

Test and evaluation of ultrasonic signal attenuation passing through generator bars located inside and outside the stator slot

Abstract

Partial discharge is one of the important factors affecting the estimation of life and fault diagnosis of high voltage generator bars. During the occurrence of partial discharge, ultrasonic signals is generated. Parameters of the signal such as amplitude, frequency and the number of its occurrences per unit time can be changed depending on the type of partial discharge and its location. This theory already has been proven about ultrasonic waves that its amplitude varies inversely with the distance from the site of partial discharge source. In this paper the ultrasonic sensors are mounted on six points along the stator bar of a HV generator, in both cases, inside and outside the stator slot. Then MATLAB analyzing techniques are used for filtering the detected signals and attenuation curve per distance from the site of discharge. These results can be used to detect and evaluate ultrasonic signals for locating the partial discharge on generator bars.

Keywords: Attenuation, Generator bars, Partial discharge, Sensor, Ultrasonic signals

آزمایش و بررسی درصد تضعیف سیگنال فراصوت حاصل از تخلیه الکتریکی جزئی در شینه ژنراتور قرار گرفته در داخل و خارج از شیار استاتور

چکیده

بررسی تخلیه الکتریکی جزئی از جمله عوامل مهم و تاثیر گذار در تشخیص خطا و تخمین عمر شینه ژنراتور فشارقوی به شمار می‌رود. تخلیه جزئی به هنگام وقوع، سیگنال‌های فراصوتی تولید می‌کند که مشخصات این سیگنال از قبیل دامنه، فرکانس، شکل و تعداد وقوع آن در واحد زمان می‌تواند بسته به نوع تخلیه جزئی و محل وقوع آن تغییر کند. در مورد امواج فراصوت قبلاً این نظریه به اثبات رسیده است که دامنه سیگنال فراصوت با میزان فاصله از محل تولید نسبت عکس دارد. در این مقاله این موضوع برای یک شینه ژنراتور در دو حالت داخل و خارج از شیار مورد آزمایش قرار گرفته است. سنسور فراصوت در شش نقطه در امتداد شینه نصب شده و پس از تحلیل نتایج آزمایش به وسیله نرم‌افزار متلب، منحنی درصد تضعیف سیگنال بر حسب میزان فاصله از محل تخلیه به دست آمده است. از این نتایج می‌توان برای تشخیص و بررسی سیگنال‌های فراصوت در مکان‌یابی تخلیه جزئی شینه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تخلیه الکتریکی جزئی، تضعیف سیگنال، سنسور فراصوت، شینه ژنراتور

مقدمه

متداول‌ترین روش برای تشخیص سلامت و تعیین عمر شینه در ژنراتورهای فشارقوی، آزمایش تشخیص تخلیه جزئی می‌باشد. وقوع تخلیه جزئی در شینه ژنراتور همواره با عوامل جانبی همچون نویزهای الکترومغناطیسی، ایجاد نویز بر روی ولتاژ شبکه، نور، گاز و صدا همراه می‌باشد. پرکاربردترین روش آزمایش تشخیص تخلیه جزئی، روش الکتریکی می‌باشد که از طریق جداسازی نویزهای تولیدی توسط تخلیه جزئی از ولتاژ شبکه به بررسی و تحلیل آن می‌پردازد. روش تشخیص الکتریکی همواره با مشکلاتی از قبیل هزینه بالای تجهیزات، تداخل نویز از سمت شبکه و محیط و ... همراه می‌باشد که در نهایت موجب بروز خطا در آزمایش‌ها تشخیصی می‌گردد. بنابراین نیاز به یک روش مکمل و جایگزین در آزمایش تخلیه جزئی به وجود می‌آید. روش تشخیص تخلیه جزئی فراصوت از جمله روش‌های رایج در ترانسفورماتورهای قدرت می‌باشد ولی قدمت مقالات موجود برای این روش در شینه ژنراتور کمتر از دو دهه بوده و در زمینه ژنراتورهای فشارقوی روش نوپا و جدیدی به شمار می‌رود. از جمله مزایای روش تشخیص فراصوت، هزینه پایین تجهیزات، عدم تداخل نویزهای مغناطیسی محیط، عدم تداخل نویزهای شبکه و تشخیص محل خطا در امتداد شینه می‌باشد [۱].

در مرجع [۲] با استفاده از سنسور صوتی، وقوع تخلیه جزئی در طول پیرسازی الکتریکی شینه ژنراتور تشخیص داده شده است. همچنین در مقالات [۳، ۴] موقعیت محل تخلیه جزئی در امتداد شینه با استفاده از روش فراصوت تشخیص داده شده است. از مشکلات این روش، عدم امکان کالیبراسیون و نمایش دامنه تخلیه جزئی بر حسب کولن می‌باشد که بررسی این موضوع در برنامه تحقیقاتی نویسندگان این مقاله می‌باشد. در [۵] نویسندگان این مقاله الگوی دامنه بر حسب فاز تخلیه داخلی را برای روش تشخیص تخلیه جزئی فراصوت ارائه داده‌اند که از آن می‌توان برای تشخیص نوع خطا در آزمایش‌ها استفاده کرد.

آزمایش تشخیص فراصوت تخلیه جزئی

به منظور بررسی تغییرات دامنه سیگنال فراصوت ناشی از تخلیه جزئی به ازای جابه‌جایی در امتداد شینه ژنراتور، بایستی از یک منبع تولیدکننده سیگنال فراصوت ثابت، از نقاط مختلف سیگنال فراصوت دریافت شود. برای تحقق این امر در مرحله اول شینه‌ای که دارای این ویژگی (دارای منبع تولیدکننده سیگنال فراصوت ثابت) باشد، یافت می‌شود. این شینه در آزمایشگاه تخلیه جزئی واقع در پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور موجود می‌باشد، که دارای تخلیه جزئی از نوع داخلی در فاصله حدوداً ۱۰۰ سانتی‌متری از ابتدای شینه بوده و در ولتاژ اعمالی آزمایش، فاقد هر گونه تخلیه سطحی و یا کرونا می‌باشد. شینه مورد آزمایش به وسیله جرثقیل بر روی پایه‌های عایقی واقع در محل آزمایشگاه قرار گرفته و آماده انجام آزمایش می‌شود.

تجهیزات آزمایشگاهی

در تجهیزات آزمایشگاهی به‌کاربرده شده در آزمایشگاه، از یک سنسور فراصوت SSQC-SQ ۴۰R به همراه یک کابل کوکسیال ۵۰ اهم برای دریافت سیگنال فراصوت، نشان داده شده در شکل ۱، استفاده شده است. همچنین از یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی فشارقوی با نسبت تبدیل ۲۲۰ ولت به ۱۰۰ کیلوولت، کارت آنالوگ به دیجیتال، خازن کوپلاژ ۱۲۰۰ Pf، ۱۰۰ Kv همراه با پیک ولت متر برای اندازه‌گیری حداکثر دامنه ولتاژ بر روی شینه استفاده شده است.



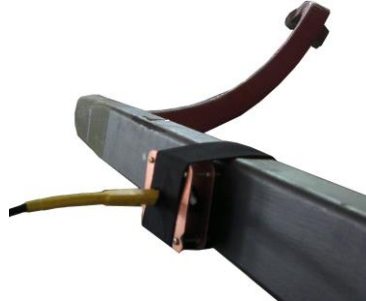
شکل ۱: سنسور فراصوت SSQC-SQ ۴۰R متصل به یک کابل کواکسیال ۵۰ اهم

مجموعه میز کنترل ولتاژ به همراه پیک ولت‌متر، کارت آنالوگ به دیجیتال و رایانه مورد استفاده در آزمایشگاه تخلیه‌جزئی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: مجموعه میز کنترل ولتاژ به همراه پیک ولت‌متر، کارت آنالوگ به دیجیتال و رایانه مورد استفاده در آزمایشگاه تخلیه‌جزئی

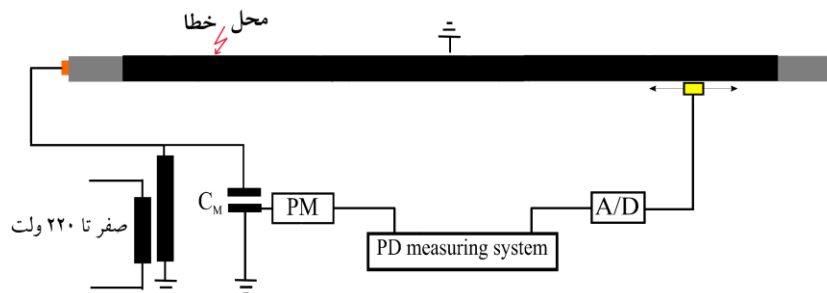
این آزمایش در آزمایشگاه تخلیه‌جزئی واقع در پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور صورت گرفته است. شینه استفاده شده در این آزمایش متعلق به یک ژنراتور ۲۵۰ MVA، ۱۵٫۷۵ KV است. طول قسمت شیار ۶۴۲ سانتی‌متر می‌باشد. هادی ۱۰۴ رشته دارد که در دو ستون با جابجایی ۳۶۰ درجه قرار گرفته‌اند. سطح مقطع شینه $۲۶\text{mm}^2 * ۱۱۲$ است. کلاس عایقی ماشین F است که غنی از رزین (Resin Rich) می‌باشد و سطح نیمه‌هادی در بخش شیار برای آزمایش در حالت داخل شیار، با ورقه استیل که مشابه یک شیار مصنوعی عمل می‌کند پوشانده شده است. شکل ۳ شینه مورد آزمایش و نحوه قرارگیری سنسور را در حالت خارج از شیار نشان می‌دهد.



شکل ۳: سنسور فراصوت قرار گرفته بر روی شینه ژنراتور خارج از شیار، در حین آزمایش تخلیه جزئی به روش فراصوت

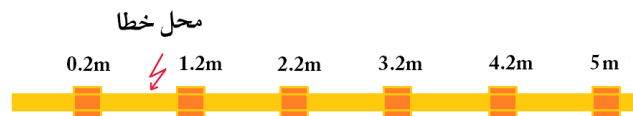
انجام آزمایش

برای بررسی درصد تضعیف سیگنال فراصوت در شینه قرار گرفته در داخل و خارج از شیار بایستی دو سری آزمایش انجام شود. در سری آزمایش‌ها B سنسور بر روی شینه خارج از شیار استاتور به صورت شکل ۳ و در سری آزمایش‌ها C سنسور بر روی هسته استاتوری که شینه درون آن است، قرار می‌گیرد. شکل ۴ مدار آزمایشگاهی برای انجام آزمایش تخلیه جزئی به وسیله سنسور فراصوت را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مدار آزمایشگاهی برای انجام آزمایش تخلیه جزئی با استفاده از سنسور فراصوت

در هر دو سری آزمایش‌ها B و C، مطابق با شکل ۵ نمونه‌گیری‌ها از شش نقطه صورت گرفته است. همچنین محل خطای داخلی در شکل ۵ نشان داده شده است.



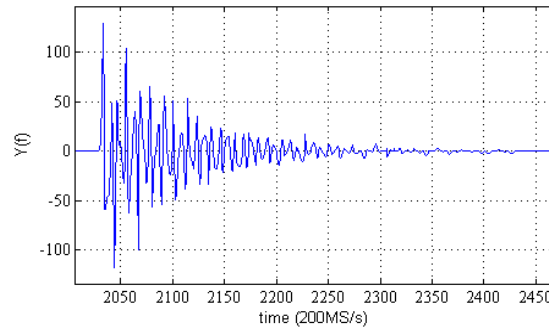
شکل ۵: نقاط مورد آزمایش و محل خطای داخلی بر روی شینه ژنراتور مورد آزمایش

نتایج آزمایش تشخیص فراصوت تخلیه جزئی

نتایج آزمایش

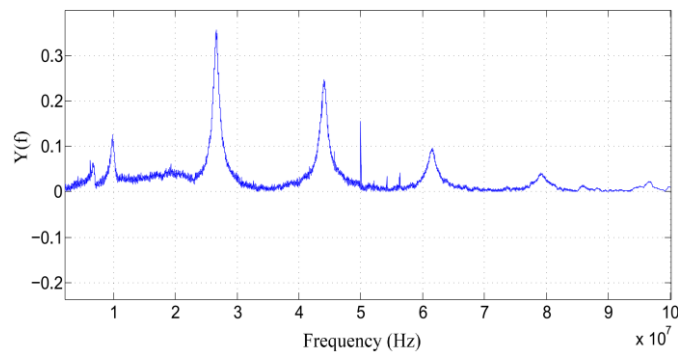
ولتاژ موثر اعمالی به شینه در هر دو سری از آزمایش‌ها، ۱۲,۵kV می‌باشد و سیگنال خام دریافتی از سنسور فراصوت در این ولتاژ ثبت گردیده است. نمونه‌ای از این سیگنال‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می‌شود یک سیگنال

غیرسینوسی میرا شونده می‌باشد. سیگنال‌های دریافت شده از هر دو سری آزمایش 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 نزدیک‌تر به سیگنال اصلی بایستی این سیگنال‌ها نویز زدایی شوند.



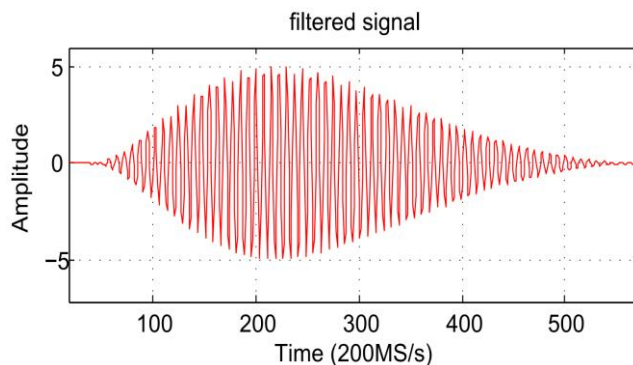
شکل ۶: سیگنال دریافتی از سنسور فراصوت به هنگام وقوع تخلیه جزئی - محور عمودی دامنه و محور افقی زمان را با فرکانس نمونه‌گیری ۲۰۰MS/s نشان می‌دهد

به همین علت تمام سیگنال‌های دریافتی از سنسور فراصوت، از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل شده و با توجه به محدوده فرکانسی که بیش‌ترین دامنه سیگنال را شاهد هستیم با استفاده از نرم‌افزار متلب، فیلترگذاری در محدوده فرکانسی مطلوب انجام می‌شود. شکل ۷ نمونه‌ای از پاسخ فرکانسی سیگنال فراصوت را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار متلب به دست آمده است.



شکل ۷: پاسخ فرکانسی سیگنال به دست آمده از سنسور فراصوت - محور عمودی نشان‌دهنده دامنه و محور افقی نشان‌دهنده فرکانس بر حسب هرتز می‌باشد

پاسخ فرکانسی برای تمام سیگنال‌های دریافتی تقریباً مشابه شکل ۷ می‌باشد بدین معنی که اولاً محدوده فرکانسی ۲۶,۳ تا ۲۷ مگاهرتز دارای بیش‌ترین دامنه می‌باشد و دوم اینکه میزان دامنه این محدوده با افزایش فاصله از محل تخلیه کاهش می‌یابد. از این رو می‌توان گفت این محدوده مناسب‌ترین شرایط را برای فیلترگذاری دارد. شکل ۸ نمونه‌ای از سیگنال فیلتر شده در محدوده فرکانسی مطلوب را نشان می‌دهد.



شکل ۸: سیگنال فراصوت فیلتر شده در محدوده فرکانسی ۲۶,۳ تا ۲۷ مگاهرتز

بررسی و تحلیل نتایج آزمایش

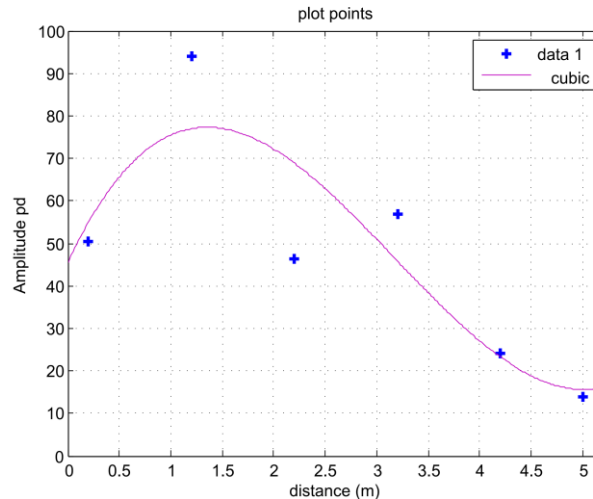
بررسی درصد تضعیف سیگنال فراصوت شینه ژنراتور قرار گرفته در خارج از شیار استاتور

برای بررسی درصد تضعیف سیگنال در هر سری از آزمایش‌ها، بایستی حداکثر مقدار دامنه سیگنال فیلتر شده مدنظر قرار گیرد. جدول ۱ میزان حداکثر دامنه سیگنال فیلتر شده را به ازای محل قرارگیری سنسور نشان می‌دهد. عدد قرار گرفته در کنار حروف B و C نشان‌دهنده فاصله از ابتدای شینه می‌باشد.

جدول ۱: حداکثر دامنه سیگنال فیلتر شده به ازای محل قرارگیری سنسور در سری آزمایشات B

شماره آزمایش	حداکثر دامنه سیگنال
$B_{۲۰}$	۵۰,۴
$B_{۱۲}$	۹۴
$B_{۲۲}$	۴۶,۲
$B_{۳۲}$	۵۷
$B_{۴۲}$	۲۴
$B_{۵۰}$	۱۴

منحنی مربوط به دامنه سیگنال فراصوت بر حسب فاصله از ابتدای شینه در شکل ۹ آمده است.



شکل ۹: منحنی دامنه سیگنال فراصوت بر حسب فاصله از ابتدای شینه در سری آزمایش B

همان طور که از روی منحنی مشخص است با افزایش فاصله از محل تخلیه جزئی داخلی (حدوداً در فاصله یک متری از ابتدای شینه) دامنه سیگنال سیر نزولی به خود می‌گیرد که با استفاده از ابزار **basic fitting** متلب می‌توان تابع دامنه بر حسب فاصله را به صورت رابطه ۱ به دست آورد.

$$Y = (p_1 \cdot X^3) + (p_2 \cdot X^2) + (p_3 \cdot X) + p_4 \quad (1)$$

$$p_1 = 2.5407$$

$$p_2 = -24.215$$

$$p_3 = 51.573$$

$$p_4 = 45.567$$

که در آن Y حداکثر دامنه سیگنال فراصوت فیلتر شده و X فاصله از ابتدای شینه را بر حسب متر نشان می‌دهد.

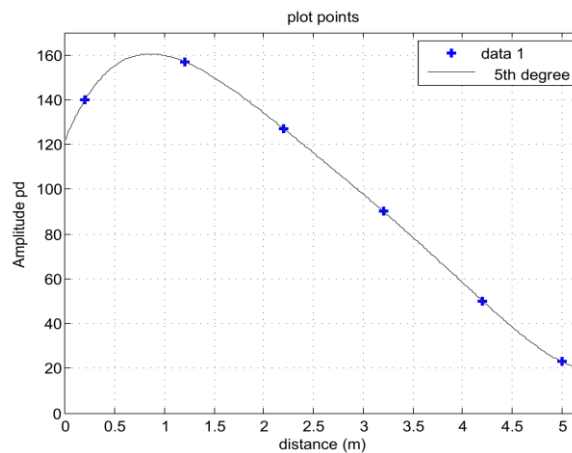
بررسی درصد تضعیف سیگنال فراصوت شینه ژنراتور قرار گرفته در داخل شیار

مشابه آزمایش B در این آزمایش نیز بایستی حداکثر دامنه را بر حسب محل قرارگیری سنسور به دست آورد. جدول ۲ میزان حداکثر دامنه سیگنال فیلتر شده را به ازای محل قرارگیری سنسور نشان می‌دهد.

جدول ۲: حداکثر دامنه سیگنال فیلتر شده به ازای محل قرارگیری سنسور در سری آزمایشات C

شماره آزمایش	حداکثر دامنه سیگنال
$C_{r.}$	۱۴۰
$C_{۱۲.}$	۱۵۷
$C_{۲۲.}$	۱۲۷
$C_{۳۲.}$	۹۰٫۲
$C_{۴۲.}$	۵۰٫۲
$C_{۵۰.}$	۲۳

منحنی مربوط به دامنه سیگنال فراصوت بر حسب فاصله از ابتدای شینه در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۱۰: منحنی دامنه سیگنال فراصوت بر حسب فاصله از ابتدای شینه در سری آزمایش C

تحلیل نتایج در سری آزمایش C نیز مشابه تحلیل نتایج در سری آزمایش B می‌باشد. از روی منحنی شکل ۱۰ می‌توان به چند نکته اشاره کرد:

- نکته نخست اینکه دامنه سیگنال‌های دریافتی از سری C، در موقعیت‌های مشابه با سری B از دامنه بیشتری برخوردار می‌باشد. علت این امر را می‌توان استفاده از ورقه‌های فولادی ناودانی شکل که برای ساخت شیار مصنوعی به کار برده شده‌اند دانست چرا که این صفحات می‌توانند ارتعاشات ناشی از تخلیه جزئی را دریافت و آن‌ها را تقویت کنند.
- نکته دوم، معادله و منحنی به دست آمده نیز محل تخلیه جزئی را در فاصله حدوداً یک متری از ابتدای شینه نشان می‌دهد.

- نکته سوم، همان طور که از شکل مشخص است با افزایش فاصله از محل تخلیه داخلی میزان دامنه با افزایش فاصله از محل تخلیه سیر نزولی به خود می‌گیرد که تابع آن با استفاده از نرم‌افزار basic fitting به صورت رابطه ۲ به دست آمده است.

$$Y = (p_1 \cdot X^5) + (p_2 \cdot X^4) + (p_3 \cdot X^3) + (p_4 \cdot X^2) + (p_5 \cdot X) + p_6 \quad (2)$$

$$p_1 = 0.38141$$

$$p_2 = -5.7205$$

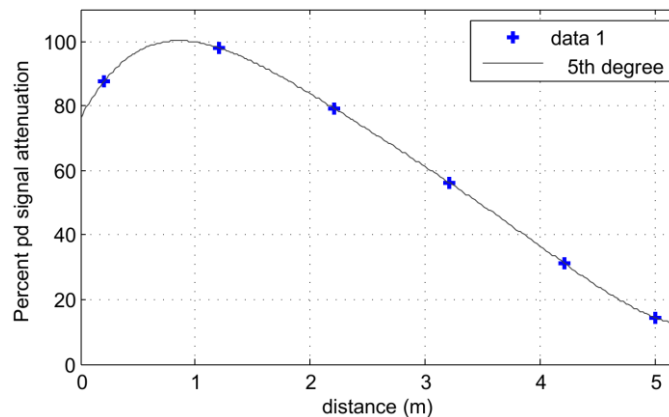
$$p_3 = 33.623$$

$$p_4 = -98.277$$

$$p_5 = 107.66$$

$$p_6 = 122.14$$

برای بررسی دقیق‌تر منحنی شکل ۱۰، آن به صورت درصدی در شکل ۱۱ رسم شده است. به این ترتیب که ابتدا حداکثر دامنه از رابطه ۲ حاصل شده و برابر با ۱۰۰ درصد دامنه منحنی قرار گرفته است. همان طور که از شکل ۱۱ نیز مشخص است می‌توان گفت که به ازای هر یک متر فاصله‌گیری از محل تخلیه، سیگنال ناشی از تخلیه در حدود ۲۲/۲ درصد تضعیف می‌شود



شکل ۱۱: منحنی درصد تضعیف سیگنال فراصوت ناشی از تخلیه جزئی در امتداد شینه

نتیجه‌گیری

در این مقاله دو سری آزمایش بر پایه‌ی روش جدید تشخیص امواج فراصوت ناشی از تخلیه‌جزئی، بر روی شینه ژنراتور در حالت داخل و خارج از شیار استاتور انجام شده است. پس از مراحل تحلیل و فیلترگذاری سیگنال دریافتی از نقاط مختلف، منحنی تغییرات دامنه سیگنال ناشی از تخلیه‌جزئی در امتداد شینه برای هر دو حالت داخل و خارج از شیار استاتور به دست آمده است. هر دو منحنی حاکی از وجود حداکثر دامنه تخلیه‌جزئی در فاصله حدوداً ۱۰۰ سانتی‌متری از ابتدای شینه هستند که نشان از صحت و درستی نتایج آزمایش‌ها می‌باشد. منحنی به دست آمده در حالت شینه قرارگرفته درون شیار نشان می‌دهد که با فاصله‌گیری از محل تخلیه به ازای هر یک متر، سیگنال ناشی از تخلیه در حدود ۲۲/۲ درصد کاهش دامنه خواهد داشت. همچنین در بررسی‌های به عمل آمده نیز مشخص گردید که در حالت شینه قرارگرفته در خارج از شیار استاتور نیز درصد تضعیف سیگنال به

ازای هر یک متر در حدود ۲۰ درصد می‌باشد. از نتایج این مقاله می‌توان به عنوان معیاری برای بررسی سیگنال‌های فراصوت در مکان‌یابی و تشخیص تخلیه جزئی شینه ژنراتور استفاده کرد.

مراجع

- [۱] م. ر. نقاشان، "روش‌ها و سیستم‌های پیرسازی شینه‌های ژنراتور"، چهارمین کنفرانس تجهیزات دوار در صنعت نفت و نیرو، ۱۳۹۱
- [۲] S. Ahmadi, M. R. Naghashan, and M. Shadmand, "Partial discharge detection during electrical aging of generator bar using acoustic technique," *IEEE Conference*, pp. ۵۷۶-، ISEC ۲۰۱۲.
- [۳] R. Bozzo, F. Guastavino, and G. Guerra, "PD detection and localization by means of acoustic measurements on hydrogenerator stator bars," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* vol. ۲, pp. ۶۶۰-۶۶۶, ۴, August ۱۹۹۵.
- [۴] 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. ۶۶۳-۶۵۸, May ۱۹۹۷.
- [۵] م. اخوات و م. ر. نقاشان، "تشخیص خطا و شناسایی الگو در آزمایش تخلیه‌جزئی شینه ژنراتور با استفاده از سنسور فراصوت"، ارائه شده به کنفرانس بین‌المللی برق ۱۳۹۲.