

کاربرد «تحلیل توالی سیگنال (PSA) تخلیه الکتریکی جزئی» در تشخیص نوع عیب عایقی در شینه ژنراتورهای فشارقوی

مجتبی اخوات محمدرضا نقاشان

شرکت فن‌آوران انرژی مدبر

تهران، ایران

۱. مقدمه

در ماشین‌های فشارقوی که ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچ آن‌ها بیش از یک کیلوولت می‌باشد از سیم‌پیچی نوع مستطیل شکل^۵ استفاده می‌شود که در آن تنها چند دور هادی داخل شیار قرار می‌گیرد. در ماشین‌های فشارقوی هر دور سیم‌پیچی از تعدادی رشته^۶ با مقطع مستطیلی تشکیل شده است که تعداد آن به سطح مقطع کل و شرایط طراحی ماشین بستگی دارد. در این نوع سیم‌پیچی ابتدا رشته‌ها با عایقی چند صد ولتی، عایق شده و در صورت لزوم ترانهاد^۷ گردیده، توسط دستگاه برش خورده و بسته به طراحی در چند ستون قرار می‌گیرد. در نهایت کل رشته‌ها در یک قالب مستطیل شکل قرار گرفته و عایق‌بندی اصلی صورت می‌گیرد. به این نوع از سیم‌پیچی، سیم‌پیچی نوع مستطیل شکل گفته می‌شود. سیم‌پیچ نوع مستطیل شکل به صورت پیش‌ساخته بوده که در دو نوع کلاف چند حلقه‌ای و شینه رایبل^۸ ساخته می‌شود. در شکل (۱) می‌توان قسمت‌های مختلف و یک برش مقطعی شینه رایبل را که در این آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته، مشاهده کرد. شینه مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع رایبل می‌باشد که توسط یک شرکت داخلی ساخته شده است.

چکیده — در این مقاله از روش تحلیل توالی سیگنال (PSA) تخلیه الکتریکی جزئی در تشخیص نوع تخلیه‌های همزمان در شینه ژنراتور فشارقوی استفاده شده است. برخلاف روش «تشخیص الگوی فازی تخلیه جزئی (PRPDA)^۲» که در آن دامنه تخلیه جزئی نقش اساسی در تشخیص نوع عیب دارد، در این روش، اندازه‌ی تخلیه مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و فقط اختلاف‌زمان وقوع تخلیه‌ها در آن کاربرد دارد. در این گزارش که حاصل از انجام تست‌های آزمایشگاهی بر روی شینه‌های واقعی ژنراتور با ولتاژ نامی ۱۸ کیلوولت می‌باشد تشخیص دو نمونه تخلیه الکتریکی جزئی همزمان و دو نوع عیب اصلی در شینه با استفاده از روش تحلیل توالی سیگنال میسر گردیده است. این دو نوع تخلیه‌های همزمان عبارت‌اند از «تخلیه داخلی همزمان با تخلیه در لایه تنظیم میدان انتهایی شینه^۳» و «تخلیه داخلی همزمان با تخلیه در ناحیه اورهنگ شینه». دو نوع عیب اساسی شینه نیز عبارت‌اند از «تخلیه الکتریکی جزئی در شینه با عایق ورقه شده^۴» و «تخلیه الکتریکی جزئی در شینه حاوی ترک‌های شعاعی».

واژه‌های کلیدی — تخلیه الکتریکی جزئی داخلی؛ تحلیل توالی

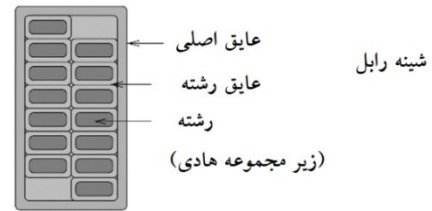
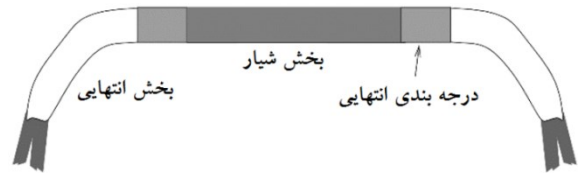
سیگنال؛ شینه ژنراتور؛ لایه تنظیم میدان؛ شینه ورقه شده

5-Form wound
 6-Strand
 7-Transpose
 8-Roebel

1-Pulse Sequence Analysis
 2-Phase Resolved Partial Discharge Analysis
 3-External Corona Protection Layer
 4-Delaminated insulation

۲. تجزیه و تحلیل تخلیه جزئی به روش حل فازی

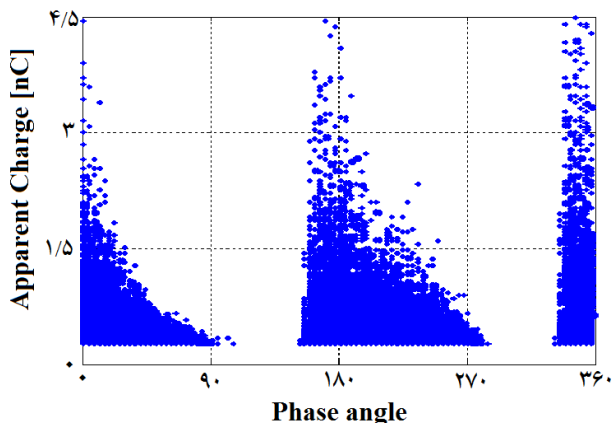
(PRPDA)



شکل (۱): بخش‌ها و یک برش مقطعی مربوط به شینه رایبل

یکی از رایج‌ترین روش‌های تحلیل تخلیه جزئی، تحلیل به روش بررسی فازی می‌باشد. در این روش، فاز وقوع و بار ظاهری تخلیه‌ها ثبت می‌شوند. به منظور ثبت اطلاعات معمولاً از یک ماتریس $m \times n$ استفاده می‌شود که در آن m نشان‌دهنده تعداد کانال‌های فاز (پنجره) و n نشان‌دهنده تعداد سطوح بار می‌باشد. هر یک از عناصر این ماتریس، تعداد تخلیه با اندازه و فاز خاصی را نشان می‌دهد. این روش قادر به ارائه الگوهای مختلفی می‌باشد از جمله: الگوی $\varphi-n$ (فاز وقوع برحسب تعداد تخلیه)، الگوی $\varphi-q_m$ (فاز وقوع برحسب حداکثر بار ظاهری، شکل (۳))، الگوی $\varphi-q_a$ (فاز وقوع برحسب متوسط بار ظاهری)، الگوی $q-n$ (بار ظاهری برحسب تعداد تخلیه) و الگوی $\varphi-q-n$ که یک الگوی سه‌بعدی بوده و تعداد، فاز وقوع و بزرگی دامنه تخلیه را نشان می‌دهد.

در این نوع شینه برای محافظت از کروناى انتهایی شینه، از نوار و وارنیش^۱ نیمه‌رسانا استفاده می‌شود. وارنیش عمدتاً برای تعمیرات و قسمت‌هایی که نمی‌توان از نوار استفاده کرد توصیه می‌شود. از مشخصه‌های بارز این مواد می‌توان به عملکرد غیرخطی در مشخصه ولتاژ/جریان اشاره کرد. عدم به‌کارگیری نوار یا وارنیش حفاظت کروناى انتهایی، تخلیه‌های سطحی در انتهای شینه را در پی خواهد داشت. بهره‌برداری مطمئن از ژنراتور وابستگی شدیدی به سلامت عایق سیم‌پیچ استاتور دارد؛ بنابراین عیب‌یابی سیم‌پیچ استاتور، از جمله مهم‌ترین اقدامات، جهت تضمین عملکرد مطمئن ماشین و افزایش طول عمر آن می‌باشد. تست تخلیه جزئی از مهم‌ترین تست‌های تشخیص سلامت شینه استاتور به شمار می‌رود که نتایج مفید و قابل‌اعتمادی در این زمینه در اختیار می‌گذارد.

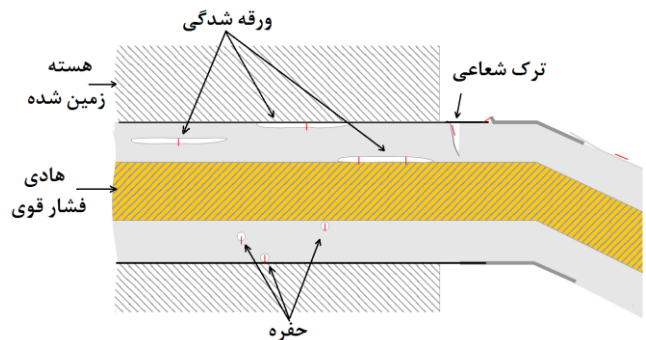


شکل (۳): نمودار دوبعدی $q=f(\varphi)$ تخلیه جزئی برای یک شینه نیروگاهی

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. شکل (۲) حالت‌های مختلفی از تخلیه جزئی درون یک شینه ژنراتور فشارقوی را نشان می‌دهد.

۳. روش تحلیل توالی سیگنال (PSA)

توالی تکرار تخلیه الکتریکی جزئی در محل ایجاد آن یک‌روند اتفاقی نبوده و برحسب یک‌روند مشخص که مرتبط با شرایط و نوع تخریب عایقی می‌باشد به وقوع می‌پیوندد [۱]. در روش تحلیل فاز ولتاژ تخلیه، دامنه‌ی تخلیه و زمان وقوع آن برحسب فاز ولتاژ اعمالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بارهای ذخیره شده در سطوح حفره عایق ناشی از تخلیه‌های ماقبل، تأثیر زیادی در توالی تخلیه‌های حفره دارد به‌نحوی که برخلاف تصورات ابتدایی، ایجاد و تکرار تخلیه به‌عنوان یک پدیده اتفاقی را مردود می‌شمارد. در برخی



شکل (۲): حالت‌های مختلف تخلیه جزئی در یک شینه ژنراتور فشارقوی

1- Varnish

۴. آزمایشات انجام شده

در این آزمایشات، اندازه‌گیری تخلیه الکتریکی جزئی بر روی پنج شینه فشارقوی توسط یک سیستم اندازه‌گیری با پهنای باند ۸۰۰ کیلوهرتز صورت گرفته است [۳]. شینه‌های مورد آزمایش به ترتیب عبارت‌اند از:

۱. شینه سالم با تخلیه داخلی محدود

۲. شینه با عایق ورقه شده که ناشی از داغ شدگی آن می‌باشد

۳. شینه حاوی تخلیه داخلی توأم با تخلیه سطحی در ناحیه لایه تنظیم میدان انتهایی

۴. شینه حاوی تخلیه داخلی توأم با تخلیه در ناحیه اورهنگ (تخلیه بین سرکلاف و بدنه زمین شده)

۵. شینه با عایق حاوی ترک‌های شعاعی

اندازه‌گیری در هر یک از آزمایشات به مدت یک ثانیه صورت گرفته و تخلیه‌ها به صورت یک فایل برحسب زمان وقوع مرتب می‌شوند. ولتاژ تست هر شینه برابر با ولتاژ نامی می‌باشد. برای هر شینه دو نمودار $\Delta U_n / \Delta U_{n-1}$ و E_n / E_{n-1} برحسب پریونیت ترسیم گردیده است.

مشابه روش تشخیص الگوی فازی تخلیه جزئی که در آن شکل الگوی به‌دست آمده، در تعیین نوع عیب سیستم عایقی از اهمیت خاصی برخوردار است، در روش تحلیل توالی سیگنال نیز شکل و نحوه قرارگیری خوشه‌ها در کنار هم می‌تواند در تعیین نوع عیب، مورداستفاده قرار گیرد. در هر یک از نمودارهای به‌دست آمده در این آزمایشات، مشخصات زیر در تعیین نوع الگو متعلق به هر نوع تخلیه مؤثر می‌باشند [۴]:

- تعداد خوشه‌ها
- فاصله بین خوشه‌ها
- پیوستگی یا تداوم خوشه‌ها
- زاویه قرارگیری خوشه‌ها در نمودار
- سطح خوشه‌ها
- خط سیر انتقالی بین خوشه‌ها

سیستم‌های عایقی که حاوی اندوکتانس زیاد می‌باشند، اندازه تخلیه الکتریکی جزئی ثبت شده، می‌تواند تا ده‌ها درصد تضعیف گردد [۲] و منحصراً تحلیل دامنه برحسب فاز می‌تواند به نتیجه‌گیری صحیحی منجر نشود. مؤلفه اصلی در روش تحلیل توالی تخلیه، فاصله زمانی بین وقوع تخلیه‌های دنبال هم می‌باشد که این مؤلفه می‌تواند به صورت مؤلفه اختلاف ولتاژ و یا اختلاف زاویه فاز بین تخلیه‌های دنبال هم نیز بیان شود. شکل (۴) پارامترهای مشخصه بین تخلیه‌های متوالی در روش تحلیل توالی سیگنال را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود فاصله سه تخلیه ایجاد شده در زمان‌های t_{n-1} ، t_n و t_{n+1} می‌تواند به صورت مؤلفه‌های اشاره شده در روابط ذیل معرفی شوند:

$$\Delta t_{n-1} = t_n - t_{n-1} \quad [s] \quad (1)$$

$$\Delta t_n = t_{n+1} - t_n \quad [s] \quad (2)$$

$$\Delta U_{n-1} = U_n - U_{n-1} \quad [kV] \quad (3)$$

$$\Delta U_n = U_{n+1} - U_n \quad [kV] \quad (4)$$

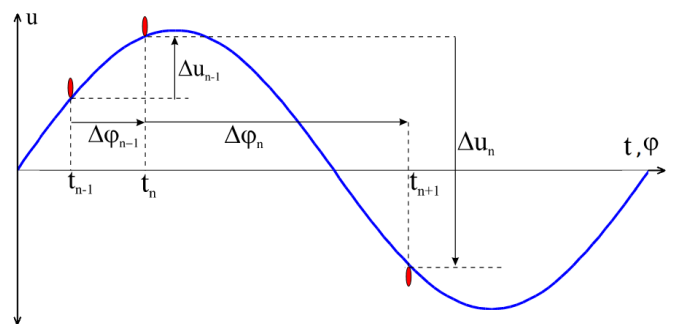
$$\Delta \varphi_{n-1} = \varphi_n - \varphi_{n-1} \quad [rad] \quad (5)$$

$$\Delta \varphi_n = \varphi_{n+1} - \varphi_n \quad [rad] \quad (6)$$

$$E_{n-1} = \Delta U_{n-1} / \Delta \varphi_{n-1} \quad [kV/rad] \quad (7)$$

$$E_n = \Delta U_n / \Delta \varphi_n \quad [kV/rad] \quad (8)$$

که در آن Δt ، ΔU ، $\Delta \varphi$ و E به ترتیب نشان‌دهنده فاصله زمانی، اختلاف ولتاژ، اختلاف زاویه و شدت میدان زاویه‌ای بین تخلیه‌های دنبال هم می‌باشد.

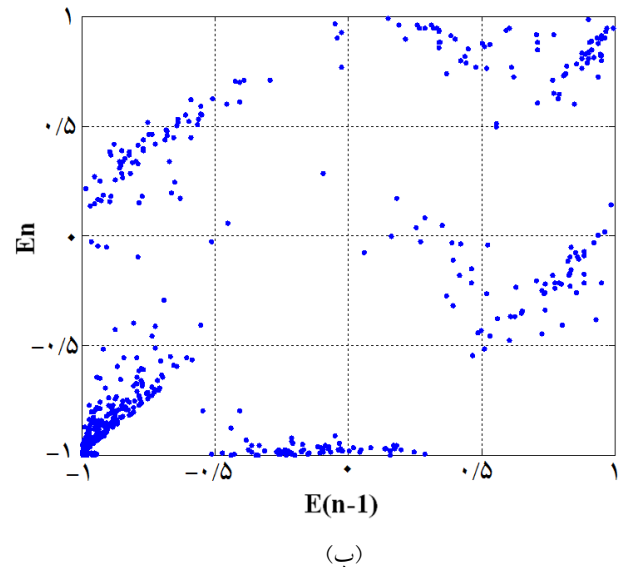
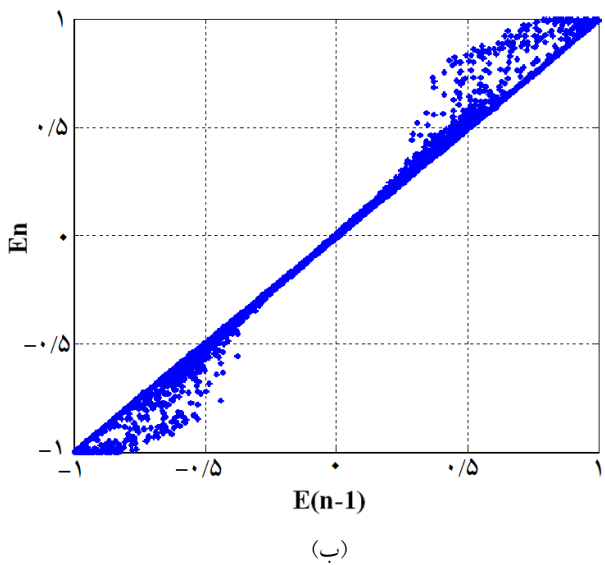
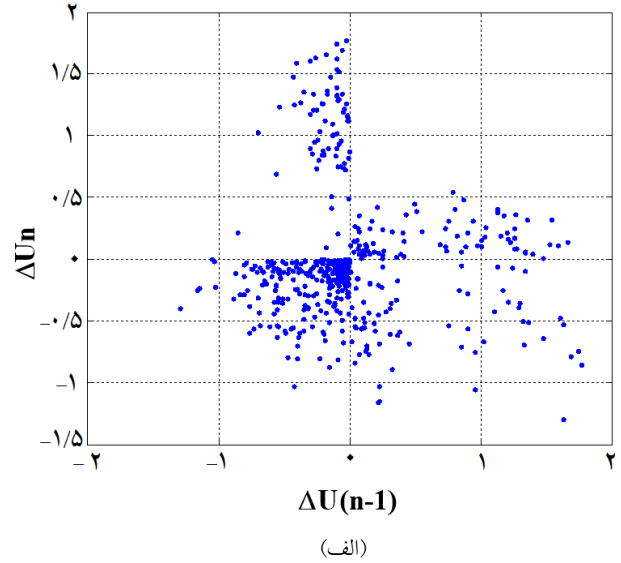
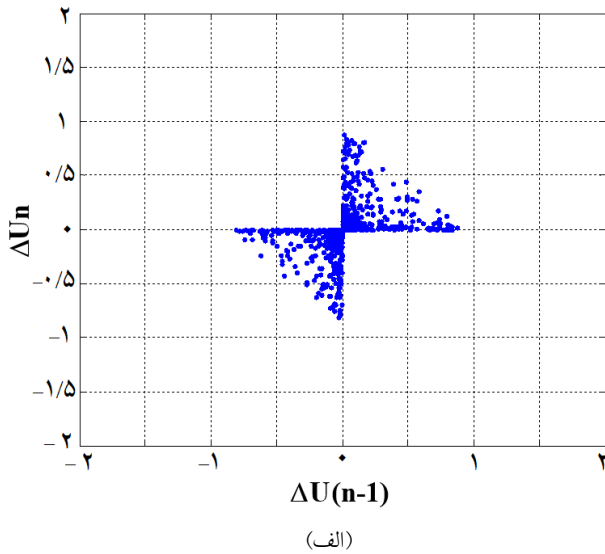


شکل (۴): پارامترهای مشخصه بین تخلیه‌های متوالی در روش تحلیل توالی سیگنال

۵. نتایج آزمایشات

در الگوهای ΔU و E متعلق به این نوع عیب، تغییرات قابل توجهی با الگوی عیب قبلی مشاهده می‌شود به طوری که در الگوی ΔU میزان پراکندگی نقاط کاهش پیدا کرده و در الگوی E نیز نقاط، یک خط سیر قطری با پراکندگی چپ‌گرد را تشکیل داده‌اند.

شکل (۵) نمودارهای مرتبط با شینه حاوی تخلیه داخلی محدود در دو الگوی ΔU و E را نشان می‌دهد.

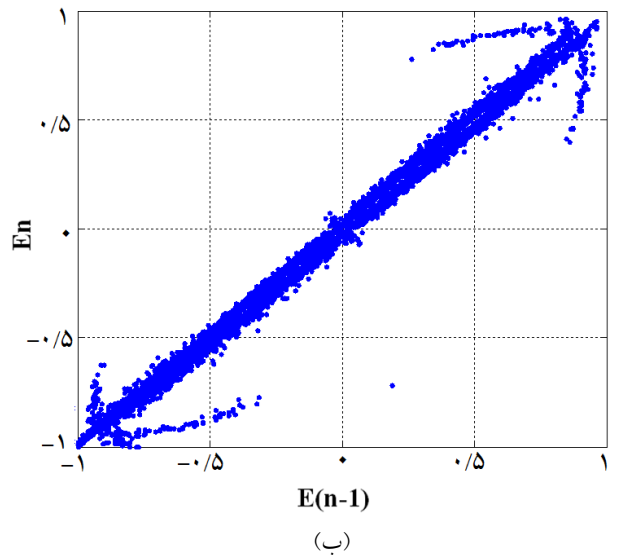
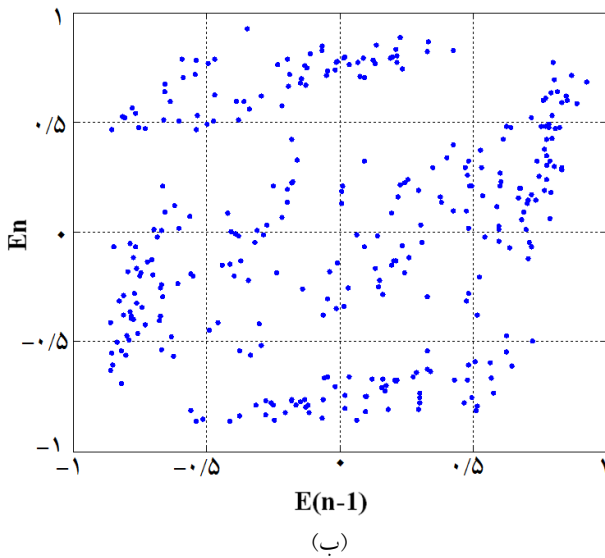
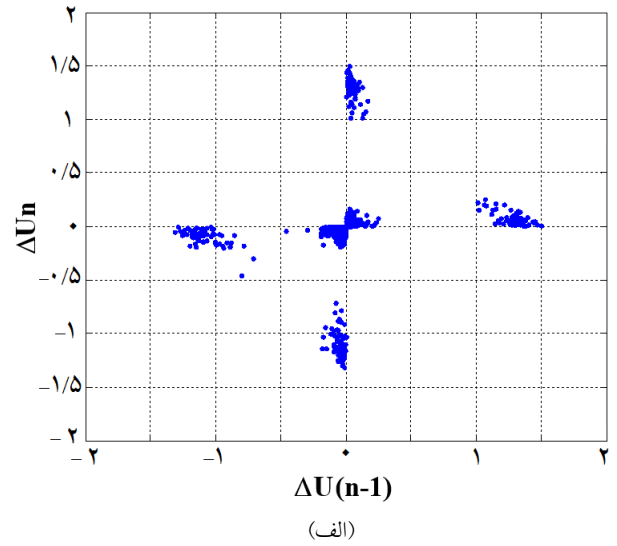
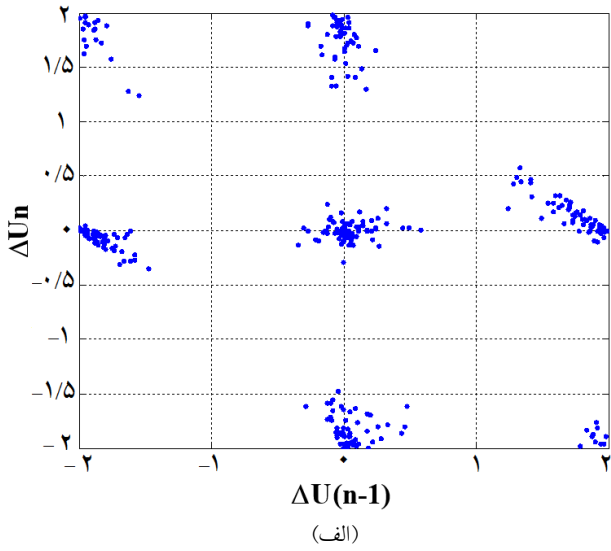


شکل (۶): نمودارهای مرتبط با شینه داغ شده در اثر افزایش دما و جداسدگی هادی از عایق اصلی آن

شکل (۵): نمودارهای مرتبط با شینه حاوی تخلیه داخلی محدود

شکل (۷) و شکل (۸) نیز مشابه دو شکل قبلی، حالت خاصی از تمرکز نقاط در الگوهای ΔU و E به ازای عیوب تخلیه داخلی و وجود همزمان تخلیه بین اورهنگ و بدنه زمین شده مجاور شینه و شینه ی حاوی ترک‌های شعاعی را نشان می‌دهد.

در الگوی ΔU ، بیشتر تمرکز نقطه‌ها در شکلی پروانه‌وار در مرکز می‌باشد. در الگوی E نیز تمرکز نقاط به صورت یک چند خوشه منفک از یکدیگر در نمودار ظاهر شده است. نمودارهای مرتبط با شینه با عایق ورقه شده در شکل (۶) مشاهده می‌شود.



شکل (۸): نمودارهای مرتبط با شینه حاوی ترک‌های شعاعی و تخلیه‌های با دامنه بسیار بزرگ و منفرد

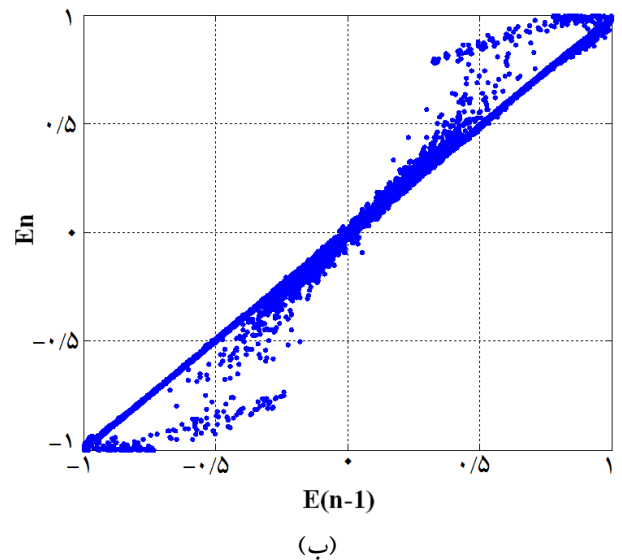
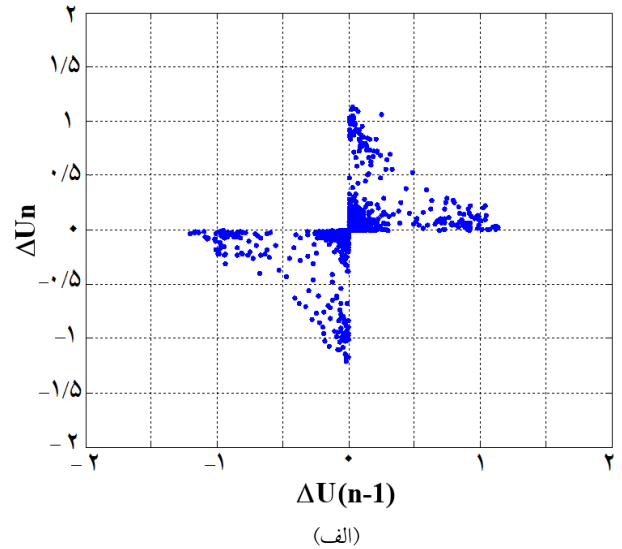
شکل (۷): نمودارهای مرتبط با شینه حاوی تخلیه داخلی و همزمان وجود تخلیه بین اورهنگ شینه و بدنه زمین شده مجاور شینه. تخلیه در ناحیه اورهنگ در هر دو نیم سیکل به وقوع می‌پیوندد.

شکل (۹) نیز الگوهای مرتبط با شینه حاوی تخلیه داخلی و تخلیه در ناحیه تنظیم میدان انتهایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، الگوها مشابه شکل (۶) می‌باشند، با این تفاوت که پراکندگی بصورت لایه‌ای مجزا و بدون پر شدگی می‌باشد.

پیوستگی یا تداوم خوشه‌ها، زاویه فرارگیری خوشه‌ها در نمودار و سطح خوشه‌ها در الگوهای ΔU و E شناسایی شود.

منابع

- [1] Djamal Benzerouk, "Pulse Sequence Analysis and Pulse Shape Analysis: Methods to Analyze Partial Discharge Processes", PhD Thesis, University of Siegen, 2008
- [2] IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery, 2010
- [3] M. R. Naghashan, D. peier, " A Broadband Computer Aided Partial Discharge Measuring System for Rotating Machine Stator Insulation", 9th International Power System Conference, 1994, Tehran
- [4] Anne Pfeffer, Stefan Tenbohlen and Stefan Kornhuber, "Pulse Sequence Analysis of Partial Discharges in Power Transformers", 17th International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011, Proceedings of the ISH, Paper No. D-41



شکل (۹): نمودارهای مرتبط با شینه حاوی تخلیه داخلی و تخلیه سطحی در لایه سلیسیوم کارباید انتهایی

۶. نتیجه‌گیری

در این گزارش که حاصل از انجام تست‌های آزمایشگاهی بر روی پنج شینه ژنراتور می‌باشد، تشخیص دو نمونه تخلیه الکتریکی جزئی همزمان و دو نوع عیب اصلی در شینه با استفاده از روش تحلیل توالی سیگنال میسر گردیده است. در این مقاله از الگوهای ΔU و E در تشخیص نوع عیب شینه استفاده شد که برای توزیع و تفسیر تخلیه جزئی بسیار مفید می‌باشند. این الگوها نشان دادند که نقص تخلیه جزئی می‌تواند به صورت موفقیت‌آمیزی با استفاده از پارامترهای مشخصه از جمله تعداد خوشه‌ها، فاصله بین خوشه‌ها،