یک طرح حفاظتی قطع‌تحریک ترکیبی جدید بر اساس بکارگیری مؤثرترین متغیرهای ژنراتور سنکرون

محمدسجاد فتح الهی[۱]، سامان حسینی همتی*[۲]، عبداله راستگو[۳]، سعید خراطی[۴]

۱- دانشجو دکتری، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، msffatolahi@gmail.com
*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، saman.hosseini@iau.ac.ir
۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، abdollah.rastgo@gmail.com
۴- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران، dr.kharati@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲

چکیده: رایج‌ترین معایب رله‌های امپدانسی قطع‌تحریک عملکرد نابجای آن در شرایط اغتشاشات سیستم قدرت و زمان عملکرد طولانی آن است. بر این اساس جهت بهبود شاخص‌های دقت و سرعت شناسایی رویداد قطع‌تحریک و تمایز آن از سایر رویدادهای گذرای سیستم قدرت یک بررسی جامع بر روی پارامترهای مختلف قابل اندازه‌گیری در ژنراتور سنکرون انجام شده است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، مهم‌ترین متغیرها شامل توان اکتیو (P_{sg}) ، زاویه بین ولتاژ و جریان (θ_{sg}) و جریان خروجی ماشین (I_{sg}) انتخاب شده و در یک منطق ترکیبی دقیق بکارگرفته شده‌اند. در این ساختار، تغییرات I_{sg} ماشین به طور پیوسته پایش شده و در صورت افزایشی بودن تغییرات آن، تغییرات پارامترهای P_{sg} و θ_{sg} مورد بررسی قرار می‌گیرند. در چنین حالتی افزایشی بودن P_{sg} نشان دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. اما در صورتی که P_{sg} تقریبا ثابت بوده و θ_{sg} مثبت است (حالت زیر تحریک)، افزایش شدید I_{sg} نشان دهنده غیر فعال بودن سیستم تحریک و دریافت توان راکتیوی بیشتر از محدودیت زیر تحریک است، لذا در چنین شرایطی دستورخروج ژنراتور با عملکرد حفاظت صادر می‌گردد. در واقع علت افزایش جریان خروجی ماشین به بیشتر از آستانه تعریف شده (در حالیکه P_{sg} ثابت بوده و θ_{sg} مثبت است) جذب زیاد توان راکتیو از سیستم قدرت به علت وقوع قطع‌تحریک است.

روش ترکیبی پیشنهادی این مطالعه در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink (2017b) در طی سناریوهای مختلف قطع‌تحریک و گذرای سیستم قدرت بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، کارآیی مدل حفاظتی پیشنهادی را تائید می‌نماید. لازم به ذکر است که برتری روش پیشنهادی از دیدگاه‌های دقت، سرعت، سادگی و هزینه اجرا با سایر طرح‌ها نیز مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: ژنراتور سنکرون؛ حفاظت قطع‌تحریک؛ رله امپدانسی؛ زاویه بین ولتاژ و جریان؛ جریان.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

۱- مقدمه

بدلیل اهمیت ژنراتورهای سنکرون به عنوان قلب تپنده در سیستم قدرت، شناسایی مطمئن و سریع خطاهای مختلف در آن امری بسیار حیاتی است که بر این اساس حفاظت‌های متنوعی از قبیل رله‌های تفاضلی، خطای زمین، توان معکوس، اضافه/کاهش ولتاژ و فرکانس، قطع‌تحریک و... برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود [۱]. وقوع قطع‌تحریک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شرایط غیر نرمال برای ژنراتور سنکرون، می‌تواند در اثر عوامل مختلفی مانند خطای سیستم کنترل خودکار ولتاژ، اتصال کوتاه شدن مدار تحریک، قطع تصادفی مدار شکن میدان و... رخ دهد. این رویداد نه تنها پتانسیل آسیب رساندن به خود ژنراتور را دارد بلکه می‌تواند تهدیدی جدی برای پایداری سیستم قدرت نیز محسوب گردد[۱و۲]. از جمله اثرات از دست رفتن سیستم تحریک در یک ژنراتور سنکرون در سیستم قدرت می‌توان مواردی از قبیل ایجاد فرکانس لغزشی در رتور و گرم شدن آن، افزایش بیش از ظرفیت نامی بارگذاری سیم‌پیچ‌های استاتور و گرم شدن آن‌ها بدلیل دریافت قابل توجه Q_{sg} از شبکه، ناپایداری و فروپاشی ولتاژ در سیستم‌های قدرت ضعیف و غیره را نام برد [۳و۴]. لذا بدین منظور یک حفاظت امپدانسی با مشخصه منفی جهت شناسایی این رویداد در ژنراتورهای سنکرون نیروگاهی تعریف می‌گردد [۵و۶]. این حفاظت که به طور گسترده‌ای در صنعت برق برای حفاظت ژنراتور سنکرون در برابر از دست رفتن تحریک آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای مزایای بسیار مهمی نظیر شناسایی دقیق همه رویدادهای قطع‌تحریک و بسیاری از رویدادهای غیر قطع‌تحریک است. با این وجود از عمده-ترین چالش‌های این حفاظت می‌توان مواردی نظیر: ۱) زمان عملکرد طولانی و وابستگی آن به سطح بارگذاری ماشین، ۲) خروج اشتباه ژنراتور در شرایط بهره‌برداری ماشین به صورت زیر تحریک و وقوع اغتشاشات گذرا سمت شبکه را نام برد [۷]. بر این اساس توسعه یک ساختار حفاظتی جدید به منظور مرتفع کردن نقاط ضعف این حفاظت امپدانسی امری کاملا ضروری است.

به منظور غلبه بر مشکلات مطرح شده برای حفاظت امپدانسی قطع‌تحریک در ژنراتورهای سنکرون، تاکنون روش‌های مختلفی توسعه داده شده که در ادامه برخی از مهم‌ترین موارد مورد بررسی قرار گرفته است.

در مراجع [۸-۱۰]، سیستم‌های حفاظتی قطع‌تحریک مختلفی که مستقل از تنظیمات آستانه می‌باشند ارائه شده است که به ترتیب شامل اندازه‌گیری و مشاهده پلاریته تغییرات پارامتر مقاومت از دیدگاه پایانه ژنراتور تحت مطالعه، مشتق مرتبه دوم جریان سیم‌پیچ‌های استاتور و پلاریته تغییرات ترکیبی از پارامترهای V_{sg}، Q_{sg} و δ_{sg} ژنراتور تحت حفاظت است. از برجسته‌ترین ویژگی‌های این سیستم‌های حفاظتی عدم نیاز به تنظیمات آستانه برای عملکرد بوده و می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین چالش‌های حفاظتی را مرتفع کرده است. با این وجود در اثر وقوع همزمان قطع‌تحریک و اغتشاشات گذرای سمت شبکه، پلاریته تغییرات پارامترهای انتخاب شده دستخوش تغییر شده و امکان عملکرد اشتباه و پنهان ماندن وقوع قطع‌تحریک کاملا محتمل خواهد بود. به منظور بهبود عملکرد این روش‌های مستقل از آستانه، در مرجع [۱۱]، یک روش حفاظتی مؤثر پیشنهاد شده است که در آن از ترکیب پارامترهای ولتاژ داخلی ماشین و Q_{sg} استفاده شده است و با اعمال تابع انتگرال به شاخص تعریف شده، ضمن حذف نوسانات گذرای آن و آشکارکردن پلاریته منفی تغییرات شاخص قطع‌تحریک پیشنهادی، توانسته است به درستی و به نحو مؤثری وقوع همزمان قطع‌تحریک و اغتشاشات شبکه را شناسایی نماید.

در برخی دیگر ازمراجع نظیر [۱۲-۱۴]، روش‌های وابسته به آستانه را به‌عنوان معیاری مؤثر برای شناسایی رویداد قطع‌تحریک پیشنهاد داده‌اند. در مرجع [۱۲] یک شاخص ترکیبی با استفاده از نسبت δ_{sg} به Q_{sg} خروجی ژنراتور ارائه شده است که علیرغم اثبات کارائی مناسب آن در شرایط قطع‌تحریک کامل و رویدادهای گذرای شبکه، کماکان امکان عملکرد اشتباه آن درشرایط قطع‌تحریک جزئی و یا تغییر ظرفیت ژنراتورها وجود دارد و نیاز به به‌روز کردن آستانه برای هر ژنراتور وجود خواهد داشت. در مرجع [۱۳] یک شاخص حفاظتی بر مبنای ضرب پارامترهای V_{sg} و Q_{sg} خروجی ژنراتور و اعمال عملگر مشتق بر روی آن پیشنهاد شده است که با توجه به روند کاهشی هر دو متغیر در شرایط قطع‌تحریک کارائی خوبی را در شناسایی چنین شرایطی از خود نشان داده است. با این وجود چالش تنظیم آستانه و امکان عملکرد اشتباه آن در شرایط عدم تنظیم مناسب آستانه برای ژنراتورهای مختلف کاملا محتمل خواهد بود. در مرجع [۱۴] نیز از ضرب متغیرهایی نظیر V_{sg}، Q_{sg} و δ_{sg} پیشنهاد شده است که از اشکالات اساسی این روش متغیر بودن پلاریته تغییرات پارامترهای انتخابی و دشواری تنظیم آستانه برای سناریوهای مختلف است. برخی دیگر از روش‌ها نظیر مراجع [۱۵-۱۷] به ترتیب از برخی پارامترهای داخلی ماشین نظیر شار فاصله هوایی استاتور، زاویه رتور و ولتاژ القا شده در سیم‌پیچ استاتور ژنراتور جهت شناسایی رویداد قطع‌تحریک بهره گرفته‌اند که استفاده از این پارامترها مستلزم بکارگیری سنسورهای دقیق و گران قیمت در داخل ماشین است. در حالیکه می-توان گفت هیچ کدام از این روش‌ها برتری خاص و ویژه‌ای را نسبت به سایر پارامترهایی که به‌سادگی در دسترس می‌باشند فراهم نکرده است. در مراجع [۱۸] و [۱۹] نیز به ترتیب راهکارهای جدیدی مبتنی بر افزایش اجباری توان راکتیو تولیدی ماشین و مشاهده پاسخ آن و مشاهده تغییرات زاویه بار ژنراتورهای موازی متصل به یک شین مشترک ارائه شده است. در روش پیشنهادی مرجع [۱۸] با ارسال فرمان افزایش جریان تحریک سیم پیچ رتور و در نتیجه افزایش Q_{sg} ماشین، وضعیت ولتاژ شین خروجی ژنراتور تحت پایش قرار می‌گیرد و در صورت مشاهده عدم تاثیر این فرمان بر روی V_{sg} ماشین، وقوع قطع‌تحریک شناسایی می‌گردد. در روش پیشنهادی مرجع [۱۹] نیز با مشاهده پلاریته تغییرات پارامتر زاویه بار در همه ژنراتورهای موازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

متصل به یک شین مشترک در یک نیروگاه، در صورت کاهشی بودن تغییرات زاویه بار یکی از واحدها و افزایشی بودن آن برای سایر ژنراتورهای موازی، وقوع قطع‌تحریک در ژنراتور با مشخصه کاهشی شناسایی می‌گردد.

سیستم حفاظتی مشخص شده در [۲۰] دو عملکرد کلیدی را توسعه می‌دهد تا از خروج ژنراتور با عملکرد حفاظت اشتباه رله امپدانسی در هنگام وقوع نوسان توان جلوگیری کند. اشکالات اساسی این طرح وابستگی آن به ژنراتورهای سنکرون موازی در حال کار و عملکرد اشتباه آن در زمانی که ژنراتور سنکرون تحت مطالعه به تنهایی کار می‌کند (عدم حضور سایر ژنراتورها) است.

استراتژی معرفی شده در [۲۱]، انتگرال توان راکتیو ژنراتور سنکرون را در قالب منطق AND با رله امپدانسی معمولی برای جلوگیری از خروج ژنراتور با عملکرد حفاظت در طول اغتشاشات سیستم قدرت پیاده سازی می‌کند. این استراتژی اگرچه عملکرد رله امپدانسی را بهبود می‌بخشد، اما ممکن است در طی برخی از اغتشاشات سیستم قدرت از کار بیفتد. در [۲۲]، یک طرح حفاظتی جدید برای تشخیص سریع وقوع قطع‌تحریک با پیاده سازی سیگنال هایی که می‌توان به راحتی از ترمینال ماشین تحت مطالعه اندازه‌گیری کرد، توسعه داده شده است. راه حل حفاظتی این مطالعه به طور جامع از طریق سناریوهای مختلف مورد بحث و شبیه‌سازی قرار گرفته و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که می‌تواند خطاهای سیستم تحریک را از اغتشاشات سیستم قدرت متمایز کند. در رویکرد ارائه شده در [۲۳]، یک استراتژی حفاظتی جدید برای ژنراتورهای سنکرون در حضور STATCOM با پیاده سازی ماشین بردار پشتیبانی و پردازش سیگنال معرفی شده است. در روش ارائه شده، تبدیل موجک گسسته برای استخراج ویژگی ولتاژ ترمینال به عنوان ورودی به SVM اعمال می‌شود. در [۲۴]، یک سیستم حفاظتی تطبیقی حفاظت قطع‌تحریک برای ژنراتورهای سنکرون مقیاس کوچک توسعه داده شده است. در این منطق حفاظتی، خروجی AVR و ولتاژ داخلی ژنراتور سنکرون برای تشخیص وقوع قطع‌تحریک غیرقابل بازیابی از سایر رویدادها اتخاذ می‌شود. در این منطق، یک تاخیر زمانی تطبیقی برای بهبود زمان تشخیص رویدادهای مختلف اجرا می‌شود .

بنابراین با توجه به مشکلات مطرح شده برای روش‌های توسعه داده شده در زمینه قطع‌تحریک، کماکان نیاز به یک روش حفاظتی جامع و کاربردی به منظور دسته بندی دقیق و سریع رویدادها با کمترین هزینه کاملا محسوس است. بر این اساس، در این مطالعه بر اساس تحلیل‌های انجام شده، سه پارامتر اساسی شامل P_{sg}، I_{sg}، θ_{sg} انتخاب شده و در یک فرمت ترکیبی دقیق بکارگرفته شده‌اند. در این ساختار، تغییرات I_{sg} ماشین به طور پیوسته پایش شده و در صورت افزایش آن به بیشتر از آستانه تعریف شده، تغییرات پارامترهای P_{sg} و θ_{sg} مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این شرایط افزایشی بودن P_{sg} نشان دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. اما در صورتی که θ_{sg} مثبت شده و P_{sg} تقریبا ثابت بماند قطع‌تحریک رخ داده و دستور خروج ژنراتور با عملکرد حفاظت صادر می‌گردد، در غیر اینصورت کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE عملکرد سریع و دقیق مدل پیشنهادی را تأیید می‌نماید.

مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه در زمینه حفاظت طراحی شده را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

- ✓ شناسایی وقوع قطع‌تحریک در تمامی شرایط بهره‌برداری ژنراتور و تمایز دقیق آن از سایر رویدادهای گذرای سمت شبکه.
- ✓ شناسایی تمامی حالت‌های وقوع قطع‌تحریک در یک بازه زمانی بسیارکم و عدم تاثیرپذیری آن از شرایط بهره‌برداری ماشین.
- ✓ بکارگیری ساده و کم هزینه طرح پیشنهادی این مطالعه در ژنراتورهای سنکرون نیروگاهی.

در نتیجه، نوآوری و سهم این مطالعه توسط طبقه‌بندی ادبیات ارائه شده در جدول ۱ مورد تأکید قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، علاوه بر رله قطع‌تحریک مبتنی بر امپدانس، استراتژی ارائه شده در این مقاله با سایر طرح‌های حفاظتی نیز مقایسه شده است.

جدول (۱): طبقه بندی روش ها با در نظر گرفتن مهم‌ترین عوامل ارزیابی.

شماره مرجع	سرعت	قابلیت اطمینان	سادگی و هزینه
[۹]	√	×	√
[۱۹]	×	√	√
[۲۰]	×	√	×
رله امپدانسی	×	×	√
این مقاله	√	√	√

سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر ارائه شده است. در بخش دوم روش حفاظتی قطع‌تحریک پیشنهادی به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته و در بخش سوم نیز عملکرد آن بر روی سیستم مطالعه به ازای وقوع رویدادهای مختلف ارزیابی شده است. در بخش چهارم مقایسه روش پیشنهادی این مقاله از دیدگاه‌های مختلف با برخی از روش‌های قبلی مورد بحث قرار گرفته است و در نهایت در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

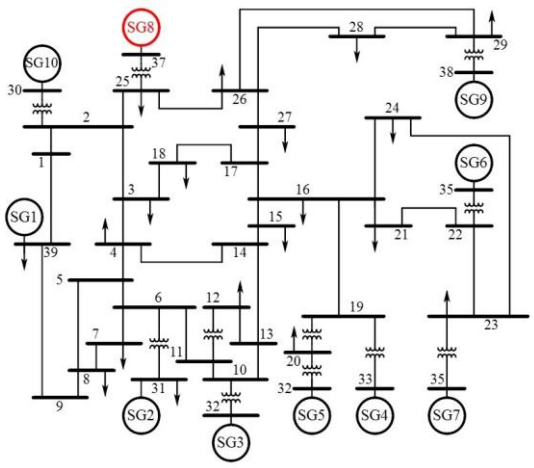
۲-روش حفاظت قطع‌تحریک پیشنهادی

همانطور که گفته شد اساسی‌ترین مشکلات رله امپدانسی قطع‌تحریک موجود زمان شناسایی طولانی و امکان عملکرد اشتباه آن در برخی شرایط خاص است. بر این اساس با در نظر گرفتن دو معیار اساسی دقت و سرعت، یک روش حفاظتی جدید مبتنی بر الگوی تغییرات مؤثرترین پارامترها در شرایط قطع‌تحریک طراحی و پیشنهاد شده است. در ادامه ابتدا تحلیل تغییرات پارامترهای اساسی P_{sg}، θ_{sg} و I_{sg} در شرایط قطع‌تحریک به صورت زیر مد نظر قرار گرفته است.

الف) تحلیل تئوری تغییرات پارامترهای انتخابی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

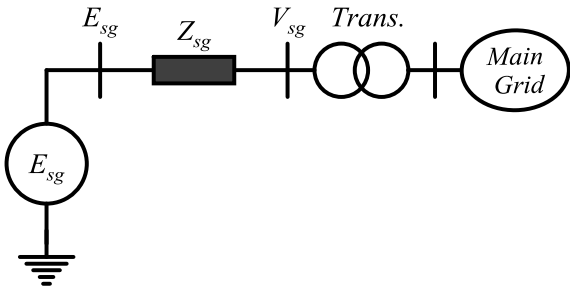
- ✓ **تغییرات I_{sg}**: توان خروجی ژنراتورهای سنکرون شامل دو مولفه توان راکتیو (Q_{sg}) و توان اکتیو (P_{sg}) است که برآیند آن‌ها تحت عنوان توان ظاهری ارائه می‌گردد. بر این اساس جریان خروجی ماشین نیز شامل دو مولفه جریان اکتیو و راکتیو بوده که برآیند آن‌ها به‌عنوان جریان خروجی ماشین مد نظر قرار می‌گیرد و ظرفیت حرارتی ماشین نیز بر این اساس تعیین می‌گردد. لذا افزایش/کاهش I_{sg} ماشین قطعا ناشی از افزایش/کاهش Q_{sg} و یا P_{sg} است. لازم به ذکر است که در شرایطی که ژنراتور به حالت زیر تحریک می‌رود و شروع به جذب Q_{sg} از سیستم قدرت می‌نماید، جریان خروجی ماشین افزایش خواهد یافت که در حالت وقوع قطع‌تحریک بدلیل دریافت بسیار زیاد Q_{sg} از سیستم قدرت قطعا جریان خروجی ماشین افزایش چشم‌گیری خواهد داشت و با تعریف یک آستانه عملکرد می‌توان این رویداد را شناسایی و مانع از آسیب به ماشین شد.
- ✓ **تغییرات P_{sg} و θ_{sg}**: تغییرات I_{sg} ماشین به طور پیوسته پایش شده و در صورت افزایش آن به بیشتر از آستانه تعریف شده، تغییرات پارامترهای P_{sg} و θ_{sg} مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این شرایط افزایشی بودن P_{sg} و θ_{sg} نشان دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. اما در صورتی که θ_{sg} افزایش یافته اما P_{sg} تقریبا ثابت بماند قطع‌تحریک رخ داده و دستور خروج ژنراتور با عملکرد حفاظت صادر می‌گردد. در واقع علت افزایش جریان خروجی ماشین (در حالیکه P_{sg} و θ_{sg} ثابت است) جذب توان راکتیو از سیستم قدرت به علت وقوع قطع‌تحریک بوده و طبق آستانه تعریف شده می‌توان آن را تشخیص داد.



شکل(۱): سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE.

ب) تحلیل ریاضی روش پیشنهادی

به منظور اثبات بحث فوق، یک تحلیل ریاضی ساده و شفاف با در نظر گرفتن مدل ژنراتور سنکرون ارائه شده در شکل (۲) فراهم شده است.



شکل (۲): مدار معادل ژنراتور سنکرون متصل به سیستم قدرت.

همانطور که می‌دانیم جریان ماشین (I_a) که همواره به سمت شبکه است، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$I_{sg} = \frac{E_{sg\angle\delta sg} - Vt\angle 0}{jX_s} \quad (۱)$$

که در آن، E_{sg} ولتاژ داخلی ماشین، δ_{sg} زاویه ولتاژ داخلی ژنراتور، X_s راکتانس سنکرون، V_t ولتاژ ترمینال و I_{sg} جریان سیم‌پیچ استاتور می‌باشند.

پارامتر E_{sg} را می‌توان بر حسب توابع sin و cos به صورت (۲) نوشت.

$$E_{sg\angle\delta sg} = E_{sg}\cos\delta sg + jE_{sg}\sin\delta sg \quad (۲)$$

با جایگزنی رابطه (۲) در رابطه (۱) و ساده سازی آن، رابطه (۳) بدست خواهد آمد.

$$I_{sg} = \frac{(E_{sg}\cos\delta_{sg} - V_t) + jE_{sg}\sin\delta_{sg}}{jX_s} \quad (۳)$$

از طرفی می‌دانیم که توان ظاهری خروجی ماشین (S_{sg}) از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. لذا با جایگزینی رابطه (۳) در رابطه (۴)، رابطه (۵) را خواهیم داشت. که با ساده سازی آن رابطه (۶) محاسبه خواهد شد.

$$S_{sg} = V_t.I_{sg}^{*} = P_{sg} + jQ_{sg} \quad (۴)$$

$$S_{sg} = V_t\left[\frac{(E_{sg}\cos\delta_{sg} - V_t) + jE_{sg}\sin\delta_{sg}}{jX_s}\right]^{*} \quad (۵)$$

$$S_{sg} = \frac{E_{sg}V_t}{X_s}\sin\delta_{sg} + j\frac{V_t}{X_s}(E_{sg}\cos\delta_{sg} - V_t) \quad (۶)$$

همانطور که در رابطه توان اکتیو (۷) مشاهده می‌گردد، در شرایط کار عادی ماشین که پارامترهای V_t و E_{sg} ثابت می‌باشند، با عملکرد گاورنر عملا پارامتر δ_{sg} تحت تاثیر قرار گرفته و با افزایش و کاهش آن توان P_{sg} تولیدی ماشین افزایش یا کاهش می‌یابد. (در واقع فلوی P_{sg} به زاویه δ_{sg} وابسته است). اما در شرایط وقوع قطع‌تحریک که پارامتر E_{sg} افت شدیدی را تجربه می‌کند و V_t افت نیز افت کمتری را خواهد داشت (بدلیل حمایت ولتاژی سمت شبکه)، با توجه به تلاش سیستم

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

کنترل فرکانس جهت تأمین P_{sg} ماشین و ثابت نگه داشتن آن در همان حدود قبل از قطع‌تحریک، زاویه δ_{sg} به شدت افزایش خواهد یافت. بنابراین با افزایش یا کاهش پارامتر P_{sg}، اندازه I_{sg} تغییر خواهد کرد.

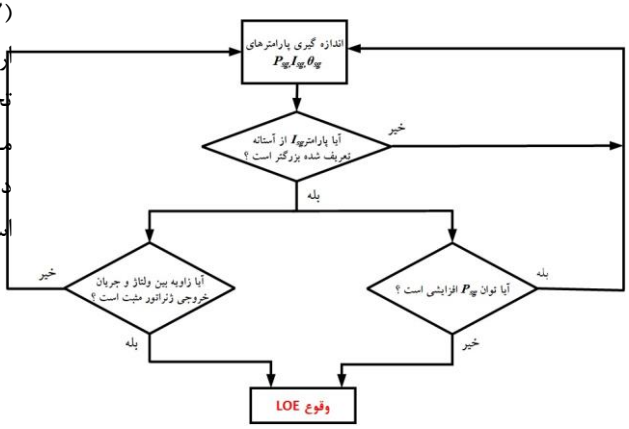
$$P_{sg} = \frac{E_{sg} V_t}{X_s} \sin \delta_{sg} \qquad (۷)$$

از طرفی طبق رابطه (۱)، با در نظر گرفتن ولتاژ ژنراتور به عنوان مرجع، زاویه I_{sg} در حالت فوق تحریک منفی بوده و در حالت زیر تحریک مثبت خواهد بود که عموماً در شرایط فوق تحریک بهره‌برداری می‌شوند. لذا اگر زاویه جریان نسبت به ولتاژ مثبت شود و ژنراتور شروع به جذب توان راکتیو از شبکه نماید، محدودکننده زیرتحریک مانع از جذب بیش از حد آن می‌گردد و جریان I_{sg} در محدوده مجاز باقی خواهد ماند. اما اگر سیستم تحریک غیر فعال باشد، محدوده‌کننده‌ای جهت دریافت توان راکتیو وجود نداشته و در نتیجه اندازه I_{sg} از حد مجاز فراتر خواهد رفت. لذا بر اساس ترکیب این دو متغیر می‌توان قطع‌تحریک را شناسایی کرد.

پ) فلوچارت روش حفاظت قطع‌تحریک پیشنهادی

در شکل (۳) فلوچارت روش حفاظت قطع‌تحریک پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، ابتدا پارامترهای P_{sg}، I_{sg}، δ_{sg} (با نرخ نمونه‌برداری ۱ کیلو هرتز) از ژنراتور تحت حفاظت اندازه‌گیری می‌شود. سپس با توجه به ترکیبی بودن این روش پیشنهادی، ابتدا وضعیت تغییرات I_{sg} مورد بررسی قرار گرفته و درصورتی که از آستانه مجاز تعریف شده فراتر رود تغییرات پارامترهای، P_{sg}، θ_{sg} مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

اگر تغییرات پارامتر P_{sg} نیز افزایشی باشد، نشانه پاسخ سیستم کنترل فرکانس ژنراتور بوده و ارتباطی به قطع‌تحریک ندارد. اما اگر θ_{sg} مثبت شده و عامل افزایش I_{sg} دریافت بیش از حد توان راکتیو از شبکه باشد، وقوع قطع‌تحریک شناسایی شده و دستور خروج ژنراتور صادر می‌گردد. لازم به ذکر است که زمان لازم برای بررسی تغییرات پارامترهای انتخابی ۱,۶ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): فلوچارت روش حفاظت قطع‌تحریک پیشنهادی.

واضح است که تنظیم مناسب بازه زمانی برای پایش متغیرهای انتخابی عامل مهمی برای تشخیص سریع و مطمئن رویدادهای قطع تحریک است. در طول رویدادهای قطع‌تحریک و اغتشاشات سیستم قدرت، یک نوسان در پارامترهای مختلف، معمولاً با فرکانس در محدوده ۰.۳ تا ۷ هرتز مشاهده می‌شود. لذا بر اساس تحقیقات مختلف از جمله مراجع [۱۱، ۲۰]، فاصله زمانی مناسب برای پایش پارامترهای مختلف با در نظر گرفتن نیم سیکل نوسان را می‌توان به صورت (۸) تعیین کرد.

$$ti \geq 0.5 \left(\frac{fs}{fsw}\right) \qquad (۸)$$

که در آن، fsw و fs به ترتیب فرکانس نوسانی و نمونه‌برداری هستند. بنابراین، با در نظر گرفتن فرکانس نمونه‌برداری ۱ کیلوهرتز و حداقل فرکانس نوسان ۰,۳ هرتز ti برابر با ۱,۶ ثانیه خواهد بود.

۳- مطالعات شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

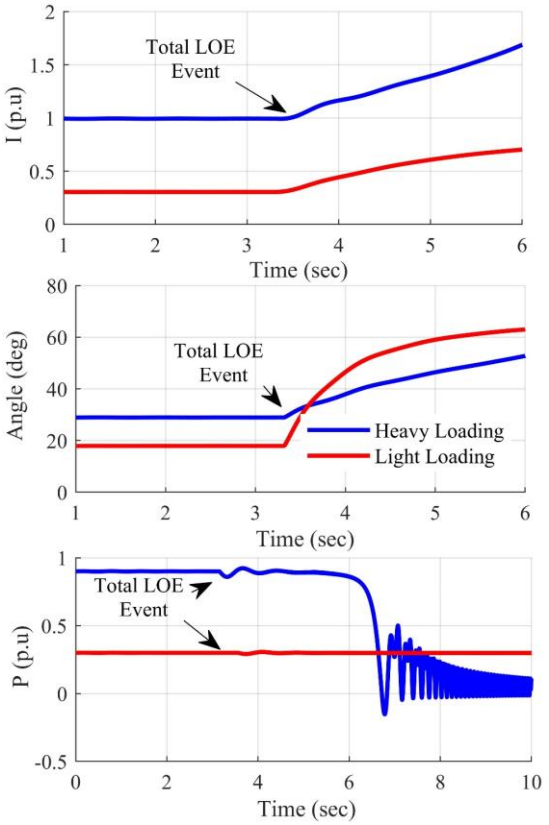
به منظور انجام یک ارزیابی دقیق و عمیق بر روی عملکرد روش پیشنهادی این مطالعه، آزمون‌های مختلفی اعم از رویدادهای قطع‌تحریک و اغتشاشات سیستم قدرت بر روی سیستم ۳۹ شین استاندارد IEEE شکل (۱) انجام شده و نتایج آن نیز به طور دقیق تحلیل و ارائه شده است.

الف) رویدادهای قطع‌تحریک

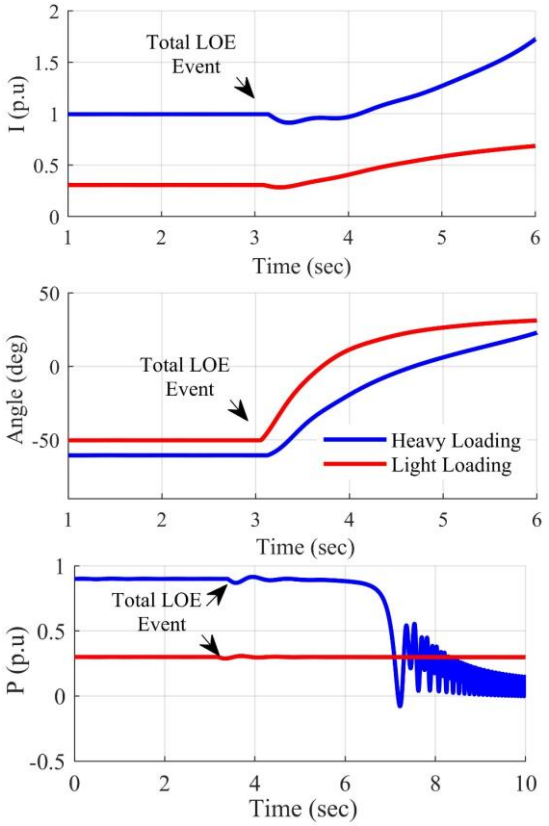
در این بخش روش پیشنهادی این مطالعه در شرایط وقوع قطع‌تحریک در ژنراتور تحت مطالعه (SG8) واقع در شین شماره ۱ سیستم شکل (۱) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور وقوع قطع‌تحریک به صورت کامل و جزئی مد نظر قرار گرفته و در آن ولتاژ تحریک در شرایط قطع‌تحریک کامل و جزئی به ترتیب صفر و به ۰,۴ تقلیل یافته است. هر یک از حالت‌های قطع‌تحریک نیز در دو حالت مختلف، شامل بارگذاری سنگین و سبک و در شرایط بهره‌برداری ژنراتور به صورت فوق‌تحریک و زیرتحریک مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل‌های (۴) تا (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، طبق الگوریتم ارائه شده در شکل (۳)، منطق تعریف شده جهت شناسایی وقوع قطع تحریک که فراتر رفتن I_{sg} از آستانه تعریف شده و ثابت ماندن P_{sg} و مثبت شدن θ_{sg} است، در تمامی حالت‌های آزمون شده تحقق یافته و دستور خروج ژنراتور در اثر وقوع قطع‌تحریک به‌درستی صادر شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



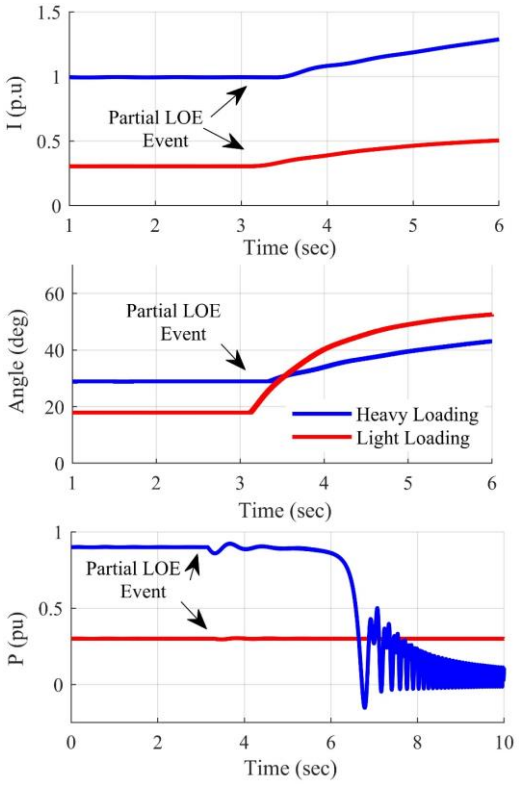
شکل (۴): نتایج شبیه‌سازی وقوع قطع‌تحریک کامل تحت بارگذاری مختلف ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت زیرتحریک.



شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی وقوع قطع‌تحریک کامل تحت بارگذاری مختلف ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت فوق‌تحریک.

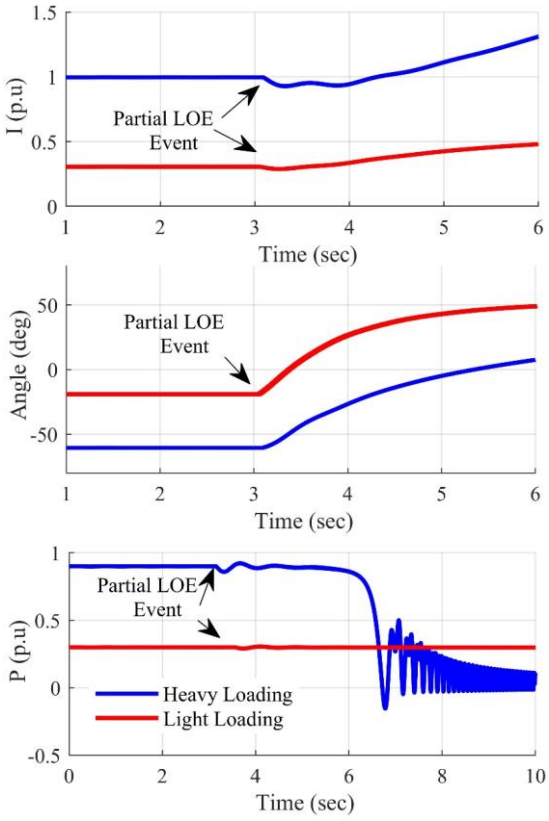
جدول (۲): اطلاعات شبیه‌سازی رویدادهای قطع‌تحریک

شماره آزمون	مقدار بار (MW±jMVAR)	نوع بارگذاری	نوع قطع‌تحریک
۱	۱۸۰+j۸۰	سنگین و فوق‌تحریک	کامل
۲	۱۸۰-j۸۰	سنگین و زیرتحریک	کامل
۳	۶۰+j۳۰	سبک و فوق‌تحریک	کامل
۴	۶۰-j۳۰	سبک و زیرتحریک	کامل
۵	۱۸۰+j۸۰	سنگین و فوق‌تحریک	جزئی
۶	۱۸۰-j۸۰	سنگین و زیرتحریک	جزئی
۷	۶۰+j۳۰	سبک و فوق‌تحریک	جزئی
۸	۶۰-j۳۰	سبک و زیرتحریک	جزئی



شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی وقوع قطع‌تحریک جزیی تحت بارگذاری مختلف ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت زیرتحریک.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



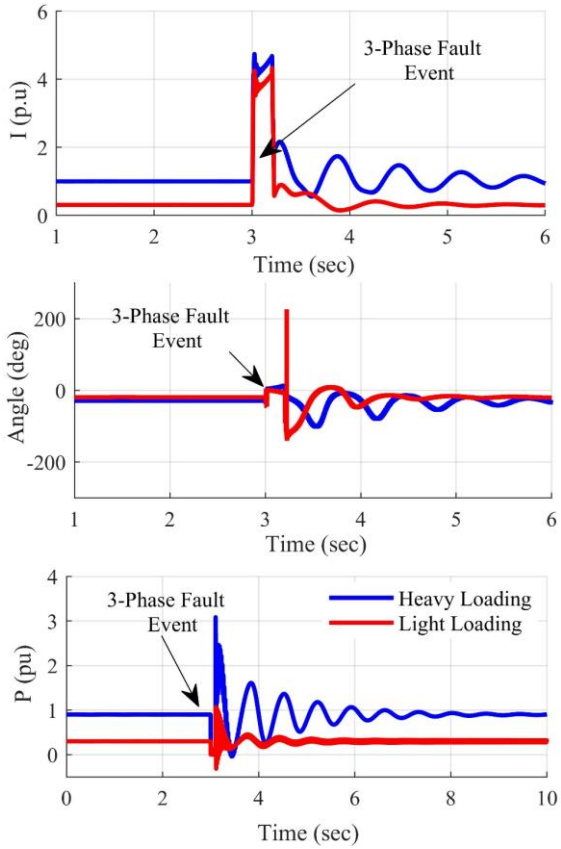
شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی وقوع قطع‌تحریک جزیی تحت بارگذاری مختلف ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت فوق‌تحریک.

ب)رویدادهای غیر قطع‌تحریک

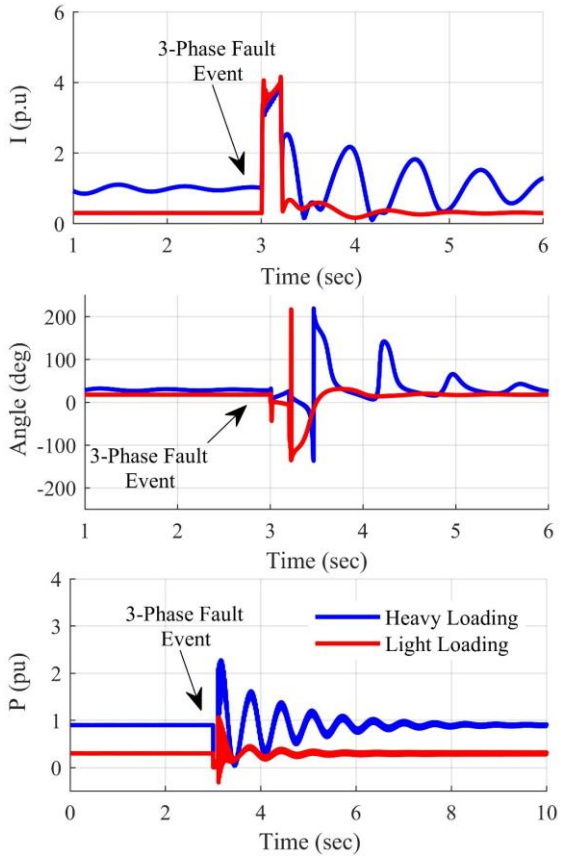
در این بخش روش پیشنهادی این مطالعه در شرایط رویدادهای غیر قطع‌تحریک مختلف از قبیل وقوع یک خطای اتصال کوتاه سه فاز گذرا به مدت ۱۰۰ میلی ثانیه و کلیدزنی یک بار اهمی-سلفی با ظرفیت ثابت، هر دو در شین شماره ۲۵ مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور انجام یک بررسی دقیق و عمیق، سناریوهای فوق در حالت‌های مختلف بهره‌برداری ژنراتور تحت مطالعه (SG8) نظیر سطح بارگذاری و کارکرد آن به صورت فوق‌تحریک و زیرتحریک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است.

جدول (۳): اطلاعات شبیه‌سازی رویدادهای غیر قطع‌تحریک

شماره آزمون	بارگذاری مختلف ژنراتور سنکرون (MW±jMVAR)
۱	۱۸۰+j۸۰
۲	۱۸۰-j۸۰
۳	۶۰+j۳۰
۴	۶۰-j۳۰



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی خطای اتصال کوتاه سه فاز تحت بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت فوق‌تحریک.



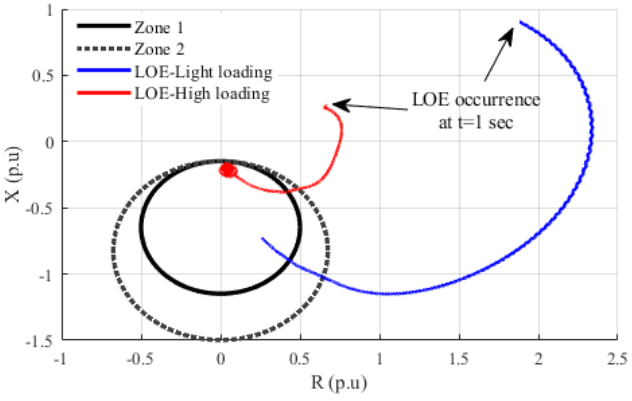
شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی کلیدزنی بار تحت بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت زیرتحریک.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

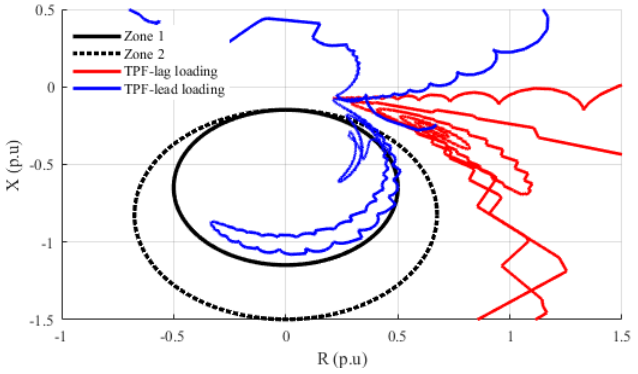
همانطور که مشاهده می‌گردد، در هیچ یک از آزمون‌های انجام شده، شرایط تعریف شده در الگوریتم شکل (۳) جهت شناسایی وقوع قطع‌تحریک که شامل افزایش I_{sg} و فراتر رفتن آن از آستانه تعریف شده و همچنین ثابت ماندن P_{sg} و مثبت شدن θ_{sg} محرز نشده و تمامی حالت‌ها به‌درستی به‌عنوان رویداد غیر قطع‌تحریک مد نظر قرار گرفته است.

۴- مقایسه روش پیشنهادی با رله متداول امپدانسی

کمیت های R و X مقاومت اهمی و راکتانس از دید ژنراتور تحت مطالعه بوده و بر حسب پریونیت بیان شده است، در شکل های شماره (۱۰) و (۱۱) کمیت X در محور عمودی مشخص و کمیت R در محور افقی مشخص شده است.در بخش شبیه‌سازی، عملکرد و کارائی روش پیشنهادی به ازای رویدادها و شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصله حاکی از عملکرد موفق و سریع این روش در دسته‌بندی رویدادهای مختلف است. در این بخش نیز به منظور تأیید عملکرد آن در مقایسه با روش امپدانسی قطع‌تحریک که در صنعت به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد برخی از آزمون‌های انجام شده در بخش قبل توسط رله امپدانسی نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، روش پیشنهادی این مطالعه از نظر سرعت و دقت شناسایی دارای شرایط بهتری نسبت به رله امپدانسی قطع‌تحریک است. همچنین عملکرد سایر طرح‌های حفاظتی قطع‌تحریک نیز با در نظر گرفتن برخی آزمون‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی وقوع قطع‌تحریک کامل و جزئی تحت بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت فوق‌تحریک.



شکل (۱۱): نتایج شبیه‌سازی خطای اتصال کوتاه سه فاز تحت بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت زیرتحریک.

بنابراین بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و مقایسه آن با برخی از روش‌های موجود، می‌توان مزایای روش پیشنهادی را با در نظر گرفتن شاخص‌های سرعت، دقت و سادگی و هزینه به‌صورت زیر تشریح کرد.

- **شاخص سرعت:** همانطور که در شکل۱۰ مشاهده می‌شود، ورود منحنی امپدانس به مناطق عملیاتی رله امپدانس در حین قطع‌تحریک در حضور هر دو شرایط بارگذاری سنگین و سبک، به ترتیب با تاخیرهای زمانی بیشتر از ۲,۵ ثانیه و ۶ ثانیه اتفاق افتاده است. همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی تمام رویدادها را با زمان ۱,۶ ثانیه نسبت به سایر طرح‌ها به ویژه رله مبتنی بر امپدانس تشخیص می‌دهد.
- **شاخص سادگی و هزینه:** در استراتژی پیشنهادی این مقاله، متغیرهای V_{sg}، P_{sg} و Q_{sg} را می‌توان به راحتی از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ موجود (CT و PT) در ترمینال SG اندازه‌گیری و محاسبه کرد .از این رو، کاربرد آن ساده و مقرون به‌صرفه است.
- **شاخص دقت:** همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در طول TPF با شرایط بارگذاری پیش‌فاز ماشین، مسیر امپدانس به اشتباه وارد مناطق رله می‌شود و باعث خروج ژنراتور با عملکرد حفاظت می‌گردد. در حالی که همانطور که از جدول ۴ مشاهده می‌شود، طرح حفاظت بدون تنظیم ارائه شده در این مقاله هیچ عملکرد اشتباهی در طول چنین رویدادهای PSD ندارد و در نتیجه عملکرد دقیقی نسبت به سایر طرح‌ها دارد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

جدول (۴): مقایسه طرح‌های حفاظتی قطع‌تحریک مختلف

شماره مرجع	نوع بارگذاری	قطع‌تحریک جزئی	قطع‌تحریک کامل	رویداد غیر قطع‌تحریک
[۹]	۸۰درصد و ۰.۸ پس‌فاز	خروج ژنراتور پس از ۱,۷ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۱,۷ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج
[۱۰]		خروج ژنراتور پس از ۱,۸۳ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۱,۸۳ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج
[۱۹]		خروج ژنراتور پس از ۲ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۲ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۸۰۰میلی‌ثانیه
[۲۱]		خروج ژنراتور پس از ۳,۶ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۳,۴ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج
رله امپدانسی		خروج ژنراتور پس از ۳,۶ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۳,۳ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۹۰۰میلی‌ثانیه
این مقاله		خروج ژنراتور پس از ۱,۶ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۱,۶ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج
[۹]	۸۰درصد و ۰.۸ پیش‌فاز	خروج ژنراتور پس از ۱,۷ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۱,۷ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج
[۱۰]		خروج ژنراتور پس از ۱,۸۳ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۱,۸۳ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج
[۱۹]		خروج ژنراتور پس از ۲ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۲ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۷۰۰میلی‌ثانیه
[۲۱]		خروج ژنراتور پس از ۳,۲ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۳,۴ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۲,۴ ثانیه
رله امپدانسی		خروج ژنراتور پس از ۳,۱ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۳,۴ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۷۵۰میلی‌ثانیه
این مقاله		خروج ژنراتور پس از ۱,۶ ثانیه	خروج ژنراتور پس از ۱,۶ ثانیه	عدم صدور فرمان خروج

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه بر اساس تحلیل‌های انجام شده، سه پارامتر اساسی شامل P_{sg}، I_{sg}، θ_{sg} انتخاب گردید و در یک منطق ترکیبی بکار گرفته شدند. در این منطق حفاظتی، پارامترهای I_{sg} و پارامترهای P_{sg} و θ_{sg} به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته و در صورت تحقق الگوهای تعریف شده برای آن‌ها، وقوع قطع‌تحریک شناسایی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE در نرم‌افزار Matlab/Simulink عملکرد سریع و دقیق مدل پیشنهادی را تأیید می‌نماید. مهم‌ترین ویژگی‌های این منطق حفاظتی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ✓ شناسایی انواع مختلف قطع‌تحریک و تمایز آن از سایر رویدادها
- ✓ شناسایی‌تمام حالت‌های قطع‌تحریک طی یک دوره زمانی مناسب
- ✓ عدم تاثیرپذیری عملکرد آن از شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت
- ✓ بکارگیری ساده و کم هزینه طرح پیشنهادی در شرایط واقعی

مراجع

[۱] A. Hasani, F. Haghjoo, F. F. da Silva, and C. Leth Bak, "Synchronous generator loss of field protection: A real-time realistic framework and assessment of some recently proposed methods," IEEE Trans. Power Del., vol. 34, no. 34, pp. 971-979, June. 2019.

[۲] M. Alla, A. Guzman-Casillas, D. S. Finney, and N. Fischer, "Generator loss-of-field protection," U.S. Patent Application 16/425,763, 2020.

[۳] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, "Power System Relaying," third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008.

[۴] D. Reimert, "Protective Relaying for Power Generation Systems," Boca Raton, London, New York, third edition, Taylor & Francis, 2006

[۵] C. R. Mason, "New loss-of-excitation relay for synchronous generators," AIEE Trans., vol. 68, no. 2, pp. 1240–1245, 1949.

[۶] J. Berdy, "Loss of excitation protection for modern synchronous generators," IEEE Trans. on Power App. Syst., vol. PAS-94, no. 5, pp. 1457–1463, Sep./Oct. 1975.

[۷] A. P. Morais, G. Cardoso. Jr., L. Mariotto, L. N. Canha, "Performance evaluation of the adaptive loss of field protection in synchronous generators by means of the positive offset method," IEEE Latin America Trans, vol. 7, no. 6, pp. 643 – 649, 2009.

[۸] B. Mahamedi, J. Zhu, S. M. Hashemi, "A setting free approach to detecting loss of field in synchronous generators," IEEE Trans. Power Del.,vol. 31, no. 5, pp. 2270-2278, Oct. 2016.

[۹] N. Noroozi, H. Yaghobiand Y. Alinejad-Beromi, "Analytical technique for synchronous generator loss of excitation protection," IET Gen. Trans. & Dist., vol. 10, no. 9, pp. 2222-2231, Jul. 2017.

[۱۰] A. Hasani and F. Haghjoo, "A secure and setting-free technique to detect loss of field in synchronous generators," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 32, no. 4, pp. 1512-1522, Dec. 2017.

[۱۱] Ali Rostami & Navid Rezaei, "An Improved Setting-Free Scheme for Fast and Reliable Detection of Complete and Partial Loss-of-Excitation," IEEE systems journal, Feb. 2022.

[۱۲] Ali Rostami & Navid Rezaei, "Fast and Reliable index to protect the synchronous generators against loss of field incidence," IET Gen. Trans. & Dist., vol. 14, no. 24, pp. 6019- 6026, Sep. 2020.

[۱۴] Mahdi Amini, Mahdi Davarpanah, and Majid Sanaye-Pasand, "A Novel Approach to Detect the Synchronous Generator Loss of Excitation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 3, pp. 1429-1438, 2015.

[۱۵] A. Hasani and F. Haghjoo, "Fast and secure detection technique for loss of field occurrence in synchronous generators," IET Electric power applications, vol. 11, no. 4, pp. 567-577, Apr. 2017.

[۱۶] M. Abedini, M. Sanaye-Pasand, M. Davarpanah, "Flux linkage estimation based loss of excitation relay for synchronous generator," IET Gen. Trans. & Dist., vol. 11, no. 1, pp. 280-288, Jan. 2017.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[۱۷] M. Abedini, M. Sanaye-Pasand, M. Davarpanah and R. Iravani, "A loss of field detectiorelay based on rotor signals estimation," IEEE Trans. Power Del.,vol. 33, no. 2, pp. 1429-1438, Apr. 2018.

[۱۸] Moein Abedini, Majid Sanaye-Pasand, and Mahdi Davarpanah, "An Analytical Approach to Detect Generator Loss of Excitation Based on Internal Voltage Calculation," IEEE Trans on Power Del, vol. 32, no. 5, pp. 2329-2338, Oct. 2017.

[۱۹] Ali Rostami, Navid Rezaei, "A novel loss of excitation protection strategy based on reactive power increment of synchronous generators," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 6, pp. 3733-3742, Dec. 2021.

[۲۰] Ali Rostami, Navid Rezaei, Amin Jalilian, Behzad Naderi, Micheal Negtevitsky, " Load angle based loss of excitation protection scheme for parallel connected synchronous generators," IEEE Transactions on Industry Applications, early access, 2022.

[۲۱] Ali Rostami, Navid Rezaei, "Improvement of the impedance-based loss-of-field protection scheme based on the dynamic behavior of the synchronous generators," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 141, pp. 1-12, 2022.

[۲۲] Ali Rostami, Navid Rezaei, "A reliable and straightforward index to avoid nuisance trip of the conventional Z-based loss-of-field relay in synchronous generators," IET Generation Transmission & Distribution, vol. 16, no. 6, pp. 1201-1211, 2022.

[۲۳] Esmaeil Zahmatkeshan, "A Novel Approach for Detection and Protection of Fault Excitation in Synchronous Machines," IEEE International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS), 2023. (DOI: 10.1109/IPAPS58344.2023.10123313)

[۲۴] Shahab Dolatabadi, Heresh Seyedi, Sajjad Tohidi, "A new method for loss of excitation protection of synchronous generators in the presence of static synchronous compensator based on the discrete wavelet transform," Electric Power Systems Research, vol. 209, 2022.

[۲۵]R.Bekhradian, M.Sanaye-pasand, M.Davarpanah, M.Abdian, "Innovative loss of field protection Algorithm for small-scale synchronous Generators," IEEE Transaction on power Delivery, vol. 38, No. 4, pp. 2661-2672, 2023.

رزومه



محمدسجاد فتح الهی در الشتر متولد شده است (۱۳۶۱) دارای مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دانشجوی دکتری در رشته مهندسی برق قدرت است. علایق تحقیقاتی او شامل حفاظت سیستم‌های قدرت و نیروگاه، مباحث مرتبط با برنامه‌ریزی تولید و سیستم‌های کنترلی نیروگاه است.



سامان حسینی همتی در کرمانشاه متولد شده است (۱۳۶۴) دارای مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری (با رتبه ممتاز) در رشته مهندسی برق قدرت است. وی در حال حاضر استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه است. علایق تحقیقاتی او شامل بهره‌برداری و بهینه‌سازی از سیستم‌های قدرت و انرژی تجدیدپذیر و برنامه‌ریزی منابع انرژی تجدیدپذیر است.



عبدالله راستگو در کنگاور متولد شده است (۱۳۶۴) دارای مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری (با رتبه ممتاز) در رشته مهندسی برق قدرت است. وی در حال حاضر استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه است. علایق تحقیقاتی او شامل بهینه‌سازی در سیستم‌های قدرت، بهینه‌سازی دوسطحی، ریزشبکه و برنامه‌ریزی منابع انرژی تجدیدپذیراست.



سعید خراطی در بهبان متولد شده است (۱۳۶۶) دارای مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری دانشگاه صنعتی شریف در رشته مهندسی برق قدرت است. وی در حال حاضر استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه است. علایق تحقیقاتی او شامل مدیریت و برنامه‌ریزی شبکه قدرت است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

A New Hybrid Loss of Excitation Protection Scheme based on the Execution of the Most Effective Variables of Synchronous Generators

Mohammad Sajad Fatolahi[1], Saman Hosseini-Hemati[* 2], Abdollah Rastgou[3], Saeed Kharrati[4]

1- Ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran,
*2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran, Saman.hosseini@iau.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran
4- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

Abstract: The most common disadvantages of impedance relays are its improper operation in the conditions of disturbances of the power system and its long operation time. Based on this, in order to improve the accuracy and speed of detection of the event of excitation interruption and distinguish it from other transient events of the power system, a comprehensive study has been conducted on various measurable parameters of the synchronous generator. Based on the analysis, the most basic variables including active power (Psg), angle between voltage and output current (θsg) and machine output current (Isg) were selected and used in a precise combination logic. In this structure, the changes of Isg machine are continuously monitored and if it increases to more than the defined threshold, the changes of Psg and θsg parameters are investigated. In such a case, the increase of Psg indicates the response of the car control system and the normal operation of the car will continue. However, if Psg is almost constant and θsg is positive (under-excited state), the increase of Isg over the permissible limit indicates that the excitation system is inactive and as a result, the reactive power is received more than the under-excited limit, so the trip command The generator is exported. In fact, the reason for the increase of the output current of the machine to more than the defined threshold (while Psg is constant and θsg is positive) is the high absorption of reactive power from the power system due to the occurrence of excitation interruption. The proposed hybrid method of this study has been evaluated in the MATLAB/Simulink (2017b) software environment during different scenarios of power system transients and excitation interruptions on IEEE 39-bus standard system. The results of the simulations confirm the effectiveness of the proposed protection model. It should be noted that the superiority of the proposed method from the points of view of accuracy, speed, simplicity and implementation cost has also been compared with other designs.

Keywords: synchronous generator; loss of excitation protection; impedance relay; Angle between voltage and current; current.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]