



A method to detect the loss of excitation in the synchronous generator using Finite Element method via Maxwell software

R. Fathi Shoob¹, M.Niaz Azari²

*Associate Professor, Mazandaran University of Science and Technology, Behshahr, Iran.

(Received: 2024/05/16 revised: 2024/09/03 Accepted:2024/10/22 published: 2024/11/06)

Abstract

The inherent limitations of prism-based surface plasmon resonance (SPR) biosensors, primarily due to their bulky design and dependence on mechanical components, have constrained their deployment in field and operational applications. In light of these challenges, there has been a significant advancement in the development of fiber optic-based SPR biosensors. This paper presents the design of a highly sensitive SPR biosensor utilizing a dual-core photonic crystal fiber (PCF). In this configuration, a gold layer serves as the plasmonic material, enabling the investigation of refractive index variations in the medium surrounding the PCF structure. Surface plasmons are excited through the coupling of the leakage mode of the PCF with the plasmonic mode. Additionally, a thin layer of titanium dioxide (TiO₂) is applied over the gold to prevent oxidation. According to simulations conducted using the Finite element method (FEM) method, the biosensor demonstrates the sensitivity of 7000 nm/RIU in terms of wavelength sensitivity and 380 RIU⁻¹ in terms of amplitude sensitivity, confirming the designed device's applicability in drug detection, biological sensing, and other analytical scenarios.

Keywords: Surface plasmon resonance, Biosensor, Amplitude sensitivity; PCF, Wavelength sensitivity

Cite this article: R. Fathi Shoob , M.Niaz Azari, “A method to detect the loss of excitation in the synchronous,” Applied Electromagnetics , vol.12 , no.2 , pp.39-52 <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.5.5>.



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: miladniazazari@mazust.ac.ir

علمی - پژوهشی

روشی برای تشخیص خطای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون با استفاده از روش اجزا محدود در نرم افزار ماکسول

رضا فتحی شوب^۱، میلاد نیاز آذری^۲

۱- دکتری، ۲- دانشیار دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۱، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

یکی از مهم‌ترین خطاهای ایجاد شده در ژنراتور سنکرون، خطای قطع تحریک است. این خطا در اثر معیوب بودن سیستم تحریک، باز شدن کلید تحریک در شرایط بهره‌برداری ژنراتور، خطا در سیستم تنظیم ولتاژ و یا بار شدید خازنی اتفاق می‌افتد. در این حالت توان راکتیو تحویلی توسط ژنراتور سنکرون کاهش می‌یابد و ژنراتور با جذب توان راکتیو از شبکه در رژیم آسنکرون با دور بالاتر از سنکرون به کار خود ادامه می‌دهد. در صورت ادامه روند کاهش جریان تحریک و در نهایت قطع آن، باعث آسیب‌های جدی به ژنراتور می‌شود. متداول‌ترین روش برای تشخیص خطای قطع تحریک، روش‌های امیدانسی هستند؛ این روش‌ها دارای سرعت پایینی بوده و قدرت تمایز کامل برای تشخیص اغتشاشاتی نظیر نوسان توان پایدار را ندارند. در این تحقیق از مشتق ولتاژ ترمینال ژنراتور و مشتق زاویه قدرت استفاده شده است که با حاصل ضرب این دو سیگنال، شاخص تشخیص خطابه دست آمده است. علامت منفی شاخص نشان‌دهنده وقوع خطای قطع تحریک بوده و در صورت وقوع خطای نوسان توان پایدار شاخص نوسانی بوده و منفی نیست. به منظور بررسی عملکرد شاخص شبیه‌سازی‌های متعددی بر اساس مدار طراحی شده با ژنراتورها و بارهای مختلف در نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام گرفته و صحت عملکرد آن مشخص شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده این موضوع است که روش پیشنهادی دارای سرعت و دقت بالاتری نسبت به روش‌های مرسوم قبلی است. همچنین با استفاده از روش‌های اجزاء محدود و نرم‌افزار Maxwell برای صحت سنجی، شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون انجام شده و نتایج آن صحت عملکرد روش و الگوریتم پیشنهادی را تأیید می‌کند. ذکر این نکته ضروری است که تاکنون در هیچ مقاله‌ای خطای قطع تحریک ژنراتور سنکرون با استفاده از روش اجزا محدود (نرم‌افزار Maxwell) شبیه‌سازی نشده و مورد بررسی قرار نگرفته است.

کلیدواژه‌ها: ژنراتور سنکرون، خطای قطع تحریک، نوسان توان پایدار، مشتق ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون، مشتق زاویه بار، شاخص LOEDI

۱- مقدمه

ژنراتورها یکی از تجهیزات اساسی نیروگاه‌ها می‌باشند، ایجاد اشکال در آن‌ها قطع کلی واحدها از شبکه و عدم تولید را به مدت طولانی به سیستم تحمیل خواهد نمود.

متداول‌ترین روش برای تشخیص خطای قطع تحریک، روش‌های امیدانسی هستند؛ این روش‌ها دارای سرعت پایینی بوده و قدرت تمایز کامل برای تشخیص اغتشاشاتی نظیر نوسان توان پایدار را ندارند. در این روش‌ها ولتاژ و جریان ترمینال ژنراتور اندازه‌گیری می‌شود و امیدانسی از آن محاسبه می‌شود، سپس خط سیر امیدانسی وارد نواحی از پیش تعریف شده‌ای می‌شوند و خطا تشخیص داده می‌شود. این رله‌ها نوعی رله دیستانس محسوب می‌شوند. با توجه به

در نیروگاه‌های تولید انرژی مسئله حفاظت و آماده بکار نگه‌داشتن دستگاه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است، این مسئله علاوه بر صرفه‌جویی در سرمایه، سهم مهمی در تولید برق مطمئن را نیز دارا است و در صورتی که دستگاهی فاقد مدارات و سیستم حفاظتی بوده و یا به هر دلیلی سیستم حفاظتی آن از کار افتاده باشد به احتمال زیاد در هنگام بهره‌برداری در مواقع بروز اشکال آن چنان دچار آسیب‌دیدگی می‌گردد که در مدار آوردن دوباره دستگاه امکان‌پذیر نبوده، و این امر هزینه سنگینی را از نقطه نظر خرید و تعمیرات و توقف طولانی مدت تولید الکتریسیته به همراه خواهد داشت و چون

استاد: فتحی شوب، رضا، نیاز آذری، میلاد، "طراحی و شبیه‌سازی آنتن GPS چندلایه با تغذیه بالن باریک شونده و قطبش دایروی و الگوی تشعشی"

"الکترومغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۵۲-۳۹، ۱۴۰۳، <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.5.5>

نامی خود دچار انحراف شده و تغییر می‌یابند. استفاده از ترکیب تغییرات پارامترهای ذکر شده به عنوان روش‌های نوینی در راستای تشخیص LOE و تمایز آن از نوسان توان پایدار مطرح شده و مورد تحلیل و بررسی‌های متعددی قرار گرفته است و شاخص‌های زیادی از ترکیب این سیگنال‌ها و یا مشتقات آن‌ها به دست آمده است [۷-۱۲].

در تحقیقات انجام شده، روش‌های مختلف و متداول برای تشخیص خطای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و معایب و مزایای هر کدام از این روش‌ها بیان و باهم مقایسه شده است. قدرت تمایز بین خطای قطع تحریک و سایر خطاها در ژنراتور سنکرون به عنوان یک اصل مهم و بااهمیت در روش‌های ارائه شده به صورت مجزا بررسی شده است [۱۳-۱۶].

بعد از وقوع خطای قطع تحریک سیگنال‌های مختلفی نظیر جریان، ولتاژ ترمینال ژنراتور، زاویه بار، سرعت، توان اکتیو و راکتیو دچار تغییراتی خواهند شد؛ لذا با استفاده از تحلیل و بررسی تغییرات آن‌ها با توجه به مشکلات روش‌های امیدانسی می‌توان شاخصی تعیین کرد که خطای قطع تحریک را در کمترین زمان تشخیص دهد و از آسیب‌های جدی به ژنراتور جلوگیری نماید [۱۶-۲۴].

نویسندگان این مقاله در پژوهش‌های گذشته [۲۹-۳۰] با استفاده از مدل ریاضی ژنراتور سنکرون و استفاده از پارامترهای ولتاژ و زاویه قدرت شاخصی را برای تشخیص دقیق خطای LOE (قطع تحریک) و تمایز آن از SPS (نوسان توان پایدار) را ارائه نموده‌اند. در این مقاله برای نخستین بار با توجه به شاخص تعیین شده برای تشخیص خطای قطع تحریک از روش اجزاء محدود برای تحلیل این شاخص با استفاده از نرم‌افزار ماکسول پرداخته شده است. امروزه، با پیدایش ماشین‌های جدید با هندسه پیچیده، استفاده از ابزار اجزاء محدود اجتناب‌ناپذیر شده است. روش‌های قدیمی تحلیل ماشین معمولاً با فرض‌های زیادی همراه بوده‌اند تا بتوانند از دشواری محاسبات بکاهند که به همین دلیل، دچار محدودیت در دقت بوده‌اند؛ اما تحلیل اجزاء محدود (FEM)، دستیابی به دقت بالا، بدون فرض‌های زیاد را ممکن می‌سازد [۳۱-۳۴].

تحلیل مسائل الکترومغناطیس در سطح ماکروسکوپی در واقع حل معادلات ماکسول با توجه به شرایط مرزی است. معادلات ماکسول یک مجموعه‌ای از معادلات هستند که در اشکال متفاوتی بیان می‌شوند و روابط میان متغیرهای اساسی الکترومغناطیسی را بیان می‌کنند [۳۵-۳۶]. این کمیتها عبارتند از:

- شدت میدان الکتریکی، E
- جابجایی الکتریکی یا چگالی شار الکتریکی، D
- شدت میدان مغناطیسی، H

ورودی این نوع رله‌ها، هر عملی که منجر به تغییر آن‌ها (ولتاژ و جریان) گردد، باعث عملکرد نادرست رله خواهد شد. به عنوان مثال اتصال کوتاه در ترمینال ژنراتور و نوسان توان پایدار سبب عملکرد نادرست رله خواهند شد. همچنین خطاهایی نظیر نوسان توان پایدار و اتصال کوتاه سبب عملکرد نادرست رله خواهند شد. به عبارت دیگر رله امیدانسی این شرایط را مثلاً نوسان توان پایدار را به عنوان خطای قطع تحریک تشخیص می‌دهد و موجب عملکرد ناخواسته‌ای خواهد شد و یا در شرایط رخ دادن هم‌زمان اتصال کوتاه و قطع تحریک، خطای قطع تحریک را تشخیص نمی‌دهد و درحالی‌که باید فرمان قطع صادر شود، سیستم قطع نشده و مشکلات و صدمات جدی به ژنراتور وارد خواهد شد [۱-۳].

برای پیشگیری از عملکرد و قطع اشتباه رله‌های امیدانسی در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی بررسی و ارائه شده است. بدین منظور برای برطرف نمودن مشکلات رله‌های امیدانسی در حین رخ دادن نوسان توان پایدار از تأخیر زمانی استفاده می‌شود، تا برای تمایز خطای قطع تحریک از خطاهای دیگر به رله فرصتی داده شود. با توجه به گذرا بودن نوسان توان پایدار چنانچه وارد زون حفاظتی شود، بعد از گذشت مدت زمانی از آن خارج خواهد شد و رله امیدانسی فرمان قطع صادر نمی‌کند. اما اگر در این حالت، خطای ایجاد شده، خطای قطع تحریک باشد در اثر تأخیر زمانی پیامدها و مشکلات زیر را به دنبال خواهد داشت:

- شارش توان راکتیو به سمت ژنراتور
- تنش‌های مکانیکی رتور و استاتور
- گرمای بیش از حد در سیم‌پیچ رتور

استفاده از شبکه‌های عصبی نیز از جمله روش‌هایی است تا مشکلاتی نظیر عملکرد نادرست رله را کم نماید و در این خصوص کارهای تحقیقاتی زیادی انجام پذیرفته است. با توجه به مشکلات رایج روش‌های امیدانسی، زمینه برای کارهای تحقیقاتی وجود دارد تا روش و راه‌حلی ارائه شود که کمترین مشکل را در تشخیص خطای قطع تحریک داشته باشد؛ در صورت ایجاد خطای قطع تحریک در ژنراتورهای سنکرون، اگر به درستی و با سرعت تشخیص داده نشود نه تنها باعث صدمه دیدن ژنراتور خواهد شد، بلکه اثرات مخربی بر پایداری سیستم قدرت نیز خواهد داشت؛ زیرا توان راکتیو تحویلی از سوی ژنراتور به شبکه قدرت کاهش پیدا کرده و تأثیر بر پروفیل ولتاژ شبکه خواهد گذاشت. در ژنراتورهای بزرگ این مسئله حتی می‌تواند منجر به شکست ولتاژ در یک ناحیه شود [۴-۶].

با ادامه تحقیقات برای تشخیص خطای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون استفاده از پارامترهای الکتریکی و مکانیکی ژنراتور سنکرون برای مشخص شدن آن استفاده شده است که مبنای بسیاری از روش‌های ارائه شده است. زمانی که ژنراتور تحت تأثیر خطاهای داخلی و یا خارجی قرار می‌گیرد، کمیت‌های مختلف آن نظیر ولتاژ پایانه، جریان، توان راکتیو خروجی، زاویه رتور و... از مقدار

همانطور که مشخص است یکی از پیامدهای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون کاهش ولتاژ ترمینال ژنراتور و افزایش زاویه بار است. یکی از مهم‌ترین پارامترها در پایداری و امنیت دینامیکی ژنراتور و شبکه‌های قدرت، زاویه بار ژنراتور است. زاویه رتور دارای ماهیت مکانیکی بوده و دستگاه‌های اندازه‌گیری الکتریکی قادر به اندازه‌گیری این پارامتر نمی‌باشند؛ لذا با استفاده از سایر کمیت‌های الکتریکی ژنراتور باید با استفاده از روش‌های تخمینی، این پارامتر را مشخص نمود. در تعیین شاخص به‌جای استفاده از زاویه بار از تغییرات آن استفاده شده است؛ تا با استفاده از ترکیب آن با تغییرات ولتاژ ترمینال به شاخص مناسبی دست‌یافت. بر اساس تغییراتی که در این دو سیگنال در زمان ایجاد خطابه وجود می‌آید؛ شاخص تشخیص طراحی شده و سپس تحلیل‌های تکنیکی با استفاده از شبیه‌سازی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۲۹].

برای بررسی روش تحلیلی و ایجاد شاخص از سیستم مورد مطالعه در شکل (۲) استفاده شده است. در این شکل یک ژنراتور سنکرون متصل به یک ترانسفورماتور افزایشنده به همراه دو خط انتقال به باس بی‌نهایت متصل شده است. بعد از وقوع خطای قطع تحریک در یک ژنراتور سنکرون، تغییرات ذیل در کمیت‌های الکتریکی حاصل خواهد شد.

- به علت حذف عامل القای ولتاژ در ژنراتور، ولتاژ داخلی و در نتیجه ولتاژ ترمینال ژنراتور کاهش یافته و جریان راکتیو از شبکه جذب می‌نماید.
- جریان استاتور به سبب تأمین جریان اکتیو شبکه و جذب جریان راکتیو مورد نیاز سیم‌پیچ تحریک از شبکه، افزایش می‌یابد.
- توان حقیقی ژنراتور به صورت کاهشی و نوسانی تغییر می‌نماید.
- توان راکتیو خروجی ژنراتور (Q) به طور پیوسته کاهش می‌یابد. در صورتی که بخشی از توان راکتیو مورد نیاز شبکه قبل از وقوع خطای قطع تحریک توسط ژنراتور تأمین شود ضریب قدرت از پیش فاز به پس فاز تغییر می‌کند. در نتیجه توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور از شبکه، دریافت و تأمین می‌گردد.
- ژنراتور دچار افزایش سرعت شده و از حالت سنکرون خارج می‌شود و با دور بالاتر از سنکرون به کار خود ادامه می‌دهد که در ادامه منجر به ناپایداری و تبدیل رژیم کار ژنراتور سنکرون به آسنکرون خواهد شد، لذا زاویه روتور آن (δ) به صورت فزاینده افزایش می‌یابد. [۲۴-۲۸]

• چگالی شار مغناطیسی، B

• چگالی جریان، J.

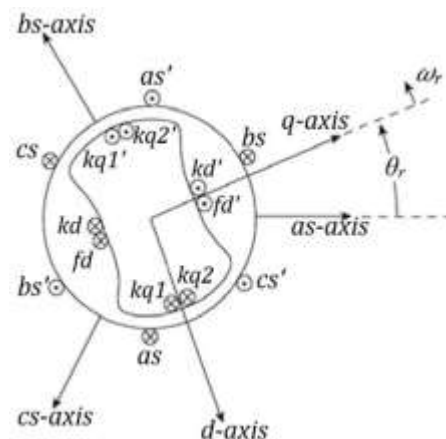
به‌طور کلی هدف از انجام این تحقیق و نوآوری آن، ایجاد یک مدل تحلیلی بر اساس روش اجزا محدود (FEM) برای آنالیز خطای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون و متعاقب آن فرمان به رله قطع تحریک است. شایان ذکر است تاکنون خطای قطع تحریک در هیچ مقاله‌ای با استفاده از روش اجزا محدود شبیه‌سازی نشده است.

۲. مدل‌سازی و روش تشخیص LOE

انواع مختلفی از مدل‌های ماشین سنکرون با پیچیدگی‌های مختلف وجود دارد. مدل‌سازی و شبیه‌سازی ماشین سنکرون به‌طور سنتی بر اساس مدل محور dq انجام می‌شود.

با توجه به اینکه ژنراتورهای سنکرون یکی از المان‌هایی هستند که در بررسی‌های دینامیکی نقش اصلی را ایفا می‌نمایند، لذا مدل‌سازی دقیق و مناسب آن‌ها برای مطالعات دینامیکی ضروری است. در مدل کامل ژنراتور سنکرون سه سیم‌پیچ شامل سه سیم‌پیچ استاتور، سیم‌پیچ جریان مستقیم رتور، سیم‌پیچ‌های میرا کننده محور d و q و یک سیم‌پیچ برای مدل‌سازی آهن یکپارچه رتور به‌عنوان میرا کننده در نظر گرفته می‌شود.

در شکل (۱) محورهای مغناطیسی سیم‌پیچ‌های استاتور تحت عنوان as، bs، cs نام‌گذاری شده است. با توجه به این شکل دو سیم‌پیچی متعلق به محور طولی (d) و دو سیم‌پیچی مربوط به محور عرضی (q) است.



شکل (۱): مدل ژنراتور سنکرون و سیم‌پیچی آن

Cite this article: R. Fathi Shoob, M. Niaz Azari, "A method to detect the loss of excitation in the synchronous", Applied Electromagnetics, vol.12, no.2, pp.39-52 <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.5.5>.



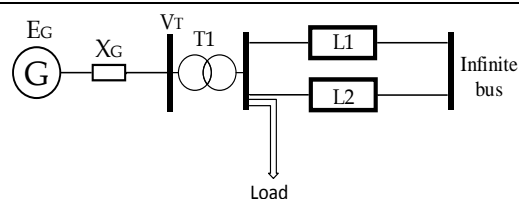
© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: miladniazazari@mazust.ac.ir

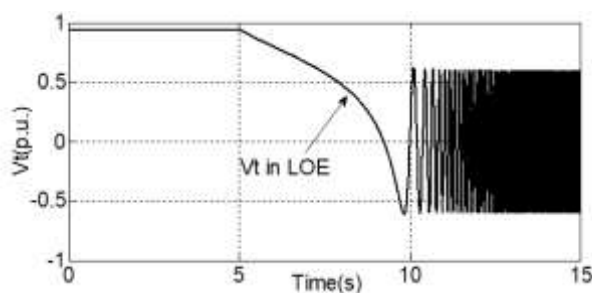
همچنین مدت زمان لازم برای تمایز بین خطای قطع تحریک (LOE) و سایر خطاهای ایجاد شده را دارا باشد. پس از خطای اتصال کوتاه در ترمینال سیم پیچ تحریک ژنراتور، که منجر به (LOE) می شود، جریان DC که از سیم پیچ تحریک عبور می کند، از بین می رود و ولتاژ ترمینال ژنراتور به آرامی کاهش می یابد. این نتیجه در خصوص توان راکتیو ژنراتور نیز صادق است. با استفاده از ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون و زاویه بار و استفاده از مقدار مثبت یا منفی بودن آن به شاخصی خواهیم رسید که علاوه بر تشخیص خطا در مدت زمان مناسب تمایز بین این خطا و سایر خطاها را انجام می دهد. شاخص تشخیص از دست دادن تحریک (LOEDI) در نظر گرفته می شود و به صورت زیر نشان داده می شود [۳۰].

$$LOEDI = k_G * ((dv / dt) * (d\delta / dt)) \quad (1)$$

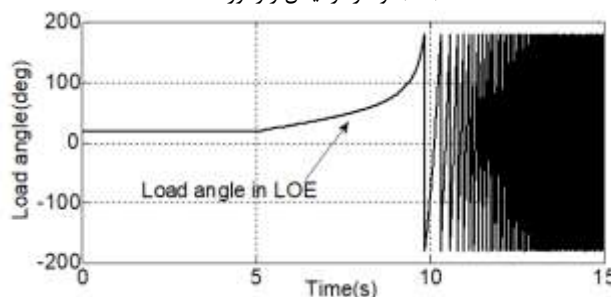


شکل (۲): شما تیک سیستم مورد مطالعه [۲۹-۳۰]

هرگونه تغییر در ساختار سیستم قدرت و یا بار در یک ژنراتور سنکرون باعث تغییر ولتاژ ترمینال خروجی و توان می شود. همان طور که می دانیم ژنراتور سنکرون به عنوان مهم ترین تجهیز شبکه قدرت، به دو سیستم Exciter و Governor مجهز است؛ که Exciter یا سیستم تحریک ولتاژ و توان راکتیو ماشین را کنترل می کند در حالی که گاورنر توان اکتیو و فرکانس ماشین را کنترل می کند. با استفاده از ولتاژ ترمینال ژنراتور و زاویه بار، شاخص مناسبی پیشنهاد می شود که مقدار آن مثبت یا منفی بوده و

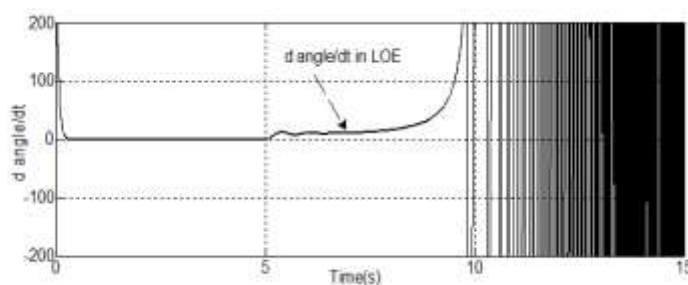


(الف): ولتاژ ترمینال ژنراتور



(ب): زاویه رتور

(ج): مشتق ولتاژ ترمینال ژنراتور



(د): مشتق زاویه رتور

شکل (۳): تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور و زاویه رتور و مشتقات آن ها در شرایط خطای قطع تحریک [۲۹-۳۰]

ولتاژ ترمینال ژنراتور و مشتق زاویه رتور ایجاد می شود و علامت مقدار شاخص به تشخیص خطای LOE می پردازد. همچنین قادر به

در رابطه (۱)، KG ضریب تقویت به منظور افزایش وضوح شاخص ارائه شده است. این شاخص بر اساس تغییراتی که در مشتق

۴. نتیجه‌گیری بر اساس شبیه‌سازی و شاخص ارائه‌شده

در یک ژنراتور سنکرون، تشخیص خطای قطع تحریک یکی از مهم‌ترین پارامترها برای جلوگیری از آسیب جدی به ژنراتور است. با توجه به شاخص مبتنی بر کمیت‌های الکتریکی ارائه‌شده، روش جدیدی برای تشخیص LOE و SPS معرفی شده است. این روش به سرعت خطاها را تشخیص می‌دهد، بین خطاهای مختلف (LOE، SPS) تمایز قائل می‌شود و از عملکرد نادرست رله تشخیص خطا جلوگیری می‌کند. شاخص پیشنهادی بر اثر تغییرات بار و نوع آن تغییر مقدار داشته؛ اما این تغییر تأثیری بر سرعت تشخیص خطای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون ندارد و با علامت شاخص بعد از تأخیر زمانی در کندترین نوسان، تشخیص داده می‌شود. البته در بعضی از روش‌های ارائه‌شده بدترین شرایط یا کندترین نوسان برای تمایز بین خطای قطع تحریک و نوسان توان پایدار در نظر گرفته شده است. در صورتی که در همه روش‌ها کندترین نوسان و یا فرکانس ۰٫۳ هرتز انتخاب شود؛ زمان تأخیر در این روش‌ها افزایش پیدا می‌نمود. در روش پیشنهادی این شرایط لحاظ شده و دارای سرعت و عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها است. تفاوت عملکردی این روش در مقایسه با سایر روش‌ها تفکیک و تمایز صحیح خطای قطع تحریک و نوسان پایدار است. به عبارتی دیگر اگر شاخص LOEDI منفی باشد، حتماً LOE اتفاق افتاده است. در غیر این صورت خطاهای دیگر رخ داده و رله فرمان قطع نمی‌دهد [۳۰].

۵. بررسی روش تشخیص خطای قطع تحریک در

ژنراتور سنکرون با استفاده از روش اجزاء محدود در

نرم‌افزار Maxwell

اجزاء محدود ابتدا برای حل مسائل تحلیل سازه‌ها بکار برده می‌شد و در اوایل دهه ۱۹۵۰ در مسائل انتقال حرارت و حرکت سیال مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۱۹۷۰ ارائه مقاله‌ای تحت عنوان «حل مسائل میدان مغناطیسی قابل اشباع به روش اجزاء محدود» افق تازه‌ای در زمینه‌ی الکترومغناطیس کاربردی با قابلیت فرمول‌بندی مسائل با اشکال هندسی پیچیده و خاصیت مغناطیسی غیرخطی را گشود. نرم‌افزارهای متعددی برای تحلیل معادلات دیفرانسیل پیچیده با استفاده از تقسیم‌بندی فضای مورد نظر به قسمت‌های کوچک و با در نظر گرفتن خطی بودن روابط حاکم بر آن‌ها، ارائه شده است و محاسبات توزیع پتانسیل و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از آن‌ها انجام می‌شود.

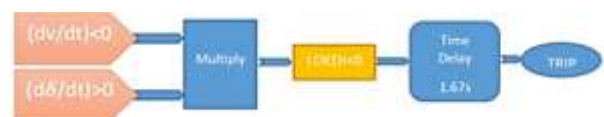
۵-۱. مراحل شبیه‌سازی ژنراتور در نرم‌افزار Maxwell

مراحل شبیه‌سازی ژنراتور شامل ترسیم هندسه‌ی ژنراتور، مش بندی، تعریف فیزیک و سناریو است که در این بخش به بررسی آن می‌پردازیم.

- ترسیم هندسه‌ی ماشین

تمایز آن از دیگر خطاها خواهد بود. با انجام شبیه‌سازی‌های متعدد در می‌یابیم که در حالت قطع تحریک مقدار ولتاژ با شیب تند شونده‌ای کاهش یافته و این مطلب مؤید این مطلب است که مشتق مرتبه اول ولتاژ ترمینال ژنراتور منفی است. در شکل (۳) مقدار ولتاژ ترمینال ژنراتور و زاویه‌تور و مشتقات آن‌ها بعد از وقوع خطای LOE در ثانیه پنجم نشان داده شده است.

علاوه بر این، نمودار منطقی فرمان قطع رله در شاخص LOEDI در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، در صورتی که سیگنال تغییرات ولتاژ منفی و سیگنال تغییرات زاویه قدرت مثبت باشد، حاصل ضرب آن‌ها منفی و بر اساس این منطق رله فرمان قطع را صادر می‌کند.

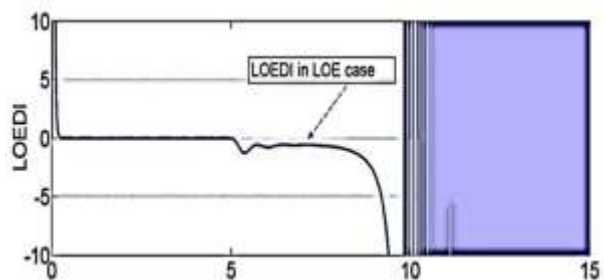


شکل (۴): سیستم مدار منطقی LOEDI برای قطع رله

۳. بررسی روش پیشنهادی در شرایط قطع تحریک

قطع تحریک در ژنراتور سنکرون می‌تواند به صورت کامل و یا با از دست دادن بخشی از تحریک همراه باشد. در صورت اتصال کوتاه ناگهانی سیم پیچ تحریک، خطای قطع تحریک کامل اتفاق می‌افتد و در این حالت ولتاژ تحریک به صورت پله‌ای صفر در نظر گرفته می‌شود. در قطع تحریکی که به صورت کامل نباشد (قطع تحریک جزئی) ولتاژ تحریک به صورت پله‌ای به کسری از مقدار نامی آن به عنوان مثال ۰٫۴ پریونیت کاهش پیدا می‌کند.

شکل (۵) شاخص LOEDI را پس از وقوع LOE نشان می‌دهد. مثبت یا منفی بودن شاخص یک پارامتر بسیار مهم در نظر گرفته



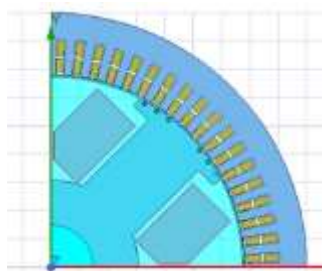
شکل (۵): شاخص LOEDI بعد از وقوع LOE

می‌شود. مقدار LOEDI در ابتدا قبل از وقوع LOE صفر است و بعد از وقوع LOE مقدار آن منفی است. با توجه به اینکه شاخص LOEDI حاصل ضرب مشتق ولتاژ در مشتق زاویه بار است، لذا مطابق نتیجه شبیه‌سازی مقدار آن منفی خواهد شد؛ در نتیجه اگر شاخص منفی باشد، LOE رخ داده است و رله LOE باید عمل کرده و دستور قطع را برای جلوگیری از آسیب‌های جدی به ژنراتور صادر کند.

می‌گیرد. طراحی و شبیه‌سازی هر پروژه‌ای در Maxwell شامل مراحل قدم‌به‌قدمی است که می‌بایست به ترتیب صورت‌پذیرند. با توجه به اینکه هدف از این بخش تحلیل رفتار ژنراتور سنکرون در زمان‌های مختلف است. در نتیجه از تحلیل گذرا برای شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون استفاده شده است. بسته به انتخاب نوع مسئله (دوبعدی یا سه‌بعدی بودن آن) می‌توانیم اشکال مختلفی را در محیط Maxwell رسم کنیم. نمایی دوبعدی ژنراتور سنکرون موردنظر در شکل (۹) نشان داده شده است. همچنین مدل دوبعدی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ماکسول در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. با دقت در این شکل ملاحظه می‌شود که به دلیل تقارن موجود در ساختار ژنراتور تنها یک‌چهارم از آن ترسیم شده است. استاتور ژنراتور شامل ۷۲ شیار است که از سیم‌پیچی دولایه در آن استفاده شده است. علاوه بر این روتور ژنراتور چهار قطب است که بر روی هر قطب ۶ شیار قرار دارد. مشخصات این ژنراتور در جدول (۱) آورده شده است. پس از رسم مدل و پیش از تعیین شرایط مرزی و تحریکات آن می‌بایست نوع حل مسئله مشخص شود، زیرا قدم‌های بعدی کاملاً وابسته به روش انتخابی حل مسئله است. هر نوع روش حل؛ پروسه‌ی خاصی برای طراحی و حل مدل طی می‌کند، که پیش از هر اقدامی باید در نظر گرفته شود.



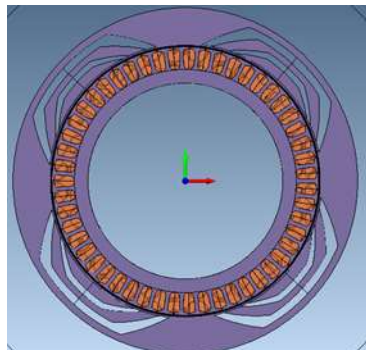
شکل (۹): نمای کلی ژنراتور سنکرون شبیه‌سازی



شکل (۱۰): مدل دوبعدی ژنراتور سنکرون در نرم‌افزار ماکسول

روش‌های مختلفی برای تعریف ماده‌ی مغناطیسی وجود دارد که یکی از دقیق‌ترین آن تعریف منحنی مغناطیس شوندرگی در نرم‌افزار مربوطه است. آرایش سیم‌بندی روتور و استاتور از نوع Lap و دولایه است که فازهای ژنراتور به صورت ستاره به هم متصل گردیده‌اند. نحوه‌ی توزیع سیم‌پیچ‌ها در شیارهای استاتور در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

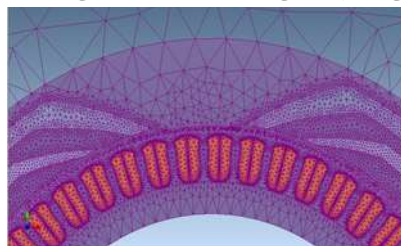
درگاه اول با توجه به ابعاد قسمت‌های مختلف ماشین الکتریکی موردنظر ساختار آن ترسیم می‌گردد. با توجه به ابعاد اساسی ماشین الکتریکی موردنظر، نمایی دوبعدی از هندسه‌ی ماشین موردنظر در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): نمایی دوبعدی از هندسه‌ی ماشین الکتریکی

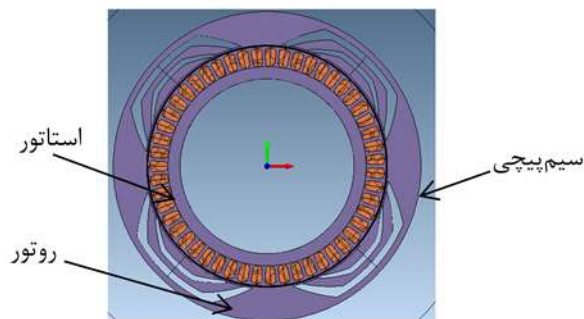
• مش بندی

بعد از اتمام ترسیم هندسه‌ی ماشین، اجزای مختلف آن مش بندی می‌گردد که در شکل (۷) نشان داده شده است. با دقت در این شکل ملاحظه می‌گردد که هر چه به فاصله‌ی هوایی نزدیک‌تر می‌شویم چگالی مش بندی افزایش می‌یابد.



شکل (۷): نمای نزدیک از مش بندی ماشین الکتریکی

بعد از اتمام مراحل قبل قسمت‌های مختلف ماشین الکتریکی از قبیل استاتور، روتور، سیم‌پیچی و غیره تعریف می‌شود. تصویری از ماشین الکتریکی موردبحث به همراه اجزای آن در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): اجزای ماشین الکتریکی در FEM

استفاده از نرم‌افزار ماکسول برای طراحی ماشین الکتریکی بوده و در این مقاله برای اعتباربخشی شاخص ارائه شده در بخش قبلی که توسط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی‌های آن با استفاده از شاخص مبتنی بر مشتق دوم ولتاژ و زاویه قدرت انجام شده مورد استفاده قرار

بعد از اتمام مراحل قبل، با توجه به تحلیل موردنیاز سناریو مناسب تعریف می‌گردد و شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون انجام می‌پذیرد. در این سناریو تعیین پارامترهای دقیق ژنراتور بسیار مهم و دارای اهمیت است. گام زمانی شبیه‌سازی اجزا محدود در ماکسول ۱۰۰ میکروثانیه است.

• خروجی‌های ژنراتور در حالت قطع تحریک

مدار الکتریکی ژنراتور در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

با دقت در این شکل در مسیر سیم‌پیچ میدان یک کلید قرار داده شده و این کلید در ثانیه یک قطع خواهد شد و مدار استاتور مشابه حالت قبل است. تحت این حالت جریان استاتور در شکل (۱۶) نشان داده شده است. با دقت به این جریان مشخص می‌شود؛ که تا قبل از ثانیه یک جریان مشابه حالت قبل است و بعد از آن ابتدا نوسانات کمی می‌کند و در نهایت صفر می‌شود. ولتاژ استاتور در شکل (۱۷) نشان داده شده است که ملاحظه می‌شود بعد از ثانیه یک ولتاژ صفر می‌شود

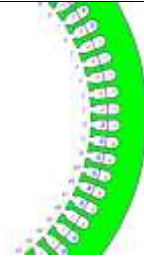
خروجی‌های ژنراتور در حالت اتصال کوتاه

مدار الکتریکی ژنراتور در حالت اتصال کوتاه در شکل (۱۸) نشان داده شده است. با دقت در این شکل در دو سر سیم‌پیچ‌های استاتور یک کلید قرار داده شده و این کلید در لحظه یک ثانیه وصل خواهد شد و استاتور اتصال کوتاه می‌شود. تحت این حالت جریان استاتور در شکل (۱۹) نشان داده شده است. با دقت به این جریان، ملاحظه می‌شود که تا قبل از ثانیه یک جریان مشابه حالت قبل است و بعد از ثانیه یک جریان اتصال کوتاه در استاتور جاری می‌شود. ولتاژ استاتور در شکل ۲۰ نشان داده شده است که ملاحظه می‌شود بعد از یک ثانیه ولتاژ بدون هیچ نوسانی صفر می‌شود.

۶. مقایسه خروجی‌های ژنراتور در دو حالت شبیه‌سازی

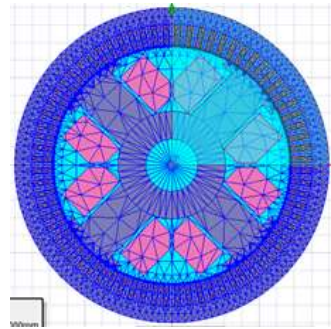
با Maxwell و Matlab/Simulink

در بخش‌های قبلی با استفاده از طراحی مدار برای شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون در حالت‌های مختلف نرمال و LOE و PLOE و اتصال کوتاه (SPS) و ایجاد شاخص LOEDI با استفاده از حاصل ضرب مشتق ولتاژ در مشتق زاویه توان؛ نتایج حاصل شد که نشان‌دهنده این موضوع است که عملکرد الگوریتم برای تشخیص خطای قطع تحریک در ژنراتور سنکرون و تمایز آن از نوسان توان پایدار درست بوده و با استفاده از علامت شاخص این امر محقق شده است. در قسمت طراحی و شبیه‌سازی مجدد با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) و استفاده از نرم‌افزار Maxwell و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به این مهم دست یافتیم که روش تشخیص خطا ارائه شده توسط نرم‌افزار Maxwell تأیید شده و رفتار ژنراتور سنکرون مشابه رفتار آن در حالت شبیه‌سازی



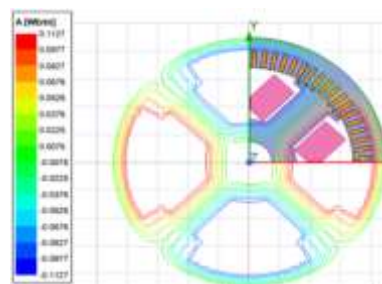
شکل (۱۱): سیم‌بندی استاتور ژنراتور سنکرون مورد مطالعه

بعد از اتمام ترسیم هندسه ژنراتور سنکرون، اجزای مختلف آن مش بندی می‌گردد. به منظور مش بندی ساختار ژنراتور سنکرون، هر کدام از اجزای آن به صورت جداگانه انتخاب شده و سپس با توجه به ابزار موجود در نرم‌افزار، مش بندی مناسب برای آن تعریف می‌گردد. با رعایت الگوی موردنظر، مش بندی ژنراتور در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

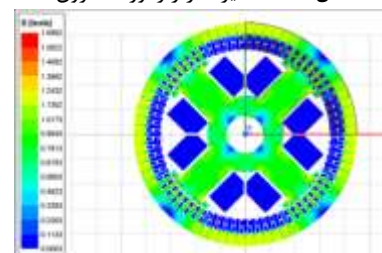


شکل (۱۲): مش بندی ژنراتور سنکرون

مسیر شار ژنراتور سنکرون موردنظر در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با دقت در این شکل ملاحظه می‌شود که به دلیل ۴ قطب بودن ژنراتور ۴ حلقه شار تشکیل شده است. علاوه بر این چگالی شار در شکل (۱۴) نشان داده شده که بیشترین مقدار چگالی شار در حدود ۱/۶۹ تسلا است.



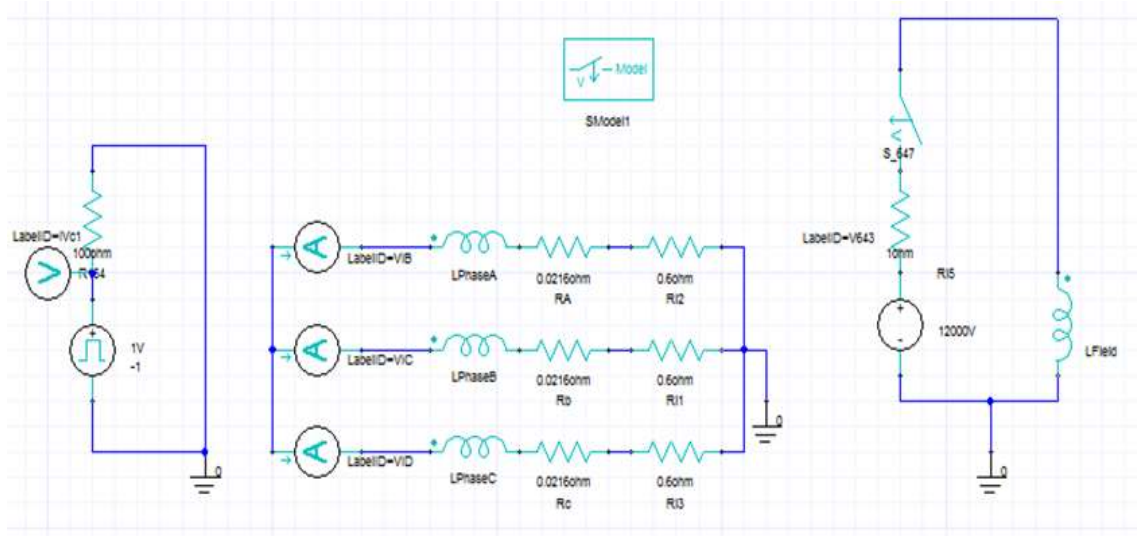
شکل (۱۳): مسیر شار ژنراتور سنکرون



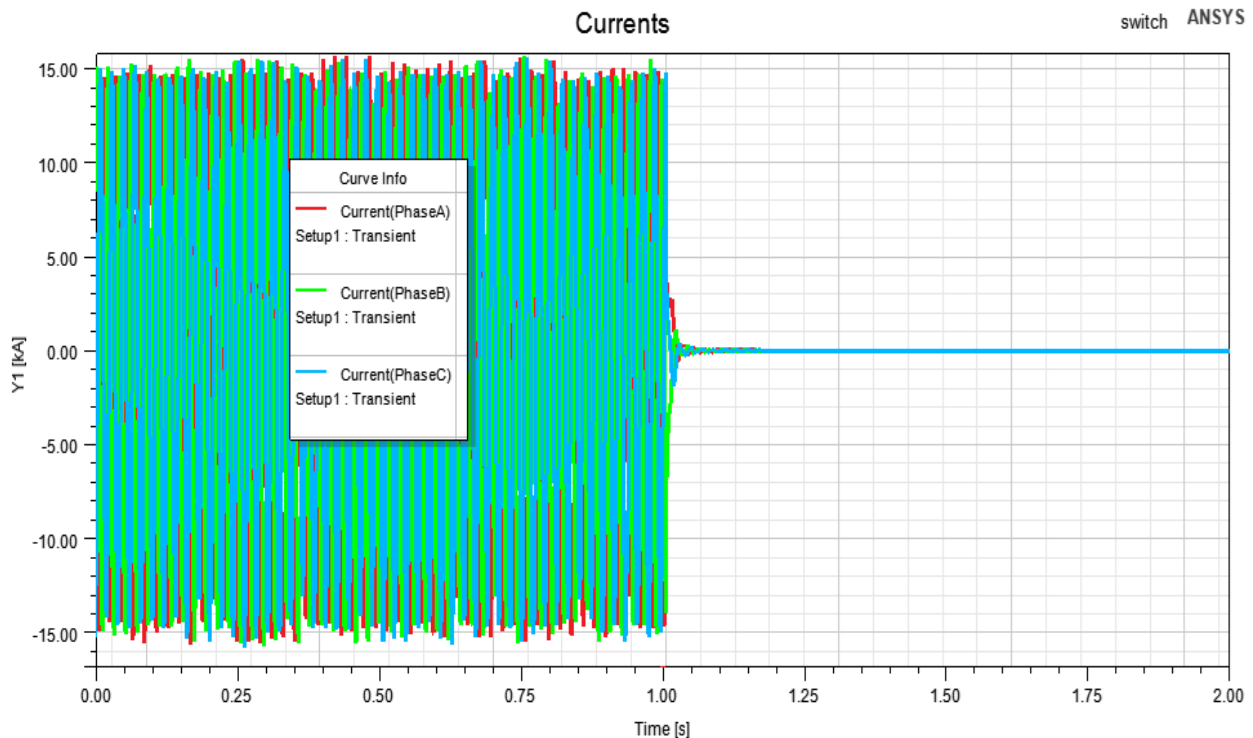
شکل (۱۴): چگالی شار ژنراتور سنکرون

همچنین در حالت خطای اتصال کوتاه که باعث ایجاد نوسان توان پایدار (SPS) می‌شود، مقایسه نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده این موضوع است که در هر دو حالت، نرم‌افزارها عملکرد مشابهی داشته‌اند. در شکل (۲۲) جریان استاتور بعد از وقوع اتصال کوتاه در دو حالت شبیه‌سازی با دو نرم‌افزار نشان داده شده است. در شاخص تعیین شده ارائه شده در بخش قبلی، این نکته اثبات شده بود که اگر حاصل ضرب مشتق ولتاژ ترمینال ژنراتور در مشتق زاویه بار منفی نباشد؛ نوسان توان پایدار اتفاق افتاده است.

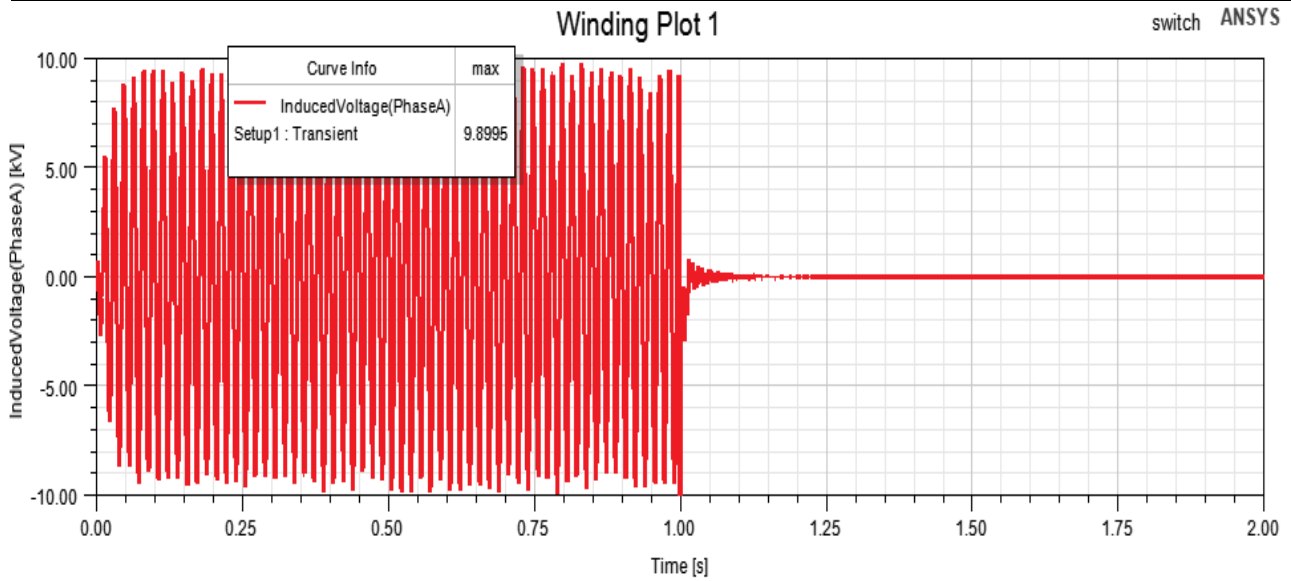
با استفاده از Matlab/Simulink است. در شکل (۲۱) مقایسه سیگنال ولتاژ استاتور با استفاده از دو نرم‌افزار در حالت قطع تحریک ارائه شده است و مؤید این مطلب است که رفتار ژنراتور در هر دو حالت به شکل یکسانی بوده و ولتاژ کاهش یافته و به صورت نوسانی با دامنه کوتاه ادامه می‌یابد. در شاخص پیشنهادی ارائه شده که کاهش ولتاژ پس از وقوع LOE را به دنبال داشته و سپس مشتق ولتاژ ترمینال ژنراتور که با علامت منفی در نتایج شبیه‌سازی وجود داشته است در شبیه‌سازی با روش اجزاء محدود نیز مؤید این مطلب است.



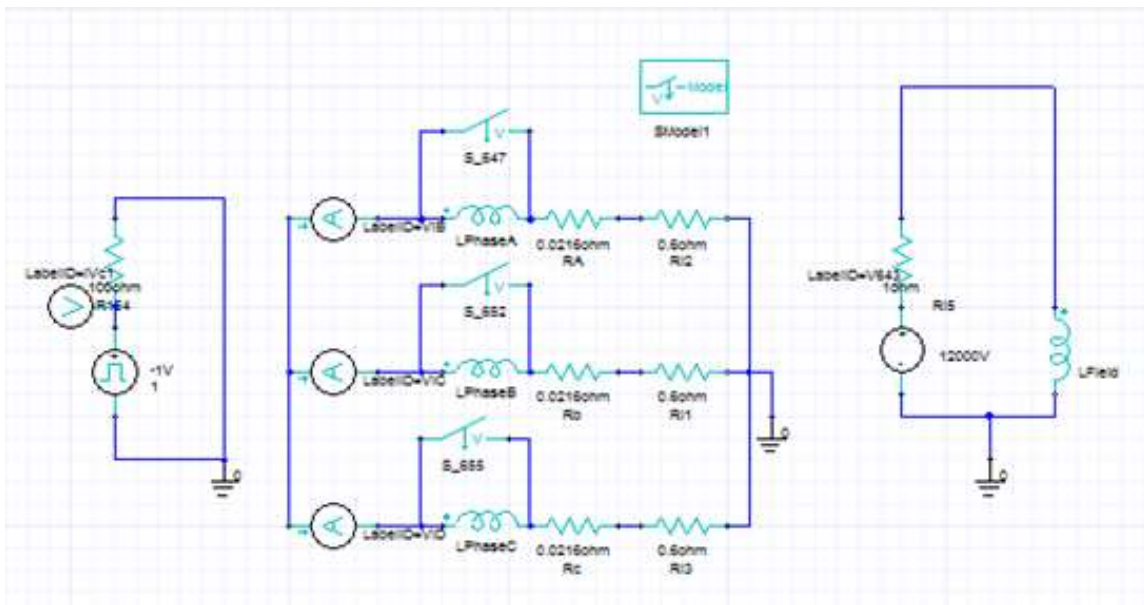
شکل (۱۵): مدار الکتریکی ژنراتور سنکرون در حالت قطع تحریک



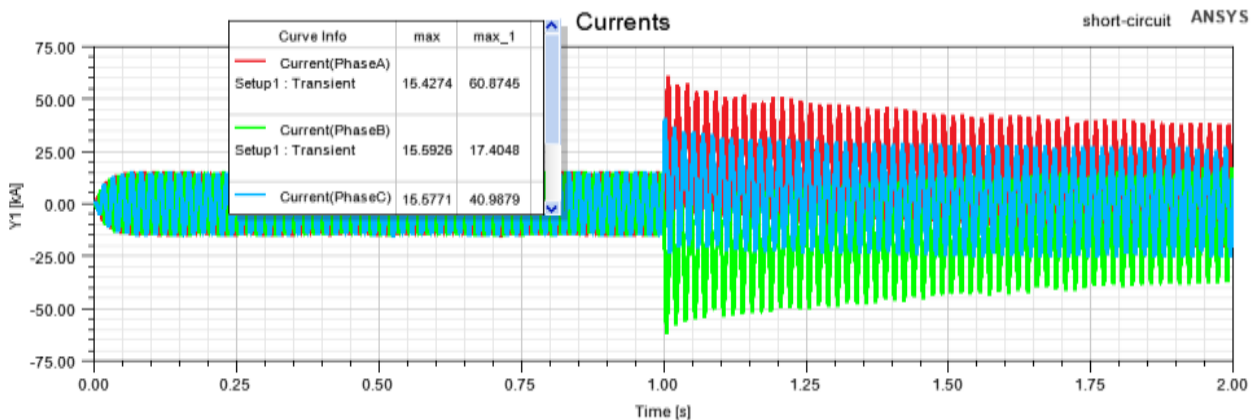
شکل (۱۶): جریان استاتور ژنراتور سنکرون در حالت قطع تحریک



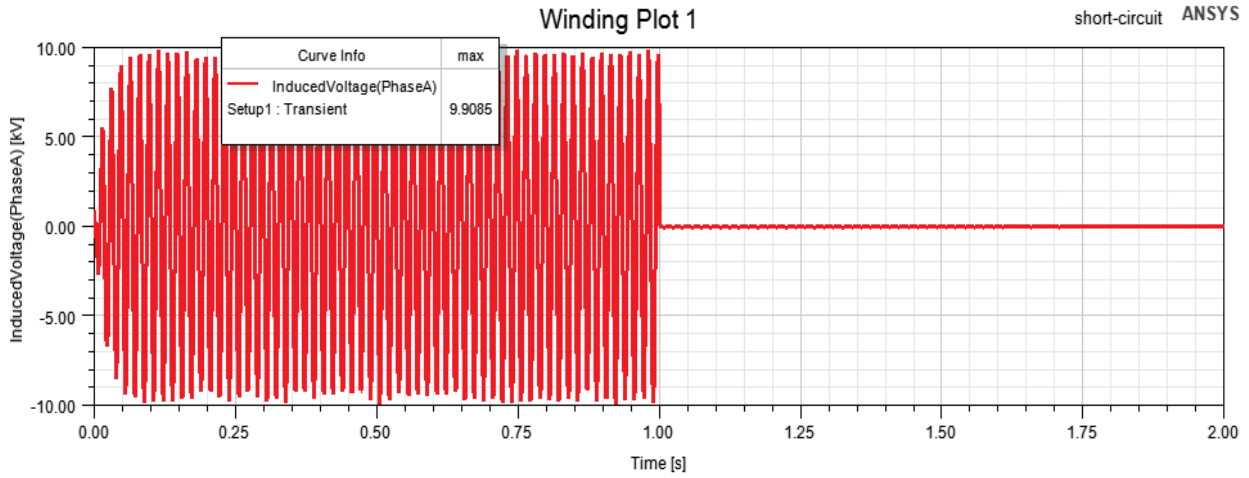
شکل (۱۷): ولتاژ استاتور ژنراتور سنکرون در حالت قطع تحریک



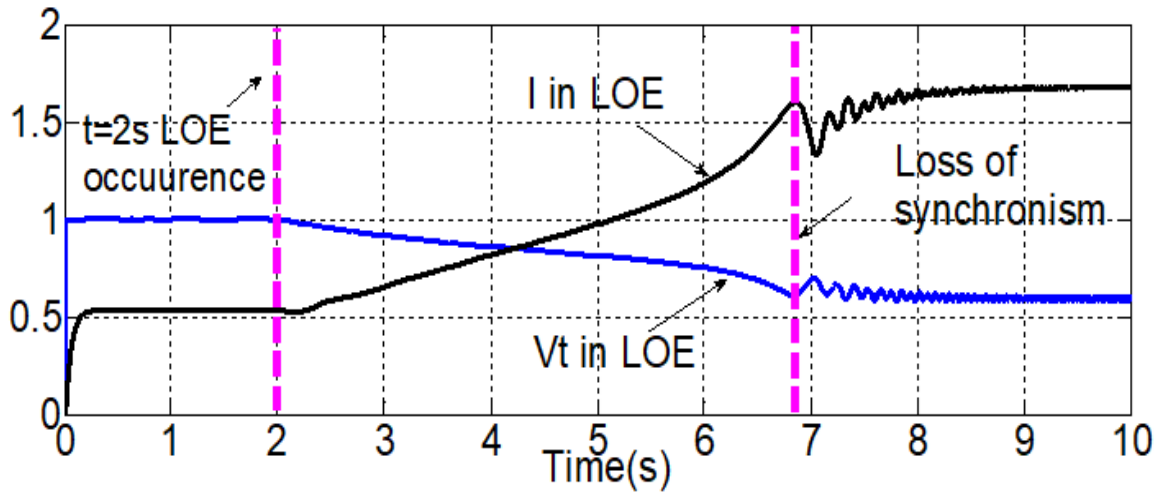
شکل (۱۸): مدار الکتریکی ژنراتور سنکرون در حالت اتصال کوتاه (نوسان توان پایدار)



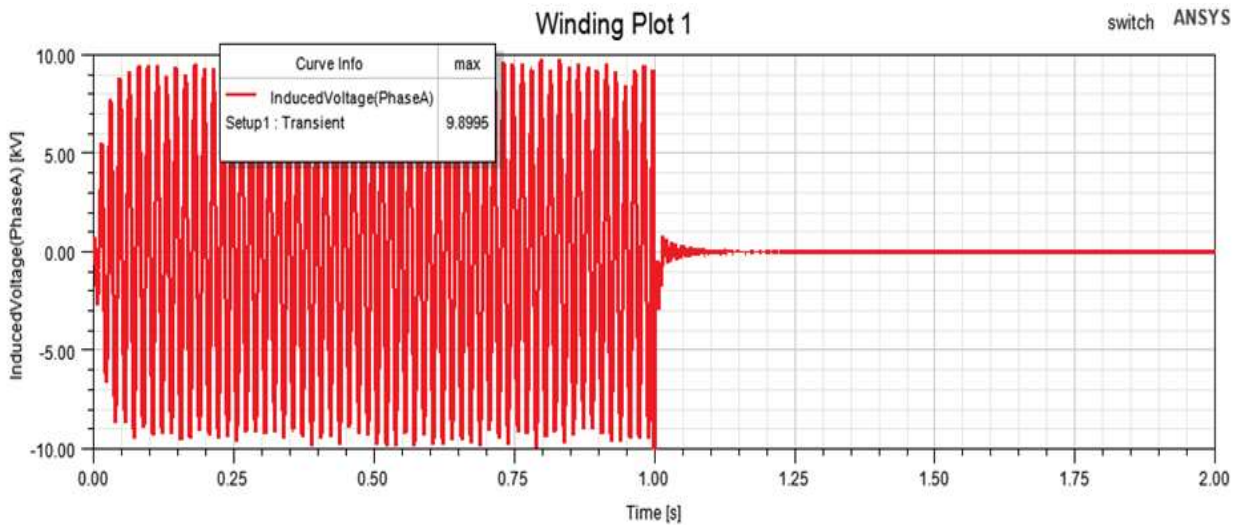
شکل (۱۹): جریان استاتور ژنراتور سنکرون در حالت اتصال کوتاه



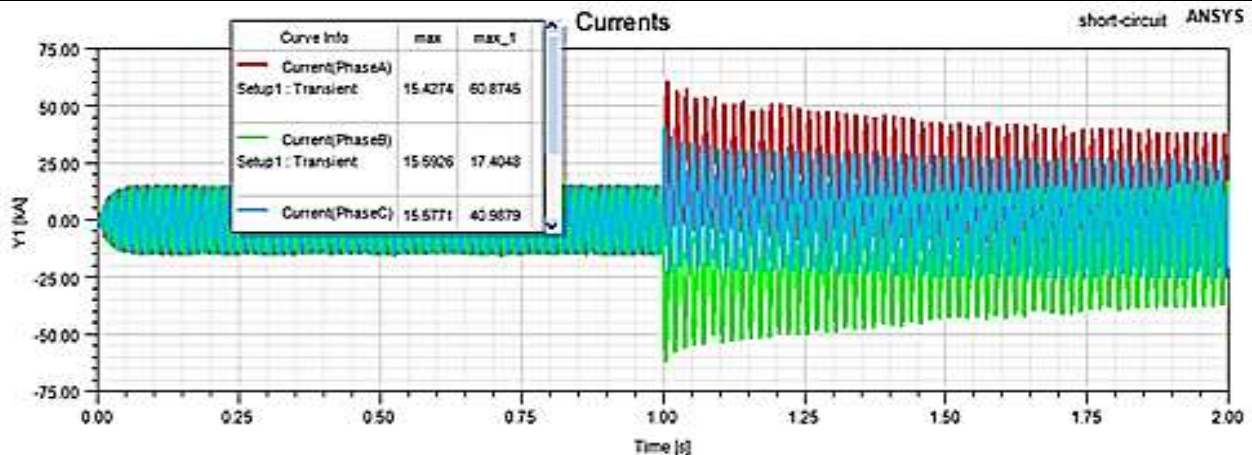
شکل (۲۰): ولتاژ استاتور ژنراتور سنکرون در حالت اتصال کوتاه



(الف): تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور و جریان استاتور در Matlab

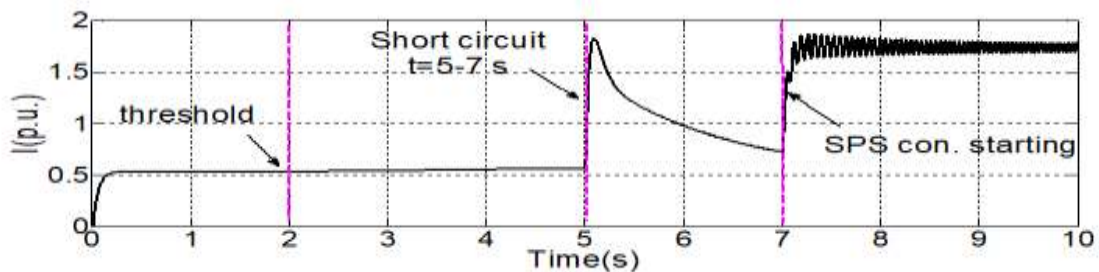


(ب): تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور در Maxwell

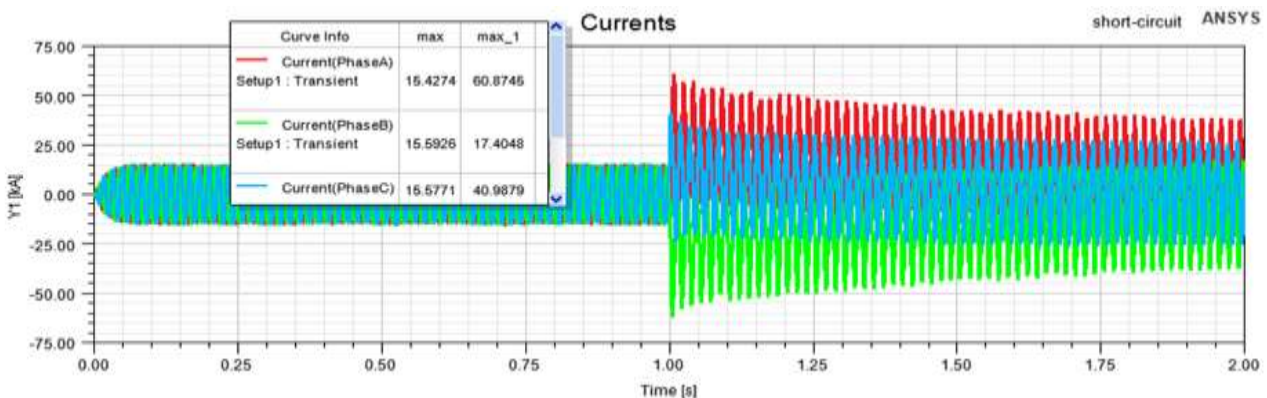


شکل (ج): تغییرات جریان استاتور ژنراتور در Maxwell

شکل (۲۱): تغییرات ولتاژ ترمینال ژنراتور و جریان استاتور در شرایط خطای قطع تحریک با استفاده از دو نرم‌افزار Matlab/Simulink و Maxwell



شکل (الف): Matlab



شکل (ب): Maxwell

شکل (۲۲): تغییرات جریان استاتور در شرایط نوسان توان پایدار با استفاده از دو نرم‌افزار Matlab/Simulink و Maxwell

۷. نتیجه‌گیری

- با در نظر گرفتن کمترین شرایط نوسان توان، عملکرد شاخص صحیح باشد.
- عملکرد شاخص به شرایط ژنراتور و سیستم قدرت و بار وابسته نباشد.
- پدیده نوسان توان پایدار هم‌زمان با خطای قطع تحریک در عملکرد روش پیشنهادی تأثیری ندارد.
- شاخص مبتنی بر مشتق ولتاژ و زاویه رتور، با در نظر گرفتن فلوجارت طراحی شده در شرایط مختلف بارگذاری شامل حالت نرمال، قطع تحریک، قطع تحریک جزئی، نوسان توان پایدار،

- با توجه به مطالب مشروحه در این مقاله اهتمام ویژه‌ای شده است تا روشی ارائه گردد که دارای مشخصات ذیل باشد:
- روشی عملی و قابل اجرا بوده و تنظیمات رله LOE بر اساس سیگنال‌های شاخص صورت پذیرد.
- در برابر تمایز بین خطای قطع تحریک و نوسان توان پایدار در بدترین شرایط حاکم عملکرد درستی داشته باشد. این الگوریتم در کمترین زمان ممکن یعنی حداکثر ۱/۶۷ ثانیه خطای قطع تحریک را تشخیص داده و از نوسان توان پایدار متمایز می‌کند.

- asymmetrical faults during power swings." *Electric Power Systems Research*, 181, (2020): 106177. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106777>
- [28] N. Noroozi; Y.Alinejad-Beromi; H. Yaghobi, "Fast approach to detect generator loss of excitation based on reactive power variation". *IET Gener. Transm. Distrib.* 2019, 13, 453–460. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5049>
- [29] Reza Fathi Shoob & Milad Niaz Azari (2023) New Method to Detect Loss of Excitation in Synchronous Generators, *IETE Journal of Research*, 69:6, 3859-3870, DOI: 10.1080/03772063.2021.1920852.
- [30] R. Fathishoob; M. Niazazari, " An Investigation of a New Method to Detect Loss of Excitation of Synchronous Generators," *IECO*, Vol. 4, No. 1, pp. 115-126, Jan 2021. <https://doi.org/10.22111/ieco.2020.34337.1276>
- [31] I. Rahbar Ayask, A. Dehestani Kolagar, M. R. Alizadeh Pahlavani, " 3D Simulation of Armature Motion in Electromagnetic Rail Launchers Using Finite Element Method" *Journal of Applied Electromagnetic*, Volume 10, Issue 2, Pages 55-70. 2022. (In Persian). [dor:20.1001.1.26455153.1401.10.2.5.1](https://doi.org/10.26455/153.1401.10.2.5.1).
- [32] M. Khodsuz, R. Haghgoo rostami, "The investigation and simulations of the suspension insulator string offset effects on the voltage and electric field distributions using the finite element method" *Journal of Applied Electromagnetic*, Volume 10, Issue 1, Pages 91-97, 2022. (In Persian). [dor:20.1001.1.26455153.1401.10.1.9.3](https://doi.org/10.26455/153.1401.10.1.9.3).
- [33] M. Yazdani-Asrami, S. A. Gholamian, M. Mirimani, J. Adabi Firuzjaie "Numerical Modelling for AC Loss of the Second Generation HTS Tapes Under Alternating External Magnetic Fields Using the Finite Element Method", *Journal of Applied Electromagnetics*, Volume 4, Issue 3, Pages 31-43, 2020. (In Persian). [dor:20.1001.1.26455153.1395.4.3.4.0](https://doi.org/10.26455/153.1395.4.3.4.0)
- [34] M. Shokri, S. A. Gholamian, " An Optimized Design to Reduce Cogging Torque in the Flux Reversal Motor" , *Journal of Applied Electromagnetics*, Vol. 10, No.2, pages 81-91, 2022, (In Persian). [dor:20.1001.1.26455153.1401.10.2.7.3](https://doi.org/10.26455/153.1401.10.2.7.3)
- [35] M. Khodsouz, S. M. Seyyedbarzegar, "An intelligent computational method to estimate the electric and magnetic field power frequency of distribution network using neural network based on normalized radial basis functions" , *Journal of Applied Electromagnetics*, Volume 8, Issue 1 , Pages 107-116, 2020. (In Persian). [dor:20.1001.1.26455153.1399.8.1.12.2](https://doi.org/10.26455/153.1399.8.1.12.2)
- [36] S. M. Seyyed Barzegar, M. Khodsuz, "Magnetic and Electric Fields Minimization of Transmission Lines Using NSGA-II Algorithm Based on Multi-Objective Optimization" *Journal of Applied Electromagnetics*, Vol. 7, No.2, pages 87-95, 2020. (In Persian). [dor:20.1001.1.26455153.1398.7.2.10.5](https://doi.org/10.26455/153.1398.7.2.10.5)
- "An Innovative Loss-of-Excitation Protection Based on the Fuzzy Inference Mechanism," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2197-2204, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2051462.
- [17] M. S. A. Aziz, M. Elsamahy, M. A. M. Hassan and F. Bendary, "Loss of excitation detection in hydro-generators based on anfis approach using positive sequence components," 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2016, pp. 309-312, doi: 10.1109/SCM.2016.7519765.
- [18] M. Amini, M. Davarpanah and M. Sanaye-Pasand, "A Novel Approach to Detect the Synchronous Generator Loss of Excitation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1429-1438, June 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2370763.
- [19] H. Yaghobi, "Fast discrimination of stable power swing with synchronous generator loss of excitation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 7, pp.1682–1690, 2016, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1045>.
- [20] A. Hasani and F. Haghjoo, "A Secure and Setting-Free Technique to Detect Loss of Field in Synchronous Generators," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 4, pp. 1512-1522, Dec. 2017, doi: 10.1109/TEC.2017.2697501.
- [21] A. Hasani; 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, 2017, <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0551>.
- [22] B. Mahamedi, J. G. Zhu and S. M. Hashemi, "A Setting-Free Approach to Detecting Loss of Excitation in Synchronous Generators," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2270-2278, Oct. 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2504539.
- [23] M. Abedini, M. Sanaye-Pasand and M. Davarpanah, "An Analytical Approach to Detect Generator Loss of Excitation Based on Internal Voltage Calculation," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 5, pp. 2329-2338, Oct. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2616386.
- [24] A. Ghorbani; B. Mozafari; S. Soleymani; A.M. Ranjbar, "Operation of synchronous generator LOE protection in the presence of shunt-FACTS," *Elec.Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 178-186, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.09.019>
- [25] Sirus Salehimehr; Behrooz Taheri; Seyed Amir Hosseini; Hossein Askarian Abyaneh; Farzad Razavi. "A New Power Swing Detection Method Based on Hilbert Transform". *IECO*, 3, 2, 2020, pp.103-114. <https://doi.org/10.22111/ieco.2019.29378.1156>
- [26] Azari, M.N. "A setting-free flux-based synchronous generator loss of excitation protection", *Electr Eng* 100, 2329–2339 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0712-x>.
- [27] Mahamedi, Behnam, and John E. Fletcher. "Setting-free method for detection of

استناد: فتحی شوب، رضا، نیاز آذری، میلاد، "طراحی و شبیه‌سازی آنتن GPS چندلایه با تغذیه بالن باریک شونده و قطبش دایروی و الگوی تشعشی
"، الکترو مغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۱۴۰۳، ۳۹-۵۲، <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.5.5>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع).



* رایانامه نویسنده مسئول: miladniazari@mazust.ac.ir