

تشخیص خطا و شناسایی الگو در آزمایش تخلیه جزئی شینه ژنراتور با استفاده از سنسور فراصوت

مجتبی اخوات، محمدرضا نقاشان

دانشگاه شهید بهشتی

پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور

تهران، ایران

Mojtaba.akhavat@gmail.com

در طول بهره‌برداری ایفا می‌کند، بنابراین تشخیص زودرس آن می‌تواند از خروج از خط خارج از برنامه و پرهزینه ژنراتورهای فشارقوی جلوگیری به عمل آورد [۱].

وقوع تخلیه جزئی در ژنراتورهای فشارقوی، پالس‌های الکتریکی فرکانس بالا و امواج فشاری فراصوت تولید می‌کند که اثر دوم آن می‌تواند از طریق عایق شینه انتشار یابد. چنین اغتشاش فشاری را می‌توان با استفاده از سنسورهای فراصوت^۲ مناسب بر روی سطح خارجی شینه شناسایی کرد [۲].

تحقیقات نشان می‌دهد که صدای منتشر شده ناشی از امواج فشاری فراصوت، هسته را تحت تاثیر قرار داده و زمانی که این امواج به از شینه خارج می‌شود تضعیف می‌گردد. این بدان معنی است که بیشتر انرژی آزاد شده توسط PD، به وسیله سنسورهای پیزوالکتریک نصب شده در هر شیار و یا نصب شده در نقاطی روی استاتور تشخیص داده می‌شود [۳].

مطالعات بسیاری در مورد تشخیص امواج فراصوت به ویژه در ترانسفورماتور فشارقوی گردیده است، مقالاتی پیرامون الگوبرداری با استفاده همزمان از روش الکتریکی و فراصوت نیز انجام شده است [۴] ولی این کار در مورد ژنراتورهای فشارقوی نوپا بوده و بیش از دو دهه قدمت ندارد.

در این آزمایش از یک سنسور مناسب برای دریافت سیگنال‌های حاصل از امواج فراصوت تخلیه جزئی استفاده شده است. سیگنال به دست آمده از سنسور فراصوت در حوزه فرکانس تحلیل شده و پس از حذف نویزها به وسیله نرم‌افزار متلب محدوده فرکانسی قابل پذیرش برای سیگنال فراصوت

چکیده — آزمایش تخلیه جزئی به عنوان یکی از اصلی‌ترین آزمایش‌ها برای سنجش سلامتی و پیش‌بینی عمر ماشین‌های الکتریکی چه در حین ساخت و چه در حال بهره‌برداری به کار برده می‌شود. آزمایش تشخیص تخلیه جزئی بر روی شینه ژنراتور نیروگاهی با استفاده از روش جدید فراصوت انجام شده است. شینه ژنراتور دارای تخلیه جزئی داخلی از نوع نزدیک به هسته زمین شده در فاصله ۱۹۰ سانتی‌متری از ابتدای شینه می‌باشد. سیگنال به دست آمده از آزمایش تخلیه جزئی در حوزه فرکانس تحلیل شده است. پس از حذف نویزها به وسیله نرم‌افزار متلب محدوده فرکانسی قابل پذیرش برای سیگنال فراصوت را جدا کرده و در حوزه زمان الگوبرداری انجام شده است. الگوبرداری به دست آمده در این مقاله می‌تواند معیار خوبی برای تشخیص تخلیه‌های داخلی در شینه ژنراتور در روش فراصوت قرار بگیرد.

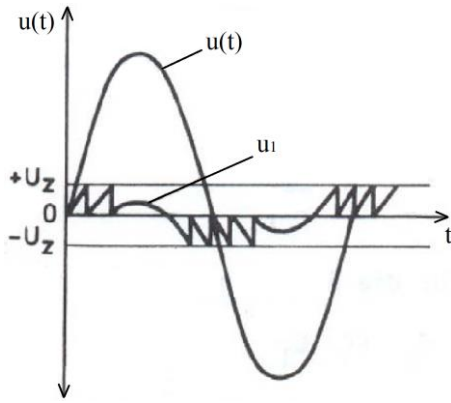
واژه‌های کلیدی — تخلیه جزئی داخلی؛ سنسور فراصوت؛ شینه ژنراتور؛ نویز

۱. مقدمه

بیشتر شکست‌ها در ژنراتورهای فشارقوی ناشی از عیب در سیستم عایقی می‌باشد که اغلب نتیجه تدریجی و مجموع اثرات مخرب تخلیه جزئی^۱ بر روی عایق می‌باشد. از این رو عایق الکتریکی شینه ژنراتور نقش مهمی در عملکرد ژنراتورهای فشارقوی برای استقامت در برابر تنش‌های الکتریکی بالا

^۲ Ultrasonic Sensors

^۱ Partial Discharge (PD)



شکل ۲: $u(t)$ شکل موج ولتاژ متصل به هادی و u_1 شکل موج ولتاژ قرار گرفته در دو سر حفره

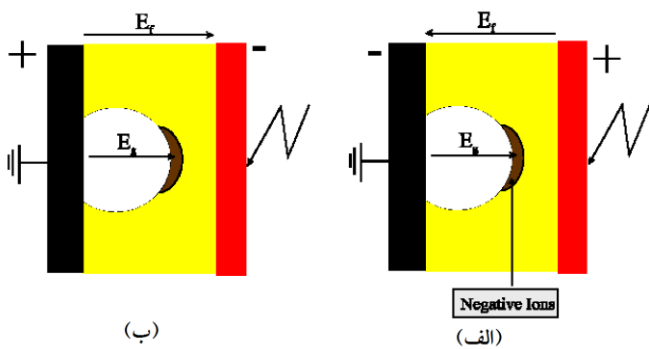
• حفره درون عایق و در مجاورت هادی

• حفره درون عایق و در مجاورت هسته زمین شده

تخلیه جزئی داخلی موجود در شینه مورد آزمایش از نوع سوم می‌باشد. از این رو به بررسی این حالت می‌پردازیم.

۲.۱ حفره درون عایق و در مجاورت هسته زمین شده

شکل ۳ وضعیت حفره را زمانی که در مجاورت هسته زمین شده قرار دارد، نشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۳ مشخص است در نیم سیکل مثبت بعد از هر تخلیه در جهت میدان اصلی یون‌های منفی داخل حفره بر روی سطح عایق حفره جمع می‌شوند و در نیم سیکل منفی میدان باقیمانده در جهت میدان اصلی بوده و اندازه تخلیه افزایش می‌یابد [۵].



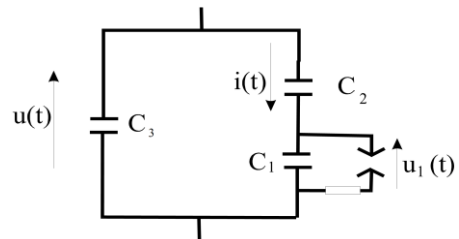
شکل ۳: حفره درون عایق در مجاورت هسته زمین شده (الف) در نیم سیکل مثبت، (ب) در نیم سیکل منفی

را جدا کرده و در حوزه زمان الگوبرداری انجام شده است. الگوبرداری به صورت دامنه تخلیه جزئی بر حسب فاز لحظه وقوع تخلیه انجام شده است.

پنج نوع متفاوت از تخلیه جزئی در شینه ژنراتور وجود دارد که عبارت‌اند از: تخلیه جزئی داخلی مجاور هادی، تخلیه جزئی داخلی میان عایق، تخلیه-جزئی مجاور هسته (تخلیه داخل شیار)، تخلیه جزئی در ناحیه لایه تنظیم میدان و تخلیه جزئی بین سر کلاف‌ها. از آنجایی که در این مقاله آزمایش‌ها و مطالعات پیرامون تخلیه جزئی داخلی صورت گرفته است لذا در ادامه توضیحات مختصری در این باره آورده شده است.

۲. تخلیه جزئی با منبع داخلی

مدار الکتریکی معادل تخلیه جزئی داخلی در شکل ۱ آمده است که در آن C_1 ، C_2 و C_3 به ترتیب معادل با ظرفیت خازنی حفره، ظرفیت خازنی بالا و پایین حفره، ظرفیت خازنی طرفین حفره می‌باشد و همچنین وقوع تخلیه درون حفره با یک برق‌گیر و مقاومت مدل‌سازی شده است.



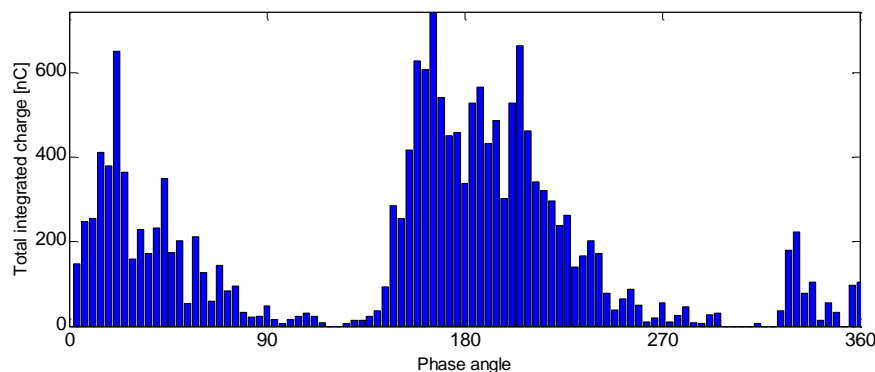
شکل ۱: مدار الکتریکی معادل حفره درون عایق بین هادی و هسته زمین شده با توجه به شکل می‌توان رابطه ۱ را استخراج کرد. با فرض اینکه C_1 خیلی بزرگتر از C_2 باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{du_1(t)}{dt} = \frac{c_2}{c_1} \frac{du(t)}{dt} \quad (1)$$

همان طور که از رابطه ۱ مشخص است زمانی که تغییرات ولتاژ در دو سر حفره حداکثر باشد در آن فاز دامنه تخلیه نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین همان طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود هرگاه که در فازهای حوالی صفر و ۱۸۰ پالس‌های تخلیه جزئی داشته باشیم می‌توان گفت این تخلیه‌ها ناشی از منبع تولیدکننده داخلی می‌باشند.

تخلیه جزئی داخلی به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌شود:

• حفره درون عایق بین هسته زمین شده و هادی



شکل ۴: نمودار دامنه بر حسب فاز به دست آمده برای تخلیه جزئی داخلی در شینه ژنراتور مورد آزمایش با استفاده از روش الکتریکی - محور عمودی دامنه مجموع بار ظاهری و محور افقی زاویه فاز را نشان می‌دهد

در تجهیزات آزمایشگاهی به‌کاربرده شده در آزمایشگاه از یک سنسور فراصوت ۴۰R SSQC-SQ به همراه یک کابل کواکسیال ۵۰ اهم برای دریافت سیگنال فراصوت، نشان داده شده در شکل ۵ استفاده شده است. ترانس آزمایشگاهی فشارقوی با نسبت تبدیل ۲۲۰ ولت به ۱۰۰ کیلوولت، کارت آنالوگ به دیجیتال، خازن کوپلاژ^۱ ۱۰۰۰ Pf - ۱۰۰ Kv همراه با پیک ولت‌متر برای اندازه‌گیری حداکثر دامنه ولتاژ بر روی شینه استفاده شده است. مجموعه میز کنترل ولتاژ به همراه پیک ولت‌متر، کارت آنالوگ به دیجیتال و رایانه مورد استفاده در آزمایشگاه تخلیه جزئی در شکل نشان ۶ داده شده است.

برای اطمینان از وجود حفره درون عایق و در مجاورت هسته زمین شده از روش تشخیص تخلیه جزئی الکتریکی^۱ بر روی شینه مورد آزمایش استفاده شده است. تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار مربوطه انجام شد و نمودار دامنه بر حسب فاز تخلیه جزئی شینه مورد آزمایش به دست آمد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

با مقایسه نمودار دامنه بر حسب فاز تخلیه جزئی به دست آمده در شکل ۴ با الگوهای مورد تأیید، می‌توان دریافت که این تخلیه جزئی از نوع درون عایق و در مجاورت هسته زمین شده (نوع سوم از انواع تخلیه جزئی داخلی، توضیح داده شده در بخش ۲) می‌باشد.

۳. آزمایش تخلیه جزئی با استفاده از سنسور

فراصوت

۳.۱. تجهیزات آزمایشگاهی فراصوت

این آزمایش در آزمایشگاه تخلیه جزئی واقع در پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور صورت گرفته است. شینه استفاده شده در این آزمایش به یک ژنراتور ۲۰۰ MVA، ۱۵٫۷۵ KV متعلق است. طول قسمت شیار ۶۴۲ سانتی-متر می‌باشد. هادی ۱۰۴ رشته دارد که در دو ستون با جابجایی ۳۶۰ درجه قرار گرفته‌اند. سطح مقطع شینه^۲ ۲۶ * ۱۱۲ است. کلاس عایقی ماشین F است که غنی از رزین می‌باشد و سطح نیمه‌هادی در بخش شیار با ورقه آلومینیومی پوشانده شده است.

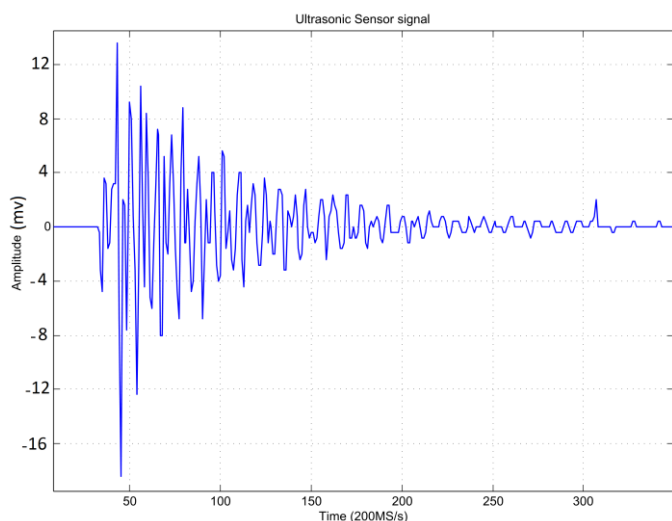


شکل ۵: سنسور فراصوت ۴۰R SSQC-SQ همراه یک کابل کواکسیال ۵۰

اهم

^۱ Coupling Capacitor

^۱ Electrical Partial Discharge Detection Method



شکل ۸: سیگنال دریافتی از سنسور فراصوت به هنگام وقوع تخلیه جزئی - محور عمودی دامنه و محور افقی زمان را با فرکانس نمونه‌گیری 200MS/s نشان می‌دهد

لازم به ذکر است، از آنجا که تاکنون روش مناسبی برای کالیبره کردن روش فراصوت در شینه ژنراتور تأیید نشده است، بنابراین در حال حاضر نمی‌توان محور عمودی که نشان‌دهنده دامنه است را بر حسب پیکو کولن نمایان کرد. استفاده همزمان از روش‌های اندازه‌گیری فراصوت و الکتریکی در برنامه این محقق می‌باشد. سیگنال‌های دریافتی توسط سنسور فراصوت با استفاده از کارت A/D و نرم‌افزار مربوطه به مدت یک ثانیه ثبت گردید.

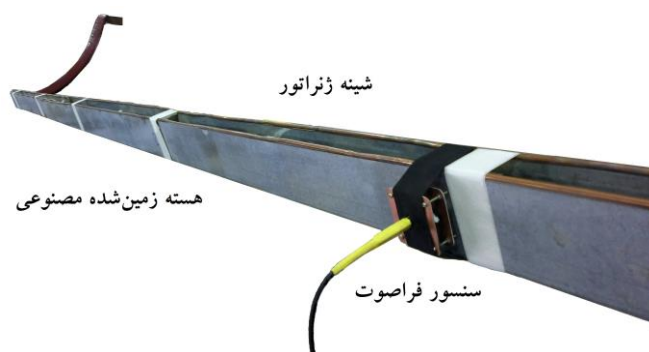
در طول مدت زمان ۱ ثانیه، ۵۰ سیکل سینوسی از ولتاژ شبکه نمونه‌گیری شده و اطلاعات نمونه‌برداری شده از طریق کارت A/D به رایانه منتقل می‌شود. به علت وجود نویز بر روی سیگنال دریافتی، هرچند با دامنه کم، برای دستیابی به نتایج بهتر و نزدیک به واقعیت بایستی این سیگنال نویز زدایی گردد.

به همین علت سیگنال دریافتی از سنسور فراصوت را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل کرده و با توجه به محدوده فرکانسی که بیش‌ترین دامنه سیگنال را شاهد هستیم با استفاده از نرم‌افزار متلب فیلترگذاری در محدوده فرکانسی مطلوب را انجام می‌دهیم. شکل ۹ طیف فرکانسی سیگنال که با استفاده از نرم‌افزار متلب به دست آمده است را نشان می‌دهد.



شکل ۶: مجموعه میز کنترل ولتاژ به همراه پیک ولت‌متر، کارت آنالوگ به دیجیتال و رایانه مورد استفاده در آزمایشگاه تخلیه جزئی

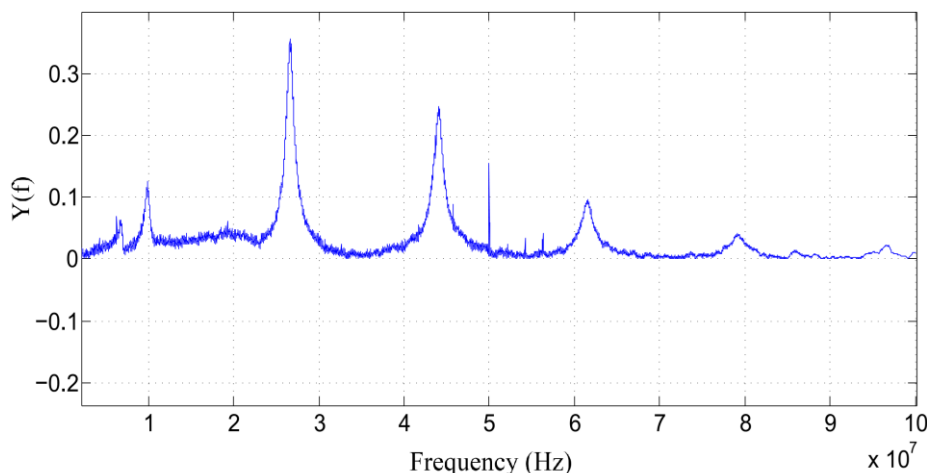
شکل ۷ موقعیت سنسور فراصوت بر روی شینه ژنراتور را نشان می‌دهد که در آن از ورقه‌های فولادی متصل به زمین برای مدل‌سازی هسته استفاده شده است.



شکل ۷: سنسور فراصوت قرار گرفته بر روی شینه ژنراتور داخل شیار مصنوعی در حین آزمایش تخلیه جزئی به روش فراصوت

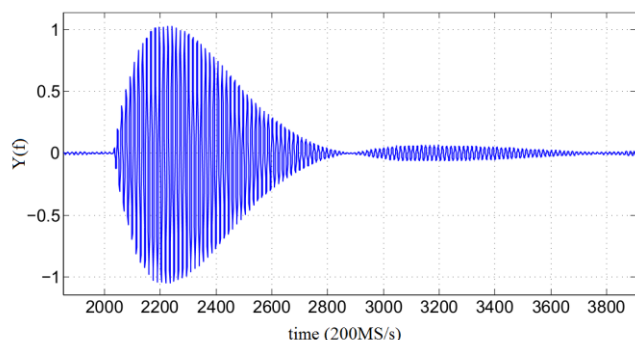
۳.۲. تحلیل نتایج آزمایش

سیگنال خام دریافتی از سنسور فراصوت در شکل ۸ نشان داده شده است که در ولتاژ موثر 12.5 کیلوولت ثبت گردیده است و همان طور که مشاهده می‌شود یک سیگنال غیر سینوسی میرا شونده می‌باشد.



شکل ۹: طیف فرکانسی معادل سیگنال به دست آمده از سنسور فراصوت - محور عمودی نشان‌دهنده دامنه و محور افقی نشان‌دهنده فرکانس بر حسب هرتز می‌باشد

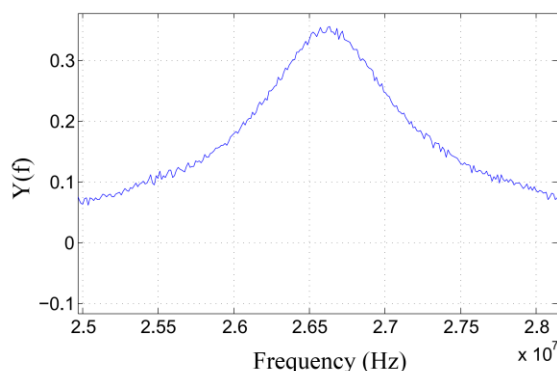
حسب فاز وقوع آن ثبت می‌شود و در نهایت در طول یک ثانیه به تعداد ۵۰ نمودار دامنه بر حسب فاز ثبت می‌گردد. از قرار دادن نمودارها بر روی یکدیگر می‌توان به یک نمونه‌گیری کلی دست یافت. نتیجه این فرایند در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: سیگنال فیلتر شده در محدوده فرکانسی ۲۶,۳ تا ۲۷ مگاهرتز

همان طور که در بخش ۲,۱ توضیح داده شد، وجود تخلیه جزئی داخلی با استفاده از روش الکتریکی در شینه مورد آزمایش، تشخیص داده شده و الگوی دامنه بر حسب فاز آن در شکل ۴ نشان داده شد. در الگوی دامنه بر حسب فاز ارائه شده در شکل ۱۲ مشابه الگوی ارائه شده برای تخلیه جزئی داخلی در روش الکتریکی در شکل ۴، محدوده وقوع تخلیه جزئی در فاز ۰ تا ۹۰ در نیم سیکل اول و ۱۸۰ تا ۲۷۰ در نیم سیکل دوم می‌باشد که تکرار تعداد تخلیه‌ها در نیم سیکل منفی بیشتر است.

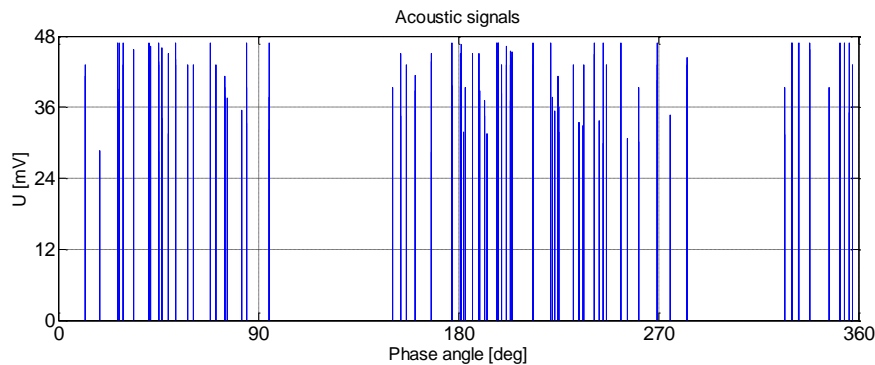
محدوده دقیق‌تر را می‌توان با استفاده از شکل ۱۰ تشخیص داد. در شکل ۱۰ محدوده فرکانسی که بیش‌ترین دامنه را دارا می‌باشد در فرکانس ۲۶,۳ تا ۲۷ مگاهرتز قرار دارد.



شکل ۱۰: محدوده طیف فرکانسی از سیگنال دریافتی توسط سنسور فراصوت که بیش‌ترین دامنه را دارا می‌باشد

حال بایستی با استفاده از نرم‌افزار متلب این محدوده از فرکانس را از سیگنال اصلی استخراج کنیم. شکل ۱۱ سیگنال فیلتر شده در محدوده فرکانسی مطلوب را نشان می‌دهد. مشابه نمونه‌گیری در روش الکتریکی آزمایش تخلیه جزئی، نمودار برداری دامنه بر حسب فاز را رسم می‌کنیم.

به این ترتیب که همزمان با ثبت سیگنال تخلیه جزئی، شکل موج ولتاژ اعمالی ۵۰ Hz نیز ثبت می‌شود، سپس با استفاده از نرم‌افزار نوشته شده در زبان برنامه‌نویسی پاسکال در هر ۲۰ ms دامنه هر سیگنال تخلیه جزئی بر



شکل ۱۲: الگوی به دست آمده برای آزمایش تخلیه جزئی شینه ژنراتور با استفاده از سنسور فراصوت - محور عمودی نشان‌دهنده دامنه و محور افقی نشان‌دهنده فاز وقوع تخلیه جزئی می‌باشد

[۴] S. Zhao, B. Li, and Y. Wang, "Partial discharge pattern recognition of transformer based on electric signal and ultrasonic comprehensive analysis," *International Conference on Systems and Informatics*, pp. ۶۳۷-۶۴۱, ۲۰۱۲.

[۵] د. م. ر. نقاشان, "جزوه درس طراحی ماشینهای الکتریکی-آزمایش تخلیه جزئی در ماشینهای الکتریکی," ۱۳۹۲.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله از یک روش جدید بر پایه‌ی تشخیص امواج فراصوت تولیدشده توسط منابع تخلیه جزئی در شینه ژنراتور استفاده شده است. الگوی دامنه بر حسب فاز وقوع تخلیه جزئی در شینه مورد آزمایش با استفاده از روش الکتریکی به دست آمده است. با استفاده از یک سنسور فراصوت و تشخیص محدوده فرکانسی مطلوب و حذف نویزها، الگوی دامنه بر حسب فاز وقوع تخلیه جزئی داخلی از نوع حفره داخلی همراه با تخلیه خارجی نزدیک به هسته زمین شده برای روش فراصوت به خوبی حاصل گردیده است. الگوی به دست آمده مشابه الگوی مورد تأیید و به دست آمده برای این نوع خطا در روش الکتریکی می‌باشد. این الگو می‌تواند معیار خوبی برای مقایسه نمونه برداری‌های انجام شده بر روی شینه ژنراتور در روش فراصوت برای تشخیص نوع تخلیه جزئی باشد.

منابع

- [۱] S. Ahmadi, M. R. Naghashan, and M. Shadmand, "Partial discharge detection during electrical aging of generator bar using acoustic technique," *IEEE Conference*, pp. ۵۷۶-۵۷۸, ۲۰۱۲.
- [۲] R. Bozzo, C. Gemme, F. Guastavino, and G. Guerra, "Localisation of partial discharge sites on power generator bars by means of ultrasonic measurements," *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. ۶۵۸-۶۶۳, May ۱۹۹۷.
- [۳] K. M. Takmi and A. M. Takami, "Acoustical FEM simulation of partial discharge in large scale generators," *psc conference*, pp. ۱-۱۱, ۲۰۱۲.