آشکارسازی سریع و مطمئن پدیده‌ی قطع تحریک در ژنراتورهای سنکرون

عباس حسنی[1]، دانشجوی دکتری، فرهاد حق‌جو[2]، استادیار

۱-دانشکده مهندسی برق- پردیس شهید عباسپور- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
a_hasani@sbu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق- پردیس شهید عباسپور- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران
f_haghjoo@sbu.ac.ir

چکیده:پدیده‌ی قطع تحریک [1](LOE) در ژنراتورهای سنکرون می‌تواند علاوه بر صدمات وارده به ژنراتور، موجب افت ولتاژ در شبکه و حتی وقوع خاموشی در آن شود. طرح تشخیص LOE مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس در پایانه ژنراتور علاوه بر سرعت پایین، ممکن است در مواجهه با سایر اغتشاشات از جمله پدیده‌ی نوسان توان پایدار[2](SPS) در سیستم قدرت عملکرد مطلوبی نداشته باشند. بر این اساس، در این مقاله از تغییرات کمیت‌های الکتریکی ژنراتور (ولتاژ، جریان، توان اکتیو و راکتیو، زاویه توان) بعد از وقوع LOE به‌منظور شناسایی این پدیده استفاده شده و شاخص‌های مختلفی متشکل از ترکیب تغییرات این کمیت‌ها ارائه و عملکرد هر یک در تشخیص LOE مورد بررسی قرار گرفته و جهت ارزیابی عملکرد شاخص‌های مذکور، مطالعات شبیه‌سازی گسترده‌ای بر روی سیستم‌های قدرت نمونه در شرایط مختلف بهره‌برداری و اغتشاشات مختلف سیستم انجام شده است. در نهایت شاخصی مبتنی بر تغییرات سه پارامتر توان راکتیو، ولتاژ و زاویه روتور ژنراتور به عنوان شاخص اصلی ارائه شده که نتایج حاصله حاکی از آن است که روش پیشنهادی دارای سرعتی به مراتب بیشتر از طرح امپدانسی بوده و در مواجهه با پدیدهSPS و سایر اغتشاشات سیستم قدرت از امنیت بالاتری برخوردار است.

واژه های کلیدی: حفاظت ژنراتور سنکرون، پدیده قطع تحریک، نوسان توان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۳

نام نویسنده‌ی مسئول: فرهاد حق‌جو

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

۱ مقدمه

یکی از شرایطی که ژنراتور سنکرون ممکن است در حین عملکرد خود با آن مواجه شود، پدیده‌ی قطع تحریک (LOE) است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که منبع تغذیه‌کننده‌ی سیم‌پیچ میدان ژنراتور به‌صورت جزئی و یا کامل قطع شود. این امر ممکن است در اثر مواردی از قبیل قطع تصادفی کلید سیستم تحریک، مدار باز شدن تحریک، اتصال‌کوتاه‌شدن تحریک (اتصال‌کوتاه در حلقه‌های لغزان)، خطای سیستم تنظیم ولتاژ و از دست رفتن منبع توان سیستم تحریک به‌وجود آید[۱-۲].

وقوع LOE در ژنراتور سنکرون موجب شتاب گرفتن و افزایش سرعت چرخش آن شده، نوسان و تغییرات تدریجی کمیت‌های الکتریکی نظیر ولتاژ، جریان و توان خروجی آن را به‌همراه دارد. روند افزایش سرعت ژنراتور در نهایت منجر به ازدست‌رفتن سنکرونیزم ژنراتور با شبکه می‌شود به‌طوری‌که در حالت ماندگار بعد از وقوع LOE، ژنراتور به‌صورت آسنکرون و در سرعتی بالاتر از سرعت سنکرون به‌کار خود ادامه می‌دهد. از جمله آسیب‌هایی که ممکن است در اثر وقوع LOE به ژنراتور وارد شود می‌توان به اضافه بار در سیم‌پیچ استاتور، آسیب به روتور در اثر گرم‌شدن سیم‌پیچ‌های میراکننده و بدنه آن، آسیب به بخش انتهایی هسته‌ی استاتور، تپشی‌شدن گشتاور و واردشدن آسیب‌های مکانیکی به ژنراتور اشاره کرد [۱]. به‌علاوه در این شرایط به‌علت قطع توان تزریقی از سیستم تحریک، ژنراتور نیازمند جذب توان راکتیو مورد نیاز خود از شبکه می‌باشد. چنان‌چه ژنراتور به یک شبکه‌ی ضعیف متصل شده باشد، جذب توان راکتیو از شبکه می‌تواند موجب کاهش سطح ولتاژ در ناحیه‌ی گسترده‌ای از شبکه شده و حتی منجر به خاموشی شبکه گردد [۴-۳]. بنابراین تشخیص سریع و مطمئن LOE جهت جلوگیری از آسیب‌های محتمل بعدی به ژنراتور و شبکه، از اهمیت بالائی برخوردار است.

تاکنون طرح‌های مختلفی جهت تشخیص LOE در مراجع مختلف ارائه شده است [۱۰-۵]. رله‌های اولیه که به‌منظور حفاظت در مقابل LOE استفاده شده‌اند شامل رله‌های کاهش جریان و ولتاژ مدار تحریک بوده‌اند. این رله‌ها در مواردی همچون کاهش تعمدی جریان تحریک در شرایط بار سبک، عملکرد مناسبی نداشتند [۳]. رله‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس در پایانه‌ی ژنراتور، متداول‌ترین نوع حفاظت LOE در شبکه قدرت کنونی می‌باشند. در این رله‌ها حفاظت LOE با درنظرگرفتن دو ناحیه‌ی حفاظتی دایروی شکل و اندازه‌گیری امپدانس دیده‌شده از ترمینال ژنراتور انجام می‌شود. با وقوع LOE و ورود امپدانس دیده‌شده به این نواحی عملکردی، رله بر مبنای تأخیرهای زمانی از پیش تنظیم‌شده، فرمان قطع صادر می‌نماید [۲، ۵ و ۶]. با وجود این‌که این رله‌ها به‌طور گسترده در شبکه قدرت استفاده می‌شوند امکان عملکرد نابه‌جای آن‌ها در شرایط نوسان توان پایدار (SPS) و سایر اغتشاشات سیستم وجود دارد [۸-۷].

در مرجع [۷] یک طرح بر مبنای منطق فازی جهت بهبود طرح امپدانسی متداول برای تشخیص و تمایز دو پدیده‌ی LOE و SPS ارائه شده است. این روش از امپدانس دیده‌شده به‌همراه ولتاژ پایانه‌ی ژنراتور برای تشخیص این پدیده استفاده می‌کند. روش دیگری [۸] بر اساس ماشین بردار پشتیبانی[۳](SVM) جهت تمایز LOE از SPS و سایر اغتشاشات سیستم نظیر خطاهای خارجی عمل می‌نماید. در مرجع [۹] از روشی مبتنی بر اندازه‌گیری شار پیوندی در فاصله‌ی هوایی ژنراتور جهت شناسایی LOE استفاده شده که نیازمند نصب سنسورهایی در داخل ژنراتور برای این منظور می‌باشد. نهایتاً در مرجع [۱۰] از شاخصی ترکیبی مشتمل بر تغییرات توان راکتیو و ولتاژ پایانه‌ی ژنراتور جهت تشخیص LOE و تمایز آن از SPS استفاده شده است. البته در این مرجع، نحوه‌ی انتخاب متغیرهای مورد استفاده و همچنین تنظیم مقادیر آستانه به‌خوبی تشریح نشده است.

در این مقاله، روش استفاده از تغییرات کمیت‌های الکتریکی ژنراتور بعد از وقوع LOE به‌منظور تشخیص این پدیده مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش از ترکیب تغییرات کمیت‌های مختلف الکتریکی ژنراتور به‌منظور ارائه‌ی شاخصی مناسب جهت تشخیص LOE استفاده شده و برای حصول نتیجه، از ترکیب تغییرات ولتاژ پایانه، توان راکتیو و زاویه توان ژنراتور برای تشخیص LOE استفاده گردیده و عملکرد آنها مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعات شبیه‌سازی گسترده‌ای جهت اعتبار سنجی ترکیبات مختلف بر روی شبکه‌ی تست نمونه، انجام شده و نتایج حاصله نشان می‌دهد که می‌توان به الگوریتم‌های سریعتر و مطمئن تری جهت تشخیص LOE و متمایز نمودن آن از سایر اغتشاشات سیستم دست یافت.

ساماندهی بخش‌های بعدی این مقاله به‌نحوی است که در بخش دوم طرح امپدانسی متداول برای تشخیص LOE تشریح شده است. بخش سوم مشتمل بر بررسی نحوه تغییرات کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی ژنراتور بعد از وقوع LOE می‌باشد. روش پیشنهادی و نحوه‌ی عملکرد آن به‌طور کامل در بخش چهارم و مطالعات شبیه‌سازی در شرایط مختلف بهره‌برداری در بخش پنجم ارائه و با طرح متداول مقایسه گردیده است. در بخش ششم روش پیشنهادی بر روی یک شبکه چند ماشینه پیاده‌سازی و تاثیر پارامترهای مختلف بر روی مقدار آستانه آن بحث شده است. در نهایت در بخش هفتم به نتیجه‌گیری مقاله پرداخته شده است.

۲ LOE و طرح متداول تشخیص آن

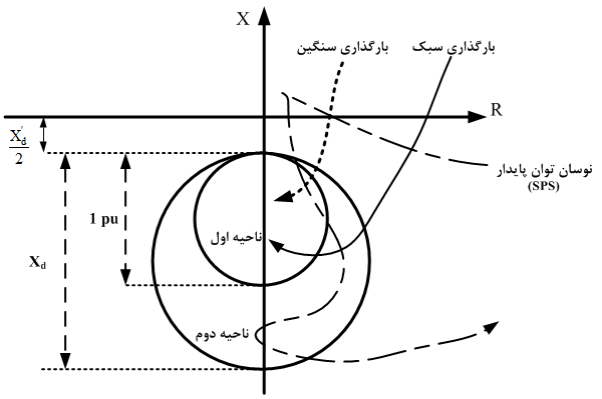
همان‌طور که اشاره شد روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس متداول‌ترین روش تشخیص LOE در ژنراتورهای سنکرون می‌باشند. معمولاً مشخصه‌ی عملکردی این رله‌ها متشکل از دو ناحیه‌ی حفاظتی است [۲ و۱۰]. ناحیه‌ی عملکردی اول این مشخصه به‌منظور شناسایی و تشخیص LOE در بارگذاری بالای ژنراتور استفاده می‌شود و تأخیر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

زمانی آن معمولاً معادل ۰/۱ ثانیه منظور می‌گردد [۲]. ناحیه‌ی دوم حفاظتی این رله علاوه بر پشتیبانی از ناحیه‌ی اول، جهت حفاظت LOE در مواقع کم‌باری ژنراتور به‌کار می‌رود. با توجه به این‌که در شرایط SPS احتمال ورود امپدانس نوسانی به این ناحیه‌ی عملکردی وجود دارد، جهت جلوگیری از عملکرد نابه‌جای آن تأخیر زمانی معادل ۰/۵ تا ۰/۶ ثانیه در نظر گرفته می‌شود [۲]. با وجود آن که تنظیم تأخیر زمانی برای این ناحیه‌ی عملکردی با توجه به مطالعات پایداری گذرا انجام می‌شود [۲]، امکان عملکرد نابه‌جای آن در شرایط تحت استرس شبکه به‌خصوص در شرایط SPS وجود دارد. از جمله موارد عملکرد نابه‌جای رله LOE می‌توان به حادثه‌ی خاموشی سراسری آمریکای شمالی در آگوست سال ۲۰۰۳ اشاره کرد که در آن ۱۳ مورد از مجموع ۲۹۰ خروج واحدهای نیروگاهی، مربوط به عملکرد نابه‌جای این نوع رله بوده است[۴].

شکل (۱) مشخصه‌ی عملکردی یک نوع رله و نحوه‌ی تنظیمات آن بر مبنای راکتانس‌های گذرا (X'_d) و سنکرون (X_d) ژنراتور را نشان می‌دهد [۲] که در آن، تغییرات امپدانس دیده‌شده توسط رله برای سه حالت شامل وقوع LOE در بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور و همچنین در شرایط وقوع SPS نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در حالت SPS امپدانس نوسانی برای مدتی وارد نواحی عملکردی رله شده که ممکن است موجب عملکرد نابه‌جای آن شود. احتمال وقوع این شرایط به‌خصوص زمانی‌که ژنراتور توان راکتیو از شبکه جذب می‌کند بالاتر است [۴].



شکل (۱): مشخصه‌ی عملکردی رله‌ی LOE و مکان هندسی تغییرات امپدانسی در شرایط مختلف

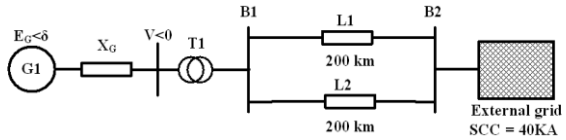
۳ -بررسی تغییرات کمیت‌های الکتریکی و مکانیکی ژنراتور بعد از وقوع LOE

زمانی‌که یک اغتشاش در داخل و یا نزدیکی یک ژنراتور سنکرون رخ می‌دهد کمیت‌های الکتریکی آن نظیر ولتاژ، جریان، توان اکتیو، توان راکتیو و زاویه‌ی توان از مقادیر نامی خود منحرف می‌شوند. در این شرایط ممکن است این کمیت‌ها تغییرات شدید و ناگهانی مانند شرایط اتصال کوتاه و یا تغییرات تدریجی و نوسانی نظیر شرایط SPS داشته باشند.

بعد از وقوع LOE در یک ژنراتور سنکرون، می‌توان در مورد تغییرات کمیت‌های الکتریکی آن به موارد ذیل اشاره نمود[۱]:

- به‌علت حذف عامل القای ولتاژ در ژنراتور، ولتاژ داخلی و در نتیجه ولتاژ پایانه‌ی ژنراتور، کاهش یافته و جریان راکتیو از شبکه جذب می‌نماید.
- جریان استاتور به‌سبب تأمین جریان اکتیو شبکه و جذب جریان راکتیو مورد نیاز سیم‌پیچ تحریک از شبکه، افزایش می‌یابد.
- توان حقیقی ژنراتور به‌صورت کاهشی و نوسانی تغییر می‌نماید.
- توان راکتیو خروجی ژنراتور (Q) به‌طور پیوسته کاهش یافته و (در صورت تأمین بخشی از توان راکتیو شبکه توسط ژنراتور قبل از وقوع LOE، که معمولاً همین‌گونه است) ضریب توان آن از حالت پیش‌فاز معمول به حالت پس‌فاز تغییر می‌کند. به‌عبارت دیگر، ژنراتوری که در شرایط عادی توان راکتیو به شبکه می‌دهد در شرایط LOE توان راکتیو مورد نیاز خود را از شبکه‌ی قدرت دریافت می‌نماید.
- ژنراتور دچار افزایش سرعت شده، سنکرونیزم خود را با شبکه از دست می‌دهد و در حالت ماندگار آسنکرون، با سرعتی بالای سرعت سنکرون به‌کار خود ادامه می‌دهد. لذا زاویه‌ی روتور آن (δ) به‌صورت فزاینده افزایش می‌یابد.

برای نشان‌دادن این تغییرات، یک سیستم تک ماشینه‌ی متصل به شین بینهایت[۴](SMIB) مطابق شکل (۲) در نظر گرفته شده و در محیط نرم‌افزار DIgSILENT [۱۱] مدل‌سازی شده است. سیستم‌های تحریک ژنراتور و گاورنر توربین نیز به‌ترتیب بر اساس مدل‌های IEEE-ESDC1A [۱۲] و IEEEG1 [۱۳] شبیه‌سازی شده‌اند. توان ظاهری ژنراتور ۶۰۰ مگاولت آمپر و ولتاژ نامی آن ۲۲ کیلوولت است. ظرفیت اتصال کوتاه[۵](SCC) شبکه خارجی معادل ۴۰ کیلوآمپر بوده که بیانگر یک شبکه قوی است. اطلاعات مربوط به عناصر این شبکه در پیوست ارائه گردیده است. سیستم‌هایی با ساختار مشابه در مراجع [۸] و [۱۰] جهت مطالعات LOE استفاده شده است.

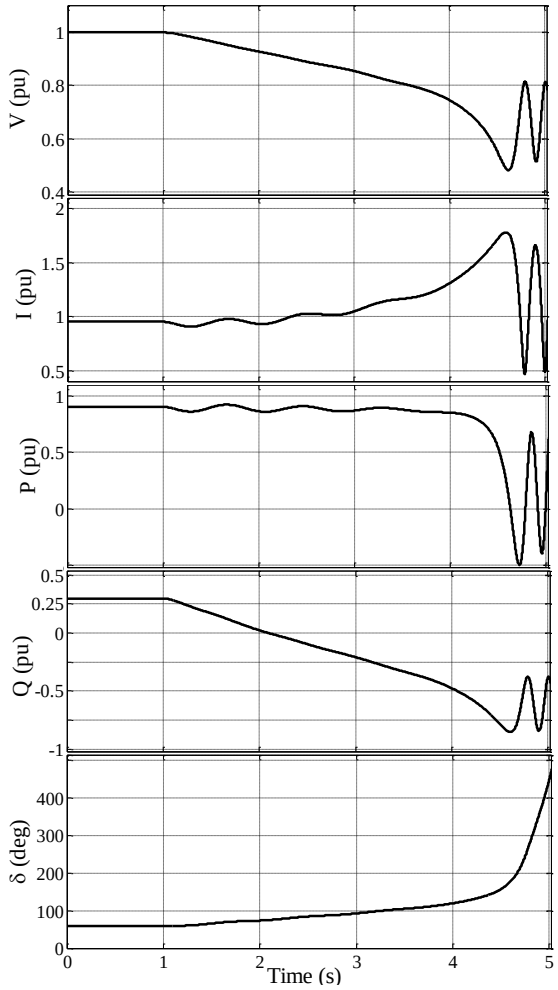


شکل(۲): سیستم SMIB مورد مطالعه

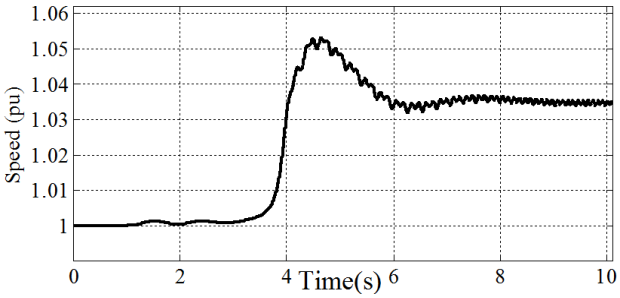
در شکل (۳) نمونه‌ای از تغییرات کمیت‌های الکتریکی (ولتاژ پایانه V، جریان خروجی I، توان اکتیو P، توان راکتیو Q و زاویه‌ی روتور δ) ژنراتور سیستم SMIB فوق برای وقوع LOE از لحظه‌ی t=1s نشان داده شده است. این شرایط برای بارگذاری ۹۵ درصدی ژنراتور و با ضریب توان ۰/۹۵ پیش‌فاز اعمال شده است. شکل (۴) نیز تغییرات سرعت ژنراتور بعد از وقوع LOE را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]



شکل (۳): تغییر کمیت‌های الکتریکی ژنراتور بعد از وقوع LOE



شکل (۴): تغییرات سرعت ژنراتور بعد از وقوع LOE

با توجه به شکل (۴) مشخص است که افزایش سرعت بعد از حدود ۴/۵ ثانیه متوقف شده و ژنراتور با لغزش نوسانی و متوسط ۳/۵ درصد سنکرونیزم خود را با شبکه از دست داده و به صورت آسنکرون به کار خود ادامه می‌دهد.

خروج از سنکرونیزم در ژنراتورهای سنکرون که در اثر وقوع LOE رخ می‌دهد، معمولاً پدیده‌ای سریع نمی‌باشد و بسته به بارگذاری ژنراتور، چندین ثانیه پس از این پدیده رخ می‌دهد. لغزش نهایی نیز متأثر از تنظیم گاورنر، امپدانس سیستم و بارگذاری اولیه‌ی ژنراتور می‌باشد. هر چه بارگیری از ژنراتور در لحظه وقوع LOE بیشتر باشد به لغزش نهایی بزرگتری در شرایط ماندگار (آسنکرون) منتهی خواهد شد. به عنوان مثال در ماشینی که در بار کامل مورد استفاده قرار گرفته است، لغزش نهایی حدوداً بین دو تا پنج درصد می‌باشد و توان خروجی ژنراتور در حالت پایدار آسنکرون کم‌تر از توان خروجی آن قبل از وقوع LOE است[۱].

۴ -روش پیشنهادی جهت تشخیص LOE

با فرض اینکه X یکی از متغیرهای الکتریکی ژنراتور (V، I، P، Q یا δ) باشد، تغییرات X در هر لحظه از زمان بعد از وقوع LOE را (به صورت پریونیت شده) می‌توان بصورت زیر نشان داد:

$$\Delta X^t = \frac{X^t - X^{t-T_s}}{X^b} \qquad (۱)$$

که در آن، T_s گام زمانی بین دو نمونه‌ی گسسته‌ی X بوده و X^b مقدار پایه‌ی کمیت مذکور می‌باشد به‌طوری‌که کمیت‌های V و I برمبنای مقادیر نامی، P و Q بر مبنای توان ظاهری ژنراتور (S) و δ برمبنای δ^0 پریونیت شده است که δ^0 نیز مقدار کمیت δ در حالت ماندگار قبل از وقوع LOE می‌باشد. شکل (۵) تغییرات متغیرهای ژنراتور را برای دو حالت بارگذاری سنگین (۹۵٪)، متوسط (۶۰٪) و سبک (۳۰٪) ژنراتور با ضریب توان ۰/۹۵ پیش‌فاز و با گام زمانی ۰/۳ ثانیه نشان می‌دهد.

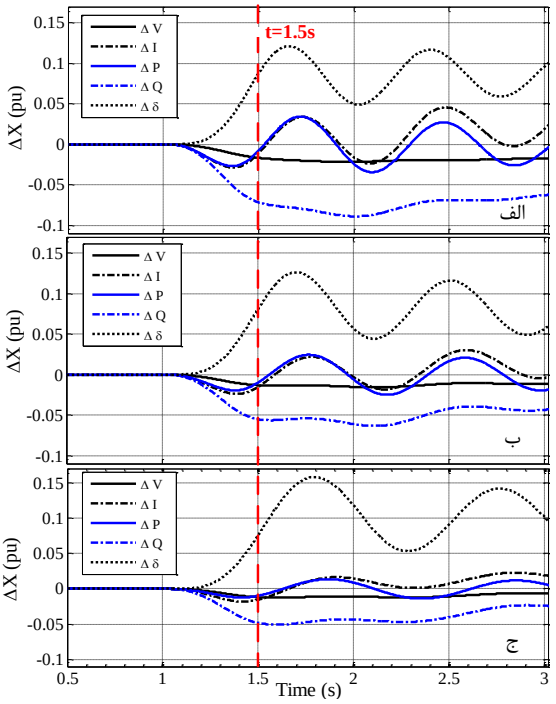
با توجه به شکل (۵) در لحظات اولیه بعد از وقوع LOE در مورد تغییرات کمیت‌های الکتریکی ژنراتور می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

- بر خلاف تغییرات V و Q که به صورت نزولی و منفی‌اند، تغییرات δ به صورت صعودی و مثبت است. اما P و I تغییراتی نوسانی (بین مقادیر مثبت و منفی) دارند. این نتایج با توجه به شکل (۳) و توضیحات ابتدای این بخش قابل پیش‌بینی بود.
- کاهش بارگذاری ژنراتور موجب کاهش میزان تغییرات کمیت‌های الکتریکی می‌شود.
- تغییرات Q و δ نسبت به کمیت‌های دیگر بیشتر بوده و با تغییر بارگذاری ژنراتور، تغییرات نسبی کم‌تری تجربه می‌کنند.

شایان ذکر است که در رابطه با انتخاب مقدار گام زمانی T_s، هر چه این زمان بیش‌تر انتخاب شود دامنه تغییرات پارامترها افزایش یافته و بر حساسیت آشکارسازی افزوده می‌گردد و لیکن این موضوع سبب ایجاد تأخیر در آشکارسازی نیز خواهد گردید. توضیحات بیشتر در بخش پنجم (قسمت ۵-۲-۵) ارائه شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]



شکل(۵) : تغییرات کمیت‌های ژنراتور به ازای بارگذاری ۹۵درصدی (الف)، بارگذاری ۶۰ درصدی (ب) و بارگذاری ۳۰درصدی (ج)

از آنجا که تغییرات هر یک از پارامترهای مذکور به تنهایی نمی‌تواند شاخص مناسبی از وقوع LOE باشد (ممکن است کمیت‌های مذکور در سایر اغتشاشات ژنراتور و سیستم تغییرات مشابهی داشته باشند. به عنوان نمونه کمیت δ در شرایط خطای اتصال کوتاه در سیستم و شرایط LOE تغییرات مشابه و افزایشی دارد)، در این مقاله از ترکیب آنها استفاده شده است. برای این منظور یک شاخص کلی تحت عنوان شاخص شناسایی قطع تحریک[۶] (LEDI) به صورت رابطه (۲) تعریف شده است:

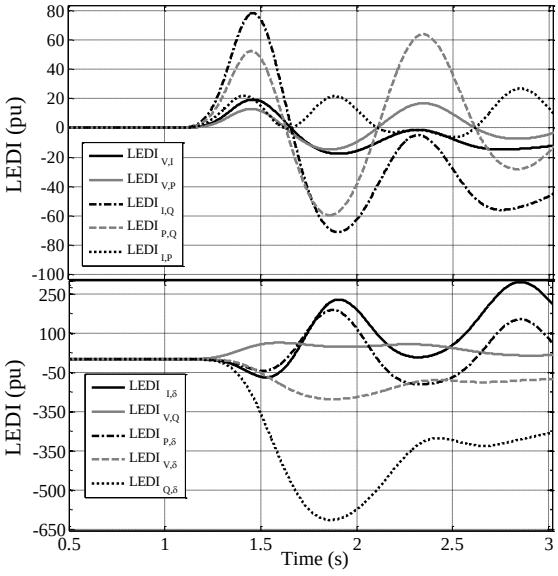
$$LEDI_{x_1,\ldots,x_i,\ldots,x_N} = K_G \times \prod_{i=1}^{N} \Delta X_i \qquad (۲)$$

که در آن، x_iها متغیرهای الکتریکی ژنراتور، N تعداد کمیت‌های استفاده شده در LEDI و K_G ضریب تقویت به منظور افزایش وضوح شاخص ارائه‌شده می‌باشد. با توجه به این‌که تغییرات کمیت‌های الکتریکی مورد نظر تحت شرایط LOE در رنج تغییرات ۰/۰۱ پریونیت می‌باشد (شکل۵، لحظه t=1.5s)، لذا حاصلضرب ΔX_iها در شاخص LEDI مقادیر بسیار کوچکی (از درجه $10^{-2\times N}$ ایجاد خواهد کرد. لذا مقدار این ضریب به صورت تابعی از N و طبق رابطه (۳) منظور شده است:

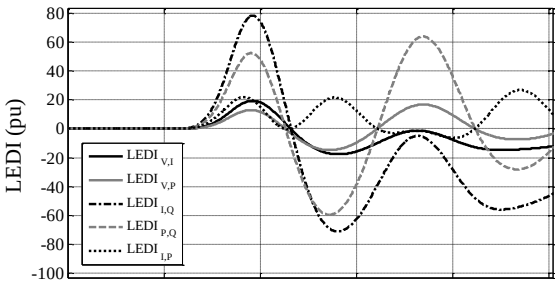
$$K_G = 10^{2\times N+1} \qquad (۳)$$

با این انتخاب در درجه اول وضوح شاخص مورد نظر افزایش می‌یابد [۱۰] و در درجه دوم مقایسه LEDIها برای مقادیر مختلف N امکان‌پذیر می‌شود. به طور کلی LEDI یک شاخص ترکیبی از حاصل ضرب تغییرات کمیت‌های الکتریکی ژنراتور می‌باشد. شایان ذکر است که حاصلضرب ΔX_iها به‌عنوان شاخصی ترکیبی از تغییرات کمیت‌های الکتریکی ژنراتور بعد از وقوع LOE، نیازی به ضرایب وزنی برای پارامترهای مختلف (همانگونه که در عملیات ترکیبی جمع و تفریق استفاده می شود) نداشته، از وضوح بالاتری نسبت به سایر ترکیبات برخوردار بوده و تغییر آن نیازمند تغییر تمامی پارامترهای مشارکت‌کننده در شاخص LEDI است و بر این اساس، ترکیب مناسبی برای این شاخص می‌باشد.

شکل (۶) تغییرات LEDI را به ازای ترکیبات مختلف دوتایی این شاخص در دو گروه پنج‌تایی برای حالت کم‌باری ژنراتور مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود با توجه به رفتار نوسانی کمیت‌های P و I بعد از وقوع LOE کلیه شاخص‌هایی که حداقل شامل یکی از این دو کمیت می‌باشند ماهیت نوسانی داشته و در شرایطی نظیر SPS که کمیت‌های الکتریکی رفتار نوسانی دارند، نمی‌توانند عملکرد مناسبی از خود نشان دهند. از طرف دیگر کاملاً مشخص است که شاخص‌های مشتمل بر ترکیب کمیت‌های V، Q و δ علاوه بر این که ماهیت نوسانی ندارند، از نظر اندازه نیز نسبت به سایر شاخص‌ها بزرگتر می‌باشند. لذا در ادامه این مقاله تمرکز بر شاخص‌های مبتنی بر این سه کمیت خواهد بود. شکل (۷) تغییرات LEDI مبتنی بر این کمیت‌ها را برای N=2 و N=3 و به منظور مقایسه نشان می‌دهد.



شکل (۶) : تغییرات LEDI برای ترکیبات دوتایی



شکل (۷): تغییرات LEDI مبتنی بر ترکیبات مختلف V، Q وδ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

با توجه به شکل (۷) مشخص است که بعد از وقوع LOE شاخص‌های تعریف شده شروع به تغییر می‌کنند. مقدار نهایی این شاخص‌ها نشان‌دهنده حاصلضرب نرخ نهایی تغییرات کمیت‌های حاضر در LEDI می‌باشد. همچنین مشخص است که در سیستم مورد مطالعه $LEDI_{Q,\delta}$ و $LEDI_{V,Q,\delta}$ دامنه و وضوح بیشتری نسبت به شاخص‌های دیگر دارا می‌باشند. از طرف دیگر $LEDI_{V,Q}$ که معادل با شاخص معرفی شده در مرجع [۱۰] می‌باشد، کمترین دامنه را نسبت به شاخص‌های ارائه شده دارد.

لازم به ذکر است که در روند شبیه‌سازی‌های این مقاله با استفاده از فازورهای ولتاژ ترمینال (V) و جریان خروجی (I) ژنراتور که با استفاده از الگوریتم فوریه گسسته (DFT)[۷] تمام سیکل و با فرکانس نمونه‌برداری ۱ کیلوهرتز محاسبه می‌شوند، مقادیر توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) ژنراتور نیز با استفاده از مقادیر فازور این کمیت‌ها قابل حصول می‌باشند.

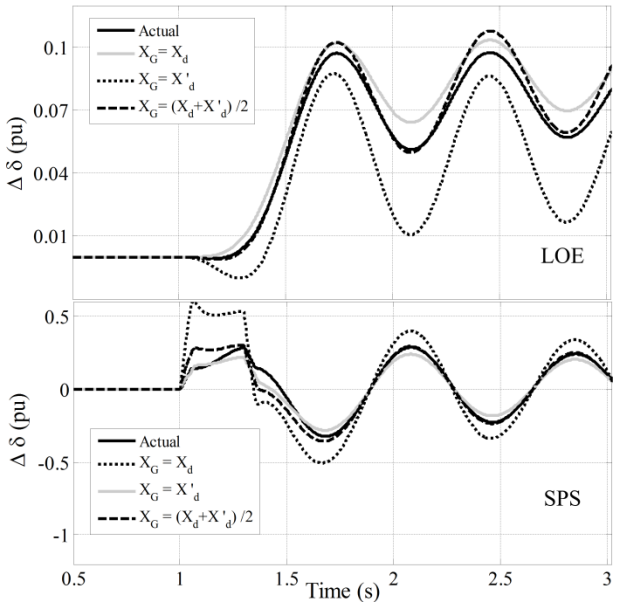
در رابطه با تخمین δ هم می‌توان از روش‌های مختلفی عمل کرد. از جمله می‌توان به روش استفاده شده در مراجع [۱۶-۱۵] اشاره کرد. در این روش زاویه δ با استفاده از مقادیر فازور ولتاژ پایانه ژنراتور در رابطه (۴) تخمین زده می‌شود.

$$E_G\angle\delta = V\angle 0 + jX_G \times I \qquad (۴)$$

با استفاده از (۴) ولتاژ داخلی ژنراتور ($\bar{E}_G$) با استفاده از مقادیر $\bar{V}$ و $\bar{I}$ قابل تخمین می‌باشد. در این رابطه مقدار X_G با توجه به شرایط عملکردی ژنراتور، ماهیت متغیری خواهد داشت به طوری که در شرایط اغتشاش و گذرای ژنراتور می‌توان از راکتانس زیرگذرای آن (X'_d) در (۴) استفاده نمود[۱۵]. در شرایط LOE بسته به بارگذاری اولیه، X_G نهایی که ژنراتور از خود نشان می‌دهد بر مبنای راکتانس‌های سنکرون و زیرگذرای ژنراتور در رابطه (۵) صادق است[۱].

$$\frac{X'_d + X'_q}{2} \le X_G \le \frac{X_d + X_q}{2} \qquad (۵)$$

قبل از وقوع LOE و در شرایط عملکرد عادی ژنراتور، X_G معادل X_d می‌باشد. با توجه به این‌که بازه زمانی مطالعه و واکنش ژنراتور در شرایط LOE وابسته به بارگذاری اولیه آن می‌تواند بین چند ثانیه تا چند ده ثانیه باشد، لذا می‌توان در ثانیه‌های ابتدایی بعد از وقوع LOE، X_G ژنراتور را معادل با X_d در نظر گرفت. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از X_d در شرایط LOE و استفاده از X'_d در شرایط SPS و سایر اغتشاشات بزرگ تخمین مناسبی از δ در رابطه (۴) ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که در این‌جا هدف محاسبه دقیق δ نبوده و صرفاً تغییرات آن ($\Delta\delta$) مدنظر می‌باشد. ازاین‌رو به منظور استفاده از یک مقدار واحد برای X_G در تخمین δ، مقدار این کمیت معادل با میانگین راکتانس‌های سنکرون و گذرای محور طولی ($\frac{X'_d + X_d}{2}$) در نظر گرفته شده است. با این روند در تخمین δ مصالحه‌ای بین شرایط LOE و SPS برقرار می‌شود. شکل (۸) نمونه‌ای از تخمین $\Delta\delta$ در شرایط LOE و SPS را به ازای مقادیر مختلف X_G نشان می‌دهد.



شکل (۸) : نمونه‌ای از تخمین $\Delta\delta$ در شرایط LOE (بالا) و SPS (پایین)

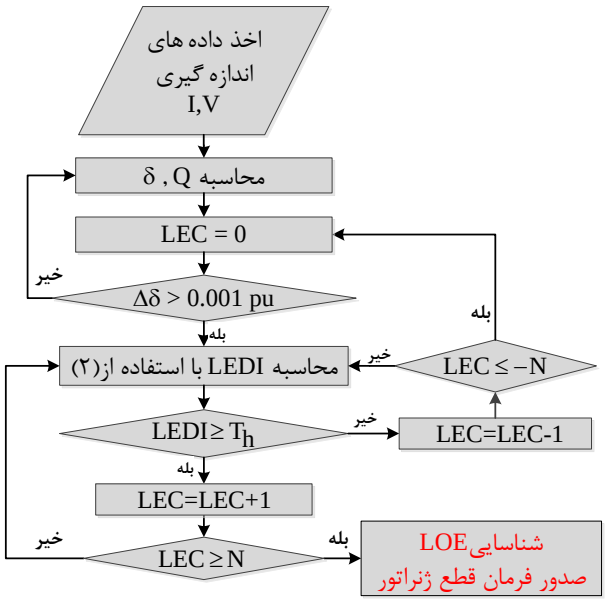
با توجه به این شکل مشخص است که استفاده از $\frac{X'_d + X_d}{2}$ نسبت به سایر مقادیر X_G، تخمین مناسب‌تری از $\Delta\delta$ ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که در این شکل مقدار واقعی $\Delta\delta$ با استفاده از مقادیر δ حاصل از نرم‌افزار Digsilent که از حل معادلات مرتبه هشت ژنراتور حاصل شده، محاسبه گردیده است.

روند شناسایی LOE در این مقاله بدین ترتیب است که اگر LEDI برای زمان مشخصی (T_{set}) از یک مقدار تنظیمی (Th) فراتر رود، LOE تشخیص داده می‌شود. انتخاب مقادیر T_{set} و Th نیازمند بررسی عملکرد LEDI در شرایط مختلف عملکردی ژنراتور و سیستم و در نظر گرفتن بدترین شرایط ممکن است. از جمله این موارد می‌توان به بارگذاری مختلف ژنراتور، امپدانس شبکه خارجی، تعداد واحدهای تولیدی مجاور در مدار و عملکرد در مواجهه با سایر اغتشاشات سیستم نظیر SPS ، اشاره نمود. زمان تنظیمی T_{set} را می‌توان با استفاده از یک منطق شمارنده پیاده‌سازی نمود. این منطق، شمارنده قطع تحریک[۸] (LEC) نام دارد. چنان‌چه LEDI از مقدار Th فراتر رود یک واحد به LEC اضافه می‌شود. در صورتی‌که LEC به مقدار نهایی تنظیمی (N) برسد، LOE شناسایی می‌شود. فعال‌کننده روند الگوریتم نیز می‌تواند بسیار ساده باشد. در این جا از $\Delta\delta$ برای این منظور استفاده شده است. چنان‌چه این کمیت از مقدار ۰/۰۰۱ پریونیت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

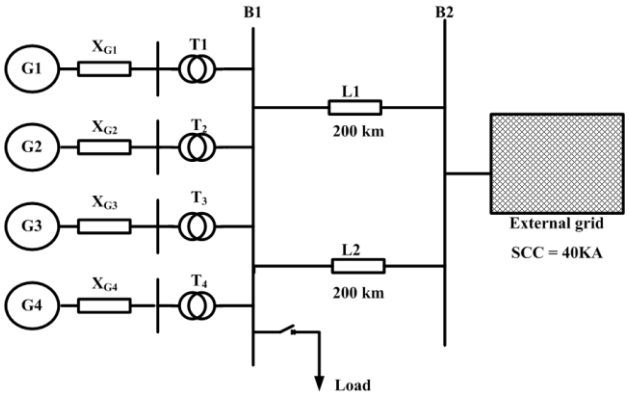
(برمبنای شبیه‌سازی) فراتر رود، الگوریتم فعال می‌شود. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل(۹): فلوچارت روش پیشنهادی

۵ -مطالعات شبیه‌سازی برای یک سیستم نمونه

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص LOE مطالعات شبیه‌سازی گسترده‌ای انجام شده و نتایج آن در این بخش ارائه گردیده است. ساختار سیستم مورد مطالعه در شکل (۱۰) نشان داده شده است. این شبکه در واقع همان شبکه SMIB شکل (۲) می‌باشد که تعداد واحدهای تولیدی آن به چهار واحد افزایش پیدا کرده است. هدف از این بخش ارزیابی رفتار LEDI مبتنی بر کمیت‌های V، Q و δ در تشخیص LOE تحت شرایط مختلف عملکردی سیستم می‌باشد. برای این منظور در بخش‌های بعدی ابتدا تأثیر عوامل مختلف بر LEDI به منظور تعیین پارامترهای Th و N بررسی شده است. در ادامه عملکرد روش پیشنهادی و طرح متداول برای چند حالت LOE و SPS مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.



شکل(۱۰): سیستم مورد مطالعه

۵ ۱ -تأثیر شرایط مختلف بر عملکرد LEDI

در این بخش هدف بررسی تأثیر شرایط مختلف عملکردی سیستم و ژنراتور بر تغییرات LEDI می‌باشد. از جمله این شرایط می‌توان به تغییر توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور، تغییر تعداد واحدهای تولیدی مجاور (NU)[۹] و تغییر ظرفیت اتصال کوتاه شبکه‌ی خارجی اشاره نمود.

۵ ۱ ۱ -تغییر توان اکتیو خروجی ژنراتور

شکل (۱۱- الف) تأثیر تغییر توان اکتیو خروجی ژنراتور را بر تغییر سطح LEDI در ضریب توان واحد نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که به طور تقریبی با افزایش توان خروجی ژنراتور، اندازه LEDI افزایش می‌یابد. به‌طوریکه در توان اکتیو خروجی بالا، LEDI دامنه و نوسان بیشتری دارد. همچنین همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در میان شاخص‌های ارائه شده در شرایط یکسان $LEDI_{V,Q}$ دارای کمترین و $LEDI_{V,Q,\delta}$ دارای بیشترین وضوح می‌باشد.

۵ ۱ ۲ -تغییر توان راکتیو خروجی ژنراتور

شکل (۱۱- ب) تأثیر تغییر توان راکتیو خروجی ژنراتور بر روی LEDI را نشان می‌دهد. در این بررسی توان اکتیو خروجی ژنراتور ثابت و معادل ۰/۶۵ پریونیت است. همچنین در سیستم مورد مطالعه حداقل و حداکثر توان راکتیو ژنراتور به ترتیب ۰/۵- و ۰/۵ پریونیت در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۱۱- ب) مشخص است که هرچه توان راکتیو ژنراتور بیشتر باشد سطح LEDI افزایش می‌یابد. کم‌ترین اندازه LEDI هم به ازای بیشترین توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور حاصل شده است.

۵ ۱ ۳ -تغییر تعداد واحدهای تولیدی مجاور

وجود واحدهای نیروگاهی در مجاورت ژنراتوری که دچار LOE شده، موجب می‌شود که توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور مذکور از طریق این واحدها تأمین شود و سیستم افت ولتاژ کمتری را تجربه نماید. کاهش نرخ افت ولتاژ پایانه ژنراتور در این شرایط می‌تواند موجب افزایش تأخیر در تشخیص LOE در طرح امپدانسی گردد. شکل (۱۱- ج) تأثیر تغییر تعداد واحدهای مجاور نیروگاهی را بر روی LEDI نشان می‌دهد. عملکرد واحدها در ۹۰ درصد بار نامی با ضریب توان ۰/۹۸ پیش‌فاز در نظر گرفته شده است. مطابق این شکل دامنه تغییرات LEDI با افزایش تعداد واحدهای تولیدی مجاور، در همه‌ی حالت‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین بدترین حالت برای LEDI را می‌توان حالتی که حداکثر واحدها در مدار باشند منظور نمود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

۵ ۱ ۴ -تغییر ظرفیت اتصال کوتاه (SCC) شبکه‌ی خارجی

ظرفیت اتصال کوتاه شبکه‌ی خارجی (SCC) نشان‌دهنده‌ی قوی بودن شبکه می‌باشد. به طوری که هر چه SCC بزرگتر باشد، امپدانس معادل شبکه کوچکتر و شبکه قوی‌تر تلقی می‌شود. چنان‌چه ژنراتوری به یک شبکه‌ی قوی متصل شده و دچار LOE شود، سنکرونیزم خود را دیرتر از زمانی که به یک شبکه ضعیف متصل شده از دست می‌دهد.

شکل (۱۱- د) تغییرات LEDI را برای تغییر SCC شبکه از محدوده‌ی یک شبکه‌ی ضعیف تا یک شبکه‌ی قوی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که به جز شاخص $LEDI_{Q,\delta}$ در همه شاخص‌های دیگر با افزایش SCC شبکه‌ی خارجی دامنه‌ی تغییرات LEDI کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر هرچه شبکه قوی‌تر باشد اندازه‌ی تغییرات LEDI کوچک‌تر می‌شود. البته در مورد $LEDI_{Q,\delta}$ عکس این قضیه صادق است و با افزایش قدرت شبکه‌ی خارجی سطح این شاخص افزایش می‌یابد.

۵ ۱ ۵ -تأثیر پارامتر T_S بر شاخص LEDI

شکل (۱۲) تاثیر افزایش T_S بر شاخص $LEDI_{V,Q}$ را برای یک مورد LOE نشان می‌دهد. با توجه با این شکل مشخص است که با افزایش T_S سطح تغییرات LEDI افزایش می‌یابد. البته علیرغم آنکه با افزایش T_S حساسیت الگوریتم بیشتر می‌شود اما بر میزان تأخیر در تشخیص LOE نیز افزوده خواهد گردید. بر این اساس، با در نظر گرفتن عوامل فوق و بررسی شرایط مختلف برای روش پیشنهادی، در این مقاله مقدار T_s معادل ۳۰۰ میلی‌ثانیه انتخاب شده است.

۵ ۱ ۶ -تعیین مقادیر تنظیمی Th و N

در بخش چهارم، تأثیر عوامل مختلف بر روی شاخص LEDI مورد بررسی قرار گرفت که می‌توان خلاصه‌ی آن را به‌ترتیب ذیل برشمرد:

- با کاهش توان اکتیو خروجی ژنراتور، اندازه LEDI کاهش می‌یابد.
- کاهش توان راکتیو خروجی ژنراتور، از دامنه‌ی LEDI خواهد کاست.
- با افزایش تعداد واحدهای نیروگاهی مجاور، از دامنه‌ی LEDI کاسته می‌شود.
- افزایش ظرفیت اتصال کوتاه شبکه‌ی خارجی، LEDI کم‌تری را نتیجه خواهد داد. البته این شرایط برای $LEDI_{Q,\delta}$ برعکس می‌باشد و با افزایش قدرت شبکه‌ی خارجی، دامنه‌ی این شاخص افزایش می‌یابد.

بر اساس نتایج فوق، بدترین شرایط وقوع LOE از نظر LEDI مربوط به حالتی است که ژنراتور به یک شبکه قوی متصل شده و بیشترین واحدهای تولیدی در حال بهره‌برداری باشند، توان اکتیو خروجی ژنراتور حداقل مقدار ممکنه بوده و حداکثر توان راکتیو ممکنه را از شبکه جذب نماید. فقط در مورد شاخص $LEDI_{Q,\delta}$ این استثنا وجود دارد که بدترین شرایط در حالتی رخ می‌دهد که ژنراتور به ضعیف‌ترین شبکه‌ی خارجی متصل شده باشد.

هدف از درنظرگرفتن بدترین شرایط ممکن در وقوع LOE که منجر به LEDI با کمترین تغییرات خواهد شد، تعیین حدود آستانه (Th) برای تشخیص LOE می‌باشد. این کمیت با درنظرگرفتن حاشیه‌ی امنیت مناسب، ۱۰٪ دامنه‌ی اولین نقطه اکسترمم نسبی در تابع LEDI (به ازای بدترین شرایط) انتخاب شده است. شکل (۱۳) تغییرات LEDI برای بدترین شرایط ممکن را به همراه مقادیر Th انتخابی نشان می‌دهد. در این شرایط مقادیر کمیت‌های P، Q، NU و SCC به ترتیب ۰/۳ پریونیت، ۰/۵- پریونیت، ۴ و ۴۰ کیلوآمپر در نظر گرفته شده‌اند. در رابطه با $LEDI_{Q,\delta}$ کمیت SCC معادل 5KA انتخاب شده است. اولین نقطه‌ی اکسترمم LEDI در هر حالت تحت عنوان $LEDI_{Max}$ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تمام مطالعات شبیه‌سازی‌شده در این مقاله و به منظور تعیین بدترین شرایط وقوع LOE، حداقل توان اکتیو خروجی و حداکثر توان راکتیو جذبی توسط ژنراتورها به ترتیب ۰/۳ و ۰/۵- پریونیت در نظر گرفته شده است.

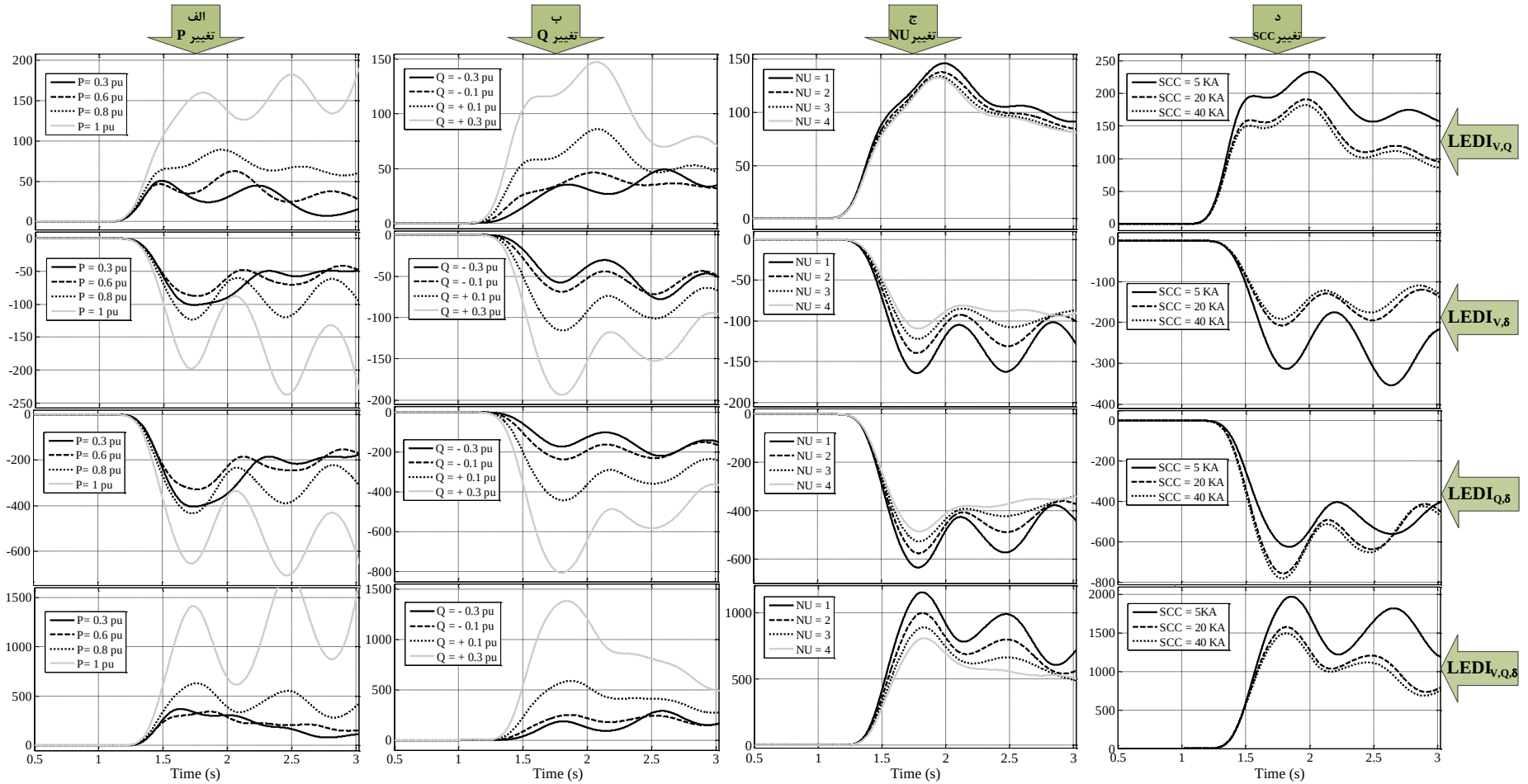
در رابطه با انتخاب کمیت N نیز که نشان‌دهنده‌ی مقدار نهایی LEC به منظور تشخیص LOE می‌باشد، لازم است که این کمیت به اندازه‌ای بزرگ انتخاب شود که از وقوع LOE اطمینان حاصل شده و در مواجهه با سایر اغتشاشات از قبیل SPS عملکرد نابه‌جایی صورت نگیرد. در این مطالعه با درنظرگرفتن فرکانس نمونه‌برداری یک کیلوهرتز، مقدار پارامتر N معادل ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده که با این رویکرد، چنان‌چه LEDI به مدت یک ثانیه (۱۰۰۰ نمونه) فراتر از Th قرار گیرد، LOE شناسایی خواهد شد.

۵ ۴ -مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با طرح متداول امپدانسی

در این بخش به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص LOE و مقایسه‌ی آن با طرح معمول امپدانسی، چند مورد شبیه‌سازی انجام شده و نتایج آن ارائه گردیده‌اند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

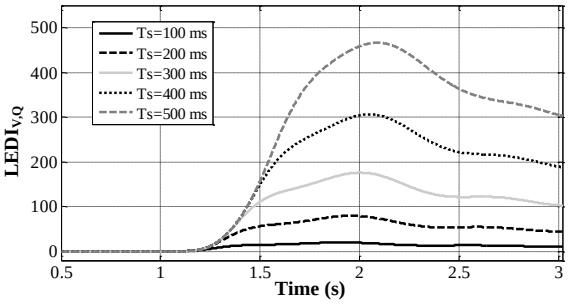
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]



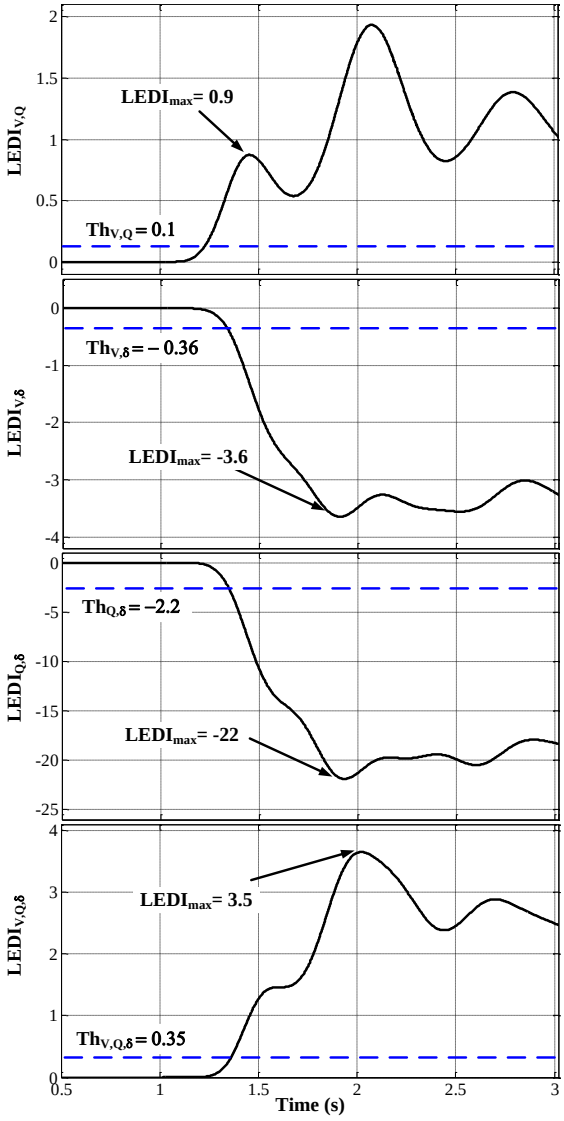
شکل (۱۱): اثر تغییر کمیت‌های توان اکتیو (الف)، توان راکتیو (ب)، تعداد واحدهای تولیدی (ج) و ظرفیت اتصال کوتاه شبکه‌ی خارجی (د) بر LEDI

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]



شکل(۱۲): تأثیر افزایش T_S بر LEDI



شکل (۱۳): تغییرات LEDIهای معرفی‌شده به ازای بدترین شرایط ممکن برای تعیین مقادیر آستانه (Th)

۵ ۲ ۱- وقوع LOE در بارگذاری سنگین

در این حالت، ژنراتور با بارگذاری ۹۵ درصدی و ضریب توان ۰/۹۵ پیش‌فاز مشغول کار بوده که خطای LOE در لحظه‌ی t=1s اتفاق می‌افتد. شکل (۱۴- الف) عملکرد LEDIهای معرفی‌شده در مقایسه با طرح متداول امپدانسی را برای این حالت نشان می‌دهد. مطابق این شکل در طرح متداول، منحنی امپدانس حدود ۴/۰۵۱ و ۴/۴۴۳ ثانیه بعد از وقوع LOE به‌ترتیب وارد نواحی دوم و اول رله می‌گردد. با درنظرگرفتن تأخیر زمانی ۰/۱ و ۰/۵ ثانیه برای نواحی عملکردی اول و دوم، این طرح بعد از گذشت زمان ۴/۵۴۳ ثانیه از لحظه‌ی وقوع LOE آن را در ناحیه اول عملکردی تشخیص خواهد داد. این در حالی است که در روش پیشنهادی LOE حداکثر ۱/۲۵۴ ثانیه بعد از لحظه‌ی وقوع آن، شناسایی می‌شود.

۵ ۲ ۲- وقوع LOE در بارگذاری سبک

در این حالت ژنراتور در ۳۰ درصد توان نامی و در ضریب توان ۰/۹۵ پیش‌فاز مشغول به کار می‌باشد که LOE رخ می‌دهد. شکل (۱۴- ب) عملکرد LEDIهای تعریف شده در مقایسه با طرح متداول امپدانسی را برای این حالت نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است در این حالت روش پیشنهادی قادر است حداکثر طی ۱/۲۹۳ ثانیه پس از وقوع LOE آن را تشخیص دهد در حالیکه در طرح متداول، منحنی امپدانس پس از ۱۰/۰۷ ثانیه از لحظه‌ی وقوع LOE وارد ناحیه دوم عملکردی رله می‌شود و بعد از ۱۰/۵۷۰ ثانیه توسط ناحیه‌ی حفاظتی دوم LOE شناسایی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که روش پیشنهادی قادر است LOE در شرایط بارگذاری مختلف ژنراتور را با سرعتی بالا و تقریباً یکسان شناسایی نماید در حالی که در طرح متداول امپدانسی، اختلاف زمانی در تشخیص LOE توسط رله، شدیداً به بارگذاری ژنراتور وابسته است.

۵ ۲ ۳- وقوع SPS در سیستم

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد طرح‌های امپدانسی متداول جهت شناسایی LOE ممکن است در شرایط نوسان توان ژنراتور دچارعملکرد نابه‌جا شوند. در این قسمت جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با SPS یک نمونه شبیه‌سازی بر روی سیستم مورد مطالعه انجام شده است. برای ایجاد یک SPS در سیستم مورد مطالعه، یک خطای اتصال‌کوتاه سه فاز در وسط خط ۲ در لحظه ۰/۷۸ ثانیه اعمال و این خطا بعد از ۲۲۰ میلی‌ثانیه با عملکرد کلیدهای دو سر خط از مدار خارج و سیستم از لحظه t=1s به حالت نوسانی وارد می‌شود. جهت ایجاد یک نوسان مطلوب، توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور به ترتیب برابر ۰/۵۸ و ۰/۵- پریونیت در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۱۴- ج) تغییرات LEDI را به همراه عملکرد طرح متداول برای این حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این حالت طرح متداول به دلیل ورود و حضور طولانی مدت امپدانس نوسانی در ناحیه‌ی دوم حفاظتی (حدود ۸۰۰ میلی‌ثانیه)، عملکرد نابه‌جا از خود نشان خواهد داد. همچنین با توجه به این شکل مشخص است که به‌جز $LEDI_{V,Q,\delta}$ سایر شاخص‌های LEDI عملکرد نادرستی در مواجهه با

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

شرایط SPS از خود نشان داده‌اند. به منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد LEDI در مواجهه با SPS و سایر اغتشاشات سیستم، در بخش (۵-۳-۵) مطالعات جامع‌تری انجام شده است

۵ ۲ ۴ -نتایج حاصل از عملکرد روش پیشنهادی به ازای وقوع LOE در شرایط مختلف بهره‌برداری

در این قسمت نتایج حاصل از عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با طرح متداول به ازای شرایط مختلف بهره‌برداری در سیستم مورد مطالعه، در جدول (۱) ارائه شده است. بر این اساس، در مورد عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با طرح متداول به نکات ذیل اشاره نمود:

- با افزایش بارگذاری ژنراتور زمان عملکرد روش پیشنهادی در حد چند ده میلی‌ثانیه افزایش می‌یابد. در حالی‌که در طرح متداول این افزایش زمان عملکرد در حد چند ثانیه می‌باشد (موارد ۱ تا ۳ از جدول (۱)).
- افزایش تعداد واحدهای نیروگاهی (NU)، زمان عملکرد طرح متداول را چند صد میلی‌ثانیه و زمان عملکرد LEDI را در حد چند ثانیه افزایش می‌دهد (موارد ۴ تا ۶ از جدول(۱)).
- تأثیر تغییر SCC شبکه خارجی بر روی زمان‌عملکرد طرح متداول بیشتر از روش مبتنی بر LEDI می‌باشد (موارد ۷ تا ۹ از جدول (۱)).
- تغییر PF ژنراتور از حالت پیش‌فاز به پس‌فاز در زمان عملکرد LEDI تأثیر چندانی ندارد. در حالی‌که در طرح متداول این تأثیر در محدوده‌ی چند ثانیه می‌باشد (موارد ۱۰ تا ۱۱ از جدول (۱)).
- با افزایش توان راکتیو جذب شده توسط ژنراتور، زمان عملکرد طرح متداول کاهش و زمان عملکرد LEDI افزایش می‌یابد. این تغییر زمان عملکرد برای هر دو روش در حد چند صد میلی‌ثانیه است (موارد ۱۲تا ۱۳ از جدول (۱)).

به عنوان نتیجه‌گیری کلی از جدول (۱) می‌توان گفت که روش پیشنهادی مبتنی بر LEDI فارغ از بارگذاری ژنراتور و توپولوژی شبکه،LOE را بسیار سریع‌تر از طرح متداول تشخیص می‌دهد.

جدول (۱): نتایج حاصل از وقوع LOE در شرایط مختلف بهره‌برداری در سیستم مورد مطالعه

#	بارگذاری ژنراتور		NU	SCC (KA)	زمان تشخیص (ثانیه)				
	P (pu)	Q (pu)			$LEDI_{V,Q}$	$LEDI_{V,\delta}$	$LEDI_{Q,\delta}$	$LEDI_{V,Q,\delta}$	طرح متداول
۱	۰/۹	۰/۳	۱	۴۰	۱/۱۳۶	۱/۲۴۵	۱/۲۵۴	۱/۲۲۲	۴/۵۵۱
۲	۰/۵۷	۰/۱۸۶	۱	۴۰	۱/۱۴۶	۱/۲۵۷	۱/۲۶۹	۱/۲۳۵	۶/۵۲۶
۳	۰/۲۸۵	۰/۰۹۳	۱	۴۰	۱/۱۵۵	۱/۲۶۸	۱/۲۸۲	۱/۲۴۷	۱۰/۵۷
۴	۰/۷۶	۰/۲۵	۱	۴۰	۱/۱۴۰	۱/۲۲۵	۱/۲۵۶	۱/۲۲۷	۵/۲۰۰
۵	۰/۷۶	۰/۲۵	۲	۴۰	۱/۱۴۰	۱/۲۵۵	۱/۲۵۹	۱/۲۲۹	۵/۴۳۳
۶	۰/۷۶	۰/۲۵	۴	۴۰	۱/۱۴۱	۱/۲۶۴	۱/۲۶	۱/۲۳۲	۵/۷۸۸
۷	۰/۸۵	۰/۲۸	۴	۵	۱/۱۳۸	۱/۲۴۷	۱/۲۷۵	۱/۲۳۸	۴/۲۴۸
۸	۰/۸۵	۰/۲۸	۴	۲۰	۱/۱۳۸	۱/۲۶۳	۱/۲۶۰	۱/۲۳۰	۵/۲۴۷
۹	۰/۸۵	۰/۲۸	۴	۴۰	۱/۱۳۸	۱/۲۶۱	۱/۲۵۷	۱/۲۲۹	۵/۲۸۳
۱۰	۰/۶۶	۰/۲۱۶	۱	۴۰	۱/۱۴۳	۱/۲۵۴	۱/۲۶۴	۱/۲۳۱	۵/۷۷۸
۱۱	۰/۶۶	-۰/۲۱۶	۱	۴۰	۱/۱۹۴	۱/۳۰۸	۱/۳۳۱	۱/۲۹۴	۳/۶۰۸
۱۲	۰/۵	-۰/۳	۱	۴۰	۱/۲۳۲	۱/۳۴۴	۱/۳۷۸	۱/۳۳۸	۳/۵۲۲
۱۳	۰/۵	-۰/۴	۱	۴۰	۱/۲۹۲	۱/۳۸۲	۱/۴۲۶	۱/۳۹۰	۲/۹۸۱

نتایج عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با سایر اغتشاشات سیستم

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یک طرح حفاظتی به منظور تشخیص LOE در ژنراتور بایستی توانایی تمایز این پدیده از سایر اغتشاشات سیستم از قبیل SPS را داشته باشد. طرح‌های متداول امپدانسی همواره در معرض عملکرد نابه‌جا در شرایط SPS قرار دارند و احتمال وقوع این شرایط به‌ویژه زمانی که ژنراتور توان راکتیو از شبکه جذب می‌نماید، افزایش می‌یابد. در بخش چهارم نیز یک مورد شبیه-سازی بر روی سیستم مورد مطالعه صحت این ادعا را اثبات کرد. البته مطابق شکل (۱۴- ج)، بجز $LEDI_{V,Q,}$ سایر شاخص‌های LEDI در مواجهه با SPS عملکرد نابه‌جا از خود نشان داده‌اند. این عملکرد نابه‌جا به‌دلیل رسیدن منطق شمارنده LEC به مقدار نهایی خود (N=1000) در حین SPS می‌باشد.

در این بخش عملکرد روش پیشنهادی در مواجهه با شرایط SPS مورد بررسی بیشتر قرار گرفته و نتایج به صورت جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول، موارد ۱ تا ۷ مربوط به SPS هایی هستند که با اعمال خطای اتصال‌کوتاه سه‌فاز در وسط خط L_2 با زمان رفع خطای t_c از لحظه t=1s اعمال شده‌اند. سایر اغتشاشات بررسی شده در این

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

جدول نیز از لحظه t=1s اعمال شده‌اند. در موارد ۱۰ و ۱۱ از این جدول بار محلی مطابق شکل (۱۰) در باس B_1 متصل شده است.
با توجه به نتایج جدول مذکور مشخص است که تنها $LEDI_{V,Q,\delta}$ در مواجهه با اغتشاشات، عملکرد نابه‌جا از خود نشان نداده و لذا این شاخص به‌عنوان بهترین معیار برای شناسائی پدیده‌ی LOE معرفی می‌گردد.

۵ ۳ -بررسی حساسیت $LEDI_{V,Q,\delta}$ به پارامترهای مختلف مشارکت‌کننده

اگرچه تأثیر عوامل مختلف بر تغییرات شاخص LEDI در بخش (۵-۱) مورد بررسی قرار گرفت و بدترین شرایط برای وقوع LOE بر اساس حداقل توان اکتیو خروجی ژنراتور، حداکثر توان راکتیو جذبی ژنراتور، حداکثر تعداد واحدهای تولیدی در مدار و بالاترین قدرت شبکه‌ی خارجی تعریف شد، باید به این نکته توجه نمود که از میان چهار پارامتر یادشده، تأثیر موارد سوم و چهارم بمراتب از موارد اول و دوم کمتر است بطوریکه در سیستم مورد مطالعه، حد آستانه:

- به ازای افزایش بار اکتیو به میزان ۰/۳ پریونیت، به ۲۵ (با ۷۰۴۲٪ افزایش) خواهد رسید؛
- به ازای تغییر جهت توان راکتیو، به ۲۵۱ (با ۷۱۶۱۴٪ افزایش) خواهد رسید؛

این در حالیست که این حد:

- به ازای وجود یک واحد در مدار (NU=1) به ۰/۷۶ (با ۱۱۷٪ افزایش) خواهد رسید؛
- به ازای کاهش قدرت اتصال کوتاه شبکه متصله از ۴۰ به ۵ مگاولت آمپر، به ۰/۴۳ (با ۲۳٪ افزایش) خواهد رسید.

همچنین در شرایطی که سیستم قدرت مذکور به شبکه‌ی ضعیف (با SCC=5) وصل است حد آستانه که در بدترین حالت معادل ۰/۴۳ خواهد بود بدون درنظرگرفتن واحدهای موازی با ژنراتور G1، به ۰/۸۲ (با ۹۱٪ افزایش) خواهد رسید و این در حالیست که افزایش توان اکتیو به میزان ۰/۳ پریونیت آن را به ۳۶/۴ (با ۸۳۶۵٪ افزایش) و تغییر جهت توان راکتیو آن را به ۱۸۴/۴ (با ۴۲۷۸۳٪ افزایش) خواهد رساند.

اگر چه این ارقام نمایانگر حساسیت بسیار زیاد LEDI به عوامل اول و دوم در مقایسه با عوامل سوم و چهارم است، از آنجا که برای تعیین حد آستانه، بدترین حالت می بایست ملاک کار قرار گیرد، بهتر است که تعداد واحدهای موجود در مدار و قدرت اتصال کوتاه شبکه های متصل به سیستم را نیز منظور نمود.

در قالب یک نتیجه‌ی کلی می‌توان گفت که تغییرات SCC و NU تاثیر به مراتب کم‌تری نسبت به تغییر بارگذرای و ضریب توان ژنراتور در تنظیم حد آستانه دارند و لذا در تنظیم مقدار آستانه برای شاخص $LEDI_{V,Q,\delta}$ بایستی شرط حداقل توان اکتیو خروجی و حداکثر توان راکتیو جذبی به‌دقت اعمال شوند. همچنین اگر واحدهای نیروگاهی در مجاورت ژنراتور مورد مطالعه وجود دارد، بهتر است تأثیر آن‌ها هم در نظر گرفته شده و قوی‌ترین حالت شبکه با حضور تمامی منابع تولید توان در سیستم منظور گردد.

۶ -ارزیابی عملکرد $LEDI_{V,Q,\delta}$ در یک شبکه‌ی چند ماشینه‌ی کوچک

در این بخش به بررسی پیاده‌سازی و عملکرد الگوریتم ارائه‌شده مبتنی بر $LEDI_{V,Q,\delta}$ در یک سیستم چند ماشینه‌ی کوچک [۱۸-۱۷] مطابق شکل (۱۵) پرداخته شده که متشکل از سه ژنراتور و یک شبکه‌ی معادل‌سازی شده‌ی متصل به سیستم است.

در تعیین بدترین شرایط وقوع LOE برای هر ژنراتور، مجدداً کمترین مقدار توان اکتیو خروجی و بیشترین توان راکتیو جذبی به ترتیب معادل ۰/۳ و ۰/۵- پریونیت انتخاب شده‌اند. از آن‌جا در مجاورت ژنراتورهای این سیستم واحدهای تولیدی دیگری وجود ندارد، لذا کمیت NU برای هر یک از این ژنراتورها معادل یک (NU=1) است. قوی‌ترین حالت شبکه (حداکثر جریان اتصال‌کوتاه) از دید باس خروجی هر ژنراتور نیروگاه (برای حصول بدترین شرایط) زمانی حاصل می‌شود که همه واحدهای تولیدی سیستم در حال کار بوده و شبکه-های متصله به سیستم نیز با بالاترین قدرت اتصال کوتاه لحاظ شده باشند. در شکل (۱۶) تغییرات $LEDI_{V,Q,\delta}$ در بدترین شرایط به همراه مقادیر Th انتخابی برای هرسه ژنراتور این سیستم نشان داده شده است.

شکل (۱۷) عملکرد $LEDI_{V,Q,\delta}$ در تشخیص LOE برای هریک از ژنراتورهای سیستم را درشرایط بارگذاری سنگین آن‌ها (بارگذاری ۹۰٪ و ضریب توان ۰/۹پیش‌فاز) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که شرایط LOE با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به راحتی قابل تشخیص است.

برای بررسی حساسیت شاخص LEDI به پارامترهای مختلف نیز لازم است تغییرات این شاخص به ازای تغییر پارمترهای مختلف ارائه گردد. حد آستانه‌ی LEDI که در بدترین شرایط برای ژنراتور G_2 معادل ۰/۱۹ بوده است:

- به ازای افزایش بار اکتیو به میزان ۰/۳ پریونیت، به ۶/۹ (با ۳۵۳۱٪ افزایش) خواهد رسید؛
- به ازای تغییر جهت توان راکتیو، به ۷۴۶ (با ۳۹۲۵۳۲٪ افزایش) خواهد رسید؛

این در حالیست که این حد:

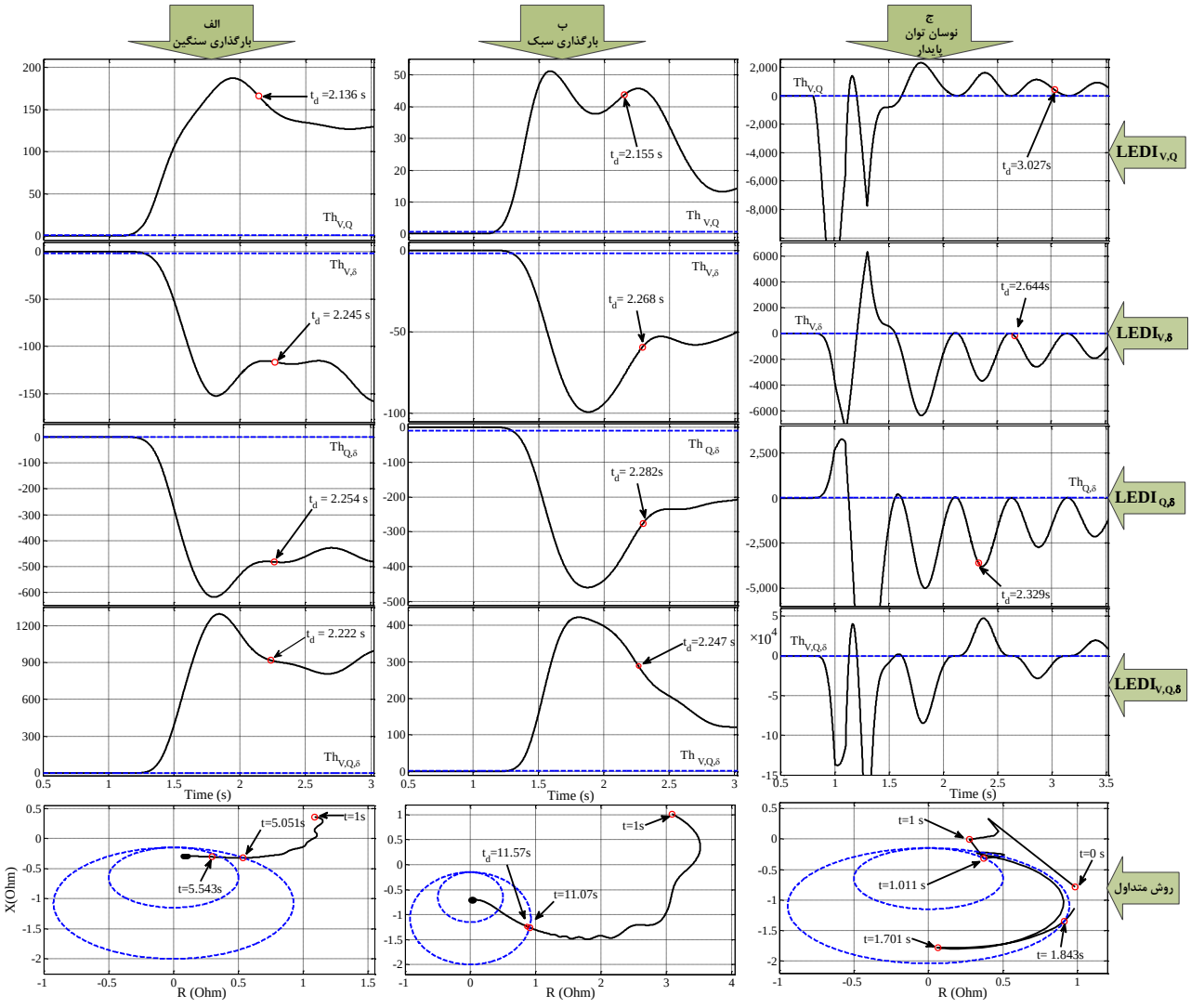
- با خروج ژنراتورهای G_1 و G_3 از مدار، به ۰/۲۰۵ (با ۸٪ افزایش) خواهد رسید؛
- به ازای کاهش قدرت اتصال کوتاه شبکه متصله از ۴۰ به ۵ مگاولت آمپر، به ۰/۲۶ (با ۳۷٪ افزایش) خواهد رسید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

همچنین در شرایطی که سیستم قدرت مذکور به شبکه‌ی ضعیف (با SCC=5) وصل است حد آستانه‌ی ۰/۲۶، با خروج ژنراتورهای G_1 و G_3 به ۰/۳۱ (با ۱۹٪ افزایش) خواهد رسید و این در حالیست که حد آستانه با افزایش توان اکتیو به میزان ۰/۳ پریونیت، به ۱۰/۱ (با ۳۷۸۵٪ افزایش) و تغییر جهت توان راکتیو به ۷۶۱ (با ۲۹۲۵۹۲٪ افزایش) خواهد رسید.

مجدداً می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات بارگذاری و ضریب توان ژنراتور در تنظیم حد آستانه نقشی اساسی و مهم ایفا کرده و لذا در تنظیم مقدار آستانه برای شاخص $LEDI_{V,Q,\delta}$ بایستی به شروط حداقل توان اکتیو خروجی و حداکثر توان راکتیو جذبی توجه ویژه داشت.



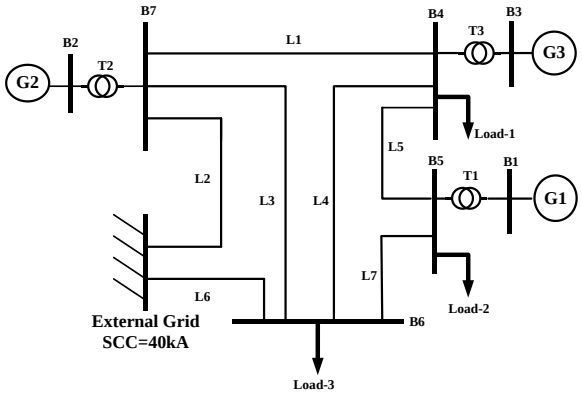
شکل(۱۴): عملکرد LEDI در مقایسه با طرح متداول امپدانسی به ازای وقوع LOE در بارگذاری‌های سنگین (الف) و سبک (ب) و در شرایط نوسان توان پایدار (ج)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

جدول (۲): مقایسه‌ی عملکرد روش پیشنهادی با روش متداول امپدانسی در مواجهه با شرایط SPS

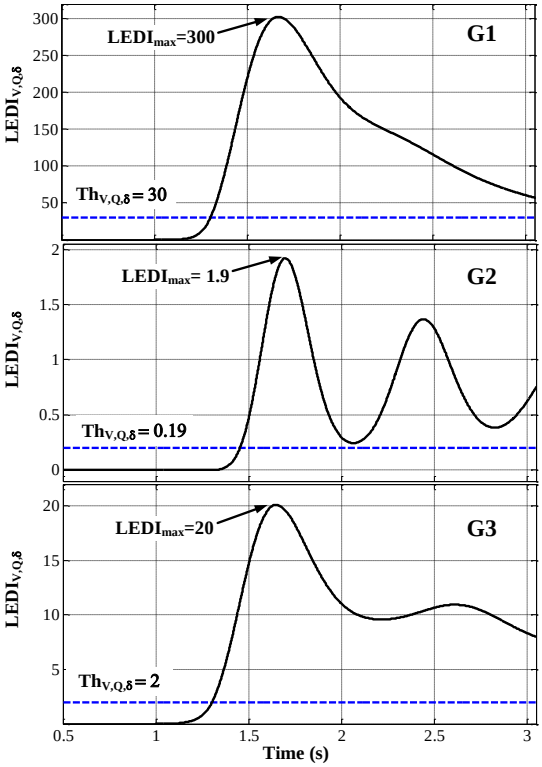
#	نوع اغتشاش عامل SPS	t_c(ms)	بارگذاری ژنراتور		نحوه‌ی عملکرد				
			P (pu)	Q (pu)	$LEDI_{V,Q}$	$LEDI_{V,\delta}$	$LEDI_{Q,\delta}$	$LEDI_{V,Q,\delta}$	طرح متداول
۱	خطای اتصال‌کوتاه	۱۵۰	۰/۸	۰/۳	عدم عملکرد	عملکرد نادرست بعد از ۲/۰۱۱ ثانیه	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۲	خطای اتصال‌کوتاه	۱۰۰	۰/۸	۰/۳	عدم عملکرد	عملکرد نادرست بعد از ۲/۰۹۵ ثانیه	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۳	خطای اتصال‌کوتاه	۱۰۰	۰/۵	۰/۲	عملکرد نادرست بعد از ۲/۰۹۹ ثانیه	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۴	خطای اتصال‌کوتاه	۲۵۰	۰/۵	۰/۲	عملکرد نادرست بعد از ۲/۰۹۸ ثانیه	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۵	خطای اتصال‌کوتاه	۲۴۰	۰/۶۶۷	-۰/۴	عملکرد نادرست بعد از ۲/۹۲۶ ثانیه	عملکرد نادرست بعد از ۱/۴۵۴ ثانیه	عملکرد نادرست بعد از ۱/۳۸۰ ثانیه	عدم عملکرد	عملکرد نادرست بعد از ۱/۸۷۰ ثانیه
۶	خطای اتصال‌کوتاه	۲۰۰	۰/۶۶۷	-۰/۴۵	عملکرد نادرست بعد از ۲/۰۰۵ ثانیه	عملکرد نادرست بعد از ۱/۵۲۶ ثانیه	عملکرد نادرست بعد از ۱/۵۲۷ ثانیه	عدم عملکرد	عملکرد نادرست بعد از ۱/۴۳۶ ثانیه
۷	خطای اتصال‌کوتاه	۱۲۰	۰/۵	-۰/۵	عملکرد نادرست بعد از ۲/۰۹۵ ثانیه	عملکرد نادرست بعد از ۱/۵۵۸ ثانیه	عملکرد نادرست بعد از ۱/۶۰۳ ثانیه	عدم عملکرد	عملکرد نادرست بعد از ۰/۹۵۶ ثانیه
۸	خروج خط L1	-	۰/۹	۰/۳	عدم عملکرد	عملکرد نادرست بعد از ۱/۵۲۰ ثانیه	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۹	خروج واحد G2	-	۰/۹	۰/۳	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۱۰	کلیدزنی بار (۱) P=250MW Q=120MVAR	-	۰/۸	۰/۳	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد
۱۱	کلیدزنی بار (۲) P= 0MW Q= 200MVAR	-	۰/۸	۰/۳	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد	عدم عملکرد



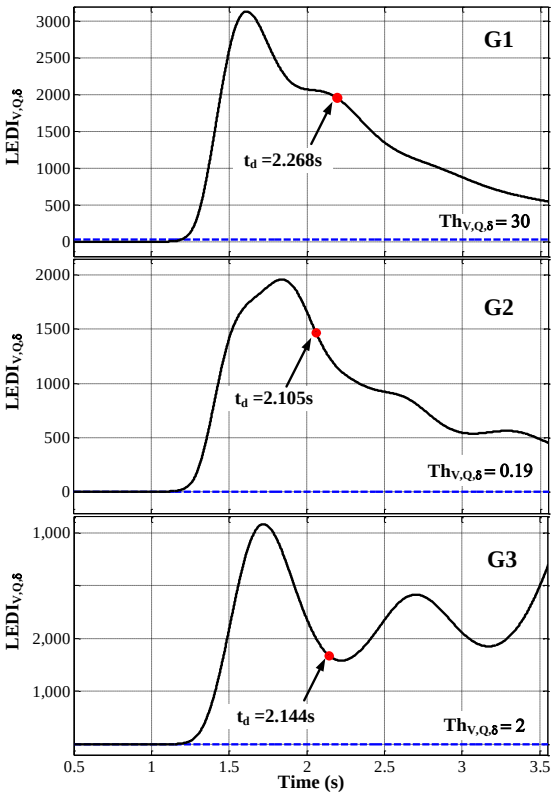
شکل (۱۵): سیستم سه ماشینه مورد مطالعه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]



شکل(۱۶): تغییرات $LEDI_{V,Q,\delta}$ به ازای بدترین شرایط وقوع LOE در ژنراتورهای سیستم سه ماشینه



شکل (۱۷): عملکرد $LEDI_{V,Q,\delta}$ در تشخیص LOE در ژنراتورهای G1 تا G3 در سیستم سه ماشینه

۷ نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور شناسایی سریع‌تر و مطمئن‌تر LOE روش استفاده از تغییرات کمیت‌های الکتریکی ژنراتور تحت عنوان شاخص LEDI ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا LEDIهای مختلفی برمبنای ترکیب تغییرات کمیت‌های مختلف الکتریکی ژنراتور ارائه گردید که از این میان، چهار شاخص ترکیبی مبتنی بر کمیت‌های ولتاژ ترمینال، توان راکتیو و زاویه توان ژنراتور به‌صورت:

- $LEDI_{V,Q}$
- $LEDI_{V,\delta}$
- $LEDI_{Q,\delta}$
- و $LEDI_{V,Q,\delta}$

معرفی و به عنوان شاخص‌های اصلی در نظر گرفته شدند.

نتایج شبیه‌سازی‌های گسترده نشان داد که اگرچه LEDIهای معرفی‌شده در شرایط مختلف عملکردی، LOE را بسیار سریع‌تر از طرح متداول امپدانسی تشخیص می‌دهند اما فقط شاخص $LEDI_{V,Q,\delta}$ است که در مواجهه با SPS و سایر اغتشاشات سیستم، عملکرد کاذب و نابه‌جائی از خود نشان نمی‌دهد. بر این اساس، شاخص مذکور به‌عنوان آشکارساز سریع و مطمئن LOE معرفی گردیده است.

شاخص مذکور حساسیت بسیار بالائی نسبت به سطح بارگذاری ژنراتور و ضریب توان آن داشته و لذا برای تعیین حد آستانه‌ی عملکردی آن، می‌بایست بدترین شرایط بهره برداری (حداقل بار اکتیو و حداکثر بار راکتیو جذبی) برای ژنراتور مورد نظر منظور گردد. همچنین بهتر است حد آستانه به ازای قوی‌ترین شبکه‌ی قدرت متصله به ژنراتور و در شرایطی که واحدهای موازی (در صورت وجود) نیز در حال کارند محاسبه شود.

مراجع

[1] D. Reimert, Protective relaying for power generation systems, Boca Raton: CRC press, 2006.

[2] IEEE guide for AC generator protection, IEEE Standard C37.102-2006.

[3] P. Kundur, Power system stability and control, New York: McGraw-Hill, 1994.

[4] NERC system protection and control subcommittee, technical reference document, "Power plant and transmission system protection coordination", June 2010.

[5] J. Berdy, "Loss of excitation protection for modern synchronous generators", IEEE Trans. on Power App. Sys., Vol. PAS-94, No. 5, pp. 1457–1463, September/October 1975.

[6] R. L. Tremaine and J. L. Blackburn, "Loss-of-field protection for synchronous machines", AIEE Trans. Part III, Vol. 1, No. 73, pp. 765−772, August 1954.

[7] A. P. de Morais, G. Cardoso, and L. Mariotto, "An innovative loss-of-excitation protection based on the fuzzy inference mechanism", IEEE Trans. on Power Del. Vol. 25, No. 4, pp. 2197-2204, October 2010.

[8] E. ajuelo, R .Gokaraju and M .S. Sachdev. "Identification of generator loss-of-excitation from power-swing conditions using a fast pattern classification

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]

method", IET Gen., Trans. & Dist., Vol. 7, No. 1, pp. 24-36, January 2013.

[9] H. Yaghobi, H. Mortazavi, K. Ansari, H. R. Mashhadi and H. Borzoe, "Study on application of flux linkage of synchronous generator for loss of excitation detection", Trans. on Etrical Energy Sys., Vol. 23, No. 6, pp. 802-817, September 2013.

[10] M. Amini, M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, "A novel approach to detect the synchronous generator loss of excitation", IEEE Trans. On Power Del., Vol. 30, No. 3, pp. 1429-1438, June 2015.

[11] User's Guide of DIgSILENT 14 software, DIgSILENT Company, Germany, December 2010.

[12] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5, Jun 2005.

[13] IEEE Power and Energy Society, Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies, Jun 2013.

[14] E. Ghahremani, M. Karrari, and O. P. Malik, "Synchronous generator third-order model parameter estimation using online experimental data", IET Gen., Trans. & Dist., Vol. 2, No. 5, pp. 708-719, September 2008.

[15] A. D. Angel, P. Geurts, D. Ernst, M. Glavic, and L. Wehenkel, "Estimation of rotor angles of synchronous machines using artificial neural networks and local PMU-based quantities", Neurocomputing 70, No. 16, pp. 2668-2678, October 2007.

[16] S. Rovnyak, Ch.W. Liu, Jin Lu, Weimin Ma, and J. Thorp. "Predicting future behavior of transient events rapidly enough to evaluate remedial control options in real-time", IEEE Trans. On Power Sys. Vol.10, No. 3: pp.1195-1203, August1995.

[17] H. Yaghobi, "Impact of static synchronous compensator on flux-based synchronous generator loss of excitation protection", *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 9, No. 9, pp. 873-883, Feb. 2015.

[18] S. Paudyal, G. Ramakrishna, M.S. Sachdev. "Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 25, No. 2, pp. 600-609, April 2010.

زیرنویس‌ها

[1] Loss of Excitation
[2] Stable Power Swing
[3] Space Vector Machine
[4] Single Machine Infinite Bus
[5] Short Circuit Capacity
[6] Loss of Excitation Detection Index
[7] Discrete Fourier Transform
[8] Loss of Excitation Counter
[9] Number of Units

پیوست (۱): اطلاعات عناصر سیستم SMIB و سیستم چهارماشینه مورد مطالعه

واحدهای نیروگاهی	S=600MVA, f=50 Hz, H=4.4s, V=22 kV, X_d=1.81 pu, X_q=1.76 pu, X'_d=0.3 pu, X'_q=0.65 pu, X''_d= 0.23 pu, X''_q= 0.25 pu, T'_{do}=8 s, T'_{qo}=1 s, T''_d=0.03, T''_q=0.07s
ترانسفورماتورها	S=600MVA,f=50 Hz, V_L=22 kV,V_H=400 kV, U_k=12.5 %
خطوط انتقال	L1,L2 : Z=0.061+j0.277 Ohm/km, L=200 km

پیوست (۲): اطلاعات سیستم سه ماشینه

واحدهای نیروگاهی	**G1**: S=80MVA, f=50 Hz, H=3.5s, V=13.8 kV, X_d=0.9 pu, X_q=0.54 pu, X'_d=0.3 pu, X'_q=0.65 pu, X''_d= 0.24 pu, X''_q= 0.25 pu,T'_{do}=5.4 s,T'_{qo}=1 s,T''_{dO}=0.03, T''_{qo}=0.09s **G2**: S=390MVA, f=50 Hz, H=5.5s, V=22 kV, X_d=1.2pu, X_q=0.7 pu, X'_d=0.3 pu, X'_q=0.65 pu, X''_d= 0.23 pu, X''_q= 0.25 pu, T'_{do}=5 s, T'_{qo}=1 s, T''_{dO}=0.1, T''_{qo}=0.09s **G3**: S=500MVA, f=50 Hz, H=4s, V=22 kV, X_d=1.6 pu, X_q=0.97 pu, X'_d=0.48 pu, X'_q=0.65 pu, X''_d= 0.3 pu, X''_q= 0.25 pu, T'_{do}=6.1 s, T'_{qo}=1 s, T''_{dO}=0.1T''_{qo}=0.18s
ترانسفورماتورها	**T1**: S=80MVA, V_L=13.8 kV, V_H=400 kV,U_k=12 % **T2**: S=400MVA, V_L=13.8 kV, V_H=400 kV, U_k=12 % **T3**:S=500MVA, V_L=13.8 kV, V_H=400 kV, U_k=12 %
خطوط انتقال	**L1** : Z = 0.048+j0.48ohm; **L2** : Z = 0.00576+j0.573ohm; **L3** : Z = 0.0288+j0.288ohm; **L4** : Z = 0.0576+j0.576ohm; **L5** : Z = 0.0142+j0.142ohm; **L6** : Z = 0.00192+j0.192ohm; **L7** : Z = j0.0957ohm;

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.2.3.5]