

نسل جدید سیستم‌های اندازه‌گیری تخلیه جزئی و کاربرد آنها در تشخیص نوع عیب عایقی تجهیزات فشار قوی

حسن‌رضا میرزایی، اصغر اکبری، علی مذهب‌جعفری و محمد خازری

مهم هر پالس تخلیه جزئی شامل بار ظاهری، فاز وقوع، زمان وقوع و ولتاژ لحظه‌ای تحریک می‌باشند. دستگاه‌های باند باریک دارای پهنای باندی برابر با ۹ kHz تا ۳۰ kHz بوده و فرکانس مرکزی آنها در محدوده بین ۵۰ kHz تا ۱ MHz قرار می‌گیرد. دستگاه‌های اندازه‌گیری باند پهن که دارای پهنای باند فرکانسی در حدود ۴۰۰ kHz هستند، علاوه بر چهار کمیت ذکر شده می‌توانند پلاریته هر تک‌پالس را نیز تعیین کنند [۱].

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، امکان ساخت دستگاه‌هایی که قادر به تقویت پالس‌های تخلیه جزئی در محدوده فرکانسی بسیار وسیع باشند فراهم شده است. با استفاده از این دستگاه‌ها که پهنای باند آنها گاه تا ۱۰۰ MHz نیز می‌رسد، امکان آشکارسازی و مشاهده شکل موج تک‌پالس‌ها در حوزه زمان فراهم شده است. تحقیقات جدید نشان می‌دهد که شکل موج این تک‌پالس‌ها در حوزه زمان دارای اطلاعات بسیار مفیدی از نوع عیب تخلیه جزئی می‌باشد [۲] تا [۸].

تشخیص درست نوع عیب در تجهیزات فشار قوی و تعیین دقیق میزان آسیب وارده به سیستم عایقی آنها از اهمیت بسیار زیادی برای کارخانجات سازنده آنها و شرکت‌های برق برخوردار است. تصمیم‌گیری در مورد ادامه بهره‌برداری از این تجهیزات یا خارج کردن آنها از مدار برای تعمیر، به برآورد کیفیت عایقی آنها بستگی دارد. عدم تشخیص درست نوع عیب هزینه‌های گزاف و جبران‌ناپذیری را به این شرکت‌ها تحمیل خواهد کرد.

انواع عیوب تخلیه جزئی را می‌توان به سه دسته کلی شامل تخلیه جزئی در نقاط نوک تیز (کرونا)، تخلیه جزئی در فصول مشترک عایق (تخلیه سطحی) و تخلیه جزئی در حفرات و حباب‌های هوای به‌جا مانده در داخل آنها (تخلیه در حفره) تقسیم نمود. تفاوت نوع محیط‌های عایقی که هر یک از انواع تخلیه‌های جزئی در آن روی می‌دهند، و همچنین مکانیزم تخلیه الکتریکی در آنها از مهم‌ترین دلایل تمایز شکل موج پالس‌های عیوب مختلف به‌شمار می‌رود. از دیگر دلایل مؤثر در این زمینه می‌توان به مواردی چون هندسه منبع تخلیه جزئی، دما و فشار آن، بارهای فضایی باقیمانده پس از هر پالس و رسانایی دیواره‌های مرزی منبع PD اشاره نمود [۸] تا [۱۰]. به کمک این موضوع، می‌توان با شناسایی شکل موج پالس‌های عیوب مختلف تخلیه جزئی، به تعیین عیب آنها و تفکیک پالس‌های عیوب چندگانه هم‌زمان پرداخت. همچنین در برخی از ادوات فشار قوی نظیر ترانسفورماتورها و ژنراتورها، شکل موج پالس‌های PD در حین عبور از محل وقوع تا محل آشکارسازی، تحت تأثیر تابع تبدیل مسیر انتقال دچار اعوجاج و تغییر می‌شود [۷]. با شناسایی نحوه تغییر مشخصات زمانی این شکل موج‌ها با محل عیب، علاوه بر مکان‌یابی آن، می‌توان به کمک آن دسته از ویژگی‌هایی که دچار تغییرات اساسی نمی‌شوند نوع آن را تشخیص داد. همچنین در صورت وقوع چند فعالیت هم‌زمان تخلیه جزئی، با توجه به یکسان‌بودن مسیر انتقال پالس‌های هر عیب و لذا شباهت سیگنال‌های اندازه‌گیری شده آن، می‌توان این عیوب را از یکدیگر

چکیده: امروزه اندازه‌گیری الکتریکی تخلیه جزئی (PD) به‌منظور مونتورینگ و بررسی کیفیت عایقی تجهیزات فشار قوی جایگاه ویژه‌ای در صنعت پیدا کرده است. اغلب این اندازه‌گیری‌ها توسط دستگاه‌های تجاری موجود که دارای باند فرکانسی محدودی هستند انجام می‌شود. این نوع از دستگاه‌های اندازه‌گیری فقط قادر به آشکارسازی چهار پارامتر مهم هر تک‌پالس تخلیه جزئی شامل بار ظاهری، فاز وقوع نسبت به ولتاژ اعمالی، زمان وقوع و مقدار لحظه‌ای ولتاژ بوده و روند عیب‌یابی توسط آنها فقط بر پایه الگوهای به‌دست آمده از این چند پارامتر محدود می‌شود. اخیراً با معرفی سیستم‌های اندازه‌گیری جدید که دارای پهنای باند فرکانسی وسیعی هستند امکان آشکارسازی شکل موج تک‌پالس‌های PD در حوزه زمان فراهم شده است. با استفاده از ویژگی‌های به‌دست آمده از این شکل موج‌ها می‌توان به‌طور دقیق‌تری نسبت به تعیین عیب عایقی تجهیزات فشار قوی اقدام نمود. همچنین بر خلاف دستگاه‌های معمول اندازه‌گیری، با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از دستگاه‌های با پهنای باند وسیع، به راحتی می‌توان به وجود چند منبع هم‌زمان تخلیه جزئی در تجهیزات پی برده و با تفکیک و جداسازی پالس‌های مربوطه، نوع عیب هر یک از آنها را تشخیص داد. در این مقاله به بررسی روند تعیین عیب عایقی با استفاده از ویژگی‌های حوزه زمان پالس‌های تخلیه جزئی که به کمک دستگاه‌های جدید اندازه‌گیری به‌دست آمده‌اند، پرداخته شده و با ارائه یک الگوریتم جدید، قدرت تفکیک‌کنندگی هر یک از آنها مطالعه شده است. همچنین جداسازی تک‌پالس‌های PD در صورت وجود منابع چندگانه هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه: تخلیه جزئی، تعیین عیب عایقی، تک‌پالس، ویژگی‌های حوزه زمان.

۱- مقدمه

اندازه‌گیری تخلیه جزئی به دلیل ماهیت غیر مخرب آن، کاربرد گسترده‌ای در بررسی کیفیت عایقی تجهیزات فشار قوی یافته است. دستگاه‌های اندازه‌گیری الکتریکی تخلیه جزئی را بسته به پهنای باند سیستم فیلترینگ و تقویت‌کننده آنها می‌توان به سه دسته کلی دستگاه‌های با باند باریک، دستگاه‌های با باند پهن و دستگاه‌های با باند بسیار وسیع تقسیم نمود. دستگاه‌های اندازه‌گیری تجاری موجود در بازار معمولاً از نوع باند باریک و باند پهن بوده و قادر به تعیین چهار پارامتر

این مقاله در تاریخ ۴ مهر ماه ۱۳۸۶ دریافت و در تاریخ ۲۲ فروردین ماه ۱۳۸۸ بازنگری شد. این تحقیق توسط آزمایشگاه فشار قوی شرکت ایران ترانسفو پشتیبانی شده است.

حسن‌رضا میرزایی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (email: hr_mirzaei@ee.kntu.ac.ir).

اصغر اکبری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (email: akbari@kntu.ac.ir).

علی مذهب‌جعفری، شرکت مدیریت شبکه برق ایران، تهران (email: mazhabjafari@igmc.ir).

محمد خازری، آزمایشگاه فشار قوی شرکت ایران- ترانسفو، زنجان (email: m.kharezi@iran-transfo.com).

بار ظاهری (q): بار ظاهری هر تک‌پالس تخلیه جزئی با اندازه‌گیری سطح زیر منحنی جریان آن به دست می‌آید

$$q = A \int_{t_1}^{t_2} S(t) dt \quad (1)$$

در رابطه فوق $S(t)$ سیگنال اندازه‌گیری شده، A نسبت تبدیل به دست آمده از کالیبراسیون و t_1 و t_2 بازه زمانی انتگرال‌گیری هستند.

اندیس زمانی (K_T): اندیس زمانی که وابسته به شکل موج تک‌پالس در حوزه زمان است ویژگی بسیار مهمی در تعیین نوع عیب تخلیه جزئی به‌شمار می‌رود. این ویژگی برای سیگنال $S(t)$ که با فرکانس f_{sampling} و در k نقطه نمونه برداری شده به صورت زیر محاسبه می‌شود [۵] و [۶]

$$K_T = \sum_{i=1}^k (t_i - t_1) \tilde{S}(t_i)^2 \times \frac{1}{f_{\text{sampling}}} \quad (2)$$

به گونه‌ای که

$$\begin{cases} \tilde{S}(t_i) = \frac{S(t_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^k S(t_j)^2}} \\ t = \sum_{j=1}^k t_j \tilde{S}(t_j) \end{cases} \quad (3)$$

اندیس فرکانسی (K_F): مشابه با اندیس زمانی، یک اندیس فرکانسی نیز برای هر پالس PD به صورت زیر قابل محاسبه است [۵] و [۶]

$$K_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} f_i |\tilde{S}(f_i)|^2} \quad (4)$$

ضریب شکل (FF): برابر است با نسبت پیک پالس بر مقدار متوسط آن

$$FF = \text{Peak/Pulse Average} \quad (5)$$

که در آن

$$\text{Pulse Average} = \frac{1}{f_{\text{sampling}}} \sum_{i=1}^k S(t_i) \quad (6)$$

ضریب پیک (PF): برابر است با نسبت پیک پالس بر مقدار مؤثر آن

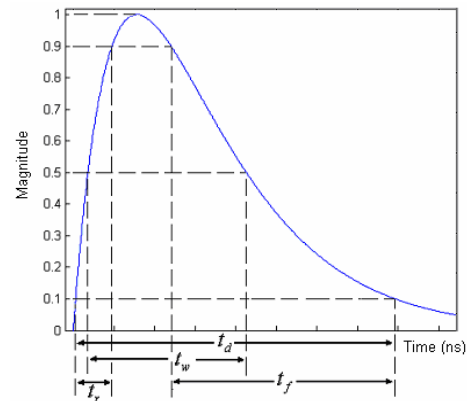
$$PF = \text{Peak/Pulse RMS} \quad (7)$$

که در آن

$$\text{Pulse RMS} = \sqrt{\frac{1}{f_{\text{sampling}}} \sum_{i=1}^k S(t_i)^2} \quad (8)$$

۳- الگوریتم انتخاب ویژگی

بدیهی است که هر یک از ۱۰ ویژگی استخراج شده، دارای قابلیت تفکیک‌کنندگی متفاوتی در زمینه جداسازی پالس‌های تخلیه جزئی با منابع مختلف هستند. هرچه مقدار یک ویژگی برای پالس‌های مربوط به یک نوع عیب شبیه به هم و برای پالس‌های مربوط به دو یا چند عیب متفاوت باشد، این ویژگی دارای قدرت تفکیک‌کنندگی بیشتری بین عیوب مختلف خواهد بود. ممکن است مقدار برخی از این ویژگی‌ها برای همه عیوب مشابه باشد. در این صورت استفاده از این ویژگی‌ها هیچ کمکی



شکل ۱: شکل موج نوعی از یک تک‌پالس تخلیه جزئی در حوزه زمان.

تفکیک نمود. به این ترتیب بر خلاف دستگاه‌های اندازه‌گیری معمول، به کمک سیستم‌های جدید می‌توان عیوب هم‌زمان را از هم جدا کرده و سپس روند تعیین عیب را چه به کمک مشخصات زمانی پالس‌ها و چه به کمک الگوهای حوزه فاز معمول انجام داد [۶] و [۱۱].

برای بررسی قابلیت دستگاه‌های جدید در تشخیص نوع عیب، توسط یک سیستم دو الکترونی تخلیه جزئی از سه نوع کرونا، تخلیه سطحی و تخلیه در حفره تولید و تک‌پالس‌های هر یک با استفاده از این دستگاه‌ها اندازه‌گیری شده است. در این مقاله علاوه بر بررسی نحوه استخراج ویژگی از شکل موج تک‌پالس‌های تخلیه جزئی، با ارائه یک الگوریتم جدید میزان قدرت هر یک از این ویژگی‌ها در تفکیک بین عیوب مختلف به دست آمده است. در پایان نیز با ترتیب دادن آزمایش‌هایی، نتایج به دست آمده از این الگوریتم در زمینه تفکیک بین پالس‌های مربوط به عیوب مختلف تخلیه جزئی به‌ویژه عیوب هم‌زمان، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- استخراج ویژگی از تک‌پالس‌های تخلیه جزئی

امروزه مشخص شده است که اطلاعات بسیار مهمی از نوع تخلیه جزئی در شکل موج تک‌پالس‌های آن نهفته شده است. یکی از مهم‌ترین مسائلی که در زمینه تشخیص نوع عیب با استفاده از شکل موج جریان تک‌پالس‌های PD مطرح می‌شود، استخراج ویژگی‌هایی از آنها است که دارای قدرت تفکیک‌کنندگی مناسبی برای تشخیص سه گروه مختلف تخلیه جزئی از یکدیگر باشند. با استخراج دقیق و مناسب این ویژگی‌ها، می‌توان تعیین عیب مؤثرتری را به دست آورد.

یک شکل موج نمونه‌ای از تک‌پالس تخلیه جزئی در شکل ۱ آورده شده است. با استفاده از این شکل، در ادامه به بررسی نحوه استخراج انواع ویژگی‌های مفید از شکل موج پالس‌های تخلیه جزئی واقعی می‌پردازیم: مقدار پیک: برای پالس‌های مثبت برابر با مقدار ماکزیمم دامنه سیگنال

و برای پالس‌های منفی برابر با مقدار مینیمم آن می‌باشد.

زمان صعود (t_r): فاصله زمانی است که در طی آن سیگنال PD از ۱۰٪ مقدار پیک به ۹۰٪ آن در پیشانی موج می‌رسد.

زمان نزول (t_f): فاصله زمانی است که در طی آن سیگنال PD از ۹۰٪ مقدار پیک به ۱۰٪ آن در پشت موج می‌رسد.

عرض پالس (t_w): برابر با فاصله زمانی موجود بین مقادیر ۵۰٪ پیک در پیشانی و پشت موج می‌باشد.

مدت پالس (t_d): برابر با فاصله زمانی موجود بین مقادیر ۱۰٪ پیک در پیشانی و پشت موج می‌باشد.

شباهت پالس‌های اندازه‌گیری شده از یک نوع عیب است. در فاصله درون گروهی فاصله بین پالس‌های موجود در گروه هر یک از این عیوب محاسبه می‌شود

$$d_{within\ group}^Z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sqrt{w_i \cdot (x_{ji}^Z - x_i^Z)^2} \quad (11)$$

$$x_i^Z = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_i \cdot x_{ji}^Z$$

که در آن Z اندیس مشخصه عیب مورد نظر، n تعداد پالس‌های PD اندازه‌گیری شده از عیب Z ام و x_{ji}^Z عنصر i ام از بردار ویژگی پالس j ام $1 \leq j \leq n$ می‌باشد. x_i^Z نیز عنصر i ام از بردار ویژگی میانگین دسته پالس‌های مربوط به عیب Z با در نظر گرفتن ترکیب پیشنهاد شده توسط کروموزوم می‌باشد.

فاصله بین گروهی برای پالس‌های اندازه‌گیری شده از دو گروه (دو عیب) Z_1 و Z_2 نیز به صورت زیر قابل محاسبه است

$$d_{between\ groups}^{Z_1, Z_2} = \sum_{i=1}^n \sqrt{w_i \cdot (x_i^{Z_1} - x_i^{Z_2})^2} \quad (12)$$

از آنجا که با کاهش فاصله بین بردارهای موجود در یک گروه و افزایش فاصله بین بردارهای گروه‌های مختلف، تفکیک پذیری آنها بیشتر خواهد شد، بردار هزینه را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$Cost = \frac{\sum_{k=1}^{n_z} d_{within\ group}^{Z_k}}{\sum_{i=1}^{n_z} \sum_{k=i+1}^{n_z} d_{between\ group}^{Z_i, Z_k}} \quad (13)$$

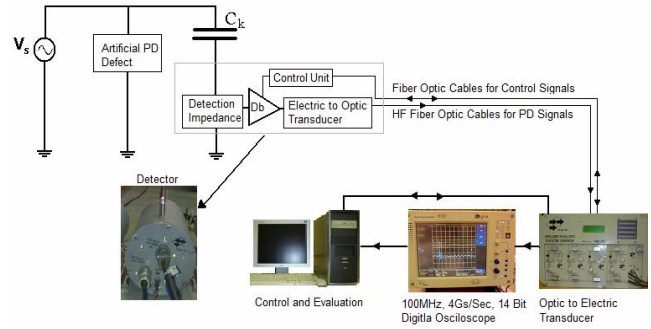
که در آن n_z برابر با تعداد گروه‌ها (عیوب) می‌باشد. با انتخاب تصادفی جمعیت اولیه و محاسبه تابع هزینه برای کروموزوم‌های آن، کروموزوم‌هایی که دارای تابع هزینه بالایی هستند حذف می‌گردند. کروموزوم‌های حذف شده با کروموزوم‌هایی که با انجام عمل امتزاج بین کروموزوم‌های با تابع هزینه کمتر تولید می‌شوند جایگزین می‌گردند. با تکرار این روند، الگوریتم ژنتیک به سمت کروموزومی با کمترین تابع هزینه همگرا خواهد شد. به این ترتیب با پیدا کردن کروموزومی که دارای کمترین مقدار تابع هزینه می‌باشد، به ترکیبی از ویژگی‌ها می‌توان دست یافت که منجر به بهترین تفکیک بین پالس‌های عیوب مختلف تخلیه جزئی گردد.

۴- نتایج عملی

به منظور بررسی شکل موج تک پالس‌های تخلیه جزئی در حوزه زمان، توسط یک سیستم دو الکترونی مبادرت به ایجاد عیوب کرونا و تخلیه سطحی روی بوشینگ ترانسفورماتور قدرت نموده و تک پالس‌های مربوط به هر یک را اندازه‌گیری و ذخیره می‌نماییم. همچنین برای تحقیق و بررسی عیوب هم‌زمان، با ترتیب دادن آزمایشی مبادرت به ایجاد دو فعالیت تخلیه جزئی هم‌زمان از نوع تخلیه سطحی و تخلیه در حفرات داخل عایق کاغذی می‌کنیم.

۴-۱ سیستم اندازه‌گیری و مدار آزمایش

برای آشکارسازی سیگنال‌های تخلیه جزئی از یک دستگاه با پهنای باند بسیار وسیع ساخت مرکز تحقیقات کامپیوتر و الکترونیک دانشگاه استفاده می‌گردد (شکل ۲). پالس‌های جریان PD با عبور از خازن کوپلاژ توسط امپدانس آشکارساز که به صورت یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند، به



شکل ۲: دیاگرام شماتیکی سیستم اندازه‌گیری و مدار آزمایش تخلیه جزئی.

به تعیین نوع عیب نخواهد کرد. همچنین ممکن است استفاده از یک ویژگی موجب گمراهی در تعیین نوع عیب شده یا میزان تفکیک پذیری بین عیوب را کاهش دهد. به همین دلیل قدرت تفکیک‌کنندگی هر یک از ویژگی‌های استخراج شده بایستی مشخص گردد تا از به کارگیری ویژگی‌هایی که موجب کاهش دقت در جداسازی عیوب مختلف می‌گردند جلوگیری شود. بنابراین برای داشتن جداسازی مؤثرتر عیوب، باید از ترکیبی از ویژگی‌ها استفاده نمود که دارای قدرت تفکیک‌کنندگی مناسبی باشند.

برای تعیین قدرت تفکیک‌کنندگی ۱۰ ویژگی استخراج شده، از الگوریتم ژنتیک که یکی از روش‌های هوشمند بهینه‌سازی است، استفاده شده است. در الگوریتم ژنتیک به کار رفته، تعداد ژن موجود در هر کروموزوم برابر با تعداد ویژگی استخراج شده برای هر پالس خواهد بود. در این صورت برای هر ویژگی یک ژن متناظر تعریف می‌شود. مقدار نسبت داده شده به هر یک از این ژن‌ها به صورت باینری بوده و برابر با صفر یا یک انتخاب می‌شود

$$Chr = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n] \quad , \quad w_i = 0 \text{ or } 1 \quad (9)$$

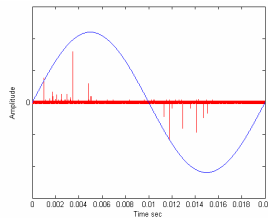
به این ترتیب اگر مقدار یک ژن برابر با یک باشد ویژگی مربوط به آن در تعیین عیب شرکت خواهد کرد و اگر مقدار آن صفر باشد این ویژگی در روند تعیین عیب نقشی نخواهد داشت. به این صورت هر کروموزوم ترکیبی از ویژگی‌ها را برای استفاده در روند تعیین عیب نشان می‌دهد.

برای سنجش میزان تشابه دو پالس PD، فاصله بین بردارهای ویژگی آن دو با در نظر گرفتن ترکیب پیشنهاد شده در هر کروموزوم محاسبه می‌شود. این فاصله برای دو پالس با بردارهای $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ و $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ به صورت زیر به دست می‌آید

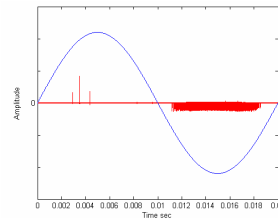
$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - y_i)^2} \quad (10)$$

در این رابطه w_i ژن i ام کروموزوم و d فاصله بین بردار ویژگی دو پالس می‌باشد.

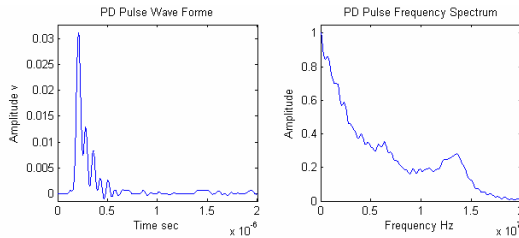
با انتخاب یک تابع هزینه مناسب می‌توان به بررسی کارایی ترکیب ارائه شده توسط هر کروموزوم و سنجش قدرت تفکیک‌کنندگی آن پرداخت. پارامترهایی مانند میزان نزدیکی پالس‌های مربوط به یک نوع عیب و میزان دوری پالس‌های مربوط به عیوب مختلف در فضای بردار ورودی، شاخص‌های مناسبی در این زمینه می‌باشند. برای محاسبه این شاخص‌ها می‌توان از فاصله‌های درون گروهی و بین گروهی بهره برد. همان‌گونه که در بخش‌های بعدی ملاحظه خواهد شد برای هر یک از عیوب تخلیه جزئی که مورد آزمایش قرار می‌گیرند، چندین تک پالس آشکارسازی و ذخیره می‌شود. به این ترتیب برای هر نوع عیب یک گروه از پالس‌های PD تشکیل خواهد شد. فاصله درون گروهی معیاری از میزان



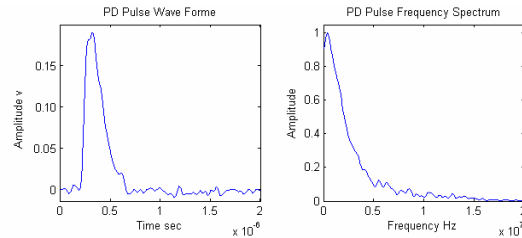
(الف)



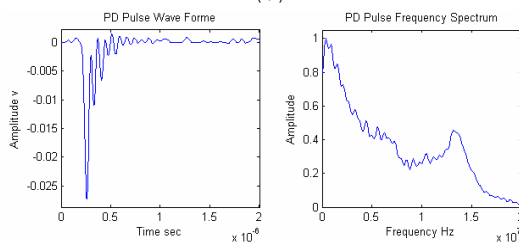
(ب)



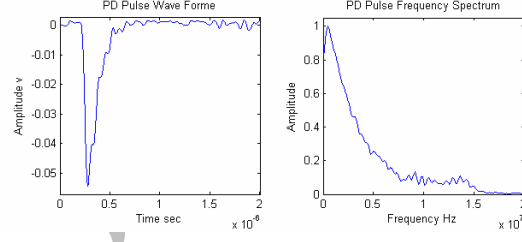
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۴: تخلیه جزئی سطحی بر روی پوشینگ در ولتاژ تحریک ۲۵ kV (الف) تخلیه سطحی در یک سیکل کامل، (ب) تک پالس مثبت و (ج) تک پالس منفی در حوزه زمان و فرکانس.

شکل ۳: تخلیه جزئی کرونا در ولتاژ تحریک ۶ kV (الف) کرونا در یک سیکل کامل، (ب) تک پالس مثبت و (ج) تک پالس منفی در حوزه زمان و فرکانس.

سیگنال الکتریکی ولتاژ تبدیل می‌شوند. این سیگنال‌ها به کمک یک تقویت کننده با بهره متغیر تقویت و توسط یک مبدل، در نزدیکی امپدانس آشکارسازی به سیگنال نوری تبدیل می‌شوند. استفاده از سیگنال نوری موجب می‌شود در مسیر انتقال، نویز کمتری روی سیگنال PD سوار شده و نسبت سیگنال به نویز بهتری به دست آید [۷]. سیگنال نوری پس از انتقال توسط کابل نوری در مجاورت دستگاه نمایش توسط یک مبدل دیگر دوباره به سیگنال الکتریکی تبدیل و به وسیله یک اسیلوسکوپ دیجیتال ۱۰۰ MHz، با نرخ ۴ Gs/sec نمونه برداری شده و در یک کامپیوتر ذخیره می‌گردد.

۲-۴ ایجاد تخلیه جزئی از نوع کرونا

می‌دانیم با اعمال ولتاژ به الکترودهای نوک تیز، هوای اطراف آنها یونیزه شده و تخلیه‌های الکتریکی موضعی کرونا در اطراف آنها ایجاد می‌گردد. برای ایجاد کرونا از دو الکترود سوزن و صفحه استفاده می‌شود. به این منظور الکترود صفحه‌ای شکل زمین شده و به الکترود سوزنی ولتاژ اعمال می‌گردد. با تنظیم فاصله بین دو الکترود در ۲ cm، در ولتاژ تحریک ۵ kV شاهد وقوع پالس‌های کرونا با پلاریته منفی در اطراف پیک منفی ولتاژ خواهیم بود. با افزایش ولتاژ تحریک به ۶ KV علاوه بر پالس‌های منفی، پالس‌های مثبت نیز در اطراف پیک مثبت ولتاژ ظاهر می‌شوند. شکل ۳، کرونا در یک سیکل کامل ولتاژ تحریک، شکل موج تک پالس‌های مثبت و منفی در حوزه زمان و طیف فرکانسی نرمالیزه شده آنها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که پالس‌های مثبت نسبت به پالس‌های منفی دارای تعداد کمتر، ولی دامنه بزرگ‌تری هستند. همچنین پالس‌های منفی کرونا دارای زمان صعود، نزول، عرض پالس و مدت زمانی به ترتیب برابر با ۴۰، ۲۱۰، ۱۲۰ و ۲۸۰ نانوثانیه هستند در حالی که این مقادیر برای پالس‌های مثبت برابر با ۵۵، ۲۷۰، ۲۴۰ و ۴۲۰ نانوثانیه می‌باشد.

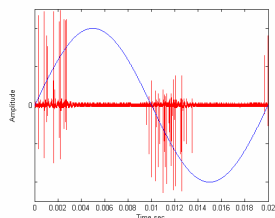
۳-۴ ایجاد تخلیه جزئی سطحی

در صورتی که روی فصل مشترک دو عایق میدان الکتریکی مماسی وجود داشته باشد، تخلیه سطحی در آن رخ خواهد داد. با پاشیدن آب نمک روی سطح یک پوشینگ ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۶۳ KV و اعمال ولتاژ ۲۵ kV به آن، تخلیه جزئی سطحی بر روی آن ایجاد و پالس‌های مربوطه ثبت گردید (شکل ۴). وجود آب نمک موجب پایین آمدن ولتاژ شروع تخلیه جزئی می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پالس‌های مثبت و منفی تخلیه سطحی بسیار شبیه به هم بوده و دارای زمان صعود، زمان نزول، عرض پالس و مدت زمانی برابر با ۳۶، ۹۰، ۵۰ و ۱۳۰ نانوثانیه می‌باشند.

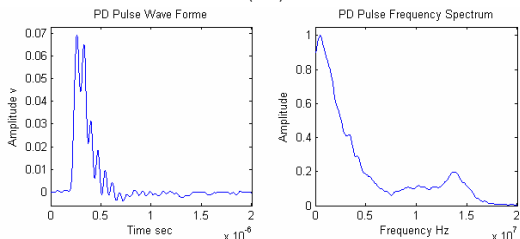
۴-۴ ایجاد تخلیه جزئی با منابع چندگانه هم‌زمان

جداسازی پالس‌های مربوط به منابع هم‌زمان تخلیه جزئی در مونتورینگ تجهیزات فشار قوی به ویژه در اندازه‌گیری زیربار (On-Load) از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. زیرا در این حالت به دلیل عدم امکان استفاده از فیلتر، نویزها و پالس‌های PD که منشأ خارجی دارند با پالس‌های PD تولید شده در داخل تجهیز مورد تست، مخلوط شده و امکان مونتورینگ مؤثر را از بین می‌برند. به همین دلیل برای به دست آوردن درک بهتر از وضعیت عایقی تجهیزات فشار قوی باید پالس‌های واقعی تخلیه جزئی را که در داخل این تجهیزات تولید می‌شوند از پالس‌های دیگر جدا نمود.

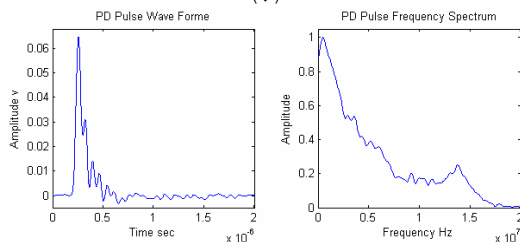
برای داشتن پالس‌های تخلیه جزئی از منابع مختلف که هم‌زمان با هم باشند با ترتیب دادن آزمایشی اقدام به ایجاد تخلیه جزئی در حفرات داخل یک عایق کاغذی هم‌زمان با تخلیه سطحی بر روی سطح مشترک آن با هوا نموده و پالس‌های آن دو را توسط دستگاه مذکور اندازه‌گیری و ذخیره



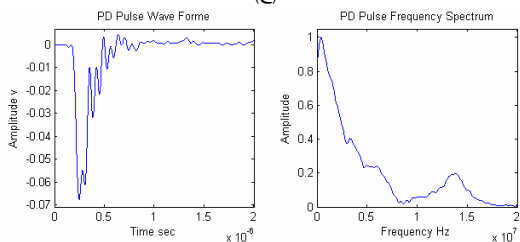
(الف)



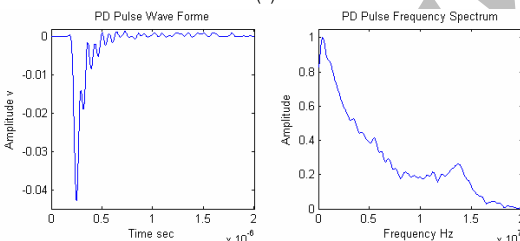
(ب)



(ج)



(د)



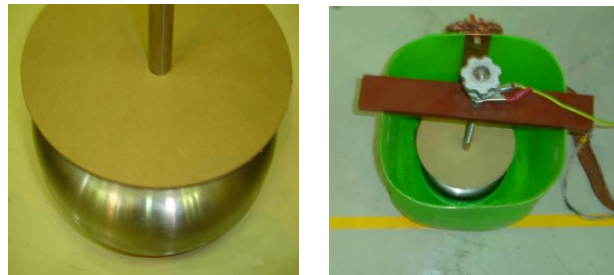
(ه)

شکل ۶: تخلیه جزئی در حفرات داخل کاغذ هم‌زمان با تخلیه سطحی در ولتاژ اعمالی ۴٫۵ KV (الف) تخلیه جزئی در یک سیکل کامل، (ب و ج) تک‌پالس‌های مثبت و (د و ه) تک‌پالس‌های منفی در حوزه زمان و فرکانس.

خواهد بود که تک‌پالس‌های آنها به الگوریتم دسته‌بندی درختی ارائه می‌شود. اگر تعداد عیوب مشخص نباشد تقسیم‌بندی نهایی را می‌توان از روی عواملی نظیر میزان فاصله خوشه‌ها در طی مراحل مختلف تقسیم‌بندی به‌دست آورد.

۵-۱ تفکیک پالس‌های کرونا و تخلیه سطحی

در این بخش ابتدا به بررسی توانایی ویژگی‌های استخراج‌شده از شکل موج تک‌پالس‌های تخلیه جزئی در حوزه زمان و فرکانس در زمینه جداسازی و تشخیص دو عیب کرونا و تخلیه سطحی از یکدیگر پرداخته و سپس قابلیت الگوریتم انتخاب ویژگی ارائه‌شده در بخش ۳ را در تعیین قدرت تفکیک‌کنندگی هر یک از این ویژگی‌ها مورد بحث و بررسی قرار



شکل ۵: آرایش الکترونی برای تولید هم‌زمان تخلیه جزئی در حفره و تخلیه سطحی.

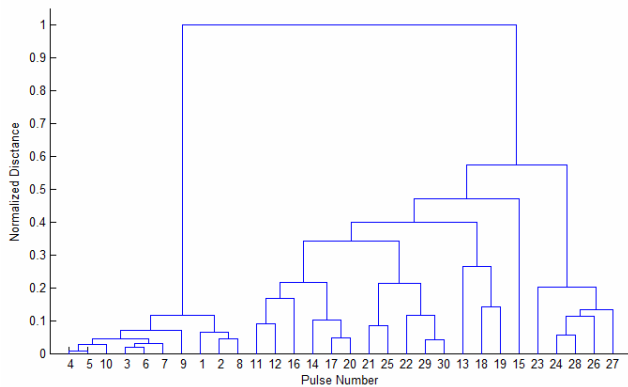
می‌نماییم. برای تولید این دو نوع تخلیه جزئی، بین یک الکتروود صفحه‌ای و یک الکتروود استوانه‌ای یک عایق کاغذی از جنس پرس‌اشپان (PSP) که در ساختار عایقی ترانسفورماتور به کار می‌رود قرار می‌دهیم (شکل ۵). می‌دانیم در صورت وجود حفره داخل عایق جامد، به دلیل اختلاف ضریب دی‌الکتریک دو محیط، میدان الکتریکی در داخل این حفرات و حباب‌ها بیشتر از میزان تحمل عایقی آنها شده و موجب بروز شکست الکتریکی موضعی می‌گردد. در ترانسفورماتورها، حفرات موجود در این کاغذها با اشباع در روغن از بین می‌روند. به همین دلیل برای این آزمایش، PSP اشباع‌نشده مورد استفاده قرار گرفته است.

با اعمال ولتاژ به این الکتروودها، در حفرات موجود در بخشی از کاغذ که بین دو الکتروود قرار گرفته، تخلیه جزئی ایجاد خواهد شد. از طرف دیگر به دلیل استفاده از الکتروود استوانه‌ای، میدان الکتریکی مماسی نیز بر روی فصل مشترک عایق PSP با هوا شکل می‌گیرد که موجب تخلیه سطحی می‌شود. در شکل ۶ فعالیت تخلیه جزئی حاصل از این آزمایش برای عایق PSP با ضخامت ۱ mm و ولتاژ اعمالی ۴٫۵ KV نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در بین این پالس‌ها دو نوع متفاوت از پالس‌های مثبت و منفی وجود دارد.

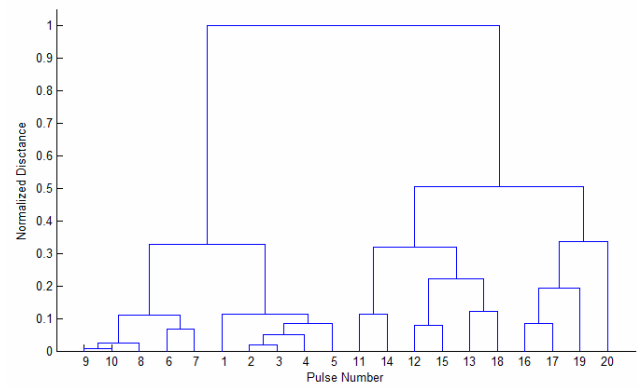
از آنجا که محدوده فاز وقوع پالس‌های مربوط به تخلیه در حفره و تخلیه سطحی نسبت به ولتاژ اعمالی مشابه هم هستند، پالس‌های مربوط به آن دو کاملاً با یکدیگر مخلوط شده و جداسازی آنها با دستگاه‌های اندازه‌گیری باند باریک و باند پهن به هیچ وجه امکان‌پذیر نخواهد بود. اما همان‌طور که در ادامه ملاحظه خواهد شد ویژگی‌های استخراج‌شده از شکل موج تک‌پالس‌های تخلیه جزئی به‌راحتی قادر به جداسازی آنها می‌باشند.

۵- تفکیک تک‌پالس‌های عیوب مختلف تخلیه جزئی

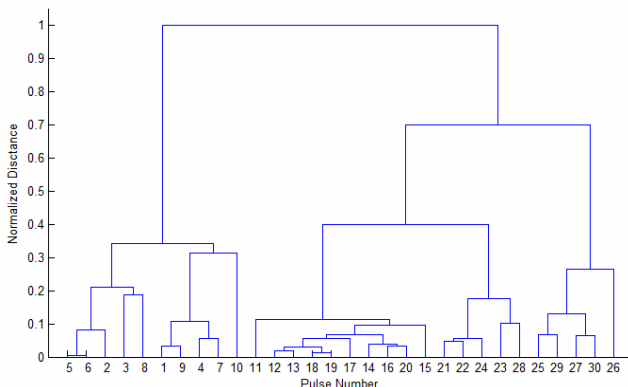
برای جداسازی پالس‌های منابع مختلف تخلیه جزئی به کمک ویژگی‌های زمانی استخراج‌شده از آنها، می‌توان از الگوریتم‌های دسته‌بندی مختلفی استفاده نمود. برای این منظور و همچنین بررسی توانایی الگوریتم انتخاب ویژگی ارائه‌شده، از الگوریتم دسته‌بندی درختی که دارای قابلیت‌های نمایشی و گرافیکی مناسبی است، استفاده شده است. این الگوریتم عمل گروه‌بندی را در طی n مرحله (n برابر با تعداد پالس‌های ارائه‌شده به آن می‌باشد) انجام می‌دهد. این الگوریتم در مرحله اول هر یک از پالس‌های ارائه‌شده را به‌عنوان یک دسته مستقل در نظر گرفته و در مرحله بعدی با محاسبه فاصله بین دسته‌های مختلف، دو دسته‌ای را که دارای کم‌ترین فاصله نسبت به یکدیگر باشند را با هم ادغام کرده و تعداد آنها را به $n-1$ می‌رساند. با تکرار این روند در مرحله n ام همه پالس‌ها در یک دسته قرار می‌گیرند. به این ترتیب الگوریتم دسته‌بندی یک سری از تقسیم‌بندی‌ها را به صورت P_1, P_2, \dots, P_n و $P_k = k$ نتیجه خواهد داد. بدیهی است تقسیم‌بندی مورد قبول، برابر با تعداد عیوبی



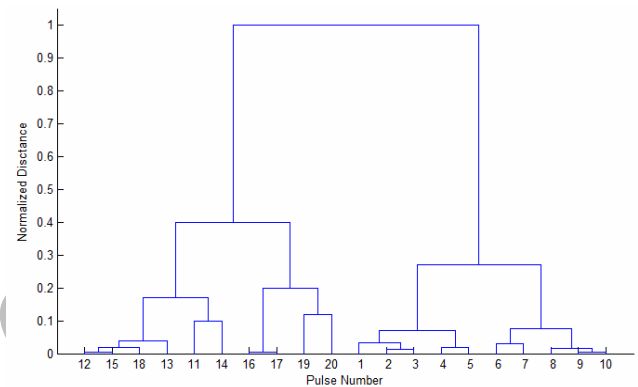
شکل ۹: جداسازی پالس‌های مثبت در فعالیت همزمان تخلیه جزئی سطحی و تخلیه در حفره و مقایسه آنها با پالس‌های مثبت آزمایش‌های قبلی.



شکل ۷: جداسازی پالس‌های کرونا و تخلیه سطحی توسط الگوریتم دسته‌بندی درختی با استفاده از ویژگی‌های استخراج‌شده.



شکل ۱۰: جداسازی پالس‌های منفی در فعالیت همزمان تخلیه جزئی سطحی و تخلیه در حفره و مقایسه آنها با پالس‌های منفی آزمایش‌های قبلی.



شکل ۸: جداسازی تک‌پالس‌های مثبت و منفی کرونا و تخلیه سطحی با استفاده از اندیس فرکانسی، زمان نزول، مدت زمان و عرض پالس.

مختلف به اثبات می‌رسد.

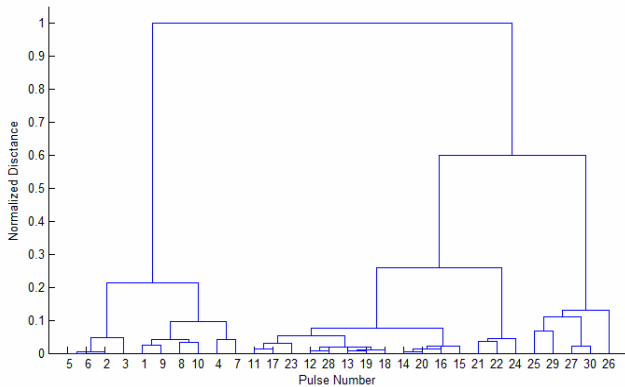
۲-۵ تفکیک و تشخیص نوع عیب پالس‌های تخلیه جزئی با منابع چندگانه هم‌زمان

برای بررسی قابلیت دستگاه‌های جدید اندازه‌گیری و ویژگی‌های استخراج‌شده توسط آنها در زمینه تعیین عیب و جداسازی پالس‌های منابع چندگانه PD، پالس‌های اندازه‌گیری شده از فعالیت هم‌زمان تخلیه سطحی روی PSP و تخلیه در حفره (آزمایش بخش ۴-۴) به همراه پالس‌های کرونا (آزمایش بخش ۳-۴) و پالس‌های تخلیه سطحی روی بوشینگ (آزمایش بخش ۳-۴) به الگوریتم درختی اعمال می‌شوند (شکل ۹ و ۱۰). به این ترتیب علاوه بر جداسازی پالس‌های هم‌زمان تخلیه سطحی روی PSP و تخلیه در حفره، می‌توان به تعیین عیب آنها نیز پرداخت.

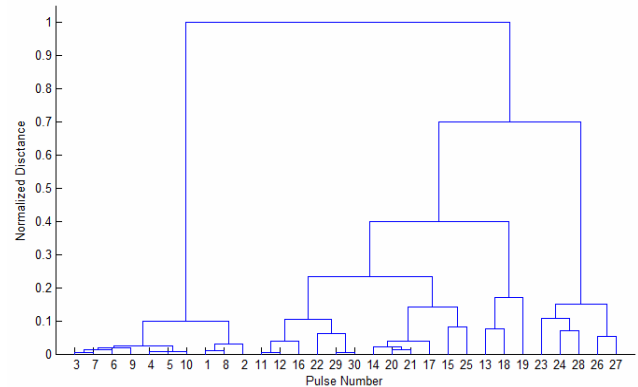
در شکل ۹ نتیجه اعمال پالس‌های مثبت اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های بخش‌های ۲-۴ تا ۴-۴ به الگوریتم خوشه‌بندی درختی به نمایش در آمده است. در این شکل پالس‌های شماره ۱ تا ۱۰ مربوط به کرونا، پالس‌های شماره ۱۱ تا ۲۰ مربوط به تخلیه سطحی روی بوشینگ و پالس‌های شماره ۲۱ تا ۳۰ مربوط به آزمایش سوم هستند. مشاهده می‌شود پالس‌های آزمایش سوم در شکل ۹ به دو گروه تقسیم شده‌اند. گروه اول شامل پالس‌های شماره ۲۱، ۲۲، ۲۵، ۲۹ و ۳۰ می‌باشد که مشابه با شکل ۶-ج می‌باشد. ملاحظه می‌شود که این پالس‌ها در میان گروه مربوط به پالس‌های تخلیه سطحی قرار می‌گیرند. در حالی که گروه دوم، شامل پالس‌های شماره ۲۳، ۲۴، ۲۶، ۲۷ و ۲۸ که مشابه با شکل ۶-ب هستند، تشکیل یک گروه مستقل می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گروه اول پالس‌های آزمایش بخش ۴-۴، مربوط به تخلیه

می‌دهیم. برای این منظور پنج پالس مثبت و پنج پالس منفی از مجموع پالس‌هایی که برای هر یک از عیوب کرونا و تخلیه سطحی در بخش‌های ۲-۴ و ۳-۴ اندازه‌گیری شدند را به صورت تصادفی انتخاب کرده و ۱۰ ویژگی ذکر شده برای هر یک را به دست می‌آوریم. شکل ۷ نتیجه اعمال بردارهای ویژگی این پالس‌ها را به الگوریتم دسته‌بندی درختی نمایش می‌دهد. در این شکل میزان تفکیک‌پذیری عیوب کرونا و تخلیه سطحی با استفاده از اطلاعات به دست آمده از شکل موج پالس‌های تخلیه جزئی در حوزه زمان به خوبی نمایان است. در این شکل پالس‌های شماره ۱ تا ۵ و ۶ تا ۱۰ به ترتیب مربوط به پالس‌های مثبت و منفی کرونا و پالس‌های شماره ۱۱ تا ۱۵ و ۱۶ تا ۲۰ نیز مربوط به پالس‌های منفی و مثبت تخلیه سطحی می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود پالس‌های اعمال شده به دو گروه مجزا برای پالس‌های کرونا و تخلیه سطحی جدا شده‌اند.

برای بررسی قدرت تفکیک‌کنندگی هر یک از ۱۰ ویژگی استخراج‌شده، ویژگی‌های پالس‌های اندازه‌گیری شده از عیوب کرونا و تخلیه سطحی به الگوریتم انتخاب ویژگی اعمال گردیدند که در نتیجه آن چهار ویژگی زمان نزول، اندیس فرکانسی، مدت زمان و عرض پالس به عنوان مؤثرترین ویژگی‌ها در تفکیک پالس‌های کرونا و تخلیه سطحی از یکدیگر تشخیص داده شدند. شکل ۸ نتیجه جداسازی بین پالس‌های کرونا و تخلیه سطحی را با استفاده از چهار ویژگی ذکر شده نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که میزان تشابه پالس‌های هر گروه به یکدیگر بیشتر شده است. بنابراین استفاده از چهار ویژگی ذکر شده در جداسازی پالس‌های این دو نوع عیب به جای استفاده از همه آنها، میزان تفکیک‌پذیری بین آن دو را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. به این ترتیب کارایی الگوریتم انتخاب ویژگی ارائه شده در تعیین قدرت تفکیک‌کنندگی ویژگی‌های زمانی



شکل ۱۰: جداسازی پالس‌های اعمال شده در شکل ۱۰ با استفاده از اندیس فرکانسی، زمان نزول، مدت زمان و عرض پالس.



شکل ۱۱: جداسازی پالس‌های اعمال شده در شکل ۹ با استفاده از اندیس فرکانسی، زمان نزول، مدت زمان و عرض پالس.

اندیس فرکانسی، زمان نزول، مدت زمان و عرض پالس دارای قدرت تفکیک‌کنندگی بهتری نسبت به ویژگی‌های دیگر هستند. این موضوع با اعمال چهار ویژگی ذکر شده برای پالس‌های کرونا و تخلیه سطحی به الگوریتم دسته‌بندی و حصول جداسازی بهتر، مورد تأیید قرار گرفت.

امروزه جداسازی پالس‌های منابع هم‌زمان تخلیه جزئی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. این امر در اندازه‌گیری زیر بار که در آن نویز و پالس‌های تخلیه جزئی خارجی با پالس‌های تخلیه جزئی تولید شده در داخل تجهیزات فشار قوی مخلوط می‌شوند به شدت مورد نیاز است. همچنین در مورد آن دسته از تجهیزات فشار قوی نیز که دارای چند منبع هم‌زمان تخلیه جزئی بوده و برای برآورد کیفیت عایقی تحت آزمایش قرار می‌گیرند، جداسازی پالس‌های هر یک از این منابع بسیار ضروری است. به همین منظور و برای بررسی قابلیت ویژگی‌های استخراج شده از شکل موج پالس‌ها در جداسازی عیوب هم‌زمان، اقدام به تولید هم‌زمان پالس‌های تخلیه سطحی و تخلیه در حفره و اندازه‌گیری آنها توسط دستگاه‌های با پهنای باند وسیع شد. با اعمال ویژگی‌های استخراج شده از این تک‌پالس‌ها به الگوریتم دسته‌بندی درختی، قابلیت آنها در زمینه جداسازی عیوب هم‌زمان به اثبات رسید. در این مورد نیز با استفاده از چهار ویژگی به دست آمده از الگوریتم انتخاب ویژگی، شاهد تفکیک‌پذیری بیشتری بین پالس‌های عیوب هم‌زمان PD بودیم.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاه فشار قوی شرکت ایران ترانسفو برای ایجاد بستر مناسب جهت انجام آزمایشات، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] IEC 60270-High Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements, 2ed., 2000.
- [2] H. Okubo and N. Hayakawa, "A novel technique for partial discharge and breakdown investigation based on current pulse waveform analysis," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 4, pp 736-744, Aug. 2005.
- [3] M. A. Elborki, P. A. Crossly, and A. D. Wang, "Detection and characterization of partial discharges in transformer defect Models," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 405-410, Chicago, US, Jul. 2002.
- [4] R. Patsch, F. Berton, and D. Benzerok, "PD source identification and characterization on the basis of pulse shape analysis," *Annual Report on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 728-731, Dec. 2002.
- [5] A. Akbari, H. Borsi, E. Gochenback, and P. Werle, "A novel database format for partial discharge monitoring and evaluation, based on the information of single PD pulses," in *Proc.*

سطحی و گروه دوم نیز مربوط به تخلیه در حفره می‌باشد. به این ترتیب علاوه بر جداسازی پالس‌های منابع هم‌زمان تخلیه جزئی، می‌توان نوع آنها را با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده در حوزه زمان تشخیص داد.

شکل ۱۰ نیز نتیجه اعمال پالس‌های منفی آزمایش‌های صورت گرفته را به الگوریتم خوشه‌بندی نشان می‌دهد. در این شکل نیز پالس‌های شماره ۱ تا ۱۰ مربوط به کرونا، پالس‌های شماره ۱۱ تا ۲۰ مربوط به تخلیه سطحی روی بوشینگ و پالس‌های شماره ۲۱ تا ۳۰ مربوط به آزمایش سوم هستند. در این مورد نیز الگوریتم دسته‌بندی پالس‌های آزمایش سوم را به دو گروه تقسیم می‌نماید. پالس‌های شماره ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۹ و ۳۰ که مشابه با پالس‌های شکل ۶-د آزمایش سوم هستند، در یک گروه مستقل و پالس‌های شماره ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴ و ۲۸ که مشابه با پالس‌های شکل ۶-ه هستند، هم‌گروه با پالس‌های تخلیه سطحی قرار گرفته‌اند.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، با اعمال چهار ویژگی ذکر شده برای پالس‌های استفاده شده در شکل‌های ۹ و ۱۰، تشابه بین پالس‌های هر عیب و همچنین فاصله بین پالس‌های عیوب مختلف افزایش یافته است. بنابراین به کمک نتایج به دست آمده از الگوریتم ارائه شده برای انتخاب ویژگی، جداسازی بهتری حاصل شده است.

۶- نتیجه‌گیری

با استفاده از سیستم‌های اندازه‌گیری تخلیه جزئی که دارای پهنای باند فرکانسی بسیار وسیعی هستند امکان اندازه‌گیری و مشاهده شکل موج تک‌پالس‌های PD در حوزه زمان میسر شده است. این شکل موج‌ها حاوی اطلاعات بسیار مهمی از نوع منبع تخلیه جزئی هستند. با استخراج ویژگی‌های مهم شکل موج تک‌پالس‌ها می‌توان به تعیین نوع عیب دقیق‌تری دست یافت. در این مقاله با معرفی ۱۰ ویژگی مهم هر تک‌پالس PD به نحوه محاسبه آنها پرداخته شد و نیز با ترتیب‌دادن آزمایش‌هایی، پالس‌های تخلیه سطحی روی بوشینگ و کرونا اندازه‌گیری شدند و ویژگی‌های مهم هر یک از آنها استخراج گردید. ملاحظه شد که با استفاده از این ویژگی‌ها به‌عنوان ورودی یک الگوریتم خوشه‌بندی درختی، می‌توان نسبت به جداسازی و تشخیص پالس‌های دو عیب PD اقدام نمود.

از آنجا که هر یک از ویژگی‌های استخراج شده از شکل موج تک‌پالس‌های تخلیه جزئی، دارای قدرت تفکیک‌کنندگی متفاوتی بین پالس‌های مربوط به عیوب مختلف هستند، با ارائه یک الگوریتم جدید در زمینه انتخاب ویژگی، قدرت تفکیک‌کنندگی هر یک از این ویژگی‌ها مورد بررسی قرار گرفت که در طی آن مشخص شد چهار ویژگی

اصغر اکبری در سال ۱۳۶۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشکده فنی دانشگاه تهران و در سال ۱۳۷۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود. از سال ۱۳۷۲ الی ۱۳۷۷ در حال گذراندن دوره دکتری مهندسی برق گرایش فشارقوی در دانشگاه تهران و به عنوان دانشجوی دانشگاه تربیت مدرس بود که در سال ۱۳۷۷ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق با تخصص فشارقوی از دانشگاه مذکور گردید و در همان سال به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مشغول به کار شد. دکتر اکبری از سال ۱۳۷۸ تا سال ۱۳۸۰ با استفاده از بورس بنیاد علمی الکساندر فون همبولت آلمان در انستیتو شترینگ دانشگاه هانور آلمان به عنوان محقق میهمان به تحقیق و فعالیتهای علمی پرداخت و پس از آن به دانشگاه محل خدمت خود بازگشت و از آن زمان در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در تهران مشغول به فعالیت است. دکتر اکبری تاکنون دانشجویان متعددی را در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری راهنمایی نموده و مقالات علمی زیادی در مجلات و کنفرانسهای داخلی و بینالمللی در زمینه تخلیه جزئی، سیستمهای مانیتورینگ تجهیزات فشارقوی و تحقیقات پایه ای در زمینه عایق و فشارقوی ارائه نموده است.

علی مذهب جعفری مدارک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را در گرایش برق - قدرت به ترتیب از دانشگاههای صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صنعتی امیرکبیر و صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در سالهای ۱۳۷۶، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۷ دریافت نمود. وی از سال ۱۳۷۷ با دیسپانچینگ ملی شبکه برق ایران همکاری دارد. زمینههای پژوهشی مورد علاقه نامبرده شامل مانیتورینگ و عیب یابی ترانسفورماتورها، اندازهگیری و مکانیابی تخلیه جزئی در ترانسفورماتورها و مدلسازی فرکانس بالای سیمپیچ ترانسفورماتورها قدرت می باشد.

محمد خارزی مدرک کارشناسی خود را در گرایش برق - قدرت از دانشگاه تبریز در سال ۱۳۷۰ دریافت نمود. وی به مدت ۱۷ سال مشغول به کار در آزمایشگاه فشار قوی شرکت ایران ترانسفو بوده و هم اکنون نیز مدیر کنترل کیفیت این شرکت می باشد. زمینههای پژوهشی مورد علاقه نامبرده شامل مانیتورینگ و تعیین عیب، مکانیابی PD و اندازه گیریهای فرکانس بالا در ترانسفورماتورها قدرت می باشد.

- Int. Conf. on Solid Dielectric*, vol. 2, pp. 672-675, Toulouse, France, Jul. 2004.
- [6] A. Cavlini, G. C. Montanari, A. Contin, and F. puletti, "A new approach to diagnosis of solid insulation systems based on PD signal inference," *IEEE Elec. Insulation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 23-30, Mar./Apr. 2003.
- [7] A. Akbari, P. Werle, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Transfer function - based partial discharge localization in power transformers: a feasibility study," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 5, pp. 22-32, Sep./Oct. 2002.
- [8] R. Bartnikas and J. P. Novak, "On the character of different forms of partial discharges and their related terminology," *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 956-968, Dec. 1993.
- [9] R. Bartnikas, "A comment concerning the rise time of partial discharge pulses," *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 196-202, Apr. 2005.
- [10] M. Hoof and R. Patsch, "A physical model, describing the nature of the partial discharge pulse sequences," in *Int'l Conf. on Properties and Application of Dielectric Materials*, vol. 1, pp. 283-286, Seoul, Korea, May 1997.
- [11] H. R. Mirzaei, A. Akbari, M. Kharezi, and A. M. Jafari, "Experimental investigation of PD diagnosis based on consecutive pulses data," in *Proc. Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis*, pp. 1262-1265, Beijing, China, Apr. 2008.

حسن رضا میرزایی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در دانشگاههای زنجان و صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در سالهای ۱۳۸۴ و ۱۳۸۷ به پایان رسانده و هم اکنون در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مشغول به تحصیل در مقطع دکتری گرایش فشار قوی است. زمینههای پژوهشی مورد علاقه نامبرده تعیین عیب تخلیه جزئی و مکانیابی آن در ترانسفورماتورها، قدرت، تحلیل پاسخ فرکانسی و کاربرد روشهای فرکانس بالا در مانیتورینگ ترانسفورماتورها می باشد.