

## بررسی تاثیرات STATCOM بر عملکرد حفاظت قطع تحریک ژنراتور سنکرون با استفاده از یک مدل واقع‌گرایانه

عباس حسنی<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، فرهاد حق‌جو<sup>۲</sup>، 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<sup>۱</sup> (STATCOM) بر عملکرد رله امیدانسی حفاظت قطع تحریک<sup>۲</sup> (LOF) ژنراتور سنکرون مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور انجام یک مطالعه دقیق و جامع، یک مدل واقع‌گرایانه برای سیستم تحریک ژنراتور در نظر گرفته شده است. این سیستم با استفاده از مدل حوزه فاز<sup>۳</sup> (PD) ژنراتور سنکرون که در شبیه‌ساز زمان واقعی دیجیتال<sup>۴</sup> (RTDS) در دسترس می‌باشد، ایجاد شده است. با استفاده از چنین سیستمی، مطالعات LOF ژنراتور به صورت واقع‌گرایانه و مبتنی بر استاندارد IEEE Standard C37.102-2006 قابل انجام می‌باشد. در این راستا، انواع مختلفی از خطاهای قطع تحریک کامل<sup>۵</sup> (CLOF) و جزئی<sup>۶</sup> (PLOF) بر ژنراتور اعمال شده و رفتار دینامیکی آن به همراه عملکرد رله امیدانسی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که STATCOM می‌تواند دو اثر عمده بر عملکرد رله مذکور داشته باشد که عبارتند از: (۱) اعمال تاخیر بر عملکرد رله در تشخیص خطاهای LOF و (۲) احتمال دستیابی ژنراتور به یک نقطه کار پایدار جدید<sup>۷</sup> (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 اضافه‌بار ژنراتور به منظور جلوگیری از اثرات گرمایی بر سیم‌پیچ استاتور به دلیل افزایش زمان عملکرد رله LOF و (۲) ارائه طرحی به منظور پایش NSOP‌هایی 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 زیر تحریک 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

پدیده LOF یکی از انواع شرایط غیرعادی است که یک ژنراتور سنکرون ممکن است در حین عملکرد خود تجربه 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: اضافه بار 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 امیدانسی انجام می‌پذیرد. این رله‌ها غالباً از یک یا دو ناحیه حفاظتی دایروی با آفست منفی که در صفحه امیدانسی (R-X) تعریف می‌شوند، استفاده می‌کنند. زمانی که امیدانسی اندازه‌گیری شده در پایانه ژنراتور وارد نواحی عملکردی مذکور می‌شود، رله بر مبنای تاخیرهای 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 گذرای سیستم، از جمله نقاط ضعف رله‌های امیدانسی می‌باشند. بهبود این نقاط ضعف، همواره به عنوان انگیزه مهم محققان این حوزه مطرح بوده و در این راستا، کارهای تحقیقاتی ارزشمندی در سال‌های اخیر ارائه شده است [۵-۱۱].

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 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 زده‌اند. در نهایت در مرجع [۱۱] با روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مبتنی بر توابع شعاعی<sup>۱</sup> (RBF) و با استفاده از کمیت‌هایی نظیر تغییرات ولتاژ و توان راکتیو به منظور آموزش شبکه عصبی، به تشخیص LOF پرداخته شده است.

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 متناوب انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> (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 آن‌ها تاثیر منفی بگذارند. 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<sup>۱</sup> و کاهش یا افزایش دسترسی<sup>۱</sup> رله اشاره کرد [۱۳-۱۶].

در سال‌های اخیر، تاثیر ادوات FACTS بر عملکرد رله امیدانسی حفاظت LOF ژنراتور سنکرون نیز مورد توجه قرار گرفته است [۲۰-۱۷]. 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 اغتشاش 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 اغتشاش 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، مرجع [۱۸] به بررسی تاثیرات STATCOM و جبران‌ساز سری سنکرون استاتیکی<sup>۱۲</sup> (SSSC) بر عملکرد رله LOF پرداخته است. همچنین مراجع [۱۹-۲۰] به ترتیب به بررسی تاثیرات STATCOM و کنترل‌کننده شارش توان بین‌خطی<sup>۱۳</sup> (GIPFC) (GIPFC) یکی از تجهیزات FACTS است که متشکل از STATCOM و SSSC می‌باشد) بر عملکرد رله LOF

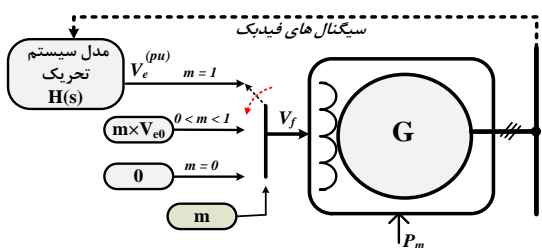
حاصل به ترتیب در بخش‌های سوم و چهارم ارائه می‌شود. در نهایت بخش پنجم شامل نتیجه‌گیری مقاله می‌باشد.

## 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 نظیر PSCAD، DigSILENT، MATLAB و EMTP موجود و برای انجام مطالعات پایداری سیستم قدرت بسیار مناسب می‌باشد. اما این مدل محدودیت‌های عمده‌ای 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 [۲۳]، 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 [۲۰-۱۷] 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 ولتاژ خروجی (بر مبنای واحد pu) سیستم تحریک ژنراتور می‌باشد. پارامتر  $m$  نیز نوع خطای LOF را نشان می‌دهد، به طوری‌که که مقادیر  $m = 1$ ،  $0 < m < 1$  و  $m = 0$  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 نویسندگان چنین مدل‌سازی واقع‌گرایانه نمی‌باشد.



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

پرداخته‌اند و راه‌حلی به منظور مقابله با تاثیرات منفی تجهیزات فوق ارائه داده‌اند. این راه‌حل‌ها مبتنی بر استفاده از اطلاعات محل اتصال ادوات مذکور می‌باشند که بایستی با استفاده از کانال‌های مخابراتی به محل رله حفاظت LOF ارسال گردند. با استفاده از این اطلاعات ارسالی، امیدانس دیده شده توسط رله اصلاح می‌شود و تاثیر حضور ادوات مذکور بر امیدانس دیده شده رله حذف می‌شود. شایان ذکر است که در مرجع [۱۱] عملکرد روش ارائه شده مبتنی بر شبکه عصبی RBF در سیستم جبران‌شده با کنترلر یکپارچه شارش توان<sup>۱۴</sup> (UPFC) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه تمامی کارهای تحقیقاتی فوق [۱۱ و ۲۰-۱۷] 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.

بر مبنای استاندارد [۲] IEEE Standard C37.102-2006، خطاهای CLOF ممکن است به دلایل متفاوتی نظیر وقوع اتصال کوتاه در مدار تحریک، مدار باز شدن مدار تحریک ژنراتور، باز شدن ناگهانی کلید تحریک و قطع شدن منبع اصلی تغذیه سیستم تحریک ژنراتور رخ دهند [۲]. همچنین استاندارد بیان می‌کند که شرایط PLOF ممکن است در اثر ایجاد اختلال در سیستم تنظیم خودکار ولتاژ<sup>۱۵</sup> (AVR) و یا زمانی که تنظیم ولتاژ ژنراتور از حالت AVR به حالت تنظیم دستی<sup>۱۶</sup> (MVR) تغییر می‌کند، رخ دهد. با این وجود همان‌طور که ذکر شد، تنها دو مورد اغتشاش به عنوان خطاهای LOF در مراجع ذکر شده [۲۰-۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است که نمی‌توان آن را یک مطالعه واقع‌گرایانه تلقی کرد. مهمترین دلیل این موضوع این است که مراجع فوق [۲۰-۱۸] 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 [۱۹-۱۷] 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  $PD$  ژنراتور سنکرون تشریح می‌گردد. مطالعات شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

## ۲-۲ - مطالعات LOF با استفاده از مدل PD

برخلاف مدل dq، مدل PD نمایش واقع‌گرایانه‌تری از ساختار ژنراتور برای مطالعات پدیده LOF ارائه می‌دهد. به طور دقیق‌تر این مدل امکان دسترسی به دو سر سیم‌پیچ 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 یکسوساز استاتیکی کنترل‌شونده سه‌فاز، AVR و MVR 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:** وقوع اتصال کوتاه در مدار تحریک، به عنوان نمونه در نقطه A یا در امتداد حلقه‌های لغزان 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 کروباز<sup>۱۷</sup> بواسطه مکانیزم ارتباط داخلی<sup>۱۸</sup>
- **نوع چهارم:** اختلال در عملکرد سیستم AVR و فعال شدن نامناسب سیستم MVR.

در رابطه با خطای 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

درستی عملکرد AVR را دنبال کند، این احتمال وجود دارد که در شرایط تغییر حالت کنترل ولتاژ از حالت AVR به MVR شرایط رخ 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].

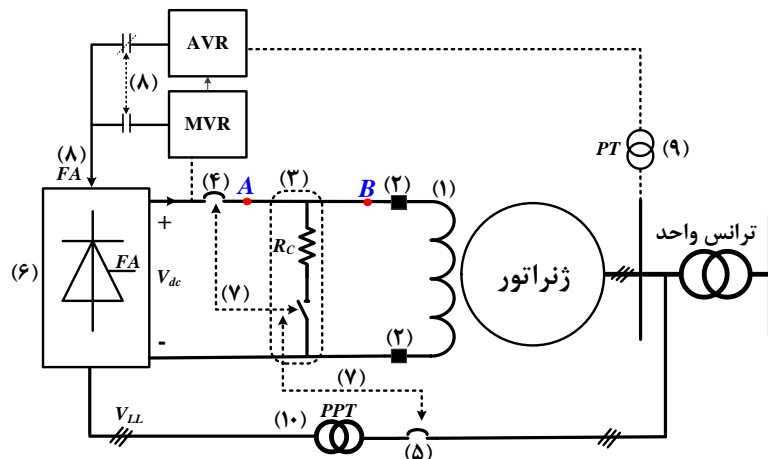
به عنوان یک نتیجه از بخش دوم، می‌توان گفت که مدل PD ژنراتور در مقایسه با مدل dq آن ابزار مناسب‌تری جهت انجام مطالعات دقیق و واقع‌گرایانه پدیده LOF می‌باشد.

## ۳ - مطالعات شبیه‌سازی

## ۳-۱- سیستم مورد مطالعه

شکل (۳) دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد. این سیستم متشکل 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<sup>۱۹</sup> (GCC) مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۱]. همچنین شکل (۴-راست) مشخصه رله LOF امیدانسی 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].



- (۱) : سیم پیچ تحریک  
(۲) : نماد حلقه های لغزان  
(۳) : سیستم کروباز شامل کلید و مقاومت  $R_c$   
(۴) : کلید سمت تحریک، DCCB  
(۵) : کلید سه فاز سمت تغذیه یکسوساز، ACCB (۱۰): ترانسفورماتور تغذیه یکسوساز  
(۶) : یکسوساز سه فاز کنترل‌شونده تریستوری  
(۷) : مکانیزم قفل داخلی  
(۸) : زاویه آتش (Firing Angle)  
(۹) : ترانسفورماتور ولتاژ  
(۱۰) : ترانسفورماتور تغذیه یکسوساز

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

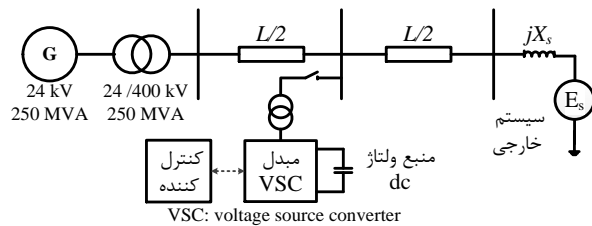
خطاهای CLOF به صورت سناریوهای جدا و در لحظه  $t = 0$  s بر ژنراتور اعمال می‌شوند. مشابه شکل (۵)، شکل (۶) تغییرات  $I$  و عملکرد رله امیدانسی را در مواجهه با چنین خطاهایی در بارگذاری سبک ژنراتور را نشان می‌دهد.

همچنین شکل (۷) تغییرات توان راکتیو خروجی STATCOM ( $Q_{st}$ ) را در مواجهه با خطاهای CLOF مذکور نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود بعد از وقوع LOF، توان راکتیو تزریقی STATCOM به شبکه به منظور تثبیت ولتاژ نقطه اتصال، افزایش می‌یابد.

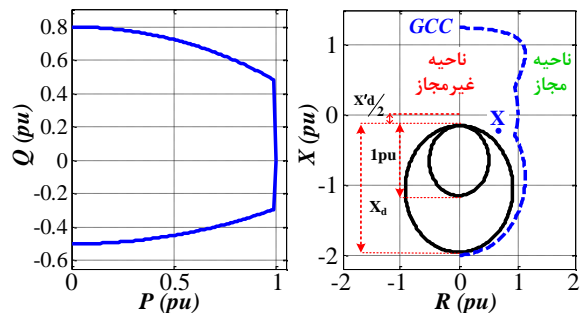
جدول (۱) خلاصه‌ای از تاثیر STATCOM بر عملکرد رله LOF امیدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF اعمال شده در بارگذاری‌های مختلف ژنراتور را نشان می‌دهد.

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

| # | بارگذاری $P+jQ$ | نوع خطا | زمان تشخیص |       |              |
|---|-----------------|---------|------------|-------|--------------|
|   |                 |         | WOS        | WS    | تاخیر عملکرد |
| ۱ | 0.9+j0.3        | اول     | ۲/۵۶۸      | ۳/۹۰۶ | ۱/۳۳۸        |
|   |                 | دوم     | ۰/۷۰۸      | ۰/۷۴۱ | ۰/۰۳۳        |
|   |                 | سوم     | ۰/۹۴۸      | ۱/۱۱۹ | ۰/۱۷۱        |
| ۲ | 0.6+j0.2        | اول     | ۴/۵۸۴      | ۵/۴۹۲ | ۰/۹۰۸        |
|   |                 | دوم     | ۰/۹۲۱      | ۱/۰۴۸ | ۰/۱۲۷        |
|   |                 | سوم     | ۱/۹۴۱      | ۲/۱۵۸ | ۰/۲۱۷        |
| ۳ | 0.3+j0.1        | اول     | ۸/۹۷۱      | ۹/۶۸۹ | ۰/۷۱۸        |
|   |                 | دوم     | ۰/۶۲۸      | ۰/۶۶۲ | ۰/۰۳۴        |
|   |                 | سوم     | ۳/۰۴۹      | ۳/۰۵۴ | ۰/۰۰۵        |
| ۴ | 0.8-j0.1        | اول     | ۳/۰۲۸      | ۳/۳۴۷ | ۰/۳۱۹        |
|   |                 | دوم     | ۰/۸۰۱      | ۰/۸۵۰ | ۰/۰۴۹        |
|   |                 | سوم     | ۱/۰۴۲      | ۱/۵۱۷ | ۰/۴۷۵        |
| ۵ | 0.6-j0.2        | اول     | ۴          | ۴/۰۲۱ | ۰/۰۲۱        |
|   |                 | دوم     | ۱/۰۶۲      | ۱/۲۲۶ | ۰/۱۶۴        |
|   |                 | سوم     | ۱/۵۶۹      | ۱/۸۰۹ | ۰/۱۱۵        |
| ۶ | 0.4-j0.3        | اول     | ۵/۱۲۳      | ۵/۲۳۳ | ۰/۱۱         |
|   |                 | دوم     | ۱/۴۹۳      | ۱/۴۹۷ | ۰/۰۰۴        |
|   |                 | سوم     | ۱/۹۷۲      | ۲/۱۲۱ | ۰/۱۴۹        |



شکل (۳): دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه



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

### ۲-۳- مطالعات LOF

در این قسمت رفتار دینامیکی ژنراتور به همراه عملکرد رله LOF امیدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF و PLOF، در بارگذاری‌های مختلف ژنراتور و دو حالت حضور<sup>۲۰</sup> (WS) و عدم حضور<sup>۲۱</sup> (WOS) STATCOM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۱-۲-۳ خطاهای CLOF

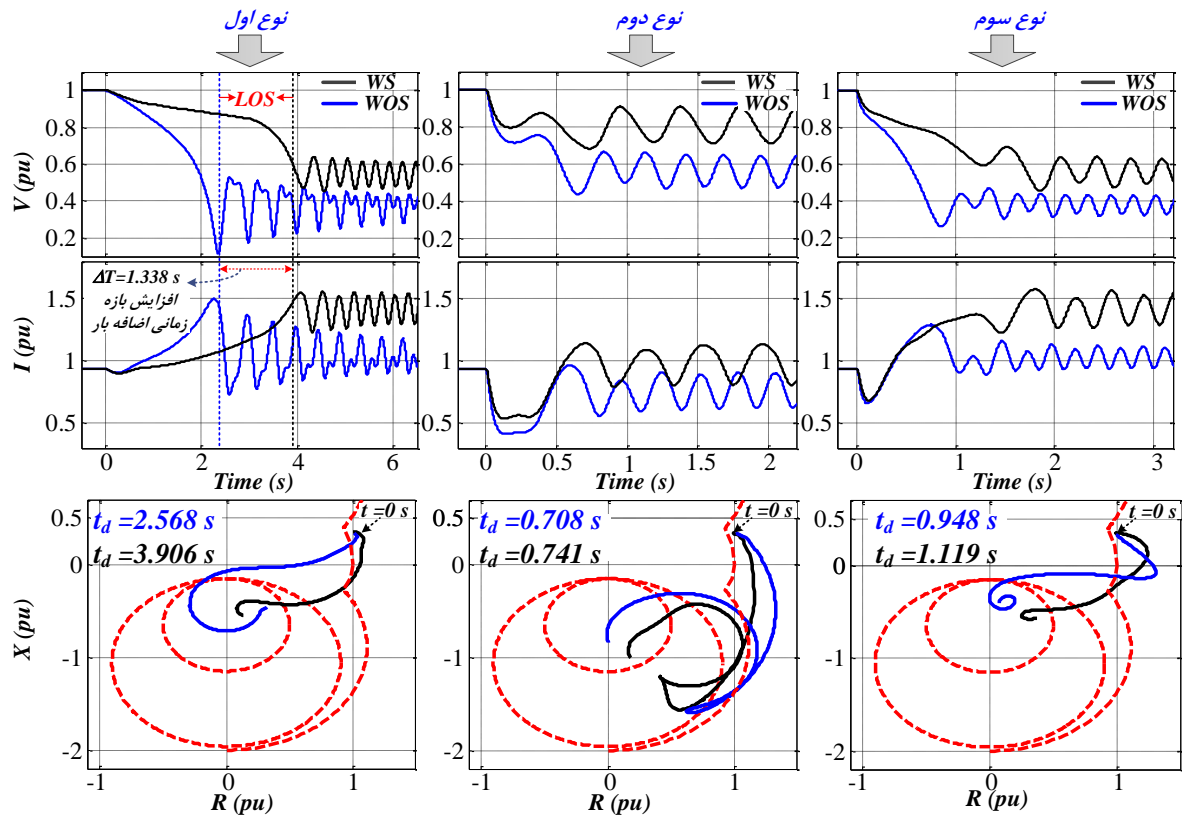
در این بخش، خطاهای CLOF سه‌گانه که در بخش (۲-۲) معرفی شدند در دو سطح بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور و در سناریوهای جداگانه بر ژنراتور اعمال می‌شوند.

#### ❖ خطاهای CLOF در بارگذاری سنگین ژنراتور

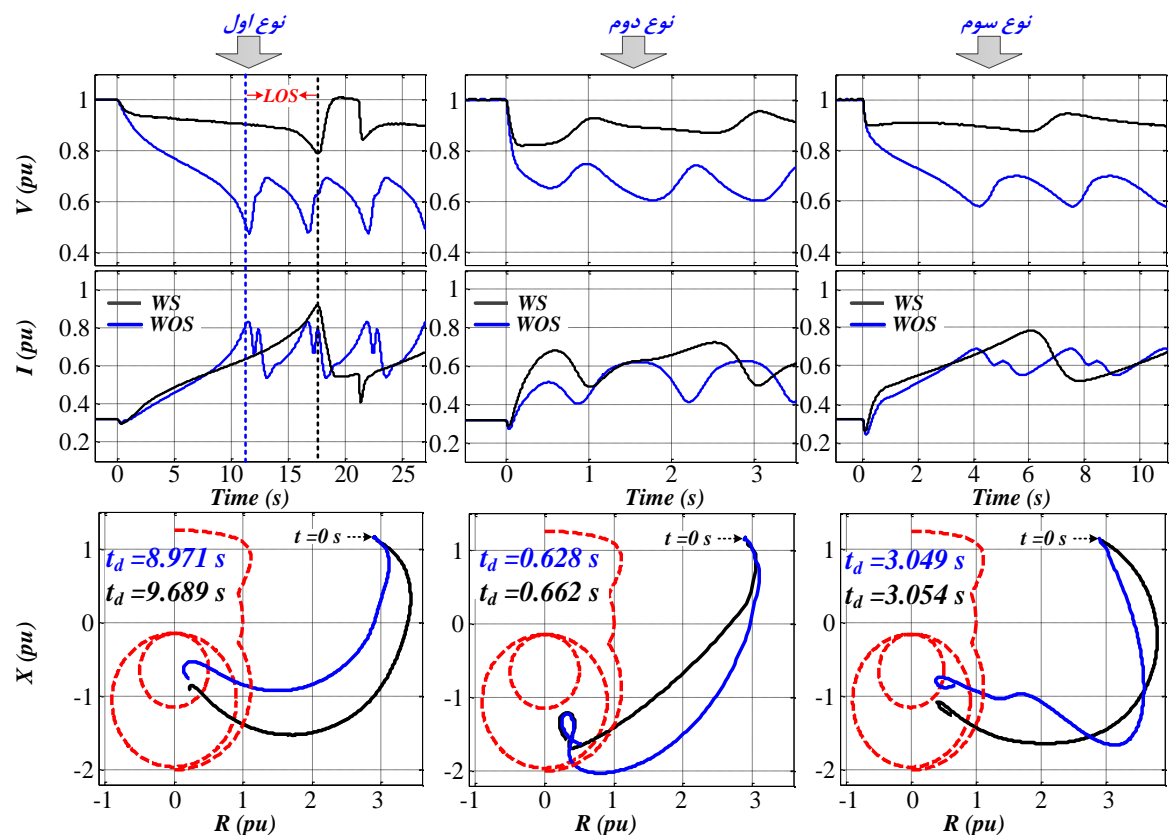
در این حالت، بارگذاری ژنراتور معادل  $S = 0.9 + j0.3$  pu است. شکل (۵) تغییرات مقدار موثر ولتاژ پایانه ( $V$ )، مقدار موثر جریان استاتور ( $I$ ) و همچنین عملکرد رله امیدانسی را در مواجهه با خطاهای CLOF مذکور نشان می‌دهد. هر ستون از این شکل مربوط به یک نوع خطای CLOF بوده و تمامی خطاها در لحظه  $t = 0$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

#### ❖ خطاهای CLOF در بارگذاری سبک ژنراتور

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



شکل (۵): تغییرات  $V$  و  $I$  به همراه عملکرد رله امیدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF در بارگذاری سنگین 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 امیدانسی در مواجهه با خطاهای CLOF در بارگذاری سبک ژنراتور و در دو حالت: با حضور (منحنی‌های مشکی) و بدون حضور (منحنی‌های آبی) STATCOM.

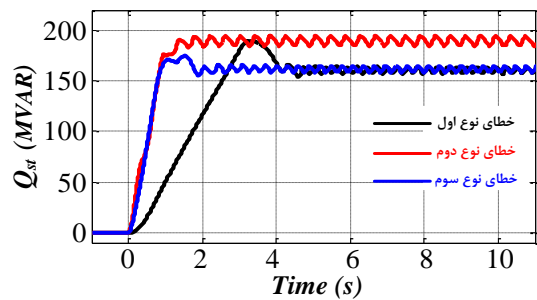
امپدانس می‌گردد. مطابق جدول (۱)، حداکثر مقدار این تاخیر برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده معادل ۱/۳۳۸ ثانیه است.

- 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)).

### ۲-۲-۲- خطاهای PLOF

همان‌طور که در بخش ۲ اشاره شد، خطاهای PLOF در مراجعی که از مدل dq 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) یکسوساز سه‌فاز تریستوری را بر عهده دارد و MVR وظیفه دنبال کردن تغییرات این کمیت را برعهده دارد تا در صورت لزوم کنترل آن را بر عهده گیرد. ارتباط بین ولتاژ dc خروجی یکسوساز  $V_{dc}$ ، ولتاژ سه‌فاز خط به خط ورودی ( $V_{LL}$ ) و پارامتر FA با رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۷].

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

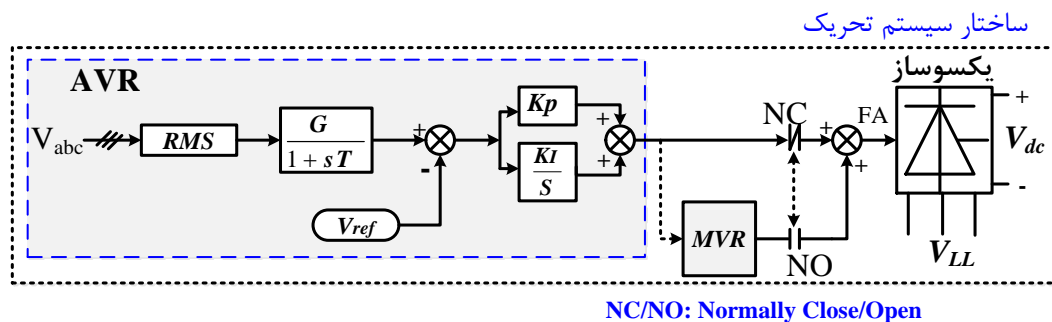


شکل (7): تغییرات  $Q_{st}$  در مواجهه با خطاهای CLOF در بارگذاری سنگین ژنراتور

### ❖ تحلیل رفتار دینامیکی ژنراتور و رله امپدانس در مواجهه با خطاهای CLOF

با توجه به شکل‌های (۵) تا (۷)، چند نکته مهم در رابطه با رفتار دینامیکی ژنراتور و عملکرد رله امپدانس 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 سنکرونیسم<sup>۲۲</sup> (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 مدار 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  $I$ ،  $V$  و عملکرد رله امپدانس را در مواجهه با چنین خطاهایی را نشان می‌دهد.

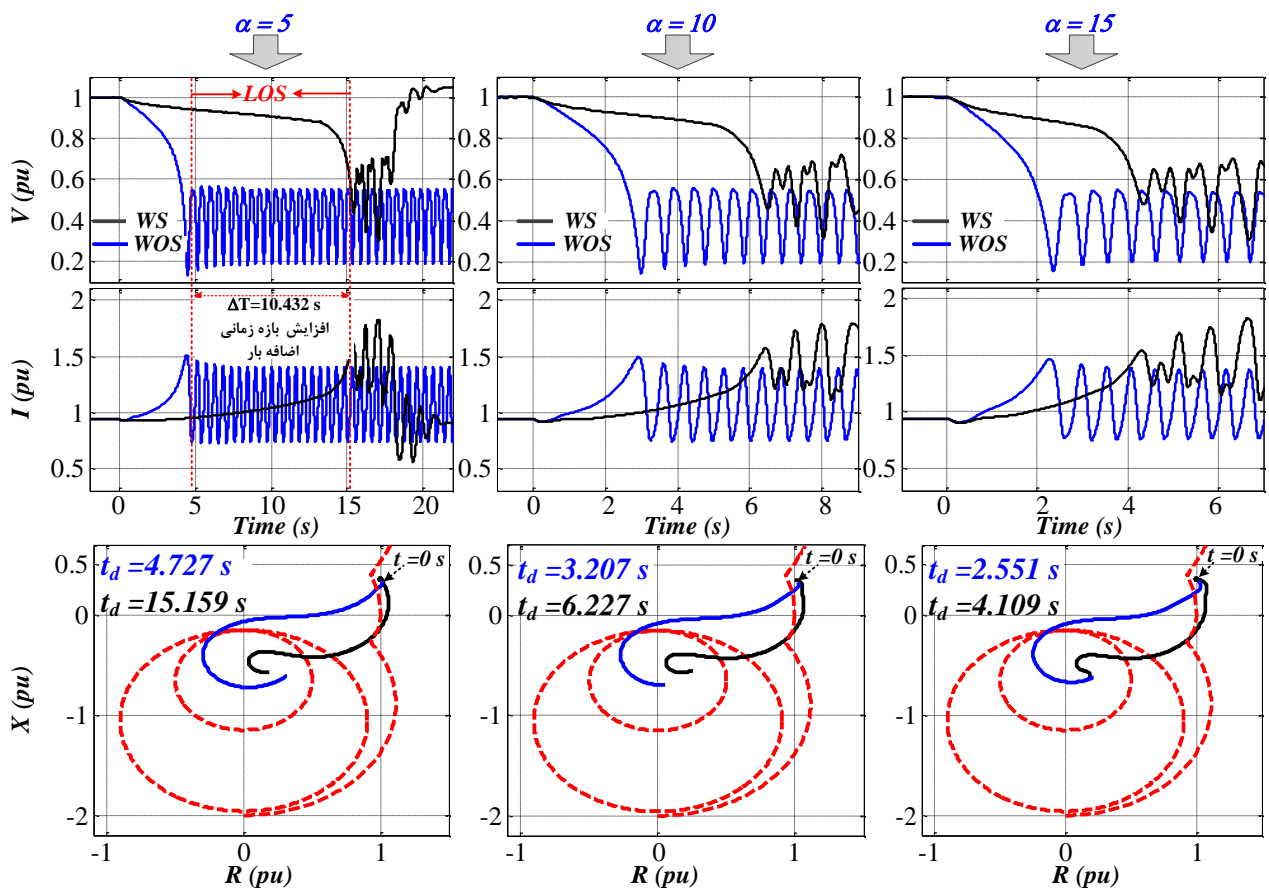
## ❖ خطاهای PLOF در بارگذاری سبک ژنراتور

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

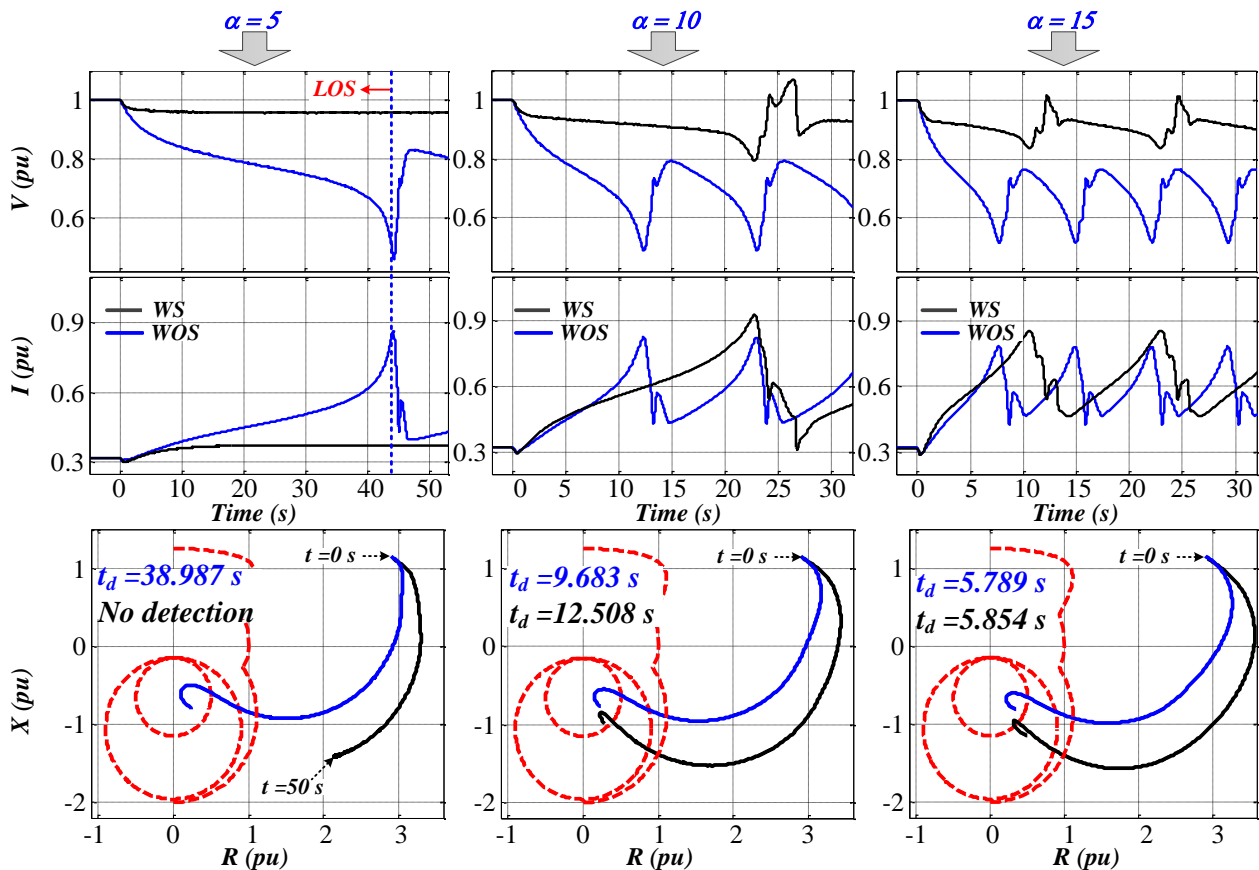
زمانی که AVR دچار اختلال شود، MVR بایستی کنترل  $FA$  را بر عهده بگیرد. در صورتی که این تغییر مد کنترلی به درستی انجام نشود، می‌توان انتظار وقوع شرایط PLOF را داشت. مشخص است که مقادیر بزرگتر  $FA$  منجر به مقادیر کوچکتر  $V_{dc}$  خواهد شد. لذا در صورتی که MVR مقدار جدید کمیت  $FA$  ( $FA^{new}$ ) را در مقدار بزرگتری از مقدار اولیه آن ( $FA^{old}$ ) تنظیم کند، خطای PLOF رخ خواهد داد. این اختلاف در مقدار تنظیمی با پارامتر  $\alpha$  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 امپدانس در مواجهه با خطاهای PLOF می‌پردازیم. این خطاها به ازای مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه از کمیت  $\alpha$  و در دو بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور اعمال می‌شوند.



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



شکل (۱۰): تغییرات  $V$  و  $I$  به همراه عملکرد رله امیدانسی در مواجهه با خطاهای 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 امیدانسی در مواجهه با

خطاهای PLOF در بارگذاری‌های مختلف

| # | بارگذاری<br>$P+jQ$ | زمان تشخیص |       |        |
|---|--------------------|------------|-------|--------|
|   |                    | $\alpha$   | WOS   | WS     |
| ۱ | $0.9+j0.3$         | ۵          | ۴/۷۲۷ | ۱۵/۱۵۹ |
|   |                    | ۱۰         | ۳/۲۰۷ | ۶/۲۲۷  |
|   |                    | ۱۵         | ۲/۵۵۱ | ۴/۱۰۹  |
| ۲ | $0.6+j0.2$         | ۵          | ۵/۳۰۵ | ۳۶/۷۳۴ |
|   |                    | ۱۰         | ۷/۹۰۸ | ۲/۶۰۳  |
|   |                    | ۱۵         | ۳/۸۹۶ | ۴/۷۱۹  |
| ۳ | $0.3+j0.1$         | ۵          | ۱/۹۸۷ | NSOP   |
|   |                    | ۱۰         | ۹/۶۸۳ | ۱۲/۵۰۸ |
|   |                    | ۱۵         | ۵/۷۸۹ | ۵/۸۵۴  |
| ۴ | $0.8-j0.1$         | ۵          | ۴/۹۱۲ | ۲/۲۵۱  |
|   |                    | ۱۰         | ۳/۲۰۵ | ۳/۷۶۴  |
|   |                    | ۱۵         | ۲/۴۸۲ | ۲/۷۰۱  |
| ۵ | $0.6-j0.2$         | ۵          | ۵/۹۲۴ | ۰/۹۷۸  |
|   |                    | ۱۰         | ۳/۵۶۱ | ۳/۵۶۷  |
|   |                    | ۱۵         | ۲/۵۴۳ | ۲/۶۷۳  |
| ۶ | $0.4-j0.3$         | ۵          | ۵/۹۷۸ | ۰/۱    |
|   |                    | ۱۰         | ۳/۱۳۴ | ۳/۳۰۵  |
|   |                    | ۱۵         | ۲/۱۹۸ | ۲/۴۰۸  |

❖ تحلیل رفتار دینامیکی ژنراتور و رله امیدانسی در

مواجهه با خطاهای PLOF

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

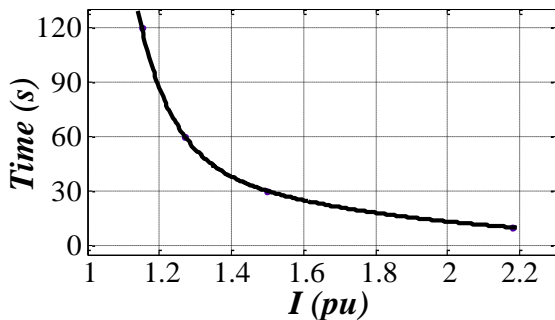
- فارغ از حضور یا عدم حضور STATCOM، مشخص است که برای یک خطای PLOF معین، رفتار دینامیکی ژنراتور در بارگذاری سنگین ژنراتور سریعتر از شرایط بارگذاری سبک می‌باشد.
- فارغ از حضور یا عدم حضور STATCOM، مشخص است که در یک بارگذاری معین، رفتار دینامیکی ژنراتور در مواجهه با خطاهای PLOF سه‌گانه متفاوت است. به طور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

حرارتی به سیم‌پیچ‌های آرمیچر، لازم است که یک رله اضافه‌جریان با مشخصه‌ای منطبق با شکل (۱۱) برای ژنراتور در نظر گرفته شود.

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

جدول (۲): قابلیت حرارتی کوتاه مدت ژنراتور سنکرون

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



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 اضافه‌بار 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 تغییر کنترل ولتاژ از حالت AVR به MVR

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 طوری که در حالت NSOP و بر خلاف 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 ( $V > 0.95 pu$ ) و عملکرد زیرتحرک.

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 و 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 استاتور. به منظور مواجهه

سیم‌پیچ‌های 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 ( $V > 0.95 pu$ ) 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، کندتر شدن رفتار دینامیکی ژنراتور و افزایش زمان عملکرد رله امپدانس LOF است.

#### ۴- بحث در مورد اثرات STATCOM بر عملکرد حفاظت LOF 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 دستیابی 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 راه‌کارهایی 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 امپدانس 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 سیم‌پیچ‌های آرمیچر به دلیل افزایش زمان اضافه‌بار 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 (STTC)<sup>۳۳</sup> سیم‌پیچ 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.

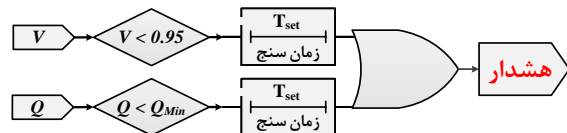
جدول (۴): اطلاعات اجزای سیستم قدرت مورد مطالعه

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

جدول (۵): اطلاعات سیستم تحریک

| AVR  | کروبار             |
|--|--------------------|
| $G=1$ , $T=0.1 \text{ s}$ ,<br>$Kp=13$ , $KI=10$ , | $R_c = 0.5 \Omega$ |

با این حالت احتمالی، می توان از یک طرح هشدار دهنده مطابق شکل (۱۲) استفاده کرد. در این طرح حداقل توان راکتیو مجاز که ژنراتور می تواند جذب کند، می باشد. مقدار این کمیت را می توان از روی GCC به دست آورد که برای ژنراتور مورد مطالعه این مقدار معادل  $0.5$  - پریونیت می باشد. مقدار تنظیمی زمان سنج ( $T_{set}$ ) را می توان به صورت اختیاری (به عنوان مثال دو ثانیه) انتخاب کرد. انتظار می رود 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 امیدانسی حفاظت LOF ژنراتور سنکرون مورد مطالعه قرار گرفت. برای رسیدن به این هدف، با استفاده از مدل PD ژنراتور سنکرون، یک مدل واقع گرایانه از یک واحد نیروگاهی توسعه داده شد. با استفاده از این مدل، مطالعات پدیده LOF به طور واقع گرایانه و منطبق بر استاندارد IEEE C37. 102-2006 انجام شد. با اعمال انواع مختلفی از خطاهای CLOF و PLOF در سیستم نمونه مورد مطالعه، تاثیرات STATCOM بر عملکرد رله LOF امیدانسی مورد مطالعه قرار گرفت. نشان داده شد که حضور STATCOM از طریق کاهش امیدانسی موثر شبکه و قوی تر کردن آن، موجب ایجاد دو تاثیر عمده بر عملکرد رله مذکور می گردد. این اثرات عبارتند از:

- افزایش زمان عملکرد رله
  - احتمال رسیدن ژنراتور به یک NSOP در شرایطی که کنترل ولتاژ از حالت AVR به MVR تغییر می کند.
- 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 می توان از آسیب های احتمالی به ژنراتور در شرایط LOF و در سیستم ها جبران شده با STATCOM جلوگیری کرد.

## سپاسگزاری

شبه سازی های ارائه شده در این مقاله با استفاده از تکنولوژی RTDS موجود در دپارتمان انرژی، دانشگاه آلبورگ، کشور دانمارک انجام شده اند. لذا نویسندگان مراتب قدردانی خود را از همکاری اعضای محترم این دپارتمان را اعلام می دارند.

## زیر نویس ها

- 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.