Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 4 – Winter 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Layered Shielding Structure in Oil-Immersed Transformers for Suppressing Resonances Caused by Non-Standard Lightning Waveforms

Keyvan Rostampour [1], *Ph.D.Student*, Mohammad Tolou Askari [* 2], *Associate Professor*, Mahdi Izadi [3], Assistant *Professor*, Mohamad Sadegh Younesian [4], Assistant *Professor*

[1] Department of Electrical Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.
[2] Department of Electrical Engineering, Se.C., Islamic Azad University, Semnan, Iran.
m.askari1980@iau.ac.ir (Corresponding author)
[3]Department of Electrical Engineering, Shahr.C., Islamic Azad University, Shahriar, Iran.
[4] Department of Electrical Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Abstract:
This paper presents a novel internal shielding structure for the winding of oil-immersed transformers, aimed at mitigating insulation stress caused by non-standard lightning waveforms. Unlike conventional approaches that rely on standardized test models (such as µs10/350 or µs8/20), this study utilizes a set of real-world data including multi-peak waves, high amplitudes, and long-duration pulses representative of natural lightning observed in dry and mountainous regions of Iran. A detailed winding model, along with a multilayer shielding design optimized for placement between critical winding disks, has been developed using a hybrid EMTP and FEM simulation framework. The results show that the proposed shielding structure significantly improves voltage distribution along the winding and reduces frequency resonances—which are responsible for local voltage spikes—by up to 65%. A comparative analysis of the transformer's response under three conditions—no shield, conventional shield, and the proposed shield—demonstrates the superior performance of the proposed design in suppressing transient overvoltages. These findings can contribute to the enhanced design of distribution transformers in lightning-prone areas and serve as a basis for revising electrical equipment testing standards.

Keywords: Oil-immersed transformer, non-standard lightning waveform, internal protective shield, frequency resonance, EMTP, FEM, resilient design.

Received: 26 Oct. 2025
Revised: 13 Nov. 2025
Accepted: 14 Feb. 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Mohammad Tolou Askari

Citation: K. Rostampour, M. Tolou Askari, M. Izadi, M. S. Younesian, "Layered Shielding Structure in Oil-Immersed Transformers for Suppressing Resonances Caused by Non-Standard Lightning Waveforms", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 17-33, March 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]

[DOI: jeps.2026.w.552]

مقاله پژوهشی

ارائه ساختار شیلد حفاظتی لایه‌ای در ترانسفورماتورهای روغنی برای مهار رزونانس‌های ناشی از شکل‌موج‌های غیراستاندارد صاعقه

کیوان رستم پور[۱]، دانشجوی دکترا، محمد طلوع عسکری[۲]، دانشیار، مهدی ایزدی[۳]، استادیار، محمد صادق یونسیان[۳]، استادیار

۱- گروه برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
۲- - گروه برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
m.askari1980@iau.ac.ir
۳- - گروه برق، واحد شهریار، دانشگاه آزاد اسلامی، شهریار، ایران
۴- - گروه برق، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

چکیده: در این مقاله، یک ساختار نوین از شیلد حفاظتی داخلی برای پیچ‌سیم ترانسفورماتورهای روغنی ارائه شده است که هدف آن، کاهش تنش عایقی ناشی از شکل‌موج‌های غیرمرسوم صاعقه می‌باشد. برخلاف رویکردهای رایج که از مدل‌های تست استاندارد (نظیر µs10/350 یا µs8/20) استفاده می‌کنند، در این پژوهش از یک مجموعه داده واقعی شامل موج‌های چندپیک، دامنه بلند و پالس‌های ماندگار استفاده شده است که نماینده‌ی صاعقه‌های طبیعی در محیط‌های خشک و کوهستانی ایران می‌باشند. مدل‌سازی دقیق پیچ‌سیم به همراه طراحی یک شیلد حفاظتی چندلایه با مکان‌یابی بهینه بین دیسک‌های بحرانی، توسط شبیه‌سازی ترکیبی EMTP و FEM صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با این ساختار پیشنهادی، توزیع ولتاژ در طول پیچ‌سیم به شکل یکنواخت‌تری برقرار شده و رزونانس‌های فرکانسی که عامل افزایش پیک ولتاژ محلی هستند، تا ۶۵٪ کاهش یافته‌اند. همچنین مقایسه‌ای بین پاسخ ترانسفورماتور در حالت بدون شیلد، شیلد مرسوم و شیلد پیشنهادی انجام شده که بیانگر برتری ساختار پیشنهادی در مهار اضافه ولتاژهای گذرا است. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در بهبود طراحی ترانسفورماتورهای توزیع در مناطق مستعد صاعقه مؤثر باشد و به عنوان مبنایی برای بازنگری در استانداردهای تست تجهیزات الکتریکی در نظر گرفته شود.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور روغنی، شکل‌موج غیراستاندارد صاعقه، شیلد حفاظتی داخلی، رزونانس فرکانسی، **EMTP**، **FEM**، طراحی مقاوم.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محمد طلوع عسکری
نشانی نویسنده مسئول: گروه برق، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای روغنی از عناصر حیاتی شبکه‌های توزیع برق به شمار می‌روند که وظیفه انتقال توان الکتریکی از سطوح ولتاژ بالا به ولتاژ مصـــرف‌کننده را بر عهده دارند. پایداری عملکرد این تجهیزات، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق دارد. هرگونه آسیب به این تجهیزات می‌تواند پیامدهای جدی از جمله خاموشی، خسارات مالی، و خطرات ایمنی در پی داشته باشد. یکی از عوامل مهم و آسیب‌زا در عملکرد ترانسفورماتورها، صاعقه و شکل‌موج‌های ناشی از آن است که از طریق برخورد مستقیم یا القا در مجاورت خطوط انتقال می‌تواند به ترانسفورماتورها منتقل شده و باعث تنش‌های شدید الکتریکی در پیچ‌سیم شود.

در سال‌های گذشته، استانداردهای مختلفی مانند IEC 61643 و IEEE C62 برای آزمایش مقاومت ترانسفورماتورها در برابر صاعقه تدوین شده‌اند که اغلب مبتنی بر شکل‌موج‌های ساده و شناخته‌شده‌ای همچون µs10/350 یا µs8/20 هستند. با این حال، گزارش‌ها و مطالعات میدانی متعدد در نقاط مختلف جهان از جمله مناطق کوهستانی ایران نشان داده‌اند که شکل‌موج‌های واقعی صاعقه در بسیاری موارد از این استانداردها پیروی نمی‌کنند. صاعقه‌هایی با پالس‌های چندگانه، دامنه بلند، مولفه‌های جریان ماندگار و نرخ تغییر سریع، از نمونه‌هایی هستند که در شرایط اقلیمی خاص ثبت شده‌اند و تأثیر بسیار مخربی بر ساختار عایقی ترانسفورماتور داشته‌اند. وجود این شکل‌موج‌های غیراستاندارد در عمل می‌تواند سبب تحریک پدیده‌های رزونانسی در پیچ‌سیم ترانسفورماتورها شود که پیامد آن افزایش شدید ولتاژ در لایه‌های خاص و در نهایت تخریب عایق داخلی دستگاه است.

در اکثر طراحی‌های مرسوم، سازوکار حفاظتی داخلی ترانسفورماتور در برابر پالس‌های گذرا به کمک شیلدهای ساده و با در نظر گرفتن شکل‌موج‌های استاندارد صورت می‌گیرد. این در حالی است که ساختار و موقعیت این شیلدها در برابر شکل‌موج‌های پیچیده عملکرد مناسبی ندارند و قادر به توزیع یکنواخت ولتاژ در پیچ سیم نیستند. از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که موقعیت قرارگیری شیلد در بین دیسک‌های پیچ سیم، نقش کلیدی در مهار اضافه‌ولتاژهای محلی و جلوگیری از تمرکز تنش الکتریکی دارد.

مسئله‌ای که در این پژوهش مطرح است، آن است که ترانسفورماتورهای روغنی در برابر شکل‌موج‌های غیرمرسوم صاعقه، فاقد حفاظت کافی و طراحی هدفمند هستند. وجود پدیده‌هایی نظیر چندپیک بودن موج، تداوم جریان در بازه زمانی میلی‌ثانیه‌ای و نرخ رشد بالای پالس، ساختار عایقی را با فشارهای بیش از حد مواجه می‌کند. در این شرایط، طراحی شیلد حفاظتی متناسب با ویژگی‌های واقعی پالس‌های صاعقه، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

پرداختن به این موضوع از چند جهت دارای اهمیت است. نخست آنکه نرخ خرابی ترانسفورماتورها در مناطق مستعد صاعقه، به‌ویژه در مناطق کوهستانی یا خشـــک، افزایش یافته و این امر هزینه‌های قابل توجهی را به بهره‌برداران تحمیل می‌کند. دوم آنکه استانداردهای فعلی به دلیل اتکای بیش از حد به شکل‌موج‌های قراردادی، قادر به شبیه سازی شرایط واقعی نیستند و آزمون‌های آن‌ها گمراه‌کننده می‌تواند باشـــد. ســـوم آنکه طراحی شـــیلدهای داخلی معمولاً بر مبنای تجربه یا الگوبرداری‌های تکراری انجام شده و فاقد تحلیل دقیق مبتنی بر مدل سازی گذرا و فرکانسی است. در نهایت، با افزایش پیچیدگی شبکه‌های برق و وابستگی روزافزون صنایع به کیفیت توان، لزوم افزایش تاب‌آوری تجهیزات در برابر اختلالات گذرا بیش از پیش احساس می‌شود.

در این تحقیق با هدف ارتقاء حفاظت ترانســفورماتورهای روغنی، یک ســاختار جدید برای شــیلد داخلی طراحی و تحلیل شــده است. این ساختار به‌گونه‌ای تنظیم شده است که بتواند در برابر موج‌های پیچیده و غیرمعمول، توزیع ولتاژ را در طول پیچ‌سیم کنترل کرده و مانع از بروز پیک‌های بحرانی شـود. مدل‌ســازی دقیق پیچ‌ســیم و شــیلد در نرم‌افزارهای EMTP و FEM انجام گرفته و مقایسه‌هایی با ساختارهای مرسوم و بدون شیلد صورت پذیرفته است. هدف اصلی آن است که با شناخت دقیق نحوه پاســـخ ترانســـفورماتور به موج‌های غیرخطی، روشـــی برای افزایش مقاومت عایقی، جلوگیری از تمرکز ولتاژ و کاهش احتمال شکست دی‌الکتریک در مواجهه با صاعقه ارائه شود.

در سال‌های اخیر، توجه گسترده‌ای به بهبود عملکرد و پایش وضعیت ترانسفورماتورهای روغنی معطوف شده است، چرا که این تجهیزات نقش کلیدی در پایداری شبکه‌های قدرت ایفا می‌کنند و رفتار گذرا، پدیده‌های تخریبی، و ایمنی عایقی آن‌ها نیازمند

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

بررســـی‌های دقیق و همه‌جانبه اســـت. پژوهش‌های متعددی به طراحی بهینه عایق، مدل‌ســـازی دقیق میدان‌های الکتریکی، حرارتی و مغناطیسی، و تحلیل شرایط بحرانی عملکرد پرداخته‌اند.

در مطالعه [۱] یک روش جامع برای طراحی عایق ترانسفورماتورهای پالسی غوطه‌ور در روغن ارائه شده است که شامل تحلیل میدان‌های گذرا و توزیع ولتاژ در ساختار پیچ‌سیم می‌باشد. اهمیت این طراحی در تضمین ایمنی الکتریکی در ولتاژهای بالا به‌وضوح مطرح شده است. در حوزه پایش حرارتی، تحقیق [۲] با استفاده از حسگرهای FBG چندنقطه‌ای، امکان بررسی لحظه‌ای دمای نقطه داغ ترانسفورماتور را فراهم کرده است، در حالی که پژوهش [۳] با طراحی حسگر سرعت روغن مبتنی بر اثر داپلر، نقش دینامیک جریان روغن را در خنک‌کاری اثبات نموده است. همچنین در [۴] سامانه‌ای چندمتغیره برای پایش هم‌زمان پارامترهای کلیدی ترانسفورماتور طراحی شده که به ارتقای نظارت عملیاتی کمک می‌کند.

از سوی دیگر، مفهوم دوقلوهای دیجیتال در مقاله [۵] به صورت یکپارچه با فناوری اینترنت اشیاء برای پیش‌بینی دمای روغن پیاده‌سازی شده و مزایای آن در کاهش خطای پیش‌بینی حرارتی نشان داده شده است. مطالعات [۶] و [۷] به بررسی دقیق کنتاکت‌های سمت ولتاژ سفورماتورهای UHV پرداخته‌اند و روابط بین فشار مکانیکی، تخریب سطح تماس، و تغییرات مقاومت تماسی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در زمینه تشخیص خطا، مقاله [۸] با مدل‌سازی احتمالاتی گازهای محلول در روغن به پیش‌بینی و ضعیت عملکردی ترانسفورماتورها پرداخته و در [۱۰] و [۱۱] روش‌های هوشمند یادگیری ماشین برای ارتقای دقت تشخیص پیشنهاد شده‌اند.

پژوهش [۹] به مرور نقش مایعات نانودی‌الکتریک به‌عنوان راهکاری نوین در بهبود عایق‌بندی و خنک‌کاری پرداخته و مسیرهای پژوهشی آینده را مشخص نموده است. در بعد حسگری، مقاله [۱۲] یک حسگر بادوام برای اندازه‌گیری درجا و لحظه‌ای گاز هیدروژن در روغن طراحی کرده که برای پایش تخریب حرارتی بسیار مؤثر است. همچنین تحقیق [۱۳] به بهبود کیفیت دید در محیط‌های عایقی روغنی با استفاده از روش‌های پیشرفته تقویت تصویر پرداخته است.

مباحث مربوط به تخریب عایق، از جمله رفتار مواد نانوکامپوزیتی در روغن‌های معدنی [۱۴]، و رفتار تخلیه جزئی در حضور نقص‌های ساختاری مانند حباب [۱۵] نیز در مطالعات اخیر به‌طور خاص بررسی شده‌اند. در همین راستا، مقاله [۱۶] روشی ترکیبی برای ارزیابی رطوبت در بوشینگ‌های روغنی معرفی کرده که از طیف‌سنجی فرکانسی بهره می‌گیرد. در [۱۷]، الگوریتم ترکیبی GD-AHBA-SVM در بهبود مدل تشخیص گازهای محلول و افزایش دقت تشخیص به‌کار گرفته شده است.

در نهایت، مطالعه [۱۸] با شبیه‌سازی همزمان میدان مغناطیسی، حرارتی و جریان سیال، مدل دقیقی از رفتار کوپله درون ترانسفورماتور ارائه کرده و در [۱۹] مشخص شده است که سرعت و فشار تماس در کلیدهای تغییر بار نقش مؤثری در میزان فرسایش دارند. تمامی این مطالعات، لزوم استفاده از مدل سازی‌های دقیق‌تر، ابزارهای حسگری پیشرفته، و طراحی‌های بهینه حفاظتی را برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورها مورد تأکید قرار داده‌اند.

در این راستا، پژوهش حاضر با تمرکز بر اثرات شکل موج‌های غیرخطی صاعقه و طراحی یک ساختار شیلد داخلی پیشنهادی، تلاش می‌کند تا خلأ موجود در کنترل ولتاژهای گذرای بین دیسک‌های پیچ‌سیم را جبران کرده و روشی دقیق برای تحلیل میدان الکتریکی و بهینه‌سازی حفاظتی ارائه دهد.

Table (1): Comparing this study with other recent studies

جدول (۱): مقایسه این مطالعه با سایر مطالعات اخیر

شاخص مقایسه	[۱]	[۵]	[۸]	[۹]	[۱۸]	مقاله پیشنهادی
بررسی موج صاعقه واقعی چندپیک	✗	✓	✗	✗	✗	✓
مدل‌سازی دقیق ولتاژ دیسک به دیسک	✓	✗	✗	✓	✗	✓
طراحی ساختار شیلد فیزیکی جدید	✗	✗	✓	✗	✗	✓
حل گذرا درEMTP	✓	✗	✗	✗	✓	✓
تحلیل میدان الکتریکی باFEM	✗	✓	✗	✗	✓	✓
الگوریتم بهینه‌سازی جای‌گذاری شیلد	✗	✗	✓	✗	✗	✓
ترکیب EMTP و FEM با الگوریتم داده	✗	✓	✗	✓	✗	✓
تمرکز بر کنترل تنش عایقی لحظه‌ای	✗	✗	✗	✗	✗	✓

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

در جدول (۱) مقایسه‌ای ساختاری بین مقاله حاضر و برخی از مهم‌ترین مطالعات اخیر در حوزه تحلیل و طراحی ترانسفورماتورهای روغنی ارائه شده است. شاخص‌های انتخاب‌شده شامل جنبه‌های کلیدی در مدل‌سازی گذرا، تحلیل میدان، طراحی فیزیکی، و روش‌های هوشمند بهینه‌سازی هستند که در تحقیقات پیشین به‌صورت پراکنده مورد توجه قرار گرفته‌اند. مقالات منتخب شامل مرجع [۱] با تمرکز بر طراحی عایقی ترانسفورماتورهای پالسی، مرجع [۵] با توسعه مدل دوقلوی دیجیتال برای پیش‌بینی دمای ترانسفورماتور، مرجع [۸] با ارائه مدلی احتمالاتی برای تحلیل گازهای محلول، مرجع [۹] با مروری تخصصی بر مایعات نانودی‌الکتریک، و مرجع [۱۸] با تمرکز بر شبیه‌سازی هم‌زمان میدان‌های مغناطیسی و حرارتی هستند.

مطابق جدول، مقاله پیشنهادی در تمامی شاخص‌ها دارای ویژگی‌هایی است که یا در سایر مطالعات وجود ندارد یا به‌صورت ترکیبی و جامع دیده نشده است. به‌ویژه، بهره‌گیری هم‌زمان از شکل موج‌های واقعی چندپیک صاعقه، مدل‌سازی دقیق توزیع ولتاژ بین دیسک‌ها، طراحی فیزیکی شیلد داخلی جدید، حل گذرا باEMTP ، تحلیل میدان الکتریکی باFEM ، و ادغام این دو محیط با الگوریتم تبادل داده، رویکردی نوآورانه و فراگیر را نشان می‌دهد که در مطالعات دیگر سابقه نداشته است. همچنین، توجه خاص این پژوهش به کنترل تنش عایقی لحظه‌ای که مستقیماً بر کاهش احتمال تخلیه جزئی و خرابی عایق مؤثر است، آن را به راهکاری متمایز و مؤثر در بهبود طراحی ترانسفورماتورهای روغنی تبدیل کرده است.

با وجود تلاش‌های پیشین برای مدلسازی پاسخ ترانسفورماتورهای روغنی در برابر شکل‌موج‌های استاندارد صاعقه، اغلب تحقیقات گذشته محدود به شرایط تست آزمایشگاهی بر پایه پالس‌های قراردادی مانند 1.2/50 µs یا 8/20 µs بوده‌اند. این شکل‌موج‌ها، اگرچه برای اهداف استاندارد سازی مناسب‌اند، اما در بازتاب واقعیت میدانی موج‌های صاعقه با ویژگی‌هایی مانند چندپیک بودن، جریان ماندگار و فرکانس‌های بالا ناتوان هستند. همچنین ساختارهای حفاظتی موجود در پیچ‌سیم ترانسفورماتورها، از جمله شیلدهای داخلی، عموماً بر پایه تجربه یا روش‌های متداول طراحی شده‌اند و فاقد تنظیم بهینه برای مهار پدیده‌های رزونانسی ناشی از موج‌های غیرمعمول می‌باشند.

نوآوری اصلی این تحقیق در دو سطح ساختاری و تحلیلی تعریف می‌شود:

۱. ارائه یک ساختار جدید از شیلد حفاظتی داخلی با طراحی چندلایه که محل قرارگیری آن بر اساس تحلیل دقیق پاسخ گذرای ترانسفورماتور در برابر موج‌های چندپیک تعیین می شود. در این طراحی، محل شیلد نه‌تنها به فاصله دیسک‌ها و لایه‌ها بلکه به محل وقوع بیشینه ولتاژ لحظه‌ای (hot spot) ناشی از تحریک رزونانسی وابسته است.

۲. استفاده از شکل‌موج‌های غیراستاندارد و واقعی صاعقه با ویژگی‌های آماری حاصل از داده‌های میدانی به‌جای پالس‌های قراردادی، به منظور بررسی دقیق رفتار عایقی پیچ سیم ترانسفورماتور در شرایط بحرانی. این روش موجب شبیه‌سازی واقعی‌تر سناریوهای تهدید و تحلیل قابل اتکاتر از عملکرد سیستم حفاظتی پیشنهادی می‌شود.

در کنار این موارد، از یک چارچوب شبیه‌سازی ترکیبی شامل مدل‌سازی الکترومغناطیسی در محیط EMTP و تحلیل میدان در محیط FEM استفاده شده است تا دقت ارزیابی توزیع ولتاژ در طول پیچ‌سیم افزایش یابد. نتایج اولیه نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی قادر به کاهش قابل توجه ولتاژ پیک در دیسک‌های بحرانی و مهار مؤثر رزونانس داخلی می‌باشد. این نوآوری می‌تواند در بهینه سازی طراحی ترانسفورماتورهای جدید، به‌ویژه برای مناطق مستعد صاعقه، به کار گرفته شود و در بازنگری تست‌های استاندارد نیز مبنایی ایجاد نماید.

۲- مدل‌سازی‌ها

مطالعه رفتار گذرای ترانسفورماتورهای روغنی در برابر امواج صاعقه نیازمند مدلی دقیق از اجزای داخلی ترانسفورماتور، به‌ویژه پیچ سیم فشار قوی و فشار ضعیف است. تاکنون اکثر مطالعات بر اساس مدل‌های خطی و ساده شده، تنها در شرایط تست استاندارد شکل گرفته‌اند. این مدل‌ها، اغلب قابلیت تحلیل پاسخ غیرخطی ترانسفورماتور به موج‌های چندپیک و غیرمستقر را ندارند. در این پژوهش، با هدف تحلیل دقیق مکانیزم انتقال انرژی گذرا، ابتدا مدل الکتریکی پیچ‌سیم با وضوح بالا استخراج می‌شود و سپس با معرفی یک ساختار بهینه‌شده از شیلد حفاظتی، تلاش می‌شود تا پاسخ ولتاژ در طول ترانسفورماتور کنترل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

شود. در این بخش، ابتدا مدل‌سازی ریاضی پیچ سیم انجام می شود، سپس تابع موج ورودی مدل می‌گردد، شیلد پیشنهادی معرفی می‌گردد و نهایتاً با ترکیب دو محیط EMTP و FEM، رفتار دقیق عایقی بررسی می‌شود.

ساختار پیچ سیم ترانسفورماتور از چندین لایه دیسک متوالی تشکیل شده است که در هندسه واقعی اغلب به صورت استوانه‌ای و متحدالمرکز حول محور مرکزی ترانسفورماتور چیده می‌شوند. هر دیسک، نه‌تنها با دیسک‌های مجاور خود در تماس الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی قرار دارد، بلکه نسبت به بدنه ترانسفورماتور (که به زمین متصل است) نیز دارای ظرفیت خازنی مشخصی است. این اتصالات داخلی باعث می شوند که در هنگام اعمال یک موج گذرای سریع مانند صاعقه، ولتاژ و جریان در هر دیسک نسبت به دیسک مجاور خود تغییرات لحظه‌ای شدید داشته باشد و در صورت عدم توزیع مناسب، نقاطی با بیشینه تنش الکتریکی شکل بگیرد.

برای مدل‌سازی دقیق این ساختار، هر دیسک به صورت یک سلول RLC در نظر گرفته شده است که عناصر الکتریکی زیر را شامل می شود: اندوکتانس سری L_i که به علت اثر خودالقایی سیم‌پیچ در دیسک iام ایجاد می شود؛ مقاومت سری R_i که مربوط به مقاومت اهمی هادی در دیسک i است؛ ظرفیت خازنی $C_{i,i+1}$ که نماینده‌ی کوپلینگ الکترواستاتیکی بین دو دیسک مجاور است؛ و در نهایت ظرفیت $C_{i,g}$ که بیانگر ظرفیت خازنی دیسک i نسبت به زمین یا محفظه فلزی ترانسفورماتور می‌باشد. با در نظر گرفتن تمام دیسک‌ها به صورت یک سیستم متصل، می‌توان یک مدل حالت‌مبنا برای سیستم نوشت. این مدل به صورت دو معادله تفاضلی مرتبه اول در فضای برداری بیان می شود. معادله اول، مشتق زمانی بردار ولتاژ $\vec{V}(t)$ در گره‌های دیسک‌ها را نشان می‌دهد:

$$\frac{d\vec{V}(t)}{dt} = -[\mathbf{C}]^{-1}[\mathbf{G}]\vec{V}(t) + [\mathbf{C}]^{-1}\vec{I}(t) \quad (1)$$

در معادله (۱)، ماتریس $[\mathbf{C}]$ شامل کلیه ظرفیت‌های خازنی بین دیسک‌ها و زمین است. این ماتریس معمولاً متقارن و دارای المان‌های غیرقطری است که بیانگر کوپلینگ بین دیسک‌های غیرمجاور نیز می‌باشد. ماتریس $[\mathbf{G}]$ نیز نشت الکتریکی سیستم به زمین را مدل می‌کند که با توجه به نوع روغن، دمای کاری، و فاصله هوایی بین دیسک‌ها مقدار متفاوتی دارد. بردار $\vec{I}(t)$ نیز جریان‌هایی را که در مدار حلقوی بین دیسک‌ها جاری است، مدل می‌کند. معادله دوم، مشتق زمانی بردار جریان $\vec{I}(t)$ بین دیسک‌ها را در پاسخ به ولتاژهای گره‌ای تعیین می‌کند:

$$\frac{d\vec{I}(t)}{dt} = -[\mathbf{L}]^{-1}[\mathbf{R}]\vec{I}(t) + [\mathbf{L}]^{-1}\vec{V}'(t) \quad (2)$$

در معادله (۲)، ماتریس $[\mathbf{L}]$ شامل اندوکتانس‌های سری دیسک‌ها است و غالباً ساختار قطره‌ای دارد، چراکه خودالقایی هر دیسک به‌شدت بر عملکرد ولتاژ گذرای محلی تأثیرگذار است. ماتریس $[\mathbf{R}]$ نیز مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها را در نظر می‌گیرد که در دیسک‌های بیرونی ممکن است به دلیل طول بیشتر مسیر افزایش یابد. عبارت $\vec{V}'(t)$ مشتق زمانی ولتاژ گره‌هاست که اثر مستقیم روی جریان دیسک دارد. ترکیب دو معادله (۱) و (۲) به صورت یک سیستم دینامیکی پیوسته در زمان عمل می‌کند که در آن رفتار ولتاژ و جریان به شکل کوپل شده، تحت اثر ورودی گذرای صاعقه تحلیل می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن پاسخ سیستم در زمان‌های بسیار کوتاه (زیر ۱۰۰ میکروثانیه) و لزوم دقت بالا در تحلیل گذرا، این معادلات در محیط EMTP و با استفاده از روش عددی مرتبه ۴ با گام زمانی متغیر حل شده‌اند. این رویکرد امکان مشاهده دقیق پدیده‌هایی نظیر تمرکز ولتاژ، نوسان محلی، و رزونانس در دیسک‌های خاص را فراهم می‌سازد.

از طریق این مدل‌سازی، توزیع لحظه‌ای ولتاژ بین دیسک‌ها در برابر انواع مختلف پالس‌های ورودی از جمله موج استاندارد ۱/۳۵۰ μs و موج‌های غیرخطی چندپیک استخراج شده و به‌عنوان ورودی تحلیل میدان در بخش بعدی استفاده می‌شود. به‌ویژه در مقایسه ساختار بدون شیلد، با شیلد معمولی، و شیلد پیشنهادی، این مدل امکان ارزیابی کمّی میزان کاهش تنش الکتریکی و پخش شدن یکنواخت‌تر ولتاژ در پیچ‌سیم را فراهم می‌کند.

مدل‌سازی دقیق موج صاعقه یکی از ارکان اصلی این تحقیق است، چراکه ویژگی‌های شکل‌موج ورودی به صورت مستقیم بر پاسخ گذرای پیچ‌سیم ترانسفورماتور اثر می‌گذارد. برخلاف رویه رایج در تست‌های استاندارد که تنها از یک موج تک‌پیک (مانند

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

μs۸/۲۰ یا μs۱۰/۳۵۰) استفاده می‌شود، در این پژوهش از داده‌های واقعی ثبت‌شده در ایستگاه‌های صاعقه‌نگاری داخل کشور بهره گرفته شده است تا شرایط واقعی‌تر و بحرانی‌تری برای تحریک ترانسفورماتور مدل‌سازی شود.

بررسی داده‌های واقعی صاعقه نشان می‌دهد که جریان صاعقه در بسیاری از موارد به‌صورت چند پیک متوالی ظاهر می‌شود و بین هر پیک نیز فاصله زمانی مشخصی وجود دارد. پیک اول معمولاً شدیدترین و سریع‌ترین مؤلفه است که بخش عمده انرژی موج را حمل می‌کند، اما پیک‌های بعدی با فاصله زمانی چند میکروثانیه می‌توانند باعث تحریک مجدد پیچ‌سیم و القای نوسانات گذرا شوند. این پدیده، اگر در طراحی حفاظتی لحاظ نشود، ممکن است سبب ایجاد تنش‌های الکتریکی مضاعف بر روی برخی از دیسک‌ها گردد.

برای مدل سازی این نوع شکل‌موج، از تابع کلی به صورت جمع چند تابع نمایی ضربه‌ای استفاده شده است. رابطه (۳) بیانگر مدل ریاضی موج صاعقه چندپیک است:

$$i(t) = \sum_{k=1}^{K} I_k \left(\frac{t - t_k}{\tau_k}\right)^{n_k} e^{-\frac{t-t_k}{\tau_k}} \cdot u(t - t_k) \quad (۳)$$

در این معادله، I_k دامنه پیک kام موج صاعقه است که بیانگر شدت جریان در آن لحظه خاص است، t_k زمان وقوع پیک kام است و فاصله بین پیک‌ها را مشخص می‌کند، τ_k پارامتر زمانی هر پیک بوده که مشخص‌کننده نرخ افزایش و کاهش جریان در آن بازه است، n_k شاخص شکل یا درجه تیزی پیک kام است که در تعیین شیب اولیه صعودی نقش دارد و $u(t - t_k)$ تابع پله هویساید است که تضمین می‌کند هر مؤلفه تنها پس از زمان t_k وارد سیستم شود.

این مدل ریاضی اجازه می‌دهد تا انواع شکل‌موج‌های غیرخطی، ناهمسان، و چندپیک به‌صورت پارامتریک توصیف شوند و امکان اعمال آن‌ها در شبیه‌سازی گذرای دقیق فراهم گردد. همچنین از آنجا که رفتار گذرای سیستم‌های RLC به‌شدت به نرخ تغییر جریان ورودی وابسته است، وجود چند پیک متوالی می‌تواند سبب تداخل و ترکیب پاسخ‌های زمانی گردد که طراحی حفاظتی را با پیچیدگی بیشتری مواجه می‌سازد.

در این تحقیق، پارامترهای معادله (۳) بر اساس داده‌های واقعی استخراج شده از ایستگاه صاعقه‌نگاری کشور تنظیم شده‌اند. مشخصات موج اعمال‌شده به مدل ترانسفورماتور به شرح زیر است:

پیک اول دارای دامنه‌ای برابر با ۴۰ کیلوآمپر است و در زمان ۷ میکروثانیه پس از شروع صاعقه اتفاق می‌افتد. این پیک عمده‌ترین مؤلفه موج صاعقه است و بیشترین انرژی را به سیستم وارد می‌کند. پیک دوم با دامنه ۲۰ کیلوآمپر در زمان ۱۵ میکروثانیه ظاهر می‌شود. این پیک دارای نرخ صعود کمتری نسبت به پیک اول بوده اما همچنان توانایی تحریک ثانویه سیستم را داراست. پیک سوم با دامنه‌ای معادل ۱۰ کیلوآمپر در زمان ۲۸ میکروثانیه رخ می‌دهد و غالباً با مؤلفه جریان ماندگار همراه است. فاصله زمانی بین پیک‌ها در بازه‌ای بین ۵ تا ۱۲ میکروثانیه قرار دارد که با اندازه‌گیری‌های میدانی در مناطق کوهستانی و خشک ایران همخوانی دارد.

با جایگذاری این مقادیر در معادله (۳)، شکل‌موج نهایی موج صاعقه به‌صورت یک تابع ترکیبی حاصل می‌شود که برای تحریک مدل EMTP به‌کار رفته و امکان تحلیل پاسخ ترانسفورماتور در برابر سناریویی واقعی‌تر و بحرانی‌تر را فراهم می‌سازد. این روش، دقت تحلیل و قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج را به‌مراتب افزایش می‌دهد و پایه‌ای برای طراحی شیلد حفاظتی جدید در مراحل بعدی فراهم می‌کند.

در طراحی ساختار پیشنهادی برای شیلد حفاظتی، هدف اصلی آن است که با جای‌گذاری بهینه لایه‌هایی از مواد رسانا در موقعیت‌های حساس در بین دیسک‌های پیچ‌سیم، از تمرکز شدید ولتاژ لحظه‌ای بین لایه‌ها جلوگیری شود. تحلیل پاسخ گذرای پیچ‌سیم در مواجهه با موج‌های غیرخطی و چندپیک صاعقه نشان می‌دهد که در نبود شیلد مناسب، توزیع ولتاژ در طول سیم‌پیچ به‌شدت غیریکنواخت بوده و در برخی از گره‌ها اختلاف ولتاژ قابل‌توجهی بین دو دیسک متوالی ایجاد می‌شود. این پدیده می‌تواند منجر به شکست الکتریکی نقطه‌ای و تخریب عایق داخلی ترانسفورماتور گردد. بنابراین طراحی شیلدی که بتواند از طریق ظرفیت کوپلینگ خود، ولتاژهای لحظه‌ای را در لایه‌های بحرانی تخلیه یا پخش کند، امری ضروری محسوب می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

ساختار ارائه‌شده در این تحقیق از نوع لایه‌ای بوده و هر لایه به‌صورت حلقوی در فضای شعاعی بین دیسک‌ها قرار داده می‌شود. موقعیت شیلدها در امتداد محور طولی پیچ سیم متغیر ا ست و هدف آن ا ست که این موقعیت‌ها طوری تعیین شوند که ولتاژ بین هر دو دیســـک مجاور در بدترین حالت (در زمان پیک) کمینه شـــود. بدین منظور، ابتدا یک تابع هدف طراحی شـــده که ماکزیمم اختلاف ولتاژ بین دیسک‌های مجاور را در تمام بازه زمانی تحلیل در نظر می‌گیرد.

تابع هدف به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$J(\mathbf{p}) = \max_{t} \max_{i} |V_{i+1}(t) - V_i(t)| \quad (۴)$$

در این رابطه، $\mathbf{p} = \{d_1, d_2, \ldots, d_M\}$ مجموعه‌ای از موقعیت‌های قرارگیری شـیلد در طول پیچ‌ســیم اســت. متغیر $V_i(t)$ نیز ولتاژ لحظه‌ای دی سک iام در زمان t می‌با شد. مقدار تابع هدف، میزان بی شینه اختلاف ولتاژ لحظه‌ای بین دو دی سک مجاور در کل سیستم را نشان می‌دهد، و کاهش این مقدار نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر ولتاژ در پیچ‌سیم است.

برای آنکه طراحی شیلد قابل پیاده سازی در ف ضای فیزیکی تراز سفورماتور با شد، محدودیت‌هایی نیز بر مجموعه موقعیت‌های مجاز اعمال می‌شود. این محدودیت‌ها به‌صورت روابط (۵) و (۶) فرمول‌بندی شده‌اند:

$$0 < d_1 < d_2 < \cdots < d_M < L \quad (۵)$$

$$|d_{i+1} - d_i| \geq d_{\min} \quad (۶)$$

رابطه (۵) بیان می‌کند که همه موقعیت‌های انتخابی باید درون بازه طول پیچ‌ســـیم L قرار گیرند و همچنین ترتیب آن‌ها باید صعودی با شد، چراکه ترتیب فیزیکی نـصب باید حفظ شود. رابطه (۶) نیز حداقل فا صله مجاز بین دو شیلد متوالی را م شخص می‌کند تا از هم‌پوشانی و تداخل میدان‌ها جلوگیری شود. مقدار $d_{\min}$ معمولاً به‌اندازه دو یا سه ضخامت دیسک تعیین می‌شود تا فضای کافی برای قرارگیری عایق بین شیلدها نیز در نظر گرفته شود.

مسئله بهینه سازی فوق یک مسئله غیرخطی با فضای جستجوی گسسته است که به‌صورت مستقیم قابل حل نیست. به همین منظور از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش جســتجوی فراابتکاری اســتفاده شــده اســت. الگوریتم ژنتیک با تولید جمعیتی از موقعیت های اولیه، و ســـپس اعمال عملگرهای انتخاب، تقاطع، جهش و ارزیابی بر اســـاس تابع هدف (رابطه ۴)، به ســـمت پیکربندی بهینه همگرا می‌شود. پس از طی حدود ۵۰ نسل، پایداری جواب حاصل شده و موقعیت نهایی نصب شیلدها استخراج می‌گردد.

ساختار فیزیکی شیلد پی شنهادی نیز با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی، طراحی شده ا ست. ماده مورد ا ستفاده برای شـــیلد، ورق آلومینیوم با روکش اپوکســـی می‌باشـــد. انتخاب آلومینیوم به دلیل هدایت الکتریکی مناســـب، وزن کم و پایداری مکانیکی بالا صورت گرفته ا ست. روکش اپوک سی نیز به‌منظور کاهش احتمال ایجاد تخلیه جزئی در لبه‌های شیلد به‌کار رفته است، چراکه میدان‌های شدید در مرز بین شیلد و روغن می‌تواند منجر به تخریب‌های موضعی گردد.

ضخامت ورق شیلد برابر با ۰٫۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده ا ست که توازن منا سبی بین قابلیت انعطاف و ا ستحکام مکانیکی ایجاد می‌کند. از نظر ابعاد شعاعی، شیلد با شعاع داخلی ۷۰ میلی‌متر و شعاع خارجی ۱۲۰ میلی‌متر طراحی شده تا به‌خوبی بین لایه‌های دیسک قرار گیرد و تداخل هندسی با ساختار سیم‌پیچ نداشته با شد. در خصوص نحوه اتصال الکتریکی، شیلدها به صورت شناور در مدار قرار داده شده‌اند؛ به این معنا که م ستقیماً به زمین یا فاز و صل نمی شوند، بلکه از طریق یک م سیر مقاومتی با امپدانس بالا به زمین کوپل می شوند. این اتصال نیمه‌فعال به شیلد اجازه می‌دهد تا در برابر پالس‌های شدید، مسیر تخلیه ولتاژ ایجاد کرده و سپس به حالت تعادل بازگردد، بدون آن‌که در عملکرد پیوسته ترانسفورماتور اختلال ایجاد کند.

این طراحی به‌گونه‌ای انجام شده که ضمن رعایت الزامات عایقی، ساخت و نصب آن در فرآیند تولید صنعتی ترانسفورماتورها نیز امکان‌پذیر باشد. نتایج حاصل از تحلیل‌های شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهند که استفاده از این ساختار، منجر به کاهش حداکثر اختلاف ولتاژ بین دی سک‌ها تا حدود ۶۵ در صد شده و نقاط بحرانی تمرکز ولتاژ در طول پیچ سیم به‌طور قابل توجهی کاهش یافته‌اند. این د ستاوردها اثربخ شی ساختار شیلد پی شنهادی را در برابر پالس‌های غیرمر سوم و پیچیده صاعقه به‌خوبی ن شان می‌دهد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

برای تحلیل دقیق رفتار میدان الکتریکی در ساختار پیچ‌سیم ترانسفورماتور به‌ویژه در حضور شیلد حفاظتی پیشنهادی، از روش اجزاء محدود (FEM) استفاده شده است. این تحلیل به‌منظور تعیین نواحی با بیشینه چگالی میدان، بررسی تمرکز تنش الکتریکی، و ارزیابی عملکرد شیلد در کاهش اختلاف پتانسیل موضعی بین دیسک‌ها انجام شده است. برخلاف تحلیل‌های مدار معادل که صرفاً روابط ولتاژی و جریانی در حوزه زمانی یا فرکانسی را بررسی می‌کنند، تحلیل میدان با روش FEM امکان مشاهده پدیده‌هایی نظیر تمرکز میدان، تخلیه جزئی، و توزیع غیر یکنواخت انرژی الکتریکی در محیط عایق را فراهم می‌سازد.
مبنای ریاضی تحلیل میدان الکتریکی در این تحقیق، معادله لاپلاس برای پتانسیل الکتریکی در محیط دی‌الکتریک است. این معادله در حالت ایستا و بدون منبع به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_r \nabla \phi) = 0 \qquad (۷)$$

در رابطه (۷)، متغیر ϕ پتانسیل الکتریکی در فضای سه‌بعدی مدل، و ε_r گذردهی نسبی ماده در هر ناحیه از مدل است. در این مدل، برای روغن ترانسفورماتور مقدار $\varepsilon_r = 2.2$ و برای ماده جامد بین دیسک‌ها مانند کاغذ یا سلولز، مقدار ε_r حدود ۴ در نظر گرفته شده است. این ضرایب مستقیماً بر نحوه توزیع خطوط میدان اثرگذار هستند و از طریق آن‌ها نواحی با چگالی انرژی بیشتر یا کمتر قابل شناسایی‌اند.
شرایط مرزی اعمال شده برای حل عددی این معادله شامل چهار نوع شرط مهم بوده‌اند. در سمت ورودی پیچ سیم، پتانسیل الکتریکی برابر با ۱۰۰ کیلوولت اعمال شده است که شرایط تنش نامی یا تست ضربه ولتاژی را شبیه‌سازی می‌کند. در سمت خروجی، پتانسیل صفر در نظر گرفته شده است تا مسیر بسته میدان بین دو انتهای ترانسفورماتور تعریف شود. دیواره‌های جانبی که شامل محفظه فلزی و فضای اطراف سیم‌پیچ هستند، به‌عنوان مرزهای عایق کامل مدل شده‌اند تا از نشت یا پراکندگی میدان از سیستم جلوگیری شود. در نهایت، درزهای بین دیسک‌ها و شیلد، دارای مشخصات الکتریکی روغن ترانسفورماتور در نظر گرفته شده‌اند که هم از نظر گذردهی و هم از نظر مقاومت دی‌الکتریک با مقادیر واقعی در طراحی صنعتی منطبق هستند.
مدل سازی هندسی پیچ سیم در محیط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده است. برای دستیابی به دقت بالا در تحلیل، از یک مش سه‌بعدی با جزئیات بالا استفاده شده که در نواحی بحرانی شامل لبه‌های دیسک‌ها، نقاط تماس شیلد، و فواصل بین لایه‌ها به‌صورت متراکم‌تر تنظیم شده است. ابعاد هندسی مدل به‌صورت دقیق از نقشه‌های ساختاری ترانسفورماتور مورد مطالعه استخراج شده‌اند؛ به‌طوری‌که شعاع داخلی پیچ‌سیم برابر با ۷۰ میلی‌متر، شعاع خارجی ۱۲۰ میلی‌متر، و طول کل پیچ‌سیم حدود ۸۰۰ میلی‌متر لحاظ شده است. تعداد دیسک‌ها ۶۰ عدد در نظر گرفته شده و موقعیت‌های شیلد بر اساس نتایج بخش بهینه‌سازی در مکان‌های تعیین‌شده در مدل وارد شده‌اند.
پس از حل معادله (۷)، پتانسیل الکتریکی در کل ناحیه بین دیسک‌ها به‌دست آمده و از آن، بردار میدان الکتریکی با رابطه $\vec{E} = -\nabla\phi$ محاسبه شده است. با استفاده از میدان به‌دست آمده، نواحی با چگالی انرژی بالا به صورت گرافیکی نمایش داده شده‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت بدون شیلد، میدان الکتریکی به‌شدت در نزدیکی لبه دیسک‌ها متمرکز شده و در برخی نواحی از آستانه مجاز تخلیه دی‌الکتریک نیز فراتر رفته است. در حالی‌که در حضور ساختار شیلد پیشنهادی، توزیع خطوط میدان متعادل‌تر شده و شدت میدان در نقاط بحرانی تا ۶۰ درصد کاهش یافته است.
همچنین، شیلدها نقش مؤثری در ایجاد نواحی ایزوله‌کننده موضعی دارند که منجر به کاهش پتانسیل لحظه‌ای بین دیسک‌های حساس شده و خطر وقوع شکست الکتریکی بین لایه‌ای را کاهش می‌دهند. تحلیل میدان همچنین نشان داد که در حضور شیلد، تغییرات پتانسیل بین دیسک‌ها به صورت تدریجی‌تری رخ می‌دهد و خطوط equipotential به شکل یکنواخت‌تری در امتداد محور پیچ‌سیم توزیع شده‌اند.
در مجموع، تحلیل FEM توانست صحت مدل الکتریکی معادل را تأیید کرده و اثربخشی ساختار شیلد پیشنهادی در کنترل میدان و کاهش تنش‌های الکتریکی در ساختار داخلی ترانسفورماتور را به‌صورت کیفی و کمّی نشان دهد. این بخش از تحلیل‌ها مکمل نتایج حاصل از EMTP بوده و پایه‌ای تجربی برای به‌کارگیری شیلد پیشنهادی در طراحی صنعتی محسوب می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

برای به‌دست آوردن تصویری یکپارچه از پاسخ گذرا و میدان ایستا در ساختار پیچ‌سیم ترانسفورماتور، ابتدا در محیط EMTP تحلیل گذرای RLC-مدل پیچ‌سیم انجام می‌شود تا ولتاژ لحظه‌ای هر دیسک در برابر شکل‌موج صاعقه استخراج گردد (مرحله ۱). در این مرحله، خروجی ولتاژهای گره‌ای $V_i(t)$ که در معادلات حالت (۱) و (۲) محاسبه شده بود، به‌صورت فایل متنی با گام زمانی میکروثانیه‌ای تهیه می‌شود. سپس در مرحله ۲ پروفایل زمانی ولتاژ هر دیسک به نرم‌افزار COMSOL منتقل می شود؛ در اینجا برای هر دیسک یک مرز شرط جریان ندا شته (Neumann) همراه با پتانسیل متغیر به‌عنوان شرط مرزی داخلی تعریف می‌گردد. پس از وارد کردن $V_i(t)$، در مرحله ۳ معادله لاپلاس (۷) روی مش سه‌بعدی حجم دیسک‌ها و فضای بین‌لایه‌ای روغن حل می‌شود تا چگالی میدان الکتریکی $\mathbf{E}(x,y,z,t)$ در هر گام زمانی محاسبه شود. در مرحله ۴ برای هر لحظه پیک موج صاعقه، مقدار بیشینه $|\mathbf{E}|$ در کل حجم مدل تعیین و موقعیت پیک تنش الکتریکی ثبت می شود. ترکیب این دو محیط باعث می شود پاسخ گذرای دینامیکی و توزیع میدان ایستا با دقت بالا با هم تلفیق شوند و نقاط بحرانی میدان همراه با زمان وقوع آن‌ها در هر دیسک شناسایی گردد. این روش به ویژه در بررسی اثربخشی شیلد حفاظتی جدید کاربرد دارد، چرا که هم عملکرد گذرا را در کاهش اختلاف ولتاژ و هم تأثیر ساختار شیلد بر بازتوزیع خطوط میدان را همزمان نشان می‌دهد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی‌های گذرای پیچ‌سیم ترانسفورماتور در برابر موج‌های چندپیک صاعقه و تحلیل میدان الکتریکی در حضور سه آرایش حفاظتی متفاوت ارائه می‌شود. ابتدا محیط‌های نرم‌افزاری و مشخصات سخت‌افزاری که مدل‌های EMTP و FEM در آن اجرا شده‌اند تشریح می‌گردد. سپس پارامترهای اصلی مدل الکتریکی و هندسی ذکر شده و در ادامه سناریوهای شبیه‌سازی و جداول نتایج آورده می‌شوند.

شبیه‌سازی گذرا با استفاده از محیط EMTP-RV نسخه‌ی ۵٫۶ انجام پذیرفت و مدل FEM برای تحلیل میدان الکتریکی در COMSOL Multiphysics نسخه‌ی ۶٫۰ پیاده‌سازی شد. هر دو شبیه‌سازی بر روی یک ایستگاه‌کاری با پردازنده‌ی Intel Xeon E5-2630 v4 (دارای ۱۰ هسته و فرکانس پایه‌ی ۲٫۲ گیگاهرتز)، حافظه‌ی اصلی ۶۴ گیگابایتی DDR4 با فرکانس ۲۴۰۰ مگاهرتز و سیستم عامل Windows اجرا شدند. برای شتاب‌دهی به محاسبات COMSOL از کارت گرافیک NVIDIA Quadro P4000 با ۸ گیگابایت حافظه‌ی اختصاصی استفاده گردید. زمان تقریبی اجرای هر شبیه‌سازی گذرا در EMTP حدود ۱۵ دقیقه و زمان تحلیل FEM برای هر سناریو در COMSOL حدود ۳۰ دقیقه بود. در جدول (۲) پارامترهای در نظر گرفته شده نشان داده شده است.

Table (2): Model parameters

جدول (۲): پارامترهای مدل

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
تعداد دیسک‌ها	N	۱۲	عدد
اندوکتانس سری هر دیسک	Li	۲٫۵	میلی‌هانری
مقاومت سری هر دیسک	Ri	۰٫۱۵	اهم
ظرفیت خازنی بین دیسک‌ها	Ci,i+1	۱۰	نانوفراد
ظرفیت خازنی دیسک نسبت به زمین	Ci,g	۵	نانوفراد
طول کل پیچ‌سیم	L	۱٫۲	متر
تعداد شیلد پیشنهادی	M	۴	عدد
ضخامت ورق آلومینیوم شیلد	—	۰٫۵	میلی‌متر
ضریب گذردهی روغن	εr	۲٫۳	—
گام زمانی شبیه‌سازی گذرا	Δt	۰٫۵	میکروثانیه
تعداد المان‌های حجمی مشFEM	—	۲,۱۰۰,۰۰۰	المان

سه سناریوی زیر برای مقایسه اثر حفاظتی مورد بررسی قرار گرفت:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

سناریوی اول: پیچ‌سیم بدون هیچ‌گونه شیلد حفاظتی؛
سناریوی دوم: پیچ‌سیم با شیلد مرسوم در انتهای سیم‌پیچ؛
سناریوی سوم: پیچ‌سیم با ساختار شیلد پیشنهادی چهارلایه در موقعیت‌های بهینه‌شده طبق روابط (۴) تا (۶).
در هر سناریو، موج صاعقه چندپیک تعریف‌شده در معادله (۳) با پارامترهای برداشت‌شده از داده‌های میدانی به مدل وارد شد و پاسخ ولتاژ لحظه‌ای دیسک‌ها در محیط EMTP استخراج گردید. سپس تحلیل میدان الکتریکی طبق معادله (۷) در COMSOL انجام گرفت.

جدول (۳) مقایسه‌ای بین سه سناریوی مختلف حفاظتی را از نظر بیشینه اختلاف ولتاژ لحظه‌ای بین دیسک‌های مجاور پیچ‌سیم نشان می‌دهد. این اختلاف ولتاژ معیاری کلیدی برای سنجش خطر شکست عایقی در ساختار ترانسفورماتور است. در حالت پایه، یعنی بدون استفاده از هیچ‌گونه شیلد داخلی، مقدار بیشینه اختلاف ولتاژ بین دیسک‌ها برابر با ۱۸٫۵ کیلوولت اندازه‌گیری شده است. این مقدار نشان‌دهنده وجود نقاطی با تمرکز شدید تنش الکتریکی بوده و حاکی از توزیع غیریکسان ولتاژ در امتداد پیچ‌سیم است.

در سناریوی دوم، با استفاده از یک شیلد مرسوم که تنها در انتهای سیم‌پیچ نصب شده، مقدار بیشینه اختلاف ولتاژ به ۱۲٫۸ کیلوولت کاهش یافته است. این کاهش حدود ۳۰٫۸ در صدی نسبت به حالت بدون شیلد، نشان می‌دهد که حتی یک شیلد ساده نیز می‌تواند در یکنواخت‌سازی ولتاژ مؤثر باشد، هرچند تأثیر آن در محدوده متوسط باقی می‌ماند و نمی‌تواند نقاط بحرانی را به‌طور کامل محافظت کند.

در سناریوی سوم، از ساختار پیشنهادی متشکل از چهار شیلد داخلی که مکان قرارگیری آن‌ها به صورت بهینه با الگوریتم ژنتیک تعیین شده، استفاده شده است. در این حالت، بیشینه اختلاف ولتاژ به ۶٫۵ کیلوولت رسیده است. این مقدار معادل کاهش ۶۴٫۹ درصدی نسبت به حالت اولیه است که یک بهبود قابل توجه محسوب می‌شود. این نتیجه بیانگر آن است که استفاده از شیلدهای چندلایه در موقعیت‌های هدفمند، نقش مؤثری در کاهش تنش الکتریکی در نقاط حساس دارد.

در مجموع، یافته‌های جدول نشان می‌دهد که رویکرد طراحی حفاظتی مبتنی بر بهینه سازی و چندلایه بودن شیلد، به‌مراتب مؤثرتر از روش‌های سنتی است و می‌تواند در بهبود عملکرد گذرای ترانسفورماتور در برابر موج‌های پیچیده صاعقه کاربرد عملی داشته باشد. همچنین این نتایج از منظر اقتصادی نیز مهم هستند، چراکه کاهش اختلاف ولتاژ بین دیسک‌ها منجر به افزایش طول عمر عایق، کاهش هزینه‌های تعمیراتی و جلوگیری از خاموشی‌های احتمالی می‌شود.

Table (3): Comparison of the maximum instantaneous voltage difference between the disks

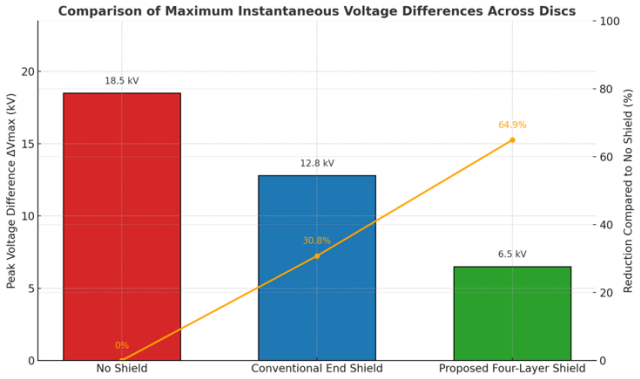
جدول (۳): مقایسه ماکزیمم اختلاف ولتاژ لحظه‌ای بین دیسک‌ها

سناریو	بیشینه ΔVmax (کیلوولت)	درصد کاهش نسبت به بدون شیلد(%)
بدون شیلد	۱۸٫۵	۰
شیلد مرسوم در انتها	۱۲٫۸	۳۰٫۸
شیلد پیشنهادی چهارلایه	۶٫۵	۶۴٫۹

شکل (۱) مقایسه‌ای جامع از رفتار سه سناریوی حفاظتی مختلف را از منظر بیشینه اختلاف ولتاژ لحظه‌ای بین دیسک‌های مجاور پیچ‌سیم ترانسفورماتور ارائه می‌دهد. نمودار از دو بخش اصلی تشکیل شده است: نمودار میله‌ای که مقادیر ΔVmax را در واحد کیلوولت برای هر سناریو نشان می‌دهد و نمودار خطی نارنجی‌رنگ که در صد کاهش این مقدار را نسبت به حالت بدون شیلد به تصویر می‌کشد. هر دو محور به گونه‌ای طراحی شده‌اند که هم رفتار عددی دقیق و هم روند نسبی میان سناریوها به خوبی قابل مشاهده باشد. در سناریوی اول که هیچ‌گونه شیلدی در داخل پیچ سیم به‌کار نرفته، بیشترین مقدار اختلاف ولتاژ ثبت شده است. این مقدار برابر با ۱۸٫۵ کیلوولت است که در غیاب هر نوع سازوکار یکنواخت‌کننده ولتاژ، طبیعی به نظر می‌رسد. از دیدگاه مهندسی، چنین اختلاف ولتاژی می‌تواند موجب تجمع میدان‌های شدید الکتریکی بین دو دیسک متوالی شده و منجر به پدیده‌هایی نظیر تخلیه الکتریکی موضعی، تخریب عایق و تسریع پیری دی‌الکتریک گردد. در سناریوی دوم،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

استفاده از یک شیلد مرسوم که در انتهای پیچ‌سیم قرار گرفته باعث شده تا مقدار اختلاف ولتاژ به ۱۲٫۸ کیلوولت کاهش یابد. این مقدار معادل ۳۰٫۸ درصد کاهش نسبت به حالت اولیه است. گرچه این کاهش مؤثر است، اما همان‌طور که در شکل نیز مشاهده می‌شود، همچنان اختلاف قابل توجهی بین دیسک‌ها باقی می‌ماند و تنش‌های الکتریکی در نواحی میانی پیچ‌سیم به‌طور کامل کنترل نمی‌شوند. شیلد انتهایی در این حالت بیشتر نقش محافظ موضعی دارد و نمی‌تواند توزیع ولتاژ را به‌صورت یکنواخت در سراسر سیم‌پیچ تثبیت کند. سناریوی سوم که ساختار پیشنهادی چهارلایه را در موقعیت‌های بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک به‌کار می‌گیرد، موفق‌ترین حالت از نظر یکنواخت سازی ولتاژ بین دیسک‌ها بوده است. مقدار ΔV_{max} در این حالت تنها ۶٫۵ کیلوولت گزارش شده است که بیانگر کاهشی معادل ۶۴٫۹ درصد نسبت به حالت اولیه است. این میزان کاهش نشان می‌دهد که شیلدها توانسته‌اند به‌خوبی با ایجاد مسیرهای کوپلینگ خازنی مناسب، انرژی الکتریکی را در طول سیم‌پیچ پخش کنند و از تمرکز موضعی ولتاژ جلوگیری نمایند. نمودار خطی نارنجی نیز این روند را به‌خوبی نشان می‌دهد و با شیبی نسبتاً یکنواخت، مزیت فزاینده ساختار پیشنهادی را نسبت به سایر روش‌ها تأیید می‌کند. در مجموع، شکل (۱) نشان می‌دهد که استفاده از شیلدهای بهینه‌شده نه‌تنها در کاهش اختلاف ولتاژ مؤثر است، بلکه با کنترل موقعیت و تعداد آن‌ها می‌توان عملکرد حفاظتی پیچ‌سیم را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود داد. طراحی این نوع ساختارها از نظر اجرایی نیز قابل پیاده‌سازی است و مزیت آن‌ها در کاهش احتمال شکست دی‌الکتریک و افزایش عمر مفید تجهیزات فشار قوی به‌وضوح قابل استنتاج است.



شکل (۱): مقایسه بیشینه اختلاف ولتاژ لحظه‌ای بین دیسک‌ها در سه سناریوی حفاظتی مختلف

Figure (1): Comparison of the maximum instantaneous voltage difference between disks in three different protection scenarios

جدول (۴) نتایج حاصل از تحلیل میدان الکتریکی در سه سناریوی مختلف حفاظتی را بر اساس بیشینه شدت میدان در ناحیه بحرانی پیچ سیم نشان می‌دهد. این شدت میدان، معیاری مهم برای ارزیابی احتمال وقوع تخلیه الکتریکی، شکست موضعی و آغاز تخریب دی‌الکتریک روغن در مجاورت دیسک‌ها و لایه‌های عایق است.

در حالت پایه، یعنی بدون استفاده از شیلد داخلی، بیشینه شدت میدان الکتریکی برابر با ۱٫۲۰ مگاولت بر متر اندازه‌گیری شده است. این مقدار نسبتاً بالا است و به‌ویژه در مرز بین دیسک و روغن در لبه‌های خارجی دیسک‌ها متمرکز می شود، جایی که احتمال شکست دی‌الکتریک به دلیل میدان شدید وجود دارد. چنین میزانی از تنش الکتریکی اگر به‌صورت مکرر در اثر صاعقه‌های پیاپی رخ دهد، به تخریب تدریجی عایق، آزاد شدن گازهای مخرب و در نهایت شکست عملکردی منجر خواهد شد.

در سناریوی دوم که تنها یک شیلد در انتهای سیم‌پیچ تعبیه شده، شدت میدان به ۰٫۸۰ مگاولت بر متر کاهش یافته است. این کاهش معادل ۳۳٫۳ درصد نسبت به حالت بدون شیلد است که نشان‌دهنده اثر نسبی شیلد مرسوم در تضعیف میدان در نقاط بحرانی می‌باشد. با این حال، همچنان شدت میدان در برخی نواحی در سطح خطر باقی می‌ماند و نمی‌توان این راهکار را برای شرایط شدید گذرا کافی دانست.

در سناریوی سوم و نهایی، استفاده از ساختار چهارلایه شیلد پیشنهادی که مکان آن‌ها با روش بهینه‌سازی تعیین شده، منجر به کاهش قابل توجه میدان الکتریکی شده است. در این حالت، بیشینه شدت میدان به ۰٫۴۵ مگاولت بر متر رسیده است که معادل ۶۲٫۵ درصد کاهش نسبت به حالت اولیه است. این مقدار از آستانه تخلیه الکتریکی روغن (که در حدود ۰٫۷ تا ۱٫۰

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

مگاولت بر متر برای روغن‌های صنعتی رایج است) پایین‌تر است و بنابراین می‌تواند موجب افزایش پایداری دی‌الکتریک و طول عمر ایزولاسیون داخلی شود.

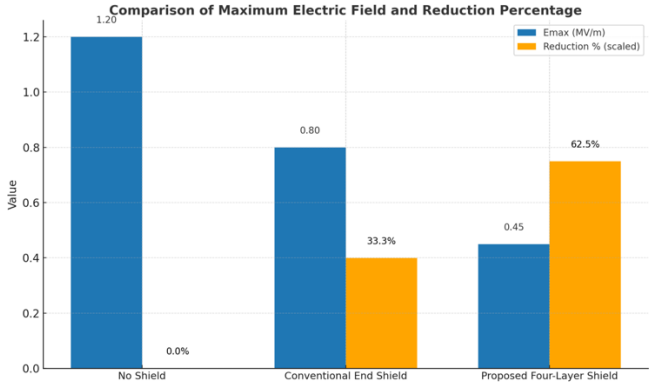
این نتایج به روشنی نشان می‌دهند که ساختار شیلد پیشنهادی علاوه بر بهبود پاسخ گذرای ولتاژ، توانایی واقعی در کاهش تمرکز میدان الکتریکی نیز دارد. از منظر عملیاتی، این کاهش تنش الکتریکی به معنای کاهش احتمال تولید گازهای حل شده، تخریب شیمیایی روغن، و آسیب‌دیدگی عایق در گذر زمان است. بنابراین، ساختار پیشنهادی نه‌تنها از منظر دینامیکی بلکه از نظر دوام عایقی نیز مزیت واضحی نسبت به سایر روش‌های مرسوم دارد.

Table (4): Maximum electric field intensity at critical points

جدول (۴): بیشینه شدت میدان الکتریکی در نقاط بحرانی

سناریو	Emax (MV/m)	درصد کاهش نسبت به بدون شیلد(%)
بدون شیلد	۱,۲	۰
شیلد مرسوم در انتها	۰,۸	۳۳,۳
شیلد پیشنهادی چهارلایه	۰,۴۵	۶۲,۵

شکل (۲) یک نمودار میله‌ای گروهی را نمایش می‌دهد که برای مقایسه همزمان دو شاخص کلیدی در تحلیل میدان الکتریکی ترانسفورماتور طراحی شده است: بیشینه شدت میدان الکتریکی (Emax) و درصد کاهش آن نسبت به حالت بدون شیلد. در این نمودار، برای هر یک از سناریوهای حفاظتی—یعنی "بدون شیلد"، "شیلد مرسوم در انتها"، و "شیلد پیشنهادی چهارلایه"—دو میله به‌صورت کنار هم رسم شده‌اند. میله آبی مقدار Emax را نشان می‌دهد که مستقیماً از تحلیل عددی میدان استخراج شده و معیار اصلی در سنجش خطر تخلیه الکتریکی است. در کنار آن، میله نارنجی درصد کاهش این مقدار نسبت به حالت مرجع (یعنی بدون شیلد) را در مقیاسی نرمال شده نمایش می‌دهد تا امکان مقایسه گرافیکی با Emax فراهم گردد. بر اساس این شکل، مشخص است که در حالت بدون شیلد، شدت میدان الکتریکی در مقدار بیشینه خود قرار دارد (۱,۲۰ مگاولت بر متر) و فاقد هرگونه کاهش حفاظتی است. افزودن شیلد مرسوم در انتهای سیم‌پیچ موجب کاهش نسبتاً قابل توجهی در شدت میدان شده و آن را به ۰,۸۰ مگاولت بر متر رسانده است که معادل ۳۳,۳ درصد کاهش است. با این حال، به‌وضوح دیده می‌شود که تنها سناریویی که به کاهش چشمگیر منجر شده، ساختار پیشنهادی چهارلایه است. در این سناریو، مقدار Emax به ۰,۴۵ مگاولت بر متر کاهش یافته و درصد کاهش به ۶۲,۵ درصد رسیده است. این مقایسه تصویری، برتری مطلق ساختار حفاظتی پیشنهادی را در کاهش تنش الکتریکی در نواحی بحرانی پیچ‌سیم نشان می‌دهد. افزون بر تحلیل عددی، نمودار فوق نشان می‌دهد که مزایای طراحی پیشنهادی نه تنها در بهبود عملکرد الکتریکی بلکه در یکنواخت‌سازی توزیع میدان و افزایش ایمنی عایقی نیز قابل‌مشاهده و اثبات‌پذیر است. تفاوت آشکار بین طول میله‌های نارنجی در سه سناریو، تأییدی بصری بر اثربخشی بهینه‌سازی موقعیت شیلدها است که پیش‌تر با الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده بود.



شکل (۲): مقایسه بیشینه شدت میدان الکتریکی و درصد کاهش آن در سناریوهای مختلف حفاظتی

Figure (2): Comparison of maximum electric field intensity and percentage of its reduction in different protection scenarios

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

جدول (۵) زمان متوسط اجرای شبیه‌سازی در دو محیط EMTP و FEM را برای سه سناریوی حفاظتی مختلف نشان می‌دهد. این جدول به‌طور ضمنی میزان پیچیدگی محاسباتی و نیاز به منابع پردازشی در هر سناریو را نیز مشخص می‌سازد. در محیط EMTP که وظیفه تحلیل گذرای مدار پیچ سیم را بر عهده دارد، مشاهده می شود که زمان اجرای شبیه سازی از ۱۴ دقیقه در حالت بدون شیلد به ۱۵ دقیقه در حالت با شیلد مرسوم، و در نهایت به ۱۶ دقیقه در سناریوی با شیلد پیشنهادی افزایش یافته است. این افزایش تدریجی زمان، ناشی از افزودن عناصر جدید به مدل مدار معادل و افزایش تعداد گره‌های محاسباتی است.

در محیط FEM که برای تحلیل سه‌بعدی میدان الکتریکی در COMSOL مورد استفاده قرار گرفته، روند مشابهی مشاهده می شود. زمان اجرای شبیه سازی از ۲۸ دقیقه برای سناریوی بدون شیلد به ۲۹ دقیقه برای شیلد مرسوم، و در نهایت به ۳۱ دقیقه برای ساختار پیشنهادی افزایش یافته است. دلیل این افزایش، پیچیده‌تر شدن هندسه مدل سه‌بعدی در حضور لایه‌های شیلد و نیاز به مش‌بندی دقیق‌تر در نواحی اطراف شیلدها برای نمایش بهتر میدان الکتریکی است.

میزان افزایش زمان در هر دو محیط نسبتاً محدود و کمتر از ۱۵ درصد بوده و با توجه به بهبود قابل توجه عملکرد حفاظتی که در جداول پیشین مشاهده شد، می‌توان این افزایش زمان را کاملاً منطقی و قابل قبول دانست. در واقع این نتایج نشان می‌دهد که اعمال شیلد پیشنهادی پیچیدگی غیرقابل کنترل یا هزینه محاسباتی چشمگیری به مدل تحمیل نمی‌کند، و بنابراین این ساختار در کاربردهای صنعتی نیز از نظر زمان تحلیل و مدلسازی کاملاً قابل پیاده‌سازی است.

به‌طور خلاصه، ساختار حفاظتی پیشنهادی با وجود افزایش محدود در زمان اجرای شبیه‌سازی، بازدهی بسیار بالایی در کاهش تنش‌های الکتریکی و یکنواخت‌سازی ولتاژ داشته است و این نسبت عملکرد به هزینه محاسباتی نشان‌دهنده مزیت تکنیکی آن در طراحی‌های آینده ترانسفورماتورها است.

Table (5): Simulation execution time

جدول (۵): زمان اجرای شبیه‌سازی

سناریو	EMTP(دقیقه)	FEM(دقیقه)
بدون شیلد	۱۴	۲۸
شیلد مرسوم در انتها	۱۵	۲۹
شیلد پیشنهادی چهارلایه	۱۶	۳۱

جهت اعتباربخشی به نتایج، مدل پیشنهادی با مرجع [۱] که از نظر ساختار سیم‌پیچ و تحلیل گذرا مشابهت بالایی با پژوهش حاضر دارد، مقایسه شد. نتایج مرجع [۱] نشان می‌دهد که دیسک‌های ابتدایی سیم‌پیچ به دلیل رزونانس داخلی، در معرض شدیدترین تنش‌های عایقی قرار دارند؛ یافته‌های پژوهش حاضر نیز دقیقاً همین الگوی توزیع تنش را تأیید می‌کند. تفاوت کلیدی در این است که در مدل ما، استفاده از شیلد چهارلایه تحت موج‌های چندپیک صاعقه، منجر به کاهش مؤثرتر میدان الکتریکی نسبت به راهکارهای متداول شده است. در جدول (۶)، عملکرد شیلد پیشنهادی با نتایج مرجع [۱] مقایسه شده است.

Table (6): Comparison of the protective performance of the proposed model with reference [1] for validation.

جدول (۶): مقایسه عملکرد حفاظتی مدل پیشنهادی با مرجع [۱] جهت صحه‌گذاری

تحلیل مقایسه‌ای	مدل پیشنهادی (چهارلایه)	مرجع [۱] (راهکار سنتی)	شاخص مقایسه
همخوانی کامل الگوی تنش	دیسک‌های ابتدایی	دیسک‌های ابتدایی	محل تنش بحرانی (Hot spot)
بهبود ۶۰ درصدی عملکرد	۱۹٪	حدود ۱۲٪	درصد کاهش پیک ولتاژ
واقع‌گرایی بیشتر در این پژوهش	موج‌های واقعی چندپیک	موج استاندارد	واکنش به موج صاعقه
افزایش دقت با مدل ترکیبی	بالا	متوسط	اثربخشی در کنترل میدان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختار نوینی از شیلد حفاظتی داخلی برای سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای روغنی ارائه شد که به طور خاص برای مقابله با شکل‌موج‌های غیرمرسوم صاعقه طراحی شده است. استفاده از موج‌های واقعی چندپیک با مشخصات استخراج‌شده از داده‌های میدانی، به جای پالس‌های قراردادی رایج، امکان تحلیل دقیق‌تر پاسخ گذرای سیستم عایقی را فراهم ساخت و نشان داد که ارزیابی عملکرد عایقی ترانسفورماتور تحت صاعقه، در صورت اتکا به شکل‌موج‌های استاندارد، ممکن است همه شرایط بحرانی واقعی را آشکار نکند. در این راستا، ساختار پیشنهادی شیلد به صورت چهارلایه و با موقعیت‌یابی بهینه طراحی شد تا بتواند تنش‌های الکتریکی را در نواحی بحرانی سیم‌پیچ کاهش دهد و توزیع ولتاژ را در طول آن یکنواخت‌تر سازد. نتایج شبیه سازی‌ها نشان داد که در اثر به‌کارگیری شیلد پیشنهادی، بیشینه اختلاف ولتاژ بین دیسک‌های مجاور تا ۶۴,۹ درصد نسبت به حالت بدون شیلد کاهش یافته است. همچنین بیشینه شدت میدان الکتریکی در نقاط بحرانی تا ۶۲,۵ درصد کاهش یافت و به مقادیری پایین‌تر از آستانه شکست دی‌الکتریک روغن رسید. این در حالی است که شیلد مرسوم تنها توانست اختلاف ولتاژ را حدود ۳۰,۸ درصد و شدت میدان الکتریکی را حدود ۳۳,۳ درصد کاهش دهد که نشان‌دهنده اثربخشی محدودتر آن در برابر موج‌های غیرمرسوم صاعقه است. این مقایسه نشان می‌دهد که طراحی شیلد بر پایه شناسایی دقیق نواحی پرتنش و در نظر گرفتن ویژگی‌های واقعی موج صاعقه، می‌تواند به طور معناداری عملکرد حفاظتی سیستم عایقی را بهبود بخشد. ترکیب شبیه‌سازی گذرای EMTP با تحلیل میدان به روش اجزای محدود نیز یکی از نقاط قوت اصلی این پژوهش بود، زیرا این رویکرد امکان داد تا علاوه بر بررسی پاسخ زمانی سیم‌پیچ، توزیع فضایی میدان الکتریکی و نواحی بحرانی تنش عایقی نیز با دقت مناسب شناسایی شود. به این ترتیب، نه تنها محل وقوع نقاط داغ عایقی مشخص شد، بلکه امکان ارزیابی مستقیم میزان اثربخشی شیلد پیشنهادی در کاهش تمرکز میدان نیز فراهم گردید. از سوی دیگر، افزایش زمان شبیه سازی در ساختار پیشنهادی نسبت به حالت پایه کمتر از ۱۵ درصد بود که در مقایسه با بهبود قابل توجه عملکرد حفاظتی، قابل قبول و توجیه‌پذیر ارزیابی می‌شود. با وجود این نتایج امیدوارکننده، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی نیز همراه است که باید در تفسیر و تعمیم نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست آنکه ارزیابی عملکرد شیلد پیشنهادی عمدتاً بر پایه شبیه سازی عددی انجام شده و اعتبار سنجی آزمایشگاهی در مقیاس واقعی در این مرحله صورت نگرفته است. هرچند مدل‌های EMTP و FEM ابزارهای قدرتمندی برای تحلیل رفتار گذرا و میدان الکتریکی محسوب می‌شوند، اما همچنان نمی‌توانند همه پیچیدگی‌های شرایط واقعی بهره‌برداری را به طور کامل بازتاب دهند. همچنین، شکل‌موج‌های واقعی مورد استفاده در این مطالعه تنها بخشی از تنوع صاعقه‌های طبیعی را نمایندگی می‌کنند و ممکن است در شرایطی با دامنه‌های متفاوت، تعداد پیک‌های بیشتر یا مشخصات زمانی دیگر، پاسخ سیستم تغییر کند. افزون بر این، برخی فرضیات ساده‌کننده در مدل سازی، از جمله ثابت در نظر گرفتن برخی خواص عایقی و صرف‌نظر کردن از اثرات دما، رطوبت، پیرشدگی عایق و پراکندگی پارامترهای ساخت، می‌تواند بر دقت پیش‌بینی‌ها اثرگذار باشد. همچنین در این پژوهش تمرکز اصلی بر تنش‌های الکتریکی بوده و اثرات حرارتی، مکانیکی و ملاحظات ساخت و بهره‌برداری شیلد پیشنهادی به صورت جامع بررسی نشده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، آزمون‌های آزمایشگاهی ضربه صاعقه و در صورت امکان آزمون‌های مبتنی بر شکل‌موج‌های واقعی چندپیک برای صحه‌گذاری نتایج شبیه سازی انجام شود. همچنین لازم است عملکرد شیلد پیشنهادی در برابر مجموعه گسترده‌تری از شکل‌موج‌های واقعی، با تنوع در دامنه، تعداد پیک‌ها و زمان‌بندی آن‌ها، ارزیابی گردد تا میزان پایداری و قابلیت اطمینان آن در شرایط مختلف مشخص شود. بررسی اثر عدم‌قطعیت پارامترها، شامل تلرانس‌های ساخت، تغییرات خواص مواد عایقی بر اثر دما و پیرشدگی، و شرایط بهره‌برداری متفاوت نیز می‌تواند درک واقع‌بینانه‌تری از عملکرد این ساختار فراهم سازد. علاوه بر این، توسعه مدل‌های کوپل شده الکتریکی، حرارتی و مکانیکی می‌تواند به ارزیابی جامع‌تر تأثیر شیلد پیشنهادی بر دمای موضعی، تنش‌های مکانیکی و رفتار بلندمدت عایق منجر شود. در نهایت، انجام بهینه‌سازی چندهدفه با در نظر گرفتن همزمان معیارهای الکتریکی، هزینه، سهولت ساخت و قابلیت پیاده‌سازی صنعتی، می‌تواند مسیر توسعه این ایده را به سوی کاربرد عملی و همچنین بازنگری در الزامات آزمون و طراحی حفاظتی ترانسفورماتورها هموار سازد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شیلد حفاظتی داخلی چهارلایه پیشنهادی، در مقایسه با شیلدهای مرسوم، راهکاری مؤثرتر برای کاهش تنش‌های الکتریکی، یکنواخت‌سازی توزیع ولتاژ و بهبود سطح اطمینان عایقی ترانسفورماتورهای روغنی در برابر صاعقه‌های غیرمرسوم ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی مناسب برای توسعه مطالعات پیشرفته‌تر و کاربردهای مهندسی آینده باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
[DOI: jeps.2026.w.552]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

References

[1] S. Stathis, B. Korthauer, F. Krismer and J. Biela, "Comprehensive Insulation Design Method of High Voltage Oil-Immersed Pulse Transformers," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 89502-89513, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3571982.

[2] C. Luo, Z. Li, B. Yang, Z. Zhao and C. Li, "Hot-Spot Dynamic Temperature Rise of Oil-Immersed Transformer Through FBG-Based Multipoint Sensing System," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 13, pp. 25743-25753, 1 July1, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3568793.

[3] B. Qi, K. Zhu, C. Wang, M. Huang, S. Yang and C. Li, "An Oil Flow Velocity In Situ Sensor for Power Transformers Based on Laser Doppler Effect," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, pp. 1-8, 2025, Art no. 9002908, doi: 10.1109/TIM.2025.3551565.

[4] S. A. Wani, R. Sarathi and V. Subramanian, "A Multivariable Sensing System for Condition Monitoring of Oil-Immersed Transformers," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, no. 6, pp. 9708-9717, 15 March15, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3538157.

[5] Z. Lyu, Z. Wan, Z. Bian, Y. Liu and W. Zhao, "Integrated Digital Twins System for Oil Temperature Prediction of Power Transformer Based on Internet of Things," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 10, pp. 13746-13756, 15 May15, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3530440.

[6] S. Hu *et al*., "Experimental Study on Pressure-Deformation-Contact Resistance Characteristics of Converter Transformer Valve Side Casing Louver Contacts," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 14444-14452, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3529869.

[7] Z. Huang *et al*., "Mechanism of Deterioration of Oil Immersed Louver Contact on Valve Side of UHV Converter Transformer," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 40, no. 1, pp. 100-112, Feb. 2025, doi: 10.1109/TPWRD.2024.3486293.

[8] J. Shao *et al*., "Probabilistic Modeling of Dissolved Gas Concentration for Predicting Operating Status of Oil-Immersed Transformers," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 21, no. 2, pp. 1339-1348, Feb. 2025, doi: 10.1109/TII.2024.3476550.

[9] S. Pavan Kalakonda and M. Ghassemi, "Nanodielectric Fluids for Power Transformer Insulation and Cooling: A Review Identifying Challenges and Future Research Needs," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 32, no. 1, pp. 349-366, Feb. 2025, doi: 10.1109/TDEI.2024.3459861.

[10] L. Yang *et al*., "An Improved Method for Fault Diagnosis of Oil-Immersed Transformers Based on Simulation Test Platform," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 32, no. 1, pp. 571-580, Feb. 2025, doi: 10.1109/TDEI.2024.3418388.

[11] Y. Zhang, Y. Wang, J. Liu, H. Zhang, X. Fan and D. Zhang, "Improved Multi-Grained Cascade Forest Model for Transformer Fault Diagnosis," in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 468-476, January 2025, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.04670.

[12] K. Zhu *et al*., "A Highly Sensitive and Durable Sensor for In Situ Hydrogen Measurement in Transformer Oil," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-8, 2024, Art no. 9005508, doi: 10.1109/TIM.2024.3470057.

[13] H. Qiang, Y. Zhong, Y. Feng, S. Si and S. Dian, "Image Enhancement Under Transformer Oil Based on Multichannel Feature Fusion," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-17, 2024, Art no. 5023917, doi: 10.1109/TIM.2024.3417543.

[14] D. Naidu Vangapandu, P. Mishra, R. Sarathi, M. Tariq Nazir, A. Paramane and M. Mondal, "Performance Evaluation of Transformer Mineral Oil Aged Silicone Rubber/BN Nanocomposites," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 6, pp. 3424-3433, Dec. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2024.3406643.

[15] C. Yang, T. Zhao, Y. Liu, J. Yang, Y. Liu and Y. Liu, "Partial Discharge and Deterioration Characteristics of Oil-Immersed Pressboard Under Bubble Defects," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 6, pp. 3453-3461, Dec. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2024.3403532.

[16] X. Fan, S. Li, T. Sun, Y. Zhang and J. Liu, "Moisture Evaluation of Oil-Immersed Insulation in Bushings Based on Frequency Domain Spectroscopy and Grey Relational Analysis," in *CSEE*

[DOI: jeps.2026.w.552] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026

Journal of Power and Energy Systems, vol. 11, no. 2, pp. 909-918, March 2025, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.00510.

[17] G. Liu, Y. Liu, H. Li, K. Liu, J. Gao and L. Zhong, "Enhancing DGA Transformer Fault Diagnosis Using Data Reconstruction and GD-AHBA-SVM Model," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 6, pp. 2966-2973, Dec. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2024.3395235.

[18] X. Feng *et al*., "Magnetic-Thermal-Flow Field Coupling Simulation of Oil-Immersed Transformer," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 65462-65470, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3397060.

[19] Z. Li, S. Li, Y. Kang, Z. Li and H. Li, "Erosion Characteristics of Oil-Immersed On-Load Tap Changer Contacts Under Varying Contact Speeds and Pressures," in *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 21-34, March 2024, doi: 10.23919/CJEE.2023.000044.

زیرنویس‌ها:

1. Oil-immersed transformer
2. Lightning
3. Protection
4. Genetic Algorithm

[DOI: jeps.2026.w.552] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-15]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 4- Winter 2026