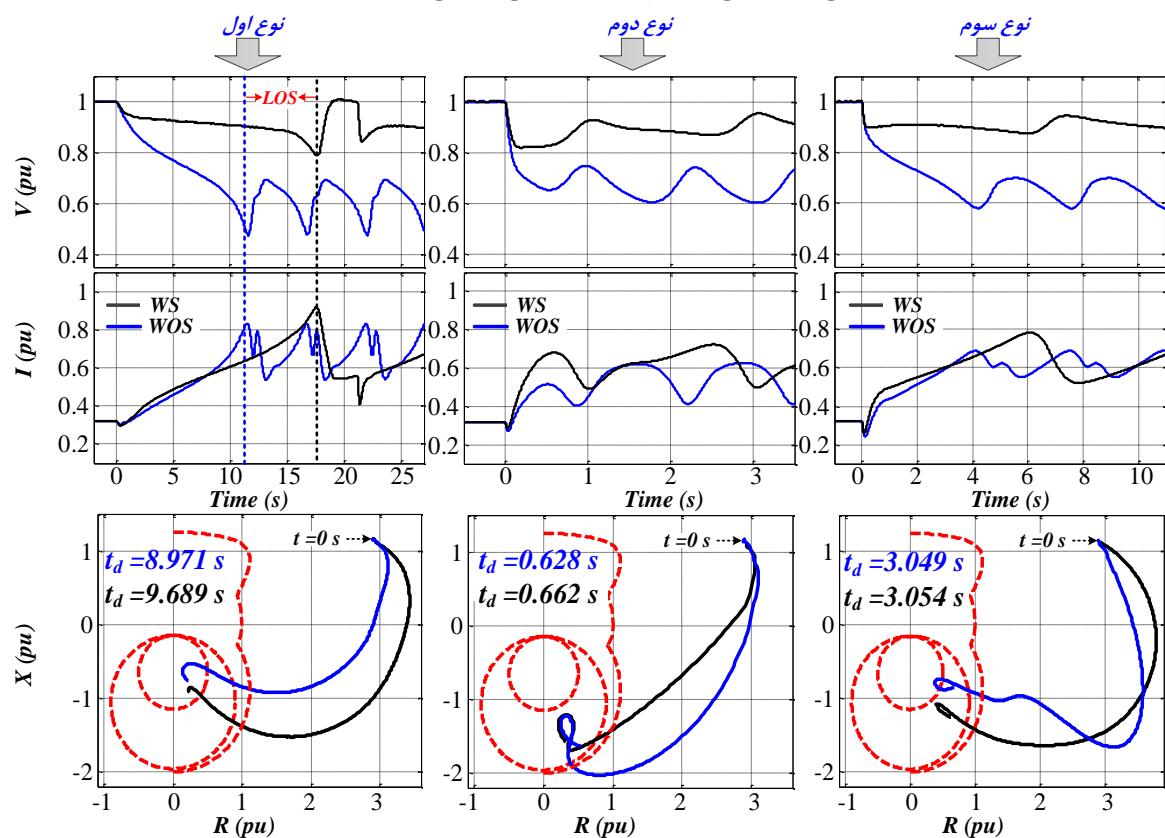
در این حالت، بارگذاری ژنراتور معادل $S = 0.9 + j0.3\text{ pu}$ است. شکل (۵) تغییرات مقدار موثر ولتاژ پایانه (V), مقدار موثر جریان استانور (I) و همچنین عملکرد رله امپدانسی را در مواجهه با خطاهای CLOF مذکور نشان می‌دهد. هر ستون از این شکل مربوط به یک نوع خطای CLOF بوده و تمامی خطاهای در لحظه $t = 0\text{ s}$ اعمال می‌شوند.

❖ خطاهای CLOF در بارگذاری سبک ژنراتور

در این حالت، ژنراتور در شرایط عملکرد عادی توان ظاهری $S = 0.3 + j0.1\text{ pu}$ را به شبکه تحویل می‌دهد. مشابه حالت قبل،



شکل (۵): تغییرات V و I به همراه عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاها CLOF در بارگذاری سنجین ژنراتور و در دو حالت: با حضور منحنی‌های مشکی) و بدون حضور (منحنی‌های آبی) STATCOM



شکل (۶): تغییرات V و I به همراه عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاها CLOF در بارگذاری سبک ژنراتور و در دو حالت: با حضور منحنی‌های مشکی) و بدون حضور (منحنی‌های آبی) STATCOM

امپدانسی می‌گردد. مطابق جدول (۱)، حداقل مقادیر این تاخیر برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده معادل $1/338$ ثانیه است.

- ژنراتور در حین خطاهای CLOF نوع اول و دوم به ترتیب کندترین و سریع‌ترین دینامیک را از خود نشان می‌دهد. متقابلاً، حضور STATCOM به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر دینامیک ژنراتور و زمان عملکرد رله در حین خطاهای نوع اول و دوم گذاشته است.

- در حضور STATCOM، میزان و نرخ افت ولتاژ پایانه ژنراتور بعد از وقوع CLOF کمتر است.

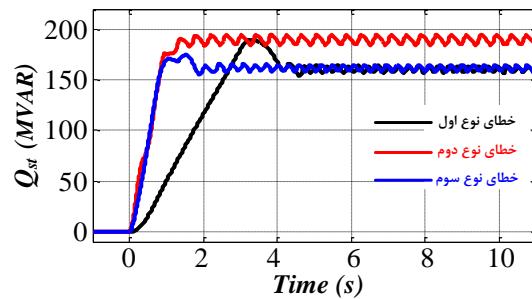
- در حضور STATCOM و در بارگذاری سنگین ژنراتور، افزایش زمان عملکرد رله موجب افزایش بازه زمانی اضافه‌بار شدن سیم-پیچ‌های آرمیچر می‌گردد. این موضوع در خطای CLOF نوع اول مشهودتر است (۱/۳۳۸ ثانیه مطابق شکل (۵)).

۲-۲-۳- خطاهای PLOF

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، خطاهای PLOF در مراجعی که از مدل ژنراتور استفاده کرده‌اند به صورت واقع‌گرایانه‌ای مدل نشده است. مطابق استاندارد IEEE [۲] شرایط PLOF می‌تواند ناشی از اختلال در عملکرد AVR و فعال شدن نامناسب MVR ایجاد شود [۲]. شکل (۸) ساختار سیستم تحریک در نظر گرفته شده برای ژنراتور مورد مطالعه را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد. در این ساختار AVR وظیفه کنترل زاویه آتش (FA) یکسوزان سه‌فاز تریستوری را بر عهده دارد و MVR وظیفه دنبال کردن تغییرات این کمیت را بر عهده دارد تا در صورت لزوم کنترل آن را بر عهده گیرد.

ارتباط بین ولتاژ dc خروجی یکسوزان V_{dc} ، ولتاژ سه‌فاز خط به خط ورودی (V_{LL}) و پارامتر FA با رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۷].

$$V_{dc} \cong 1.33 \times V_{LL} \times \cos(FA) \quad (1)$$

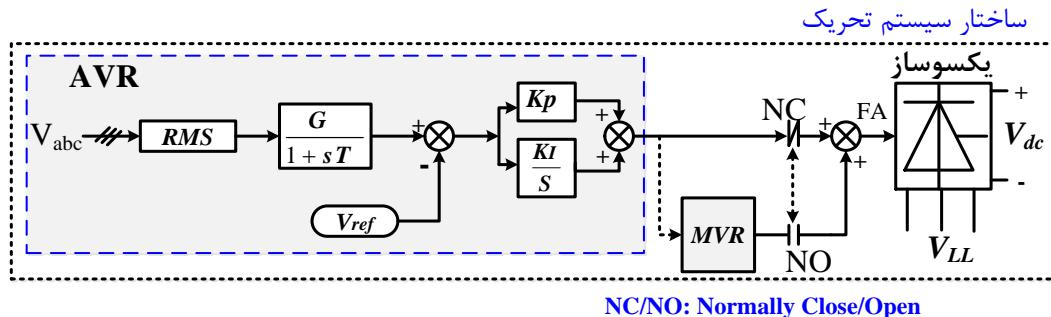


شکل (۷): تغییرات Q_{st} در مواجهه با خطاهای CLOF در بارگذاری سنگین ژنراتور

تحليل رفتار دینامیکی ژنراتور و رله امپدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF

با توجه به شکل‌های (۵) تا (۷)، چند نکته مهم در رابطه با رفتار دینامیکی ژنراتور و عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF به صورت زیر قابل استنتاج می‌باشد:

- فارغ از حضور یا عدم حضور STATCOM، مشخص است که برای یک خطای CLOF معین، رفتار دینامیکی ژنراتور در بارگذاری سنگین ژنراتور سریعتر از شرایط بارگذاری سبک می‌باشد. به عنوان نمونه با مقایسه ستون اول شکل‌های مذکور، مشخص است که پدیده خروج از سنکرونیزم (LOS) در بارگذاری سنگین، سریعتر از شرایط بارگذاری سبک رخ می‌دهد. همچنین، مشخص است که در این شرایط زمان عملکرد رله کمتر می‌باشد.
- فارغ از حضور یا عدم حضور STATCOM، مشخص است که در یک بارگذاری معین، رفتار دینامیکی ژنراتور در مواجهه با خطاهای CLOF سه‌گانه متفاوت است. به طور دقیق‌تر، رفتار دینامیکی ژنراتور در مواجهه با خطاهای CLOF ناشی از دار باز شدن مدار تحریک (نوع دوم و سوم)، سریع‌تر از خطای نوع اول است که در آن مدار تحریک اتصال کوتاه می‌شود [۲۶].
- فارغ از میزان بارگذاری ژنراتور، حضور STATCOM موجب کندتر شدن رفتار دینامیکی ژنراتور و افزایش زمان عملکرد رله



شکل (۸): نمایش با جزئیات بیشتر سیستم تحریک در نظر گرفته شده برای ژنراتور مورد مطالعه

❖ خطاهای PLOF در بارگذاری سنگین ژنراتور

در این شرایط، بارگذاری ژنراتور معادل $S = 0.9 + j0.3 \text{ pu}$ است و خطاهای PLOF مذکور در سناریوهای جدا و در لحظه $t = 0 \text{ s}$ بر ژنراتور اعمال می‌شوند. شکل (۹) تغییرات V , I و عملکرد رله امپدانسی را در مواجهه با چنین خطاهایی را نشان می‌دهد.

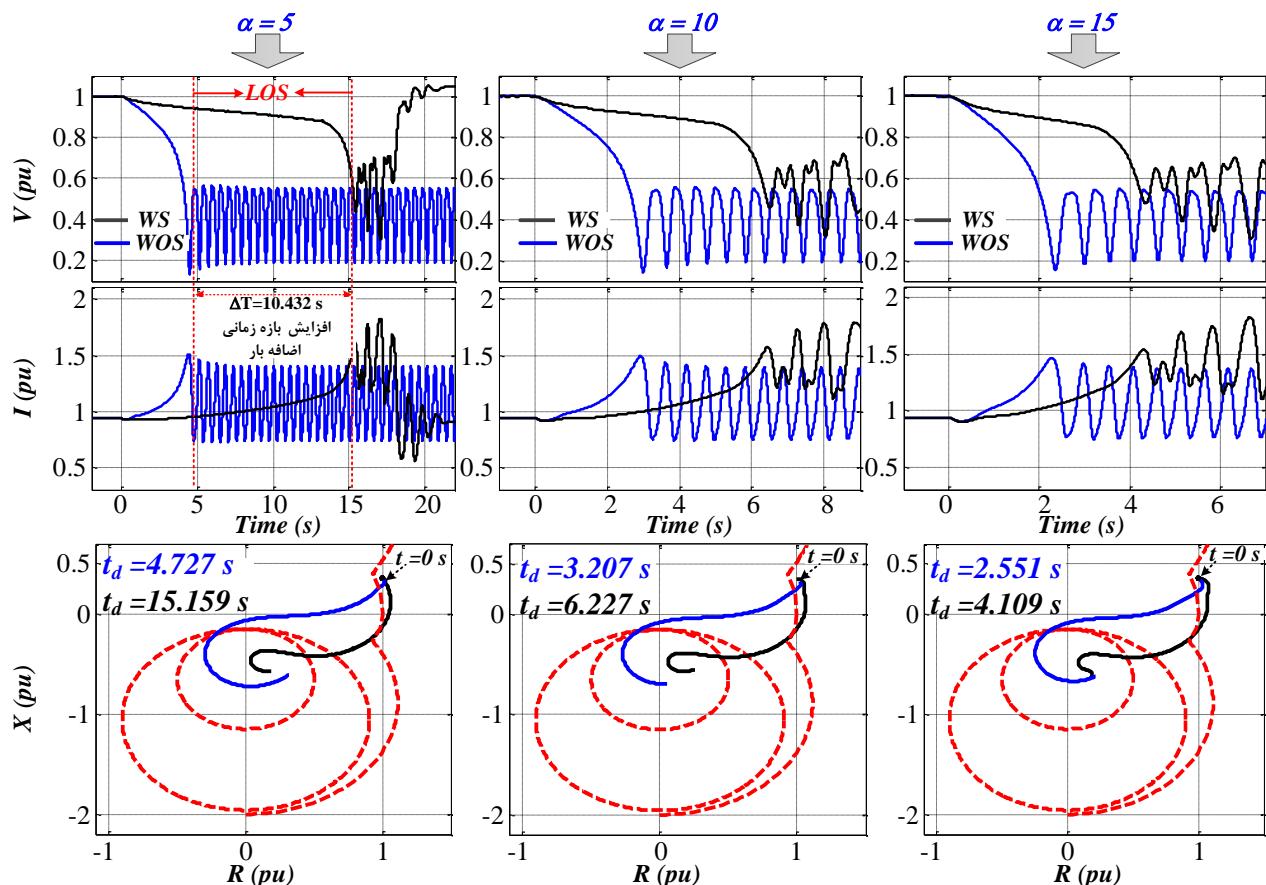
❖ خطاهای PLOF در بارگذاری سبک ژنراتور

در این شرایط، بارگذاری ژنراتور معادل $S = 0.3 + j0.1 \text{ pu}$ است. مشابه شکل (۸)، شکل (۹) تغییرات V , I و عملکرد رله امپدانسی را در مواجهه با خطاهای PLOF مذکور را نشان می‌دهد. جدول (۲) خلاصه‌ای از تأثیر حضور STATCOM بر عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاهای PLOF سه‌گانه در بارگذاری‌های مختلف ژنراتور را نشان می‌دهد.

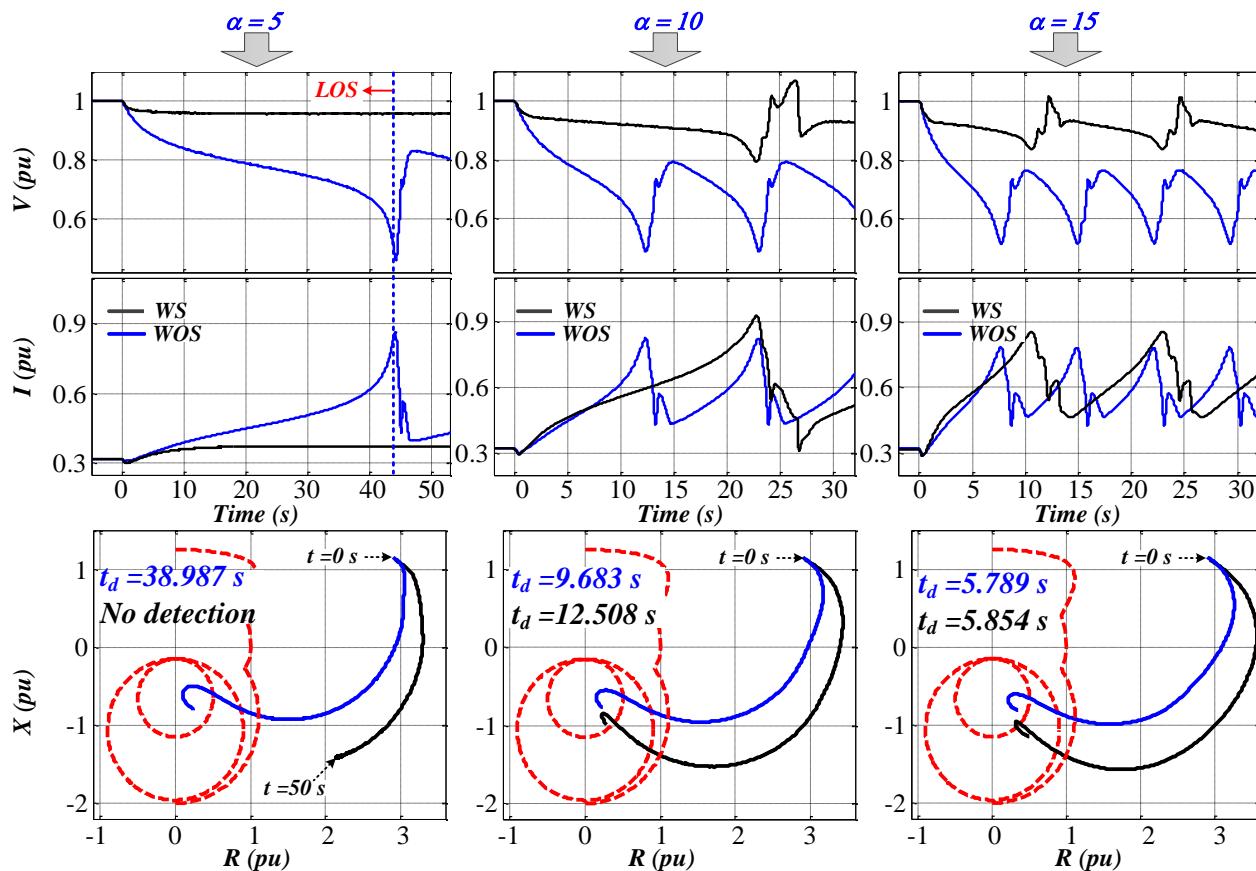
زمانی که دچار اختلال شود، MVR باقیستی کنترل FA را بر عهده بگیرد. در صورتی که این تغییر مدد کنترلی به درستی انجام نشود، می‌توان انتظار وقوع شرایط PLOF را داشت. مشخص است که مقادیر بزرگتر FA منجر به مقادیر کوچکتر V_{dc} خواهد شد. لذا در صورتی که MVR مقدار جدید کمیت FA را در مقدار PLOF بزرگتری از مقدار اولیه آن (FA^{old}) تنظیم کند، خطای FA^{new} رخ خواهد داد. این اختلاف در مقدار تنظیمی با پارامتر α نمایش داده می‌شود. رابطه (۲) ارتباط بین کمیت‌های مذکور را نشان می‌دهد.

$$FA^{new} = FA^{old} + \alpha \quad (2)$$

در ادامه این بخش به بررسی رفتار دینامیکی ژنراتور و عملکرد رله LOF امپدانسی در مواجهه با خطاهای PLOF می‌پردازیم. این خطاهای به ازای مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه از کمیت α و در دو بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور اعمال می‌شوند.



شکل (۹): تغییرات V و I به همراه عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاهای PLOF در بارگذاری سنگین ژنراتور و در دو حالت: با حضور STATCOM (منحنی‌های مشکی) و بدون حضور (منحنی‌های آبی)



شکل (۱۰): تغییرات V و I به همراه عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاها PLOF در بارگذاری سبک ژنراتور و در دو حالت: با حضور (منحنی‌های مشکی) و بدون حضور (منحنی‌های آبی) STATCOM

جدول (۲): تاثیر STATCOM بر عملکرد رله امپدانسی در مواجهه با خطاها PLOF در بارگذاری‌های مختلف

❖ تحلیل رفتار دینامیکی ژنراتور و رله امپدانسی در مواجهه با خطاها

با توجه به شکل‌های (۹) و (۱۰) و جدول (۲) چند نتیجه کلی و مهم از رفتار دینامیکی ژنراتور و عملکرد رله امپدانسی به صورت زیر قابل برداشت است:

- فارغ از حضور یا عدم حضور STATCOM، مشخص است که برای یک خطا PLOF معین، رفتار دینامیکی ژنراتور در بارگذاری سنتگین ژنراتور سریعتر از شرایط بارگذاری سبک می‌باشد.
- فارغ از حضور یا عدم حضور STATCOM، مشخص است که در یک بارگذاری معین، رفتار دینامیکی ژنراتور در مواجهه با خطاها PLOF سه‌گانه متفاوت است. به طور دقیق‌تر، با افزایش کمیت α دینامیک ژنراتور سریع‌تر می‌شود.
- فارغ از میزان بارگذاری ژنراتور، حضور STATCOM موجب کنتر شدن رفتار دینامیکی ژنراتور و افزایش زمان عملکرد رله امپدانسی می‌گردد. مطابق جدول (۲)، حداقل مقدار این تاخیر برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده معادل $10/432$ ثانیه است.
- در حضور STATCOM و در بارگذاری سنتگین ژنراتور، افزایش زمان عملکرد رله موجب افزایش بازه زمانی اضافه‌بار شدن سیم-

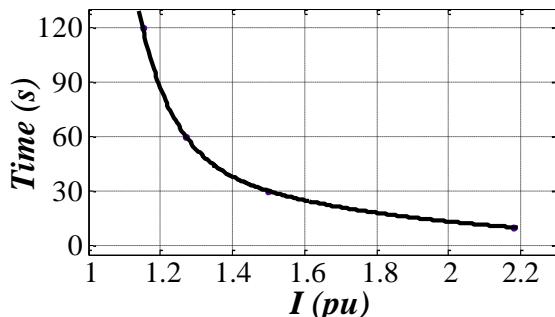
تاخیر عملکرد	زمان تشخیص		α	بارگذاری $P+jQ$	#
	WS	WOS			
۱۰/۴۳۲	۱۵/۱۵۹	۴/۷۲۷	۵	0.9+j0.3	۱
۳/۰۲	۶/۲۲۷	۳/۲۰۷			
۱/۵۵۸	۴/۱۰۹	۲/۵۵۱			
۲۶/۷۳۴	۴۵/۸۷۸	۹/۱۴۴	۱۰	0.6+j0.2	۲
۲/۰۰۳	۷/۹۰۸	۵/۳۰۵			
۰/۸۲۳	۴/۷۱۹	۳/۸۹۶			
-	NSOP	۱/۹۸۷	۱۵	0.3+j0.1	۳
۲/۸۲۵	۱۲/۵۰۸	۹/۶۸۳			
۰/۰۶۵	۵/۸۵۴	۵/۷۸۹			
۲/۲۵۱	۷/۱۶۳	۴/۹۱۲	۱۵	0.8-j0.1	۴
۰/۵۵۹	۳/۷۶۴	۳/۲۰۵			
۰/۲۱۹	۲/۷۰۱	۲/۴۸۲			
۰/۹۷۸	۶/۹۰۲	۵/۹۲۴	۱۰	0.6-j0.2	۵
۰/۰۰۶	۳/۵۶۷	۳/۵۶۱			
۰/۱۱۳	۲/۶۷۳	۲/۵۴۳			
۰/۱	۶/۰۷۸	۵/۹۷۸	۱۵	0.4-j0.3	۶
۰/۱۷۱	۳/۳۰۵	۳/۱۳۴			
۰/۲۱	۲/۴۰۸	۲/۱۹۸			

حرارتی به سیم پیچ‌های آرمیچر، لازم است که یک رله اضافه جریان با مشخصه‌ای منطبق با شکل (۱۱) برای ژنراتور در نظر گرفته شود.

با توجه به تاثیر STATCOM در افزایش زمان اضافه بار آرمیچر در شرایط LOF، توصیه می‌شود که تنظیم چنین رله اضافه جریانی با حساسیت و دقت بیشتری انجام شود. در واقع این رله را می‌توان به عنوان یک رله پشتیبان برای رله LOF امپدانسی در نظر گرفت.

جدول (۲): قابلیت حرارتی کوتاه مدت ژنراتور سنکرون

۲/۱۸	۱/۵	۱/۲۷	۱/۱۵	I (pu)
۱۰	۳۰	۶۰	۱۲۰	t (s)



شکل (۱۱): منحنی قابلیت حرارتی کوتاه مدت ژنراتور با توجه به جداول (۱) و (۲) و ستون اول شکل‌های (۵) و (۹)، مشخص است که حداکثر مقدار کمیت I حدود $1/6$ پریونیت و حداکثر زمان اضافه بار معادل $10/432$ ثانیه می‌باشد. با مقایسه این مقادیر با اطلاعات جدول (۳)، واضح است که ژنراتور مورد مطالعه در مواجهه با خطاهای LOF بررسی شده دچار آسیب حرارتی نمی‌شود.

۴-۲-احتمال رسیدن ژنراتور به یک NSOP در حین MVR به AVR به تغییر کنترل ولتاژ از حالت

همان‌طور که نشان داده شد، در حضور STATCOM و در شرایطی که سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور از حالت AVR به حالت MVR تغییر می‌کند، احتمال وقوع شرایط PLOF یا رسیدن ژنراتور به یک NSOP وجود دارد به طوریکه در حالت NSOP و برخلاف شرایط PLOF، ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست نمی‌دهد و قادر است به عملکرد پایدار خود ادامه دهد. البته با یک ولتاژ پایانه کاهش یافته ($V > 0.95 \text{ pu}$) و عملکرد زیرتحریک.

تنها نگرانی که در این شرایط به وجود می‌آید این است که آیا نقطه کار جدید در ناحیه مجاز عملکردی ژنراتور و مطابق با GCC می‌باشد یا نه؟ چنین نواحی در شکل (۴-راست) برای ژنراتور مورد مطالعه نشان داده شده‌اند. به عنوان نمونه، نقطه X در این شکل، در ناحیه مجاز و همچنین ناحیه عملکردی رله قرار ندارد. لذا عملکرد بلند مدت ژنراتور در این نقطه می‌تواند موجب آسیب به ژنراتور گردد. از جمله آسیب حرارتی به ناحیه انتهایی هسته استاتاتور. به منظور مواجهه

پیچ‌های آرمیچر می‌گردد. این موضوع در خطای PLOF به ازای $\alpha = 5^\circ$ مشهودتر است ($10/432$ ثانیه مطابق شکل (۹)).

- به ازای $\alpha = 5^\circ$ ، در بارگذاری سبک ژنراتور و در حضور STATCOM، ژنراتور به یک NSOP می‌رسد. (شکل (۱۰) ستون اول). در این حالت رله هیچ شرایط LOF ای تشخیص نمی‌دهد و ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست نمی‌دهد، بلکه با یک ولتاژ پایانه کاهش یافته ($V > 0.95 \text{ pu}$) و تغییر ضریب توان از حالت پس‌فاز به پیش‌فاز، به عملکرد پایدار خود در نقطه کار جدید ادامه می‌دهد. همچنین مشخص است که نقطه کار جدید در صفحه R-X منحنی GCC ژنراتور را نقض نمی‌کند و این نقطه مطابق شکل (۴-راست) در ناحیه مجاز عملکرد ژنراتور قرار دارد.

در قالب استنتاج کلی می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط LOF، تجهیز STATCOM از طریق کاهش امپدانس موثر شبکه، موجب قوی‌تر شدن شبکه می‌شود که حاصل آن، کنترل شدن رفتار دینامیکی ژنراتور و افزایش زمان عملکرد رله امپدانسی LOF است.

۴-بحث در مورد اثرات STATCOM بر عملکرد حفاظت ژنراتور و ارائه راهکارهای مناسب

همان‌طور که در بخش قبل نشان داده شد، حضور STATCOM دو اثر مهم زیر را بر روی عملکرد حفاظت LOF ژنراتور به همراه دارد:

- افزایش زمان تشخیص خطاهای LOF
- احتمال رسیدن ژنراتور به یک NSOP در حین شرایطی که کنترل ولتاژ ژنراتور از حالت AVR به حالت MVR تغییر می‌کند ولی شرایط PLOF رخ نمیدهد.

در این بخش، به بررسی دقیق‌تر این اثرات و ارائه راهکارهای مناسب جهت مواجهه با آن‌ها می‌پردازیم.

۴-۱-افزایش زمان تشخیص خطاهای LOF

همان‌طور که در در بخش ۳ نشان داده شد، حضور STATCOM موجب افزایش زمان عملکرد رله امپدانسی می‌شود. از طرف دیگر این حضور موجب کاهش میزان افت ولتاژ در شبکه و افزایش زمان وقوع LOS ژنراتور می‌گردد. مهمترین نگرانی که ممکن است در اثر این افزایش زمان عملکرد رله به وجود آید، آسیب حرارتی به سیم پیچ‌های آرمیچر به دلیل افزایش زمان اضافه بار ژنراتور در حین خطاهای LOF در بارگذاری سنگین ژنراتور می‌باشد (ستون اول از شکل‌های ۵ و ۹).

مطابق استاندارد IEEE C37-102-2006 [۲] قابلیت حرارتی کوتاه مدت ^{۲۳} (STTC) سیم پیچ آرمیچر ژنراتور سنکرون به صورت جدول (۳) بیان می‌شود. شکل (۱۱) نیز منحنی متناسب با این جدول را در صفحه جریان-زمان نشان می‌دهد. به منظور جلوگیری از آسیب

ضمایم

اطلاعات سیستم مورد مطالعه در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است.

جدول (۴): اطلاعات اجزای سیستم قدرت مورد مطالعه

خطوط انتقال	ترانسفورماتور	ژنراتور سنکرون
$L = 300 \text{ km}$ $Z' = 0.018+j0.37 \Omega/\text{km}$ $Z^0 = 0.36+j1.22 \Omega/\text{km}$	$S=260 \text{ MVA},$ $24/400 \text{ kV}$ $Uk\% = 12\%$	$S=250 \text{ MVA}, f=60 \text{ Hz},$ $V=24 \text{ kV}, H=3.5 \text{ s},$ $X_l=0.15 \text{ pu}, R_g=0.0016 \text{ pu}$ $X_d=1.81 \text{ pu}, X'_d=0.3 \text{ pu},$ $X''_d=0.23 \text{ pu},$ $X_q=1.7 \text{ pu}, X'_q=0.2 \text{ pu},$ $X''_q=0.25 \text{ pu},$ $T'_{do}=8 \text{ s}, T'_{qo}=0.8 \text{ s},$ $T''_{do}=0.03 \text{ s}, T''_{qo}=0.07 \text{ s}$

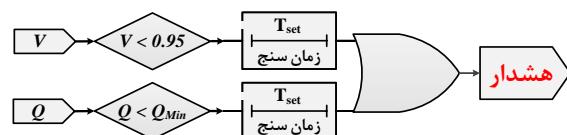
جدول (۵): اطلاعات سیستم تحریک

AVR	کروبار
$G=1, T=0.1 \text{ s}, K_p=13, K_I=10,$	$R_c = 0.5 \Omega$

مراجع

- [1] Reimert, D.: “Protective relaying for power generation Systems” (Taylor & Francis, Florida, USA, 2006, 3rd edn.).
- [2] “IEEE Guide for AC Generator Protection”, 2006, IEEE Standard C37.102-2006.
- [۳] حسنی، عباس و حق‌جو، فرهاد ”اُشکارسازی سریع و مطمئن پذیده قطع تحریک در ژنراتورهای سنکرون“ نشریه علمی و پژوهشی کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال پنجم شماره ۱۰، پاییز و زمستان ۱۳۹۵ سال.
- [4] Berdy, J.: “Loss of excitation protection for modern synchronous generators”, IEEE Trans. Power Appar. Syst, 1975, 94, (5), pp. 1457–1463.
- [5] Hasani, A., Haghjoo, F.: “Fast and secure detection technique for loss of field occurrence in synchronous generators”, IET Electr. Power Appl., 2017, 11, (4), pp. 567–577.
- [6] Noroozi, N., Alinejad-Beromi, Y., Yaghobi, H.: “Fast approach to detect generator loss of excitation based on reactive power variation”, IET Gener. Transm. Distrib., 2019, 13(4), pp. 453–460.
- [7] Hasani, A., Haghjoo, F., da Silva, F. F., et al.: ‘A Current-Based Differential Technique to detect Loss of field in Synchronous generators’, IEEE Trans. Power Del., DOI: 10.1109/TPWDRD.2019.2910460.
- [8] Yaghobi, H., Mortazavi, H., Ansari, K., et al.: ‘Study on application of flux linkage of synchronous generator for loss of excitation detection’, Int. Trans. Electr. Energy Syst. (ETEP), 2013, 23, (6), pp. 802–817.
- [9] Abedini, M., Sanaye-Pasand, M., Davarpanah, M.: “Flux linkage estimation based loss of excitation relay for synchronous generator”, IET Gener. Transm. Distrib., 2017, 11, (1), pp. 280–288
- [10] Abedini, M., Sanaye-Pasand, M., Davarpanah, M.: “Loss-of-field detection relay based on rotor signals estimation”, IEEE Trans. Power Deliv., 2018, 33, (2), pp. 779–788.
- [11] Moravej, Z., Rassoli, H., Pazoki, M. : “A new protection scheme for loss of excitation detection in presence of

با این حالت احتمالی، می‌توان از یک طرح هشدار دهنده مطابق شکل (۱۲) استفاده کرد. در این طرح Q_{min} حداقل توان راکتیو مجاز که ژنراتور می‌تواند جذب کند، می‌باشد. مقدار این کمیت را می‌توان از روی GCC به دست آورد که برای ژنراتور مورد مطالعه این مقدار معادل $0/5 - 0$ -پریونیت می‌باشد. مقدار تنظیمی زمان سنج (T_{set}) را می‌توان به صورت اختیاری (به عنوان مثال دو ثانیه) انتخاب کرد. انتظار می‌رود که بعد از اعلام هشدار، اقدامات لازم توسط اپراتورهای نیروگاهی به منظور جلوگیری از آسیب به ژنراتور انجام شود.



شکل (۱۲): طرح پیشنهادی به منظور مواجهه با NSOP های محتمل برای ژنراتور

۵- نتیجه

در این مقاله تاثیرات STATCOM بر رله امپدانسی حفاظت LOF ژنراتور سنکرون مورد مطالعه قرار گرفت. برای رسیدن به این هدف، با استفاده از مدل PD ژنراتور سنکرون، یک مدل واقع‌گرایانه از یک واحد نیروگاهی توسعه داده شد. با استفاده از این مدل، مطالعات IEEE C37.102-2006 انجام شد. با اعمال انواع مختلفی از خطاهای CLOF و PLOF در سیستم نمونه مورد مطالعه، تاثیرات STATCOM بر عملکرد Rله LOF امپدانسی مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شد که حضور STATCOM از طریق کاهش امپدانس موثر شبکه و قوی تر کردن آن، موجب ایجاد دو تاثیر عمده بر عملکرد Rله مذکور می‌گردد. این اثرات عبارتند از :

- افزایش زمان عملکرد Rله
- احتمال رسیدن ژنراتور به یک MVR در AVR به شرایطی که کنترل ولتاژ از حالت NSOP به تغییر می‌کند.

پیامدهای منفی و احتمالی تاثیرات فوق بر عملکرد ژنراتور، مورد تحلیل قرار گرفت و راه کارهای متناسب به منظور مواجهه با هر دو اثر ارائه شد. با در نظر گرفتن راه کارهای پیشنهادی می‌توان از آسیب‌های احتمالی به ژنراتور در شرایط LOF و در سیستم‌ها جبران شده با STATCOM جلوگیری کرد.

سپاسگزاری

شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این مقاله با استفاده از تکنولوژی RTDS موجود در دپارتمان انرژی، دانشگاه آلبورگ، کشور دانمارک انجام شده‌اند. لذا نویسنده‌گان مراتب قدردانی خود را از همکاری اعضا محترم این دپارتمان را اعلام می‌دارند.

زیرنویس‌ها

- ¹ Static Synchronous Compensator
- ² Loss of Field
- ³ Phase Domain
- ⁴ Real-Time-Digital-Simulator
- ⁵ Complete Loss of Field
- ⁶ Partial Loss of Field
- ⁷ New Stable Operating Point
- ⁸ Radial Based Function
- ⁹ Flexible Alternating Current Transmission Systems
- ¹⁰ Phase Selection
- ¹¹ Over-Reach
- ¹² Static Synchronous Series Compensator
- ¹³ Generalized Interline Power-Flow Controller
- ¹⁴ Unified Power Flow Controller
- ¹⁵ Automatic Voltage Regulator
- ¹⁶ Manual Voltage Regulator
- ¹⁷ Crowbar System
- ¹⁸ Interlock Mechanism
- ¹⁹ Generator Capability Curve
- ²⁰ With STATCOM
- ²¹ Without STATCOM
- ²² Loss of Synchronism
- ²³ Short Time Thermal Capability

- FACTS devices”, Journal of Electrical and Energy Systems, 2020, 109, pp. 110-121.*
- [12] Hingorani, N. G., Gyugyi, L.: “*Understanding FACTS: Concepts & Technology of Flexible AC Transmission Systems*”, 1999. New York: Wiley.
 - [13] Albasri, F. A., Sidhu, T. S., Varma, R. K. : “*Performance comparison of distance protection schemes for shunt-FACTS compensated transmission lines*”, IEEE Trans. Power Del., 2007, 22(4), pp. 2116 2125.
 - [14] Khederzadeh, M., Sidhu, T. : “*Impact of TCSC on the protection of transmission lines*”, IEEE Trans. Power Del., 2006, 21(4), pp. 80-87.
 - [15] EL-Arroudi, K., Joos, G., McGillis, D.: “*Operation of impedance protection relays with the STATCOM*”, IEEE Trans. Power Del., 2012, 17 (2), pp. 381-387.
 - [16] Dubey, R., Samantaray, S. R., Panigrahi, B. K.: “*Adaptive distance protection scheme for shunt-facts compensated line connecting wind farm*”, IET Gener. Transm. Distrib., 2016, 10 (1), pp. 247–256.
 - [17] Elsamahy, M. S., Faried, O., Sidhu, T.: “*Impact of midpoint STATCOM on generator loss of excitation protection*”, IEEE Trans. Power Del., 2015, 29 (2), pp. 724-732.
 - [18] Ghorbani, B. mozafari, S. Soleymani, et al.: “*Impact of STATCOM and SSSC on synchronous generator LOE protection*”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2016, 24, pp. 2575-2588.
 - [19] Yaghobi, H.: “*A new adaptive impedance-based LOE protection of synchronous generator in the presence of STATCOM*”, IEEE Trans. Power Del., 2017, 32 (6), pp. 2489-2499.
 - [20] Ghorbani, S. Soleymani, Mozafari, B.: “*A PMU-based LOE protection of synchronous generator in the presence of GIPFC*”, IEEE Trans. Power Del., 2015, 31 (2), pp. 551-558.
 - [21] Hasani, A., Haghjoo, F., da Silva, F. F., et. al.: “*Synchronous generator loss of field protection: A real-time realistic framework and assessment of some recently proposed methods*”, IEEE Trans. Power Del., 2019, 34 (3), pp. 971-979.
 - [22] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., Al-Haddad, K.: “*Static synchronous compensators (STATCOM): A review,*” IET Power Electron., vol. 2, pp. 297–324, Dec. 2009.
 - [23] “*RTDS User’s Manual. RTDS Technologies*”, Inc., Winnipeg MB, Canada [Online]. Available: <http://www.rtds.com>.
 - [24] “*Thyristor static excitation systems*”, Mitsubishi Electric, September 2010. [Online]. Available: <http://www.meppi.com>.
 - [25] “*Unitrol 6000 static excitation systems*”, ABB, OCT. 2015. [Online]. Available: <http://www.ABB.com>.
 - [26] Hasani, A., Haghjoo, F., Silva, F. F. da., et al.: “*Synchronous Generator LOF Protection Using a Detailed Model Based on IEEE Standard C37.102-2006*”, 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe).
 - [27] Rashid, H. M., “*Power electronic circuits, devices and applications*”, University of West Florida, Pearson Prentice Hall, 2004.