Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 4 – Winter 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

A simple optimization logic based on the parameters of the angle between voltage and current and the size of the terminal voltage to protect loss of excitation of synchronous generator

Mohammad Sajad Fatolahi[*1], Javad moradi[2], Ali Rostami[3]
[1]msffatholahi@gmail.com
[2]Javadmiradi54@gmail.com
[3]alirostami@gmail.com

Abstract:
In this study, by using two variables of the angle between voltage and current (θsg) and terminal voltage (Vsg) in a precise combinational logic, a new protection method is presented to detect the excitation loss of a synchronous generator. In this structure, the changes in θsg of the machine are continuously monitored and if it becomes positive, the changes in the Vsg parameter are examined. In this situation, if the amplitude of Vsg is greater than 0.95 per unit, it indicates the response of the machine control system and the normal operation of the machine will continue. However, if the magnitude of Vsg decreases and reaches a value less than 0.95 per unit, excitation loss occurs and the generator trip command is issued. The combined method proposed in this study has been evaluated in the MATLAB/Simulink (2017b) software environment during different scenarios of excitation loss and power system transients on the IEEE standard 39-bus 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 in terms of accuracy, speed, simplicity and implementation cost has also been compared with the impedance method.

Keywords: synchronous generator, loss of excitation protection, impedance relay, power angle, terminal voltage.

Received: 30 Nov. 2024
Revised: 9 Jan. 2025
Accepted: 1 Feb. 2025

*** Corresponding Author:** Dr.Mohammad Sajad Fatholahi

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523]

Citation: M. S. Fatolahi, J. moradi, A. Rostami, "A simple optimization logic based on the parameters of the angle between voltage and current and the size of the terminal voltage to protect loss of excitation of synchronous generator", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 4, pp. 13-22, February 2025 (in Persian).

مقاله پژوهشی

یک منطق ترکیبی ساده مبتنی بر پارامترهای زاویه بین ولتاژ و جریان و اندازه ولتاژ ترمینال جهت حفاظت قطع تحریک ژنراتورهای سنکرون

دکترمحمدسجاد فتح الهی*[1]، مهندس جواد مرادی[2]، دکترعلی رستمی[3]

*۱- شرکت مدیریت تولید برق بیستون، کرمانشاه، ایران، msffatholahi@gmail.com
۲- شرکت مدیریت تولید برق بیستون، کرمانشاه، ایران، Javadmoradi54@gmail.com
۳- شرکت مدیریت تولید برق بیستون، کرمانشاه، ایران، ali.rostami.ir@gmail.com

چکیده: در این مطالعه با بکارگیری دو متغیر زاویه بین ولتاژ و جریان (θ_{sg}) و ولتاژ ترمینال (V_{sg}) در یک منطق ترکیبی دقیق، یک روش حفاظتی جدید جهت شناسایی قطع تحریک ژنراتور سنکرون ارائه شده است. در این ساختار، تغییرات $\boldsymbol{\theta}_{sg}$ ماشین به طور پیوسته مانیتور شده و در صورت مثبت شدن آن، تغییرات پارامتر V_{sg} مورد بررسی قرار می گیرد. در این شرایط چنانچه دامنه V_{sg} از ۰,۹۵ پریونیت بزرگتر باشد، نشان دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. اما در صورتی که اندازه V_{sg} کاهش یافته و به مقدار کمتر از ۰,۹۵ پریونیت برسد، قطع تحریک رخ داده و دستور تریپ ژنراتور صادر می گردد. روش ترکیبی پیشنهادی این مطالعه در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink (2017b) در طی سناریوهای مختلف قطع تحریک 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 می نماید. لازم به ذکر است که برتری روش پیشنهادی از دیدگاه‌های دقت، سرعت، سادگی و هزینه اجرا با روش امپدانسی نیز مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: ژنراتور سنکرون؛ حفاظت قطع تحریک؛ رله امپدانسی؛ زاویه قدرت؛ ولتاژ ترمینال.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمدسجاد فتح الهی
نشانی نویسنده مسئول: کرمانشاه، کیلومتر ۲۵ جاده کرمانشاه – همدان، شرکت مدیریت تولید برق بیستون،msffatholahi@gmail.com

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

۱- مقدمه

ژنراتور سنکرون به عنوان گران‌ترین تجهیز سیستم قدرت، نقشی حیاتی در پایداری سیستم قدرت داشته و بر این اساس برای شناسایی دقیق، سریع و بدون هیچ گونه نقصانی در آن باید به رله‌های حفاظتی مختلفی مانند اضافه/کاهش فرکانس و ولتاژ، دیفرانسیل، بار نامتعادل، ارت فالت، توان معکوس، قطع تحریک و ... مجهز شوند [۱]. یکی از حفاظت‌های کلیدی آن حفاظت قطع تحریک بوده، که می‌تواند در اثر علت‌های گوناگون مانند قطع تصادفی مدار شکن میدان، خطای سیستم کنترل خودکار ولتاژ AVR اتصال کوتاه شدن مدار تحریک و ... رخ دهد [۲]. وقوع قطع تحریک و تداوم بهره‌برداری در این وضعیت می‌تواند علاوه بر آسیب رساندن به خود ژنراتور تهدیدی جدی برای پایداری سیستم قدرت نیز محسوب گردد. از اثرات منفی از دست رفتن سیستم تحریک در یک ژنراتور سنکرون در سیستم قدرت می‌توان به افزایش بیش از ظرفیت نامی بارگذاری سیم‌پیچ‌های استاتور و گرم شدن آن‌ها بدلیل دریافت قابل توجه Q_{sg} از شبکه بخصوص در زمان بارگذاری سنگین، ایجاد فرکانس لغزشی در رتور و گرم شدن آن، ناپایداری و فروپاشی ولتاژ در سیستم‌های قدرت ضعیف به علت جذب توان راکتیو از سایر ژنراتورهای باقیمانده در سیستم قدرت و غیره را نام برد [۳ و ۴]. لذا بدین منظور یک حفاظت امپدانسی با مشخصه منفی جهت شناسایی این رویداد در ژنراتورهای سنکرون نیروگاهی تعریف می‌گردد [۵ و ۶]. 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 قطع تحریک و بسیاری از رویدادهای غیر قطع تحریک می‌باشد. با این وجود از عمده‌ترین 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 گذاری 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 می‌باشد.

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

در طرح پیشنهادی [۸] تغییر حالت‌های گذرا ژنراتور سنکرون که توسط فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) تخمین زده می‌شود، زاویه بین ولتاژ گذرا و فازور ولتاژ داخلی محور q در طول رویدادهای LOE افزایش می‌یابد؛ بنابراین از این زاویه و مشتق آن استفاده می‌شود. تخمین متغیرهای داخلی ژنراتور برای دستیابی به زاویه بین ولتاژ گذرا و فازور ولتاژ داخلی استفاده می‌شود. در مطالعه [۹] رویکرد یادگیری ماشین را برای تشخیص خطای LOE و همچنین منطق طبقه‌بندی برای تمایز عیب LOE از شرایط نوسان قدرت ناشی از خطای خط ارائه می‌کند. این مقاله از روش آماری Hotelling's-T^2 برای محاسبه شاخص‌های خطا مبتنی بر Hotelling-T^2 (HT^2-FI) برای تشخیص خطا و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای طبقه‌بندی استفاده می‌کند. داده‌های سری زمانی کمیت‌های الکتریکی مانند ولتاژ پایانه و توان راکتیو ژنراتور از سیستم تست گذرگاه بی‌نهایت Single Machine شبیه‌سازی شده استخراج شده و به‌عنوان داده ورودی استفاده می‌شود. در [۱۰] تجزیه‌وتحلیل تبدیل موجک گسسته (DWT) روی سیگنال ولتاژ ترمینال ژنراتور و ویژگی‌های دامنه فرکانس زمانی (TFD) برای تعریف ویژگی‌های منحصربه‌فرد خطای LOE استخراج می‌شوند. در طرح ارائه شده [۱۱] یک رویکرد جدید را تنها با بررسی جریان آرمیچر و توان اکتیو در ترمینال ژنراتور ارائه می‌کند. این روش هیچ تأخیر زمانی عمدی را در نظر نمی‌گیرد. در مطالعه [۱۲] مسئله اصلی برای تشخیص LOE و نوسان توان پایدار (SPS) تأخیر زمانی است که بخش اولیه زمان تشخیص در همه استراتژی‌های وعده‌دهنده در حال انجام است. این مقاله یک طرح مؤثر بر اساس اولین مشتق زاویه ضریب توان معادل (EPFA) مقادیر ولتاژ و جریان ۳ فاز در محور مربع مستقیم را برای تشخیص LOE معرفی می‌کند. الگوریتم جدید، بر اساس EPFA، برای کاهش زمان موردنیاز طرح تشخیص LOE توسعه‌یافته است.

در استراتژی معرفی شده [۱۳] جهت شناسایی رویدادهای قطع‌تحریک روش هوش مصنوعی استفاده شده است و از پارامترهای الکتریکی و غیر الکتریکی و با پارامترهای کمتری نسبت به سایر روش های غیر هوش مصنوعی استفاده شده و دارای دقت بالایی می باشند و عیب نصب تجهیزات و سنسورها جهت اندازه‌گیری و استخراج داده ها وجود دارد. در مطالعات [۱۴] مطالعه ای با حضور ادوات فکتس و تاثیرات این ادوات بر روی حفاظت قطع‌تحریک انجام شده و طولانی تر شدن زمان شناسایی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- winter 2025

رویدادها با حضور این ادوات مشاهده می‌گردد.روش ارائه شده [۱۵] با استفاده از مشتق متغیرهای ولتاژ و ضریب قدرت ماشین روشی ارائه شده که عیب اساسی این روش این است که خطای قطع‌تحریک جزئی و اغتشاشات سیستم قدرت را پوشش نمی‌دهد.

در سیستم حفاظتی مشخص شده در [۱۶] ادوات فکتس مورد استفاده در خط انتقال از تریستور راکتور و خازن برای کنترل توان استفاده می‌کند. اگرچه کنترل کننده های فکس مزایای زیادی دارند اما پاسخ گذرا ادوات فکتس پارامترهای الکتریکی را که توسط رله‌های مختلف برای حفاظت از سیستم مشاهده می‌شود، تغییر می‌دهد. روش جدید حفاظت قطع‌تحریک پیشنهاد شده برای محاسبه زاویه فاز و مقدار ولتاژ با جریان استفاده می‌شود. ولتاژ و جریان با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری فازور که در ترمینال ژنراتور متصل است در استراتژی حفاظتی پیشنهادی تخمین زده می‌شود. امیدانس با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. سیستم استنتاج فازی فازیPMU بسته به تابع عضویت و بر اساس قانون بین تریب و هشدار پاسخی را انتخاب می‌کند.در مرجع [۱۷] از دست دادن تحریک (LOE) و نوسان قدرت (PS) برخی از شرایط مهمی هستند که ممکن است در ژنراتور سنکرون ایجاد شوند که منجر به از دست دادن پایداری سیستم قدرت می‌شود. در این مقاله طبقه بندی کننده جنگل تصادفی (RF) و طبقه بندی کننده شبکه عصبی پیش خور(FFNN) استفاده شده است.در روش [۱۸] از دست دادن حفاظت تحریک ژنراتور به طور کلی بر اساس صفحه مختصات R-X است در حالی که حد تحریک پایین معمولاً بر اساس صفحه مختصات P-Q است. بوسیله روش کاهش A0 می توان حفاظت قطع‌تحریک از صفحه مختصات R-X به صفحه مختصات P-Q ترسیم نه بر اساس صفحه مختصاتP-Q ، افت حفاظت تحریک ژنراتور و حد کمر یک پایین محاسبه می‌شود. درطرح پیشنهادی [۱۹] یک استراتژی کامل حفاظت قطع‌تحریک برای LSC مورد استفاده در UHVDC پیشنهاد می‌کند. ابتداء نقص معکوس موجود از طریق تجزیه و تحلیل عمیق رفتار توان راکتیو ارائه شده است. سپس اختلاف جریان تحریک بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی معادل به عنوان ویژگی خطای جدید افزایش می‌یابد. درحفاظت مبتنی بر مقایسه با ویژگی توان راکتیو معکوس موجود که در شرایط فاز اصلی LSC سالم نیز ظاهر می‌شود، این ویژگی جریان فقط در فرآیند LOE ظاهر می‌شود و بنابراین معمولی تر است. از آنجایی که جریان تحریک واقعی در عمل قابل اندازه‌گیری نیست، مدل تخمین با آزمایش و شبیه‌سازی ساخته و تایید می‌شود.درمرجع [۲۰] روش جدیدی برای تشخیص عیب LOE ارائه شده است که بر اساس مشتق ولتاژ ترمینال و مشتق زاویه توان ژنراتور سنکرون طراحی شده است. با توجه به ایده پیشنهادی مطالعات شبیه‌سازی کاملی با در نظر گرفتن حالتهای خطای مختلف در ژنراتور سنکرون و شرایط مختلف حاکم بر آن برای بررسی صحت عملکرد انجام شده است. این مطالعات نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در تشخیص خطای LOE سریع تر و دقیق تر است. همچنین امنیت بالاتری در تشخیص خطایLOE از SPS دارد. درطرح پیشنهادی [۲۱] به کمک ادوات فکتس و خصوصا (UPFC)، امپدانس‌های سیستم کمی تغییر می‌کند که اساس رله‌های قطع‌تحریک معمولی است و بنابراین در نهایت مانع عملکرد آن می‌شود و براین اساس یک طرح مبتنی بر هوش مصنوعی برای تفکیک قطع‌تحریک کامل، قطع‌تحریک جزئی، نوسانات توان و شرایط عادی پیشنهاد شده است.

بنابراین با توجه به مشکلات مطرح شده برای روش‌های توسعه داده شده در زمینه قطع تحریک، کماکان نیاز به یک روش حفاظتی جامع و کاربردی به منظور دسته بندی دقیق و سریع رویدادها با کمترین هزینه کاملا محسوس می‌باشد. بر این اساس، در این مطالعه بر اساس تحلیل‌های انجام شده، دو پارامتر اساسی شامل V_{sg}، θ_{sg} انتخاب شده و در یک فرمت ترکیبی دقیق بکارگرفته شده‌اند. در این ساختار، تغییرات θ_{sg} ماشین به طور پیوسته مانیتور شده و در صورت مثبت شدن آن تغییرات پارامتر V_{sg} مورد بررسی قرار می گیرد. در صورتی که θ_{sg} کاهش یافته و به مقدار کمتر از ۰,۹۵ پریونیت برسد قطع تحریک رخ داده و دستور تریپ ژنراتور صادر می گردد.در این شرایط افزایشی بودن V_{sg}به بیشتر از ۰,۹۵ پریونیت نشان دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. نتایج شبیه سازی‌های انجام شده بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE عملکرد سریع و دقیق مدل پیشنهادی را تأیید می نماید.

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

- ✓ شناسایی وقوع قطع تحریک در تمامی شرایط بهره‌برداری ژنراتور و تمایز دقیق آن از سایر رویدادهای گذرای سمت شبکه.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

- ✓ شناسایی تمامی حالت‌های وقوع قطع تحریک در یک بازه زمانی بسیار کم و عدم تاثیرپذیری آن از شرایط بهره‌برداری ماشین.
- ✓ به‌کارگیری ساده و کم هزینه طرح پیشنهادی این مطالعه در ژنراتورهای سنکرون نیروگاهی.

در نتیجه، نوآوری و سهم این مطالعه در مقایسه با رله امپدانسی، توسط طبقه بندی ادبیات ارائه شده در جدول ۱ مورد تأکید قرار گرفته است.

Table (1): Classification of methods considering the most important evaluation factors

جدول(۱): طبقه بندی روش ها با در نظر گرفتن مهم ترین عوامل ارزیابی

روش حفاظتی	سرعت	دقت	اقتصادی
رله امپدانسی	×	×	√
این مقاله	√	√	√

سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر ارائه شده است. در بخش دوم روش حفاظتی قطع تحریک 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 قطع تحریک پیشنهادی

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

الف) تحلیل تغییرات پارامترهای انتخابی

- ✓ **تغییرات $\mathbf{V_{sg}}$:** ژنراتورهای سنکرون مجهز به یک سیستم تحریک جهت کنترل پارامتر ولتاژ می‌باشند که در صورت عملکرد صحیح آن، این پارامترتغییرات خواهد داشت. در واقع جهت افزایش ولتاژ باید پارامترهای تحریک ماشین افزایش یافته و با ازدست رفتن سیستم تحریک ژنراتور کاهش می‌یابد. لذا چنانچه ولتاژ خروجی ژنراتور کاهش یابد، می بایست ژنراتور در ناحیه فوق تحریک کارکرده و جهت اصلاح ولتاژ خروجی، پارامترهای تحریک را افزایش دهد. لذا در این شرایط چنانچه ژنراتور درحالت زیر تحریک بهره‌برداری شود می تواند نشانه قطعی از وقوع قطع تحریک باشد. لذا جهت اطمینان از این شرایط باید پارامتر زاویه بین ولتاژ و جریان ژنراتور مورد بررسی قرار گیرد.
- ✓ **تغییرات $\mathbf{\theta_{sg}}$:** عمدتاً ژنراتورها در حالت فوق تحریک بهره‌برداری شده و در این حالت نیز زاویه بین ولتاژ و جریان منفی می باشد یا به عبارتی جریان از ولتاژ عقب تر خواهد بود. اما زمانی که ژنراتور در حالت زیر تحریک بهره‌برداری می شود، این زاویه مثبت شده و می تواند ناشی از قطع تحریک یا پاسخ سیستم تحریک به افزایش ولتاژ شبکه ناشی از توان راکتیو خازنی آن باشد. لذا جهت اطمینان از علت کارکرد ژنراتور در حالت زیر تحریک وضعیت ولتاژ باید بررسی شده و بر اساس آن تصمیم گیری شود.

لذا بر اساس تحلیل فوق پارامترهای ذکر شده در قالب یک فرمت ترکیبی به‌کارگرفته شده‌اند که در بخش بعدی تشریح می-گردد.

ب) فلوچارت روش حفاظت قطع تحریک پیشنهادی

در شکل (۱) فلوچارت روش حفاظت قطع تحریک پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، ابتدا پارامترهای V_{sg}، θ_{sg} (با نرخ نمونه برداری ۱ کیلوهرتز) از ژنراتور تحت حفاظت اندازه‌گیری می‌شود. سپس با توجه به ترکیبی بودن این روش پیشنهادی، ابتدا وضعیت تغییرات $\mathbf{\theta_{sg}}$ ماشین به‌طور پیوسته مانیتور شده و در صورت افزایش آن به بیشتر از

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- winter 2025

مقدار صفر و به‌عبارتی مثبت شدن زاویه بین ولتاژ و جریان تغییرات پارامتر V_{sg} مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این شرایط افزایشی بودن V_{sg}به بیشتر از ۰,۹۵ پریونیت نشان‌دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه پیدا خواهد کرد. اما در صورتی‌که θ_{sg} کاهش یافته و به مقدار کمتر از ۰,۹۵ پریونیت برسد قطع تحریک رخ داده و دستور تریپ ژنراتور صادر می‌گردد، لازم به ذکر است که زمان لازم برای بررسی تغییرات پارامترهای انتخابی ۱,۶ ثانیه درنظرگرفته شده است.

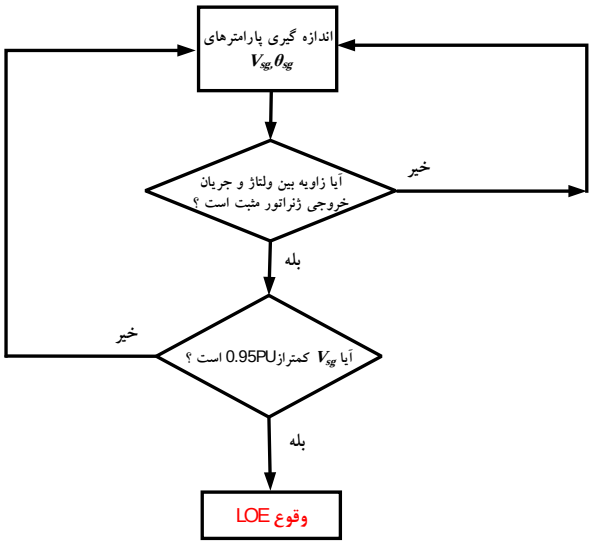


Figure (1): Flowchart of the proposed loss of excitation protection method

شکل(۱): فلوچارت روش حفاظت قطع تحریک پیشنهادی

۳- مطالعات شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

به منظور انجام یک ارزیابی دقیق و عمیق بر روی عملکرد روش پیشنهادی این مطالعه، تست‌های مختلفی اعم از رویدادهای قطع تحریک و اغتشاشات سیستم قدرت بر روی سیستم ۳۹ شین استاندارد IEEE شکل (2) انجام شده و نتایج آن نیز به طور دقیق تحلیل و ارائه شده است.

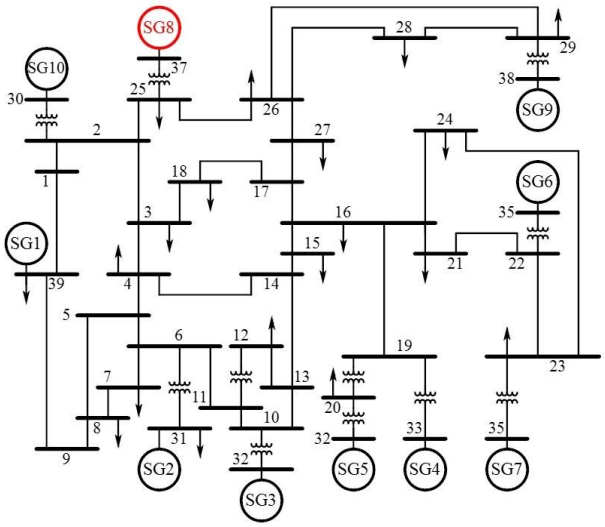


Figure (2): IEEE 39-bus standard system

شکل(۲): سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

الف) رویدادهای قطع تحریک

در این بخش روش پیشنهادی این مطالعه در شرایط وقوع قطع تحریک در ژنراتور تحت مطالعه (SG8) واقع در شین شماره ۱ سیستم شکل (۲) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور وقوع قطع تحریک به صورت کامل و جزئی مد نظر قرار گرفته، که در آن ولتاژ تحریک در شرایط قطع تحریک کامل و جزئی به ترتیب صفر و به ۰,۴ تقلیل یافته است. هر یک از حالت‌های قطع تحریک نیز در دو حالت مختلف، شامل بارگذاری سنگین و سبک و در شرایط بهره‌برداری ژنراتور به صورت فوق تحریک و زیر تحریک مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام شده در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، طبق الگوریتم ارائه شده در شکل (۱)، منطق تعریف شده جهت شناسایی وقوع قطع تحریک که فراتر رفتن θ_{sg} از مقدار صفر و به عبارتی مثبت شدن زاویه بین ولتاژ و جریان می باشد و تغییرات پارامتر V_{sg} مورد بررسی قرار می گیرد. در این شرایط افزایشی بودن V_{sg} به بیشتر از ۰,۹۵ پریونیت نشان دهنده پاسخ سیستم کنترلی ماشین بوده و کارکرد عادی ماشین ادامه دارد و در صورتی که θ_{sg} کاهش یافته و به مقدار کمتر از ۰,۹۵ پریونیت برسد قطع تحریک رخ داده و دستور تریپ ژنراتور صادر می‌گردد.

Table (2): Simulation information of loss of excitation events

جدول (۲): اطلاعات شبیه سازی رویدادهای قطع تحریک

شماره تست	مقدار بار	نوع بارگذاری	نوع قطع تحریک
۱	۱۸۰+j۸۰	سنگین و فوق تحریک	کامل
۲	۱۸۰-j۸۰	سنگین و زیر تحریک	کامل
۳	۶۰+j۳۰	سبک و فوق تحریک	کامل
۴	۶۰-j۳۰	سبک و زیر تحریک	کامل
۵	۱۸۰+j۸۰	سنگین و فوق تحریک	جزئی
۶	۱۸۰-j۸۰	سنگین و زیر تحریک	جزئی
۷	۶۰+j۳۰	سبک و فوق تحریک	جزئی
۸	۶۰-j۳۰	سبک و زیر تحریک	جزئی

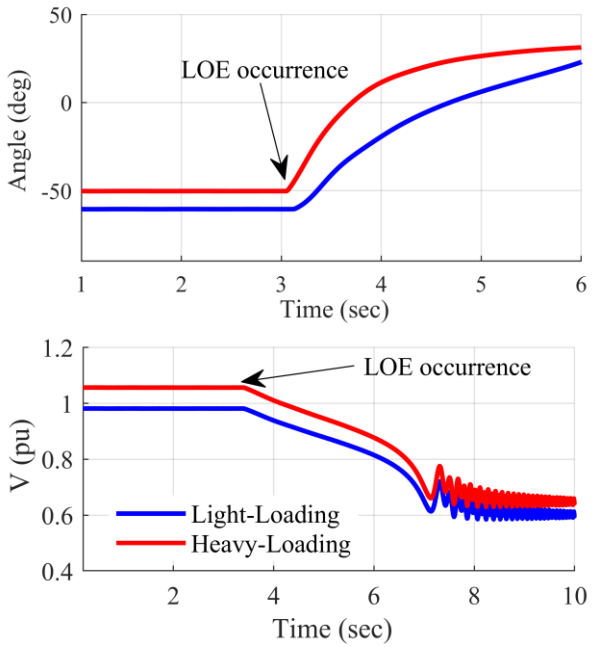


Figure (3): Simulation loss of excitation loss occurrence under light load conditions (generator operating in over-excitation mode) and heavy load conditions (generator operating in under-excitation mode)

شکل (۳): نتایج شبیه سازی وقوع قطع تحریک درشرایط بارگذاری سبک (کارکرد ژنراتور به صورت فوق‌تحریک) و سنگین (کارکرد ژنراتور به صورت زیرتحریک)

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

Table (3): Simulation information of non-loss of excitation events

جدول (۳): اطلاعات شبیه سازی رویدادهای غیر قطع تحریک

شماره تست	بارگذاری مختلف ژنراتور سنکرون
۱	۱۸۰+j۸۰
۲	۱۸۰-j۸۰
۳	۶۰+j۳۰
۴	۶۰-j۳۰

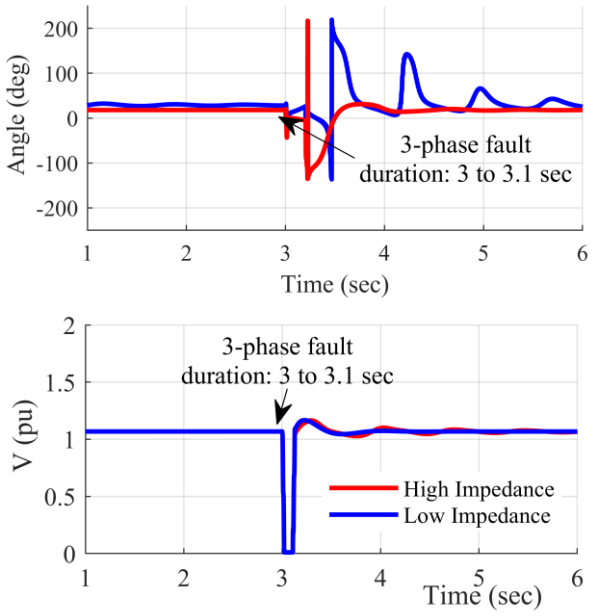


Figure (4): Simulation results of three-phase short-circuit fault with low fault impedance and high fault impedance

شکل (۴): نتایج شبیه سازی خطای اتصال کوتاه سه فاز با امپدانس خطای کم و امپدانس خطای زیاد

همانطور که مشاهده می‌گردد، در تست انجام شده، شرایط تعریف شده در الگوریتم شکل (1) جهت شناسایی وقوع قطع تحریک محرز نشده و تمامی حالت‌ها به درستی بعنوان رویداد غیر قطع تحریک مد نظر قرار گرفته است.

۴- مقایسه روش پیشنهادی با رله متداول امپدانسی

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 می‌باشد. در این بخش نیز به منظور تأیید عملکرد آن در مقایسه با روش امپدانسی قطع تحریک که در صنعت به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد برخی از تست‌های انجام شده در بخش قبل توسط رله امپدانسی نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، روش پیشنهادی این مطالعه از نظر سرعت و دقت شناسایی دارای شرایط بهتری نسبت به رله امپدانسی قطع تحریک می‌باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025

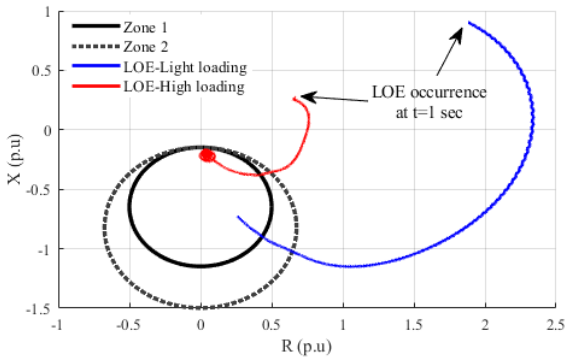


Figure (5): Simulation results of the occurrence of complete and partial excitation loss under heavy and light generator loading in over excitation operating conditions

شکل(۵): نتایج شبیه سازی وقوع قطع تحریک کامل و جزئی تحت بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت فوق تحریک

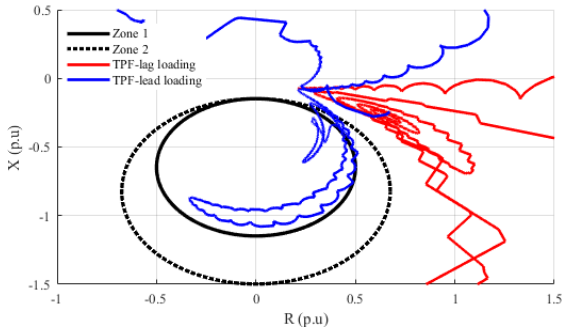


Figure (6): Simulation results of three-phase short-circuit fault under excitation heavy and light generator loading in under excitation operating conditions

شکل (۶): نتایج شبیه سازی خطای اتصال کوتاه سه فاز تحت بارگذاری سنگین و سبک ژنراتور در شرایط بهره‌برداری به صورت زیر تحریک

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه بر اساس تحلیل‌های انجام شده، دو پارامتر اساسی شامل V_{sg}، θ_{sg} انتخاب گردید و در یک منطق ترکیبی بکار گرفته شدند. در این منطق حفاظتی، پارامترهای V_{sg} و θ_{sg} به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته و در صورت تحقق الگوهای تعریف شده برای آن‌ها، وقوع قطع تحریک شناسایی می گردد. نتایج شبیه سازی‌های انجام شده بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شین IEEE در نرم افزار 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 قطع تحریک و تمایز آن از سایر رویدادها
- ✓ شناسایی تمام حالت‌های قطع تحریک طی یک دوره زمانی مناسب
- ✓ عدم تاثیر پذیری عملکرد آن از شرایط بهره‌برداری سیستم قدرت
- ✓ به‌کارگیری ساده و کم هزینه طرح پیشنهادی در شرایط واقعی

References مراجع

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- winter 2025 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]

[1] 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.
[2] M. Alla, A. Guzman-Casillas, D. S. Finney, and N. Fischer, "Generator loss-of-field protection," U.S. Patent Application 16/425,763, 2020.
[3] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, "Power System Relaying," third edition, John Wiley & Sons Ltd, 2008.
[4] D. Reimert, "Protective Relaying for Power Generation Systems," Boca Raton, London, New York, third edition, Taylor & Francis, 2006
[5] C. R. Mason, "New loss-of-excitation relay for synchronous generators," AIEE Trans., vol. 68, no. 2, pp. 1240–1245, 1949.
[6] 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.
[7] 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.
[8] Momeni, E., H. Yaghobi, and A. Shahzadi, Using dynamic state estimation to detect loss of excitation in synchronous generators. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024. 18 Issue 3 Pages 639-652.
[9] Hemavathi, R. and M. Geethanjali, Machine Learning Approach to Differentiate Excitation Failure in Synchronous Generators from Power Swing. 2023.
[10] Hemavathi, R. and M. Geethanjali, Ensemble machine learning approach to identify excitation failure in synchronous generators. Engineering Failure Analysis, 2023. 152: p. 107506.
[11] Chatterjee, S., D. Das, and K. Bhattacharjee. A High Speed Method for Loss of Excitation Detection. in 2022 IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GlobConPT). [12] H. A. A. el-Ghany, E. S. Ahmed and A. E. ELGebaly, A Reliable Loss of Excitation Protection Technique Based on EPFA for Synchronous Generators. IEEE Transaction on power Delivery, 2022. 37(3): p. 1445-1455.
[13] Z.A. Barakat, A. A. Hajjar, T. Kherbek, H.H. Alhelou, "Discriminating between loss of excitation and power swings in synchronous generator based on ANN," Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 30, pp. 545-556, March. 2019.
[14] S. Nandkeolyar, " Improvement of loss of excitation protection of an alternator in the presence of shunt-Facts- A comprehensive review," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 114, 2020.
[15] R. Fathi-Shoob, M. Niaz-Azari, "New method to detect loss of excitation in synchronous generators," IETE Journal of Research, early access, 2021.
[16] Kiruthiga, M. and S. Periasamy, Impact of STATCOM on the Loss of Excitation Protection, in AI Approaches to Smart and Sustainable Power Systems, IGI Global. p. 101-119, 2024.
[17] Gulati, V. and K. Verma. Supervised Machine Learning to Identify Loss of Excitation and Power Swing in a Generator. in 2023 7th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA). 2023.
[18] Xiao, M., et al. Study on the coordination strategy of generator loss of excitation protection and low excitation limit. in International Conference on Mechanisms and Robotics (ICMAR 2022). 2022. SPIE.
[19] Guo, Z., et al., A complete protection strategy for loss of excitation of large-scale synchronous condenser in UHVDC. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023.
[20] Shoob, R.F. and M.N. Azari, New method to detect loss of excitation in synchronous generators. IETE Journal of Research, 2023. Vol. 69 Issue 6 Pages 3859-3870.
[21] Y.Anamika, A.Mishra, M. Bhatnagar. "Detection of partial loss of excitation faults in generator in the presence of UPFC." Journal of The Institution of Engineers (India): Series B 102: 213-226, 2021.
[22] M. S. Fatolahi, S. Hosseini- Hemati, A. Rastgou and S. Kharrati, " A multi- variables loss of excitation protection scheme to improve the factors of accuracy and speed of detection than the conventional impedance relay. The Journal of Engineering, Vol. 2023-Issue 11 ,01 November 2023.
[23] S. Hosseini-Hemati, A. rastgou, M.S. Fatholahi, S. Kharrati, " A New Hybrid Loss of Excitation Protection Scheme based on the Execution of the Most Effective Variables of Synchronous Generators", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - Issue. 4 Pages 65-75 – Winter 2024.
[24] Ali Darvish Falehi, " Designing an energy storage system based on type II fuzzy logic controller to reduce dc-link voltage fluctuations of permanent magnet synchronous generator wind turbine", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 11 - Issue. 4 Pages 23-32 – Winter 20

[DOI: 10.82362/jeps.2025.w.523] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-12]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 4- Winter 2025