

بررسی اثرات استفاده از لایه ICP بر عمر مفید و وضعیت عایقی شینه‌های ژنراتور به- کمک آزمون‌های پیرسازی شتاب یافته

حامد هاشمی دزکی¹، حمید جهانگیر²، محمدرضا نقاشان³، نصرالله طاهری⁴، نصرالله طاهری⁵

- 1- آزمایشگاه مرجع صنایع انرژی (اپیل)، آزمایشگاه قدرت و نیروگاهی، تهران، ایران.
- 2- دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران.
- 3- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران.
- 4- دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، تهران، ایران.
- 5- سازمان آب و برق خوزستان، مدیریت بهره‌برداری و تعمیرات سد و نیروگاه کارون 3، خوزستان، ایران.

چکیده

استفاده از لایه حفاظت کرونای داخلی (ICP) یکی از راهکارهایی است که در سال‌های اخیر برای بهبود وضعیت سیستم عایقی شینه‌های ژنراتور مورد توجه قرار گرفته است. در اکثر تحقیقات و آزمایش‌هایی که تا کنون انجام شده است، مزایای استفاده از لایه ICP با تکیه بر بهبود پارامترهای الکتریکی مانند $\tan \delta$ و PD روتین تست مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله با کمک انجام آزمون‌های تجربی Voltage Endurance به‌عنوان یکی از آزمون‌های پیرسازی شتاب یافته بر اساس استانداردهای IEEE 1043 و IEEE 1553، اثرات احتمالی نامطلوب استفاده از لایه ICP تحقیق شده است. نتایج به دست آمده از انجام آزمون‌های عملی بر روی 4 شینه 18 کیلو ولت بدون ICP و 4 شینه که از لایه ICP استفاده نموده‌اند، دلالت بر این امر دارد که اگرچه مقادیر اولیه PD و $\tan \delta$ شینه‌ها به کمک لایه ICP بهبود یافته، اما در فرآیند پیرسازی اثرات نامطلوب خود را نشان داده و ضعف‌های عایقی مستتر در شینه‌های با ICP منجر به بروز تخلیه کامل و مردود شدن آزمون Voltage Endurance گردید. نتایج به دست آمده ضرورت توجه به آزمون‌های پیرسازی در هنگام تولید انبوه علی‌الخصوص در شرایط تغییر طراحی مانند استفاده از لایه ICP را روشن می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: شینه‌های ژنراتور (Stator bars)، لایه حفاظت کرونای داخلی (ICP)، تخلیه جزئی (PD)، آزمون‌های پیرسازی شتاب یافته، Voltage Endurance

1- مقدمه

استرس‌های محیطی دیگری قرار خواهند گرفت [1 و 2]. لازم به ذکر است هر کدام از تنش‌های ذکر شده می‌تواند منجر به بروز خطای عایقی در ژنراتور گردد.

بررسی‌های آماری مختلفی برای طبقه‌بندی خطاهای رخ داده در ژنراتورها انجام شده است. از مرجع [4] می‌توان به‌عنوان یکی از جامع‌ترین بررسی‌های انجام شده در این زمینه برای

شینه‌های استاتور یکی از مهمترین اجزای ژنراتورهای بزرگ به-شمار می‌آیند که ساختار صحیح و مناسب عایقی آنها نقش اساسی در ویژگی‌های مهم ژنراتور دارد [1]. شینه‌های ژنراتور در زمان بهره‌برداری به‌صورت مستمر تحت استرس‌ها و تنش‌های الکتریکی، حرارتی، مکانیکی، سیکل‌های حرارتی و

استفاده از لایه ICP در شینه می‌تواند توزیع میدان الکتریکی را همگون ساخته و پارامترهای الکتریکی سیستم عایقی به-خصوص تخلیه جزئی (PD) را بهبود خواهد داد. در مراجعی مانند [1 و 8]، مزایای استفاده از لایه ICP مانند کاهش میزان تخلیه جزئی در مورد شینه‌های نو مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود استفاده از لایه ICP در مورد شینه‌های ژنراتورهای قدیمی که از تکنولوژی‌های گذشته استفاده نموده-اند و در طراحی اولیه آن استفاده از لایه ICP دیده نشده است می‌تواند استفاده از لایه ICP، در عین حال که شاخص‌های الکتریکی زمان صفر و قبل از نصب را بهبود بخشد، فرآیند پیری (Aging) را متاثر نماید.

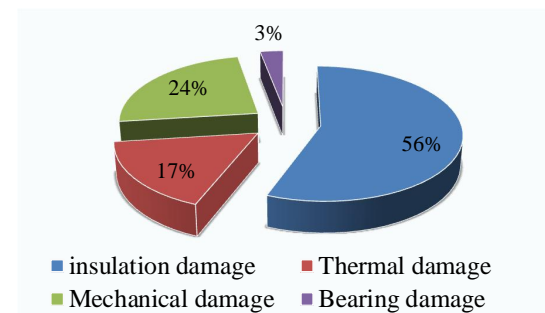
اثرات لایه ICP در فرآیند پیری و طول عمر مفید سیستم عایقی ژنراتور در تحقیقاتی که اشاره شد کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از آنجایی که ارزیابی اثرات لایه ICP در طول عمر مفید ژنراتور زمان‌بر و دارای پیچیدگی در آنالیز اثرات این لایه دارد، نیاز است پیرسازی شتاب یافته به صورت آزمایشگاهی برای این موضوع دنبال گردد. آزمون تحمل ولتاژی (Voltage Endurance) یکی از آزمون‌های پیرسازی شتاب یافته شینه‌های استاتور می‌باشد که وضعیت عایقی سیم‌پیچ‌های ژنراتور ناشی از اثرات حرارتی و الکتریکی را شبیه‌سازی می‌نماید [9 و 10].

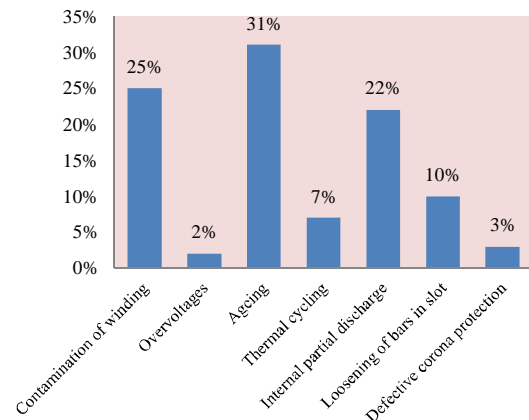
در این مقاله اثرات منفی احتمالی لایه ICP در طول عمر مفید و پیری شینه‌های ژنراتور با کمک انجام آزمون Voltage Endurance بررسی خواهد شد. مقایسه نتایج تخلیه جزئی در فواصل زمانی مختلف فرآیند پیرسازی شتاب یافته دلالت بر این موضوع دارد که اگر تمامی شرایط و الزامات استفاده از لایه ICP در نظر گرفته نشود، اگرچه مقادیر پارامترهای آزمون‌های روتین تست مانند PD بهبود می‌یابند، اما عمر مفید وضعیت عایقی در شرایط ناشی از پیری به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد.

از اینرو توجه به اثرات احتمالی منفی استفاده از لایه ICP علی-الخصوص در بازسازی کلی سیم‌پیچ ژنراتورهای قدیمی (rewinding) که در طراحی اولیه آنها استفاده از لایه ICP دیده نشده است، ضرورت می‌یابد. ضمناً باید در نظر داشت لزوماً دستیابی به پارامترهای الکتریکی بهبود یافته در زمان صفر و روتین تست‌ها به کمک استفاده از لایه ICP دلیل بر بهبود وضعیت عایقی ندارد.

ژنراتور نیروگاه‌های آبی اشاره کرد. همانگونه که در شکل (1) نیز نشان داده شده است، درصد بالایی از خرابی‌های ژنراتورهای آبی (در حدود 56%) ناشی از بروز عیوب عایقی در آنها می-باشد. از اینرو علل اصلی ایجادکننده خرابی عایقی ژنراتورهای مورد بررسی در این مرجع نیز مورد بررسی قرار گرفته اند که در شکل (2) نتایج مطالعه انجام شده قابل مشاهده است.



شکل 1: نتایج آماری مربوط به بررسی 1199 ژنراتور آبی [4]



شکل 2: نتایج آماری علل بروز خطای عایقی در ژنراتورهای آبی [4]

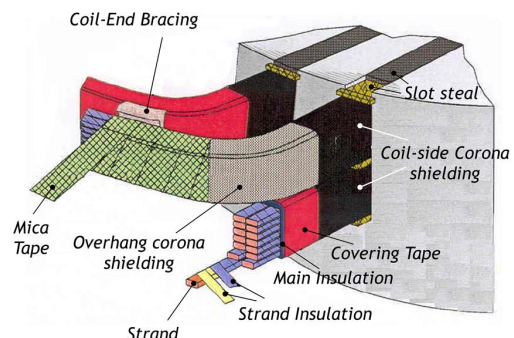
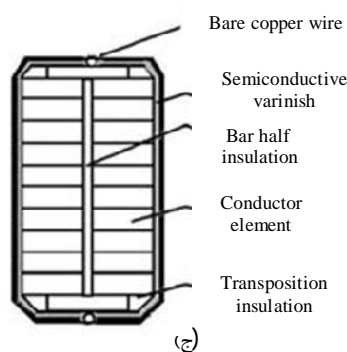
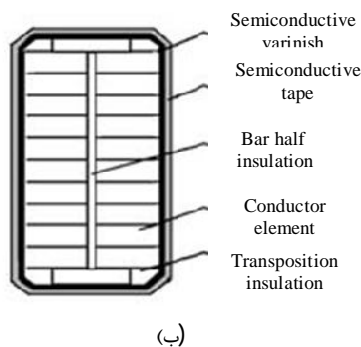
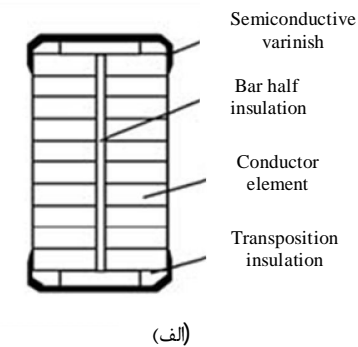
همچنین بر اساس مطالعات و مستندات که توسط EPRI و IEEE ارائه شده است، در حدود 40% خطاهای منجر به خروج از سرویس ماشین‌های الکتریکی ناشی از بروز خطا در سیم‌پیچ-های استاتور بوده است [5 و 6].

از اینرو و با توجه به اهمیت شینه‌های ژنراتور و عواملی که عمر مفید سیم‌پیچ‌ها را به مخاطره می‌اندازد، روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی سیستم عایقی شینه‌های ژنراتور و بهبود وضعیت عایقی مربوط پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار گرفته است [7]. یکی از روش‌های مورد توجه برای تحقق این مهم استفاده از لایه حفاظت کرونا داخلی (Internal Corona Protection) یا ICP می‌باشد [1 و 8].

2- لایه حفاظت کرونای داخلی (ICP)

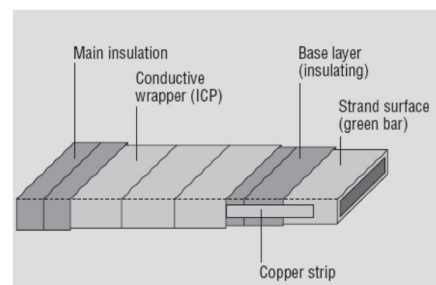
با استفاده از لایه ICP یک خازن تشکیل خواهد شد که الکترودهای آن عبارتند از استرندها و لایه هادی مربوط به ICP. همچنین عایق استرندها، رزین، میکا، حفره‌ها و ... که بین این دو الکتروده قرار دارند نقش دی الکتریک خازن مذکور را بازی می‌کنند. در نتیجه استرس الکتریکی به دی الکتریک خازن ایجاد شده اجتناب‌ناپذیر است و باید برای آن چاره‌ای اندیشید. یکی از دلایل استفاده از سیم مسی نیز اتصال استرندها به لایه هادی و اتصال کوتاه کردن دو ترمینال خازن مذکور می‌باشد که با این عملیات، استرس الکتریکی به عایق بین استرندها و لایه هادی تحمیل نخواهد شد. موضوعاتی مانند آنچه برای نوار مسی ذکر شد دلیل استفاده از لایه‌های اضافی و تکمیلی در ICP شده است.

در شکل (3)، به صورت شماتیک لایه‌های مختلف یک شینه ژنراتور نمایش داده شده است. از آنجایی که سطح مقطع هادی‌ها و استرندهای مورد استفاده در شینه‌های ژنراتور مستطیل شکل می‌باشند، توزیع میدان الکتریکی در گوشه‌های هادی سیم‌پیچ دستخوش تغییر قرار می‌گیرد. توزیع ناهمگون میدان الکتریکی در گوشه‌ها به صورت تدریجی استقامت الکتریکی و عمر مفید بلند مدت عایق شینه را کاهش می‌دهد [1]. بر اساس توضیحات داده شده، بهبود توزیع میدان الکتریکی در شینه‌های ژنراتور به منظور دستیابی به عملکرد قابل اطمینان و با راندمان بالا در دستور کار محققین مختلف و سازندگان این صنعت قرار گرفته است. یکی از روش‌هایی که می‌تواند توزیع میدان الکتریکی در شینه را اصلاح نموده و پارامترهای الکتریکی و عایقی به‌ویژه تخلیه جزیی را بهبود ببخشد، استفاده از لایه حفاظت داخلی کرونا می‌باشد [8].



شکل 3: نمایش شماتیک لایه‌های یک شینه بدون ICP [6]

همچنین در شکل (4)، شماتیک لایه‌های یک شینه با ICP و محل قرارگیری این لایه نمایش داده شده است. باید بیان داشت، روش‌های مختلف برای استفاده از لایه ICP که توسط سازندگان مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد هر کدام از این روش‌ها، مزایای بخصوص خود را خواهد داشت. در شکل (5) روش‌های مختلف استفاده از لایه ICP نمایش داده شده است.



شکل 4: نمایش شماتیک لایه‌های یک شینه با ICP [11]

شکل 5: انواع لایه‌های ICP، (الف): varnish نیمه هادی، (ب): varnish و نوار نیمه هادی، (ج): varnish و نوار نیمه هادی با سیم مسی

و آزمایشگاه‌ها مانند [12] نیز از این روش استفاده شده است. لازم به ذکر است استفاده از روش‌های دیگر ایجاد گرمایش در شیشه مانند عبور جریان از هادی و ... بر اساس استاندارد IEC 60034 و ... نیز امکان‌پذیر است.

3- آزمون پیرسازی شتاب یافته تحمل ولتاژی (Voltage Endurance)

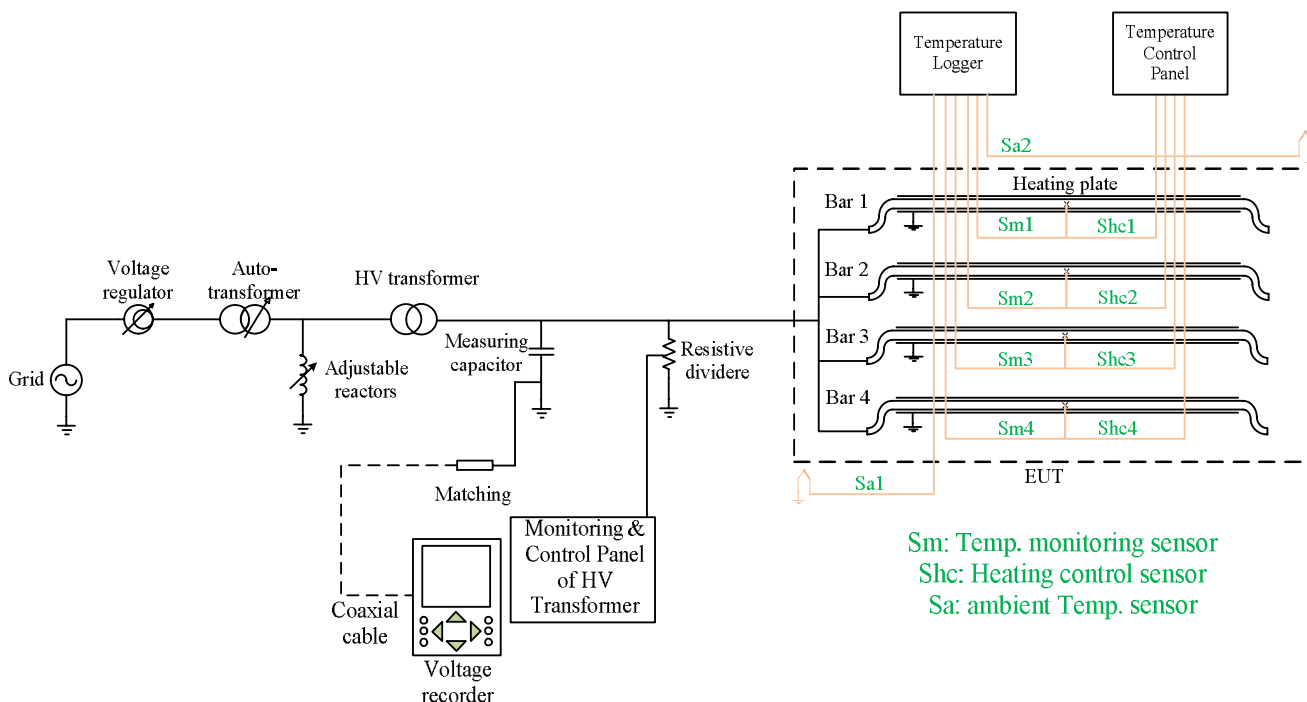
علاوه بر ایجاد شرایط اعمال تنش‌های حرارتی مشابه حداکثر دمای بهره‌برداری شیشه به کمک صفحات داغ، به صورت عمومی می‌توان با کمک اعمال ولتاژی در حدود 3/76 برابر و یا 4/39 برابر ولتاژ نامی فاز به زمین ژنراتور به ترتیب می‌توان در یک دوره تست 400 یا 250 ساعته فرآیند پیرسازی 40 ساله شیشه‌های ژنراتور را معادل‌سازی نمود. همچنین بر اساس استانداردهای مربوط به این موضوع برای ژنراتورهایی با سطوح ولتاژ مختلف و شرایط خاص، الزامات دیگری بیان شده است.

ارزیابی وضعیت عایقی شیشه‌های ژنراتور در طول بهره‌برداری، طول عمر مفید و تعیین کیفیت آن‌ها یکی از موضوعات اساسی و مورد توجه در زمینه صنایع نیروگاهی می‌باشد. یکی از مهمترین موضوعاتی که هر ژنراتور با آن مواجه است، عمر مفید عایقی شیشه‌های ژنراتور می‌باشد. یکی از مهمترین آزمون‌های ارزیابی وضعیت عایقی شیشه‌ها، آزمون تحمل ولتاژی (Voltage Endurance) است [9و10].

در آزمون Voltage Endurance مطابق آنچه در شکل (6) قابل مشاهده است، حداقل 4 شیشه باید مورد آزمون قرار گیرند. برای انجام این آزمون لازم است ولتاژ فشار قوی به کمک یک ترانسفورماتور با قابلیت تزریق جریان نشتی بالا به تجهیز اعمال گردد. از آنجایی که توان کشیده شده از شبکه با ترانس فشار قوی بالا بوده و بخش اعظم آن جریان راکتیو خازنی می‌باشد، با استفاده از یک جبران‌ساز راکتوری می‌توان جریان مورد نیاز از شبکه را کاهش داد. در طول انجام این تست، ولتاژ اعمالی، دمای شیشه و دمای محیط باید به صورت پیوسته پایش و ذخیره گردد.

در آزمون تحمل ولتاژی، اثرات استرس‌های حرارتی و الکتریکی به صورت پیرسازی شتاب یافته شبیه‌سازی می‌گردد. معمولاً این آزمون همزمان با ساخت پروتوتایپ یا طراحی روش‌ها و تکنولوژی‌های جدید توسط سازنده مورد توجه قرار می‌گیرد. این آزمون‌ها علاوه بر روتین تست می‌تواند کیفیت شیشه‌ها و عمر مفید مورد انتظار را ارزیابی نماید.

بر اساس استاندارد IEEE 1043 برای تمامی شیشه‌ها و IEEE 1553 ویژه شیشه نیروگاه‌های آبی، استفاده از صفحات داغ برای شبیه‌سازی اثرات حرارتی پیشنهاد گردیده و در برخی از مراجع



شکل (6): مدار آزمون Voltage Endurance بر اساس استانداردهای IEEE 1043 و IEEE 1553

بررسی قرار خواهند گرفت. اطلاعات شیشه‌های و شرایط آزمون در جدول (1) بیان گردیده است.

جدول 1: اطلاعات شیشه‌های مورد آزمون و پارامترهای تست Voltage Endurance

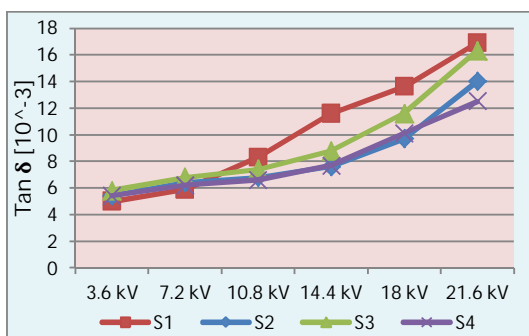
ردیف	عنوان پارامتر	مقدار و توضیحات
1	ولتاژ نامی ژنراتور	18 کیلو ولت
2	کلاس عایقی شیشه	F
3	نوع عایق شیشه	میکا-اپوکسی رزین
4	نوع خنک‌کنندگی ژنراتور	هوا خنک
5	ولتاژ اعمالی در حین آزمون	39/1 کیلو ولت
6	زمان تست	400 ساعت
7	دمای اعمالی به شیشه	110 درجه سانتیگراد

در شکل (8)، محیط انجام آزمون شامل ترانس فشار قوی مناسب برای عملیات پیرسازی شتاب یافته، صفحات داغ و ... مستقر در آزمایشگاه مرجع صنایع انرژی قابل مشاهده است.



شکل 8: شیشه‌های در حال تست Voltage Endurance

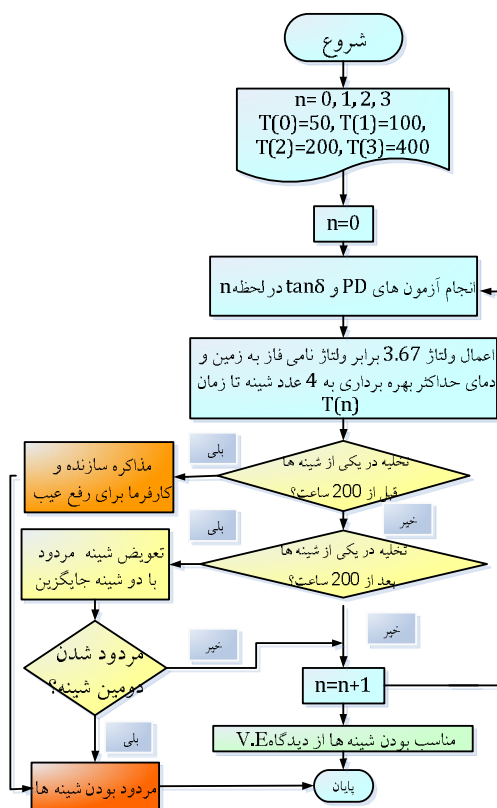
ضریب تلفات عایقی ($\tan \delta$) [14] و تخلیه جزئی (PD) [15] شیشه‌ها در ساعت صفر آزمون پیرسازی اندازه‌گیری شد که اطلاعات اندازه‌گیری شده در جدول‌های (2) و شکل (9) آورده شده است.



شکل 9: نتایج Tan delta ساعت صفر شیشه‌های بدون ICP

بر اساس استانداردهای IEEE، انجام آزمون Voltage Endurance به‌همراه اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی ($\tan \delta$) و تخلیه جزئی (PD) در ابتدا و انتهای تست الزامی است. همچنین استاندارد و مراجع معتبری مانند [13] پیشنهاد می‌کنند با انجام آزمون‌های PD و $\tan \delta$ اطلاعات تکمیلی مانند روند پیرسازی و تغییرات پارامترهای الکتریکی رصد گردد. آزمون‌های میانی تکمیلی مانند آزمون‌های ساعت 50، 100، 200 و 300 علاوه بر آزمون‌های ابتدایی و انتهایی برای عارضه‌یابی فرآیند تولید، فرآیند تخمین عمر و ... مفید خواهند بود.

در شکل (7)، روندنمای انجام آزمون Voltage Endurance به همراه انجام آزمون‌های میانی و شرایط پذیرش نشان داده شده است.



شکل 7: روندنمای انجام آزمون Voltage Endurance

4- آزمایش‌های تجربی-مقایسه‌ای بر روی شیشه‌های با و بدون لایه ICP

در این مقاله، نتایج انجام آزمون‌های Voltage Endurance چهار شیشه با تکنولوژی ساخت بدون استفاده از لایه ICP و چهار شیشه که از لایه ICP در آن‌ها استفاده شده است مورد

فاز به زمین و ولتاژ فاز به زمین در جدول (3) آورده شده است. نتایج اندازه‌گیری اثربخش بودن لایه ICP در بهبود مقادیر تخلیه جزئی لحظه صفر را دارد.

جدول (3): نتایج PD ساعت صفر شینه‌های با ICP

شماره شینه	ولتاژ تست (کیلو ولت)	Qmax [nC]
S1_ICP	18	1/5
	12/5	1/1
	10/4	0/9
S2_ICP	18	0/8
	12/5	0/6
	10/4	0/5
S3_ICP	18	1
	12/5	0/6
	10/4	0/55
S4_ICP	18	1/2
	12/5	0/9
	10/4	0/5

در بررسی نتایج اندازه‌گیری تخلیه جزئی نیز مشاهده گردید که نسبت حداکثر تخلیه جزئی در ولتاژ تست 18 کیلو ولت به مقدار اندازه‌گیری شده در ولتاژ 12/5 کیلو ولت یا 10/4 کیلو ولت در شرایطی که لایه ICP استفاده شده است، کاهش قابل توجهی یافته است.

در شرایطی که ملاک انتخاب تنها مقادیر اندازه‌گیری زمان صفر و روتین تست‌ها باشد، استفاده از شینه‌های ژنراتور با لایه ICP در الویت خواهد بود. اما باید توجه داشت که انتخاب اصولی یک شینه مناسب با در نظر گرفتن وضعیت عایقی در فرآیند پیرسازی و عمر مفید است. بر این اساس، شینه‌های مورد اشاره تحت آزمون Voltage Endurance قرار گرفتند.

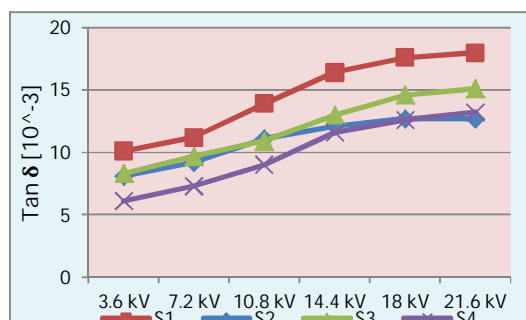
شینه‌های بدون ICP مطابق روندنمای نشان داده شده در شکل (7) و جدول (1) مورد آزمون قرار گرفتند. چهار شینه مذکور علیرغم بالابودن مقادیر تخلیه جزئی اولیه و افزایش نسبتاً قابل توجه آن در طول فرآیند پیرسازی توانستند 400 ساعت آزمون را سپری نمایند. در شکل (11)، روند تغییرات مقدار PD بر حسب ساعت تست نشان داده شده است.

جدول (2): نتایج PD ساعت صفر شینه‌های بدون ICP

ΣN+	ΣN-	ΣNQ+ [μC]	ΣNQ- [μC]	Qmax [nC]	Bar No.
2981	7944	4/3	11/2	6/8	S1
2376	4551	3/5	6/5	5/9	S2
3529	6570	4/0	7/9	6/0	S3
4780	9406	4/6	9/6	6/8	S4

همانگونه که در جدول (2) آورده شده است، دامنه حداکثر PDهای اندازه‌گیری شده کمتر از 6/8 نانو کولمب در ولتاژ نامی (18 کیلو ولت) می‌باشد. مقدار تخلیه جزئی اندازه‌گیری شده برای این شینه‌ها در مقایسه با شینه‌های ساخته شده با تکنولوژی جدید مقدار قابل توجهی است. از اینرو به‌کاربردن راهکارهای اصلاحی و بهبودی وضعیت عایقی مانند استفاده از لایه ICP مورد توجه قرار گرفت.

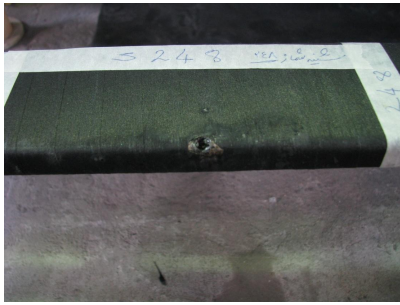
نتایج مربوط به اندازه‌گیری‌های $\tan \delta$ زمان صفر 4 شینه مشابه و تنها با تفاوت در لایه ICP در شکل (10) ارائه شده است.



شکل 10: نتایج $\tan \delta$ ساعت صفر شینه‌های با ICP

لایه ICP استفاده شده در شینه‌های مورد بررسی مطابق حالت (الف) نشان داده شده در شکل (5) می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی نشان می‌دهد که مقدار $\tan \delta$ در ولتاژهای 0/2 برابر ولتاژ نامی با لایه ICP در مقایسه با حالت پایه افزایش قابل توجهی در حدود 100% را از خود نشان می‌دهد. در تحلیل سایر شاخص‌های $\tan \delta$ مانند مقدار $\Delta \tan \delta$ یا $(\tan \delta_{0.6-0.2})/2$ ، بهبود وضعیت عایقی مشاهده گردید. ضمناً ظرفیت خازنی شینه‌ها نیز بر اثر استفاده از لایه ICP به‌صورت متوسط از حدود 4/4 نانو فاراد به 4/7 نانو فاراد افزایش یافته است.

مقادیر تخلیه جزئی شینه با لایه ICP نیز برای سطوح ولتاژ 18، 12/5 و 10/4 کیلو ولت معادل ولتاژ نامی خط، 1/2 برابر ولتاژ



شکل 13: محل بروز تخلیه کامل شیشه S4 به صورت شیار



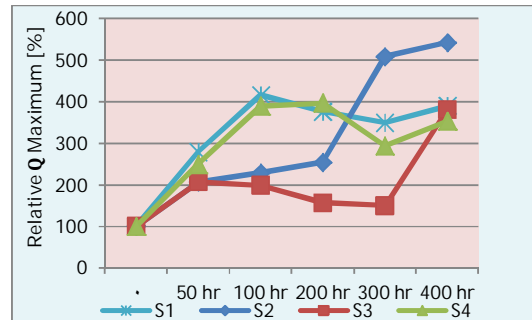
شکل 14: محل بروز تخلیه کامل شیشه S1 در خارج از شیار

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در شرایطی که مسائل و موضوعات مرتبط با لایه ICP در طراحی شیشه‌های ژنراتور به صورت کامل در نظر گرفته نشود، نه تنها وضعیت سیستم عایقی را بهبود نمی‌بخشد بلکه عمر مفید آن را نیز کاهش می‌دهد.

در حقیقت در شرایطی که سیستم پخت عایق و مراحل مربوط به فرآیند ساخت با لایه ICP از دیدگاه انتقال حرارت، چسبندگی لایه‌های داخلی شیشه مانند عایق اصلی، عایق استرنها و ... مطلوب نباشد، لایه ICP با همیتانسیل کردن بخش‌های داخلی تنها میزان تخلیه جزئی اندازه‌گیری را به صورت تصنعی کاهش خواهد داد و عیوب عایقی احتمالی به اضافه مسائل تشدید شده در رابطه با لایه ICP در فرآیند عمر اثرات خود را خواهند گذاشت.

بررسی مراجع و روش‌های مورد استفاده سازندگان نشان می‌دهد که برای نیل به یک فرآیند ساخت به همراه لایه ICP ویژگی‌های خاصی را می‌طلبد که هم در زمان طراحی و هم به کمک آزمون‌های تجربی پیرسازی مانند آزمون Voltage Endurance باید ارزیابی گردد.

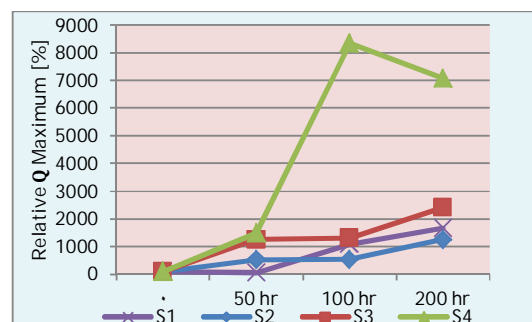
علاوه بر آزمون Voltage Endurance، نیاز است آزمون‌هایی مانند Thermal Cycling که بیشتر تاکید بر اثرات ترمومکانیکال سیستم عایقی نیز مورد توجه قرار گیرد، زیرا



شکل 11: روند تغییرات مقدار Q_{max} شیشه‌های بدون ICP

ضمناً روند تغییرات بار تجمعی مربوط به شیشه‌های بدون ICP نیز افزایش قابل توجهی را دارند. با این وجود شیشه‌های مذکور تخلیه کامل الکتریکی در زمان 400 ساعت تست (معادل 40 سال عمر بهره‌برداری) را تجربه نمودند.

شیشه‌های با ICP در آزمون Voltage Endurance روند افزایش مقدار Q_{max} قابل ملاحظه‌ای را مطابق آنچه در شکل (12) نمایش داده شده است را تجربه نمودند. ضمناً در شیشه S4 در ساعت 225 تست تخلیه کامل اتفاق افتاد. شیشه مذکور تعویض گردیده و آزمون ادامه داده شد. در ادامه انجام تست، شیشه S1 در ساعت 321 دچار تخلیه الکتریکی گردید. بر اساس روندنمای نشان داده و شرایط پذیرش آزمون مذکور، این شیشه‌ها علیرغم اینکه مقدار تخلیه اول مناسبی را داشتند، وضعیت مطلوبی را از خود نشان ندادند.



شکل 12: روند تغییرات مقدار Q_{max} شیشه‌های با ICP

در شکل‌های (13) و (14)، تصاویری از محل بروز تخلیه کامل در شیشه‌های S1 و S4 نشان داده شده است. شیشه S4 در بخش مستقیم و داخل شیار یک تخلیه کامل را تجربه نموده است. همچنین محل تخلیه کامل شیشه S1 در خارج بخش داخل شیار می‌باشد.

IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 3, pp. 539-547, June 2003.

- [3] R. Brutsch, M. Tari, K. Frohlich, T. Weiers, R. Vogelsang, "Insulation failure mechanisms of power generators [Feature Article]," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 4, pp. 17-25, July-Aug. 2008.
- [4] CIGRE Study Committee SC11, EG11.02, "Hydrogenerator Failures- Results of the Survey," 2003.
- [5] G. C. Stone, N. Warren, H. G. Sedding, W. Mcdrmid, "Advances in interpreting partial discharge test results from motor and generator stator windings," *Cigre, Session 11-202*, 2002.
- [6] علی فرشیدنیا، سهراب امینی ولاشانی، سارا گوران، کیومرث رحمانی، سید موسی نظام زاده، "ارزیابی وضعیت عایقی در ماشینهای الکتریکی به کمک سیستمهای پیوسته اندازه گیری تخلیه جزئی"، دومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب یابی ماشین آلات، دانشگاه صنعتی شریف، 1386.
- [7] G. C. Stone, G. H. Miller, "Progress in rotating-machine insulation systems and processing," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, no. 4, pp. 45-51, July-August 2013.
- [8] مهدی شادمند، رعنا میرابزاده اردکانی، "بهبود سازی سیستم عایقی رزین ریچ با استفاده از سیستم در ساخت شینه های استاتور ژنراتورهای توان بالا"، اولین کنفرانس صنعت نیروگاههای حرارتی، دانشگاه تهران، 1388.
- [9] IEEE Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators," *IEEE Std 1553-2002*, 2003.
- [10] IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils," *IEEE Std 1043-1996*, 1997.
- [11] <http://www.voith.com>
- [12] F. Tim Emry, M. Williams, "Preliminary evaluation of flat glass backed mica paper tape for high voltage coil groundwall insulation using vacuum-pressure-impregnation," *IEEE 2011 Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, 5-8 June 2011*.
- [13] G. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Wiley-IEEE Press, 2004.
- [14] IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation, "*IEEE 286-2000*."
- [15] Rotating electrical machines - Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, *IEC 60034-27*, 2006.

ضرایب انقباض و انبساط لایه نیمه‌هادی ICP متفاوت بوده و این موضوع می‌تواند انتقال حرارت را تحت تاثیر قرار داده و مسائلی مانند delamination را ایجاد نماید.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله، استفاده از لایه ICP در زمان قبل از نصب و الزامات روتین تست و همچنین فرآیند پیرسازی به کمک انجام آزمون‌های عملی بر روی شینه‌هایی بدون ICP و با ICP مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است در بیشتر مراجع، مزایای استفاده از لایه ICP با تکیه بر مقادیر δ Tan و PD قبل از نصب مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که اثرات احتمالی مخرب استفاده از لایه ICP در فرآیند پیرسازی عایقی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از آزمون‌های عملی انجام شده و مقایسه آنها در حالتی که لایه ICP استفاده نشده است و همچنین بکارگرفتن لایه ICP دلالت بر این موضوع دارد که ممکن است لایه ICP به‌درستی و با در نظر گرفتن تمامی موضوعات طراحی به‌کار برده نشده باشد. در چنین حالتی، مقادیر اندازه‌گیری شده تخلیه جزئی (PD) در زمان صفر آزمون پیرسازی شتاب یافته اعداد مطلوبی خواهند بود و در طی فرآیند پیری به‌صورت غیرطبیعی افزایش می‌یابد. این موضوع بدین سبب ایجاد می‌گردد که لایه ICP با هم‌پتانسیل کردن بخش‌های مختلف شینه به‌صورت تصنعی PD را کاهش داده و عیوب عایقی و نقاط ضعف احتمالی در سیستم باقی خواهند ماند. ضمناً اثرات نامطلوبی نیز به‌خاطر استفاده از لایه ICP در سیستم ایجاد می‌شود که همه عوامل منجر به کاهش عمر عایقی شینه به‌صورت قابل ملاحظه‌ای خواهند شد.

نتایج به‌دست آمده ضرورت انجام آزمون‌های پیرسازی شتاب یافته مانند Voltage Endurance را در شرایط استفاده از لایه ICP یا تغییرات دیگری در طراحی نشان می‌دهد و نباید در مورد کیفیت شینه‌های ژنراتور به مقادیری مانند δ Tan و PD مربوط به روتین تست اکتفا نمود.

مراجع

- [1] H. Chunxiu Hu, Y. Xiaohong, H. Xin, Z. Xiaohong, "Study on the effect of different internal corona protection on electrical properties of generator stator bar," *IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM 2009)*, pp. 196-199, 19-23 July 2009.
- [2] H. Yanpeng, X. Hengkun, W. Guoli, J. Zhidong, "Assessment of insulation condition of generator stator bars based on velocity of ultrasonic waves,"