

افزایش قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای قدرت در شبکه برق با استفاده از آنتن‌های فراپهن باند

حسین کرمی¹، مریم السادات اخوان حجازی²، حسام رهبری مقام¹، محمد جواد سنجری¹، گئورگ قره‌پتیان¹

¹دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، h.rahbarim@aut.ac.ir, m_j_sanjari@aut.ac.ir, grptian@aut.ac.ir

hkp6785@gmail.com,

²دانشکده مهندسی برق، دانشگاه کاشان، mhejazi@kashanu.ac.ir

چکیده

تواند هزینه‌های گزافی را برای شبکه برق داشته باشند؛ به همین خاطر مونیتورینگ بر خط ترانسفورماتور و نگهداری و تعمیر آن اهمیت زیادی برای پیش بینی شرایط خطای اولیه دارد [1-3]. عایق بندی یک ترانسفورماتور قدرت یکی از مهمترین قسمت‌ها برای عملکرد مطمئن این واحد در شبکه است. ضعیف بودن سیستم عایق بندی ممکن است منجر به زمینه سازی خروج ترانسفورماتور ناشی از خطاهای خارجی نظیر حالت گذرای کلیدزنی‌ها، برخورد صاعقه و اتصال کوتاه باشد. از این رو برای عملکرد مطمئن و اقتصادی، دست یابی دقیق به اطلاعات وضعیت فعلی عایق بسیار اهمیت می‌یابد [4]. نتایج عملی بیانگر آن است که تخلیه جزئی یا (Partial Discharge) یکی از مهمترین منابع خطاهای عایقی است [5-7]. اگر خرابی‌های ناشی از تخلیه جزئی در زمان‌های اولیه تشخیص داده شود می‌توان برای تعمیرات پیشگیرانه و بهبود قابلیت اطمینان اقدام مناسب کرد. اما به دلیل ساختار پیچیده ترانسفورماتورهای قدرت، تشخیص محل دقیق عیب به صورت بر خط بسیار دشوار بوده و یکی از مشکلات شبکه‌های قدرت است [7-10].

امروزه روشهای الکتریکی و مخابراتی مختلفی برای تشخیص محل عیب PD ارائه شده است [11-13]. در روشهای الکتریکی به دلیل ساختار متفاوت ترانسفورماتورها و پیچیده بودن یافتن مشخصات مورد نظر از سیم پیچ ترانسفورماتور، این هدف با مشکلات زیادی روبروست.

با استفاده از آنتن‌های مخابراتی امکان دست‌یابی به شکل موج پالس تخلیه جزئی در حوزه زمان فراهم می‌شود. از آنجا که کاربرد آنتن‌های فراپهن باند (Ultra Wide Band) در تشخیص جابجایی محوری و شعاعی بطور کامل شناخته شده است، در نتیجه ایده استفاده از این آنتن‌ها در تشخیص عیب تخلیه جزئی می‌تواند بسیار مفید باشد. زیرا اگر بتوان از این آنتن‌ها در عیب یابی تخلیه جزئی استفاده کرد می‌توان در آینده با ترکیب روش‌ها، قابلیت اطمینان ترانسفورماتور را به عنوان اساسی‌ترین تجهیز شبکه برق بالا برد. استفاده از امواج رادیویی برای تشخیص تخلیه جزئی به صورت یک اصل و قانون معتبر در استاندارد بین المللی اندازه گیری تخلیه جزئی توضیح داده شده است [14]. مکان یابی محل عیب با استفاده از سیگنال‌های الکترومغناطیسی منتشر شده از منبع تخلیه جزئی با توجه به حساسیت و دقت بالای آن، در سال‌های اخیر به یکی از

ترانسفورماتورهای قدرت در سیستم انتقال و توزیع برق نقش اساسی ایفا می‌کنند و قابلیت اطمینان آن‌ها بر روی عملکرد اقتصادی و قابلیت اطمینان شبکه تاثیر زیادی دارد. به همین خاطر مونیتورینگ بر خط ترانسفورماتور و نگهداری و تعمیر آن اهمیت زیادی برای پیش بینی شرایط خطای اولیه دارد. همانطور که مطالعه جابجایی محوری و شعاعی این تجهیز به منظور افزایش قابلیت اطمینان، بطور وسیع در حال مطالعه است. علاوه بر جابجایی محوری و شعاعی عایق بندی یک ترانسفورماتور قدرت نیز یکی از مهمترین قسمت‌ها برای عملکرد مطمئن این واحد در شبکه است. ضعیف بودن سیستم عایق بندی ممکن است منجر به زمینه سازی خروج ترانسفورماتور ناشی از خطاهای خارجی باشد. از این رو برای عملکرد مطمئن و اقتصادی، دست یابی دقیق به اطلاعات وضعیت فعلی عایق بسیار اهمیت می‌یابد. نتایج عملی بیانگر آن است که تخلیه جزئی یکی از مهمترین منابع خطاهای عایقی است. اگر خرابی‌های ناشی از تخلیه جزئی در زمان‌های اولیه تشخیص داده شود می‌توان برای تعمیرات پیشگیرانه اقدام مناسب کرد. در نتیجه باعث می‌شود با تشخیص به موقع زمان نگهداری¹ از رسیدن به زمان تعمیر² بیشتر دوری کرد. اما به دلیل ساختار پیچیده ترانسفورماتورهای قدرت، تشخیص محل دقیق عیب به صورت بر خط بسیار دشوار بوده و یکی از مشکلات شبکه‌های قدرت است. اولین گام در تشخیص برخط عیب به منظور بهبود قابلیت اطمینان استفاده از شبیه سازی می‌باشد. در این مقاله کاربرد شبیه سازی در تشخیص تعمیرات پیشگیرانه توضیح داده می‌شود.

واژه های کلیدی

آنتن UWB، نرم افزار CST، مکان یابی تخلیه جزئی، بهبود قابلیت اطمینان.

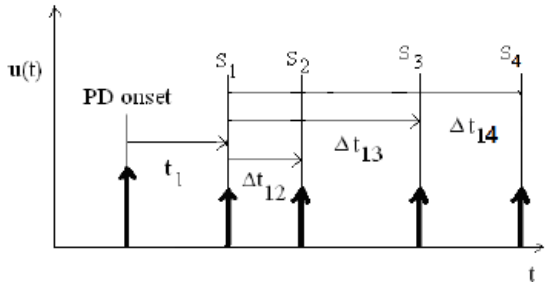
مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت در سیستم انتقال و توزیع برق نقش اساسی ایفا می‌کنند و قابلیت اطمینان آنها بر روی عملکرد اقتصادی و قابلیت اطمینان شبکه تاثیر زیادی دارد. تلفات ترانسفورماتورهای قدرت می-

¹ Maintenance time

² Expected time taking an incorrect device becomes available

کند. سیگنال‌های UWB منتشر شده را می‌توان با استفاده از آنتن-هایی که در تانک ترانسفورماتور گذاشته شده است دریافت کرد. زمان انتشار سیگنال از منبع تخلیه جزئی به آنتن‌ها را نمی‌توان تشخیص داد اما اختلاف زمانی سیگنال رسیده به یک جفت آنتن کمک می‌کند تا با یک معادله هایپربولیکی بتوان محل عیب را بر پایه روش TDOA تشخیص داد. با وجود چهار آنتن، سه معادله هایپربولیکی تشکیل می‌شود که در یک نقطه تقاطع دارند. این تفاوت زمان‌ها برای یک سیگنال، در شکل 1 بصورت شماتیک برای چهار آنتن نمایش داده شده است.



شکل 1: نمایش تفاوت زمان‌های رسیدن سیگنال از محل عیب به آنتن‌ها در روش TDOA، معادلات هایپربولیکی به صورت زیر است [17-18]:

$$(c * t_1)^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \quad (1)$$

$$(c * (t_1 + \Delta t_{12}))^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \quad (2)$$

$$(c * (t_1 + \Delta t_{13}))^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \quad (3)$$

$$(c * (t_1 + \Delta t_{14}))^2 = (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 \quad (4)$$

در این معادله C بیانگر سرعت نور در محیط و Δt_{12} ، Δt_{13} و Δt_{14} بیانگر اختلاف زمانی سیگنال رسیده از محل عیب به آنتن اول نسبت به سیگنال رسیده به آنتن‌های بعدی می‌باشد. مکان‌های آنتن‌ها که با S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 شناخته می‌شوند به ترتیب به صورت (x_1, y_1, z_1) ، (x_2, y_2, z_2) ، (x_3, y_3, z_3) و (x_4, y_4, z_4) نمایش داده می‌شوند. مکان عیب در ابتدا به صورت نامشخص است و به صورت (x, y, z) نمایش داده می‌شود و سیگنال با زمان t_1 نامشخص به اولین آنتن می‌رسد.

تحلیل سیگنال الکترومغناطیسی دریافتی از تخلیه جزئی

آزمایشات عملی و تحلیل‌های تئوری بیانگر آن است که جریان تخلیه جزئی دارای زمان اوج (rise time) بسیار سریع می‌باشد. جریان تخلیه جزئی را به صورت عددی می‌توان با معادله گوسی به صورت زیر مدل کرد [19-21]:

$$i(t) = I_0 \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

که در معادله فوق I_0 : دامنه جریان، t_0 : زمان اولیه و σ : پارامتر مشخصه شکل موج است که پهنای پالس در نصف مقدار ماکزیمم جریان (Pulse Width at Half Maximum) PWHM را تعیین می‌کند. پارامتر PWHM برای پالس تخلیه جزئی برابر

زمینه‌های مورد علاقه محققین در مونتورینگ بر خط ترانسفورماتور تبدیل شده است. شکل موج ناشی از سیگنال‌های تخلیه جزئی در حوزه زمان حاوی اطلاعات مفیدی از نوع و محل عیب تخلیه جزئی در قطعات بخصوص ترانسفورماتورهای قدرت است. با استفاده از آنتن‌های UWB (Ultra Wide Band)، امکان دستیابی به شکل موج پالس تخلیه جزئی در حوزه زمان فراهم می‌شود [15-16].

از لحاظ عملی، در سطح جهان کارهای زیادی برای مکان‌یابی عیب با آنتن‌های UWB انجام شده است [15-16] اما به دلیل اینکه قبل از آزمایشات عملی دیدگاه کاملی از شرایط بدست نیامده است، معمولاً نتایج با خطاها و اعداد متفاوتی برای تشخیص عیب روبرو شده است. همانطور که ذکر شد یکی از مزایای استفاده از UWB در تخلیه جزئی امکان ترکیب با روش تشخیص جابجایی محوری و شعاعی برای بهبود قابلیت اطمینان است. با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده یکی از مزایای دیگر استفاده از آنتن‌های UWB مقایسه با آنتن‌های مرسوم Ultra High Frequency (UHF) در زمینه دامنه سیگنال‌های دریافتی مطرح می‌شود. این شبیه‌سازی مقدمه‌ای بر بهبود قابلیت اطمینان در سال ترانسفورماتور با تشخیص عیب تخلیه جزئی است. با توسعه این روش می‌توان بسیاری از این خطاها را با استفاده از شبیه‌سازی بررسی نموده و در دنیای واقعی امکانات لازم برای پیشگیری را پیش‌بینی و پیاده‌سازی کرد. این خطاها را می‌توان با یک شبیه‌سازی مناسب قبل از انجام آزمایش عملی با بدست آوردن چگونگی نصب آنتن‌ها کاهش داد. به همین دلیل ارائه یک شبیه‌سازی مناسب امری مهم و مورد نیاز به حساب می‌آید.

در این مقاله یک ترانسفورماتور قدرت و جریان تخلیه جزئی با پیش‌موج و پس‌موج‌های متفاوت به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده و محل عیب با استفاده از سیگنال‌های منتشره محاسبه می‌شود. در این راستا، ابتدا روش TDOA (Time Difference Of Arrival) که یک روش معمول برای تحلیل سیگنال‌های رسیده به آنتن‌ها می‌باشد، توضیح داده خواهد شد. سپس با تحلیل الکترومغناطیسی از سیگنال تخلیه جزئی و تعیین مشخصات نمونه مورد مطالعه، نتایج شبیه‌سازی‌ها نمایش داده می‌شود.

بر طبق نتایج بدست آمده، نرم‌افزار CST (Computer Systems Technology) برای شبیه‌سازی و مکان‌یابی محل عیب تخلیه جزئی در سیم پیچ ترانسفورماتور با استفاده از آنتن‌های UWB بسیار مفید می‌باشد و می‌توان در آینده برای بهینه‌کردن و بهبود قابلیت اطمینان به منظور کاهش زمان تعمیر بدون نیاز به آزمایش عملی مورد استفاده قرار داد.

روش TDOA

هنگامی که در یک نقطه، پالس جریانی ناشی از تخلیه جزئی ایجاد می‌شود، بر اثر این شارش بار، سیگنال الکترومغناطیسی در محیط اطراف پراکنده می‌شود. این انتشار از معادلات ماکسول تبعیت می‌-

است. این نرم افزار قابلیت حل میدان‌های الکترومغناطیسی گذرا در دو حالت زمانی و فرکانسی با تکنیک انتگرال‌های محدود را دارد. این تکنیک، فضای مورد مطالعه را به نواحی کوچک تقسیم کرده و با مش‌بندی مناسب معادلات را حل می‌نماید [22].

همانطور که بیان شد، استفاده از آنتن‌های UWB یک روش عملی برای مونیتورینگ بر خط ترانسفورماتور می‌باشد. اما به دلیل محدودیت‌های سخت افزاری و نرم افزاری، شبیه سازی یک ترانسفورماتور قدرت با اندازه‌های واقعی آن امکان‌پذیر نمی‌باشد. در نتیجه اندازه‌های مدل را در 0.2 ضرب می‌شود. مشخصات ترانسفورماتور مورد استفاده در این مقاله از [23] استخراج شده و در جدول 1 ارائه شده است. به منظور ساده سازی مدل، تعداد لایه‌ها 5، تعداد کوپل‌ها 3 و فاصله بین کوپل‌ها 15 میلی متر در نظر گرفته شده است. شکل 3 نمای کلی هسته و شکل 4 نماهای مختلف ترانسفورماتور را در نرم افزار CST نشان می‌دهد.

جدول 1: مشخصات ترانسفورماتور مورد استفاده در شبیه سازی

3	تعداد فازها
استیل	جنس هسته
استیل	جنس بدنه تانک
mm135	قطر هسته
mm300	ارتفاع داخلی پنجره (H_w)
mm120	عرض داخلی پنجره (W_w)
mm536	ارتفاع خارجی پنجره (H)
mm624	عرض خارجی پنجره (W)
mm118	قطر یوک
mm750	ارتفاع تانک
mm840	عرض تانک
mm350	طول تانک
کاغذ آغشته به روغن	ماده عایقی بین سیم پیچ‌های H.V. و L.V. و بین سیم پیچ‌های H.V.
mm1.5	عرض عایقی بین H.V. و L.V.
mm5	عرض داکت بین H.V. و L.V.
mm221	ارتفاع H.V.
mm239	قطر خارجی H.V.
mm186.2	قطر داخلی H.V.
mm5	فاصله بین کوپل‌ها
mm0.3	عرض عایقی بین لایه‌های H.V.
8	تعداد کوپل‌های H.V.
24	تعداد لایه‌های H.V.
mm285	ارتفاع L.V.
mm156.2	قطر خارجی L.V.
mm138	قطر داخلی L.V.
پرس بورد	ماده عایقی بین لایه‌های L.V.
mm0.5	عرض عایقی بین لایه‌های L.V.
پرس بورد	ماده عایقی بین L.V. و هسته
mm1.5	عرض عایقی بین L.V. و هسته

می‌باشد که بیانگر رابطه نزدیک بین قدرت عایقی و شکل هندسی شکاف تخلیه جزئی (PD gap) می‌باشد. عموماً هر چه قطر هندسی محل عیب کمتر باشد، شیب شکل موج بیشتر و زمان اوج کمتر می‌شود. در نتیجه پارامتر مشخصه σ کوچکتر می‌شود [19]. از این رو، برای درک بیشتر وضعیت تخلیه جزئی ایجاد شده، پارامتر مشخصه σ در شکل موج جریان کمک زیادی می‌کند. با گرفتن تبدیل فوریه از (5) می‌توان معادله حالت فرکانسی جریان تخلیه جزئی را بدست آورد:

$$I(j\omega) = \sqrt{2\pi} I_0 \sigma \exp\left[-\frac{\sigma^2 \omega^2}{2}\right] \exp(-j\omega t_0) \quad (6)$$

که در این معادله ω : زاویه فرکانسی می‌باشد. جریان پالس تخلیه جزئی را می‌توان به صورت یک سری سینوسی بی‌نهایت نوشت. سیگنال الکترومغناطیسی منتشر شده را می‌توان با یک آنتن دایپل (dipole) مدل‌سازی کرد که برحسب قطر هندسی خطای عایقی، طول این آنتن (l) تعیین می‌شود. جریان متغیر با زمان مربوطه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$I = I(j\omega) \cos \omega t \quad (7)$$

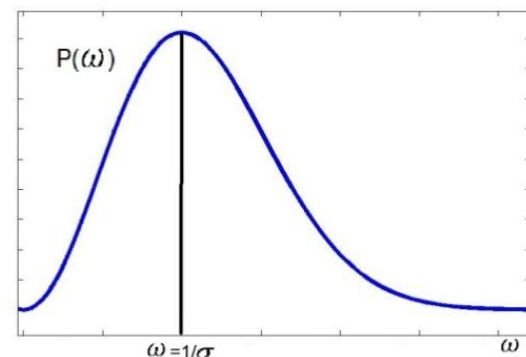
دامنه میدان منتشر شده در نقاط دور (far field) بر طبق تئوری آنتن‌ها به صورت زیر است:

$$e_k \propto I_0 \omega \sigma \exp\left(-\frac{\sigma^2 \omega^2}{2}\right) \quad (8)$$

همچنین تابع طیف فرکانسی سیگنال منتشر شده با رابطه زیر ارتباط دارد:

$$p(\omega) \propto \left(\frac{I_0 \omega \sigma l}{c}\right)^2 \exp(-\sigma^2 \omega^2) \quad (9)$$

نمودار طیف فرکانسی $P(\omega)$ برحسب ω در شکل 2 نشان داده شده است. از (9) و شکل 2 نتیجه می‌شود که بیشترین مقدار $P(\omega)$ در $\omega = \frac{1}{\sigma}$ رخ می‌دهد. بنابراین، پهنای پالس تخلیه جزئی از طریق آنالیز فرکانسی سیگنال الکترومغناطیسی ناشی از تخلیه جزئی تخمین زده می‌شود.

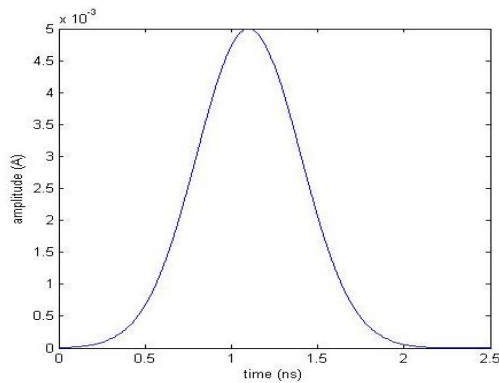


شکل 2: نمودار طیف فرکانسی سیگنال

نمونه مورد مطالعه

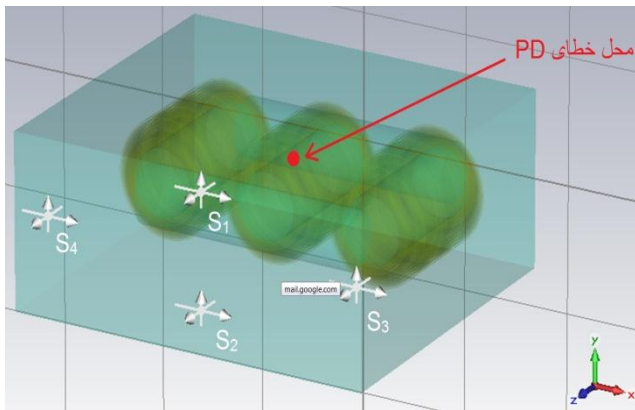
تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی براساس معادلات ماکسول انجام می‌شود. به این منظور، نرم افزار CST مورد استفاده قرار گرفته

ها و مقدار c ، مقادیر t_1 و (x, y, z) مربوط به محل خطا بدست می‌آید.



شکل 5: جریان منبع تخلیه جزئی

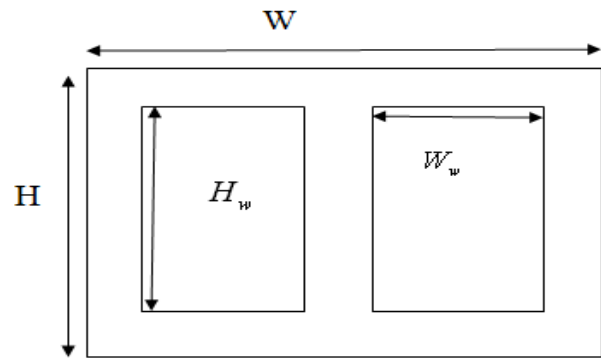
شبیه سازی به صورت زمانی و در فرکانس 0 تا 10 گیگاهرتز انجام شده است. مکان عیب تخلیه جزئی در $(0, 21.75, 78.4)$ بین سومین و چهارمین سیم پیچ H.V. داخل کاغذ آغشته به روغن گذاشته شده است. برای تشخیص سیگنال منتشر شده، چهار پروب به صورت لوزی شکل در مکان‌های $S_1(0, 22.82, 137.82)$ ، $S_2(0, -22.8, 137.82)$ ، $S_3(74.8, 0, 137.82)$ و $S_4(-74.8, 0, 137.82)$ بروی بدنه تانک ترانسفورماتور قرار داده شده است. در شکل 6، مکان چهار آنتن در بالای بدنه تانک نمایش داده شده است.



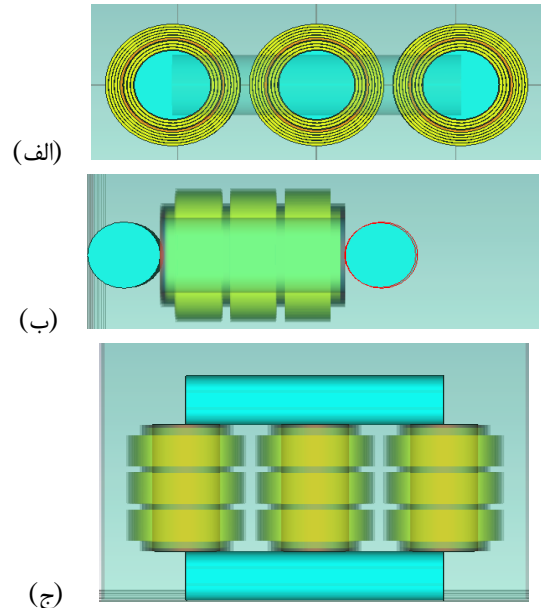
شکل 6: نمایش مکان چهار آنتن به صورت لوزی شکل در بالای بدنه تانک

جدول 2: نتایج شبیه سازی

زمان اوج (ns)	اختلاف زمانی (ns)			خطای تخمین مکان عیب نسبت به مکان واقعی عیب (mm)			
	Δt_{12}	Δt_{13}	Δt_{14}				
0.06	0.05 5	0.22	0.22	-0.8	-3.8	7.01	7.01
0.12	0.07 3	0.2	0.2	-1.8	-0.4	3.73	3.73
0.17	0.07 8	0.19	0.19	-2.5	0.89	3.22	3.22
0.4	0.06	0.13	0.13	-3.8	2.73	3.25	3.25
0.5	0.03 8	0.1	0.1	-4.8	0.66	8.01	8.01



شکل 3: نمای کلی هسته ترانسفورماتور



شکل 4: ترانسفورماتور شبیه سازی شده در CST از نمای: (الف) X-Y (ب) Y-Z (ج) X-Z

نتایج شبیه سازی

برای شبیه سازی جریان تخلیه جزئی در نرم افزار CST، یک پورت گسسته (discrete port) به عنوان منبع تخلیه جزئی با دامنه 5 میلی آمپر [19] استفاده شده است. تغییر در زمان اوج جریان تخلیه جزئی باعث تغییر در فرکانس‌های موجود در سیگنال منتشر شده از محل عیب می‌شود. هر چه زمان اوج کمتر باشد فرکانس‌های بالاتری از طریق آنتن دریافت خواهد شد. برای نشان دادن تاثیر زمان اوج شبیه سازی در 5 نمونه انجام شده است که زمان اوج جریان‌های تخلیه جزئی در آن‌ها به ترتیب 0.06، 0.12، 0.17، 0.4 و 0.5 نانو ثانیه می‌باشد. یک نمونه شکل موج تخلیه جزئی در شکل 5 نشان داده شده است.

نتایج محاسبات اختلاف زمانی سیگنال‌های رسیده و مکان تخلیه جزئی که توسط آنتن‌ها به روش TDOA تشخیص داده شده است به همراه خطای تشخیص مکان عیب در جدول 2 گرد آوری شده است. خطای تشخیص محل عیب نسبت به محل واقعی عیب بر اساس معادلات (1) تا (4) محاسبه می‌شود. در این معادلات با مشخص بودن پارامترهای Δt ، (x_i, y_i, z_i) مربوط به محل آنتن-

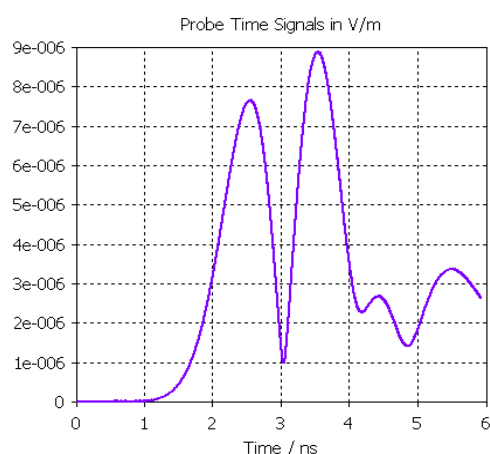
نتیجه گیری

در این مقاله روش شبیه سازی سه بعدی یک ترانسفورماتور قدرت برای تشخیص مکان عیب تخلیه جزئی با استفاده از روش TDOA معرفی شد. جریان منبع تخلیه جزئی با زمان اوج متفاوت شبیه سازی و در هر مورد با روش TDOA مکان عیب تخمین زده شد. نتایج بدست آمده با مکان واقعی عیب مقایسه و خطای هر مورد به تفکیک محاسبات لازم انجام گرفت. همانطور که ذکر شد یکی از مزایای استفاده از UWB در تخلیه جزئی امکان ترکیب با روش تشخیص جابجایی محوری و شعاعی برای بهبود قابلیت اطمینان است. با استفاده از شبیه سازی انجام شده یکی از مزایای دیگر استفاده از آنتنهای UWB در مقایسه با آنتنهای مرسوم Ultra High Frequency (UHF) در زمینه دامنه سیگنالهای دریافتی مطرح می شود. این شبیه سازی مقدمه ای بر بهبود قابلیت اطمینان (انجام اقدام لازم در زمان نگهداری و پیشگیری از رسیدن به زمان تعمیر، زیرا می دانیم زمان تعمیر بیش از زمان نگهداری طول می کشد) ترانسفورماتور با تشخیص عیب تخلیه جزئی و یافتن بهترین مکان برای آنتن ها به منظور تشخیص مکان عیب با خطای کمتر و همچنین آزمایش تخلیه جزئی با ترانسفورماتور واقعی بدون نیاز به آزمایش عملی مفید است. با توسعه این روش می توان بسیاری از این خطاها را با استفاده از شبیه سازی بررسی نموده و در دنیای واقعی امکانات لازم برای پیشگیری را پیش بینی و پیاده سازی کرد.

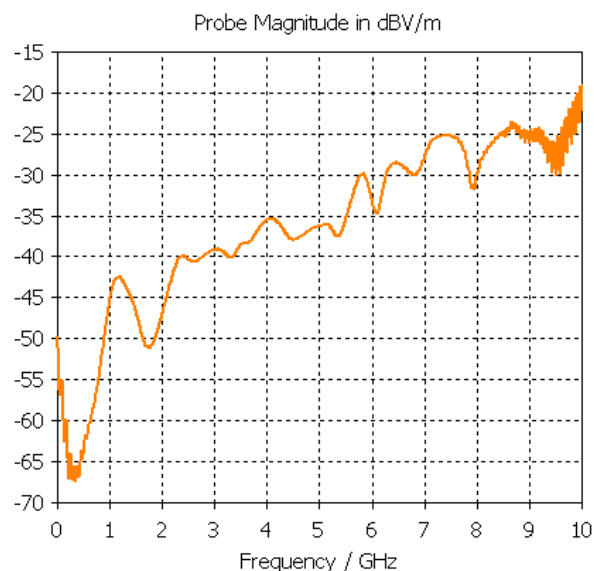
مراجع

- [1] M. Faifer, R. Ottoboni, S. Toscani, "A measurement system for the on-line diagnostics of power transformer bushings", Applied Measurements for Power Systems (AMPS), IEEE International Workshop on, pp. 80 - 84, 2011.
- [2] H. Duan, L. Dejun, "Application of improved Elman neural network based on fuzzy input for fault diagnosis in oil-filled power transformers", Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), International Conference on, pp. 28 - 31, 2011.
- [3] P. Kang, D. Birtwhistle, "Condition monitoring of power transformer on-load tap-changers. II. Detection of ageing from vibration signatures", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 148, Issue 4, pp. 307 - 311, 2001.
- [4] B. H. Ward, S. A. Lindgren, "Survey of developments in insulation monitoring of power transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 17, Issue 3, pp. 16-23, 2001 (Pubitemid 32609249).
- [5] G. C. Stone, "Practical techniques for measuring partial discharge in operating equipment", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 7, Issue 4, pp. 9-19, 1991.
- [6] V. Jeyabalan, "Coherent Phase Detection Technique for Location of Partial Discharge in Transformer Windings", Power Delivery, IEEE

یک نمونه شکل موج دریافت شده توسط یکی از آنتن ها در شکل 7 نشان داده شده است. با استفاده از این شکل می توان به وقوع عیب در ترانسفورماتور پی برد و از رسیدن به زمان تعمیر جلوگیری کرد. از جدول 2 می توان دریافت که افزایش زمان اوج سیگنال منجر به کاهش باند فرکانسی در پورت سیگنال شده و در نتیجه بر اثر پراکندگی موج، سیگنال منتشر شده با زمان بیشتری به پروب می رسد. آنتنهای S_3 و S_4 به دلیل اینکه نسبت به پورت دارای تقارن می باشند نتایج آنها یکسان است. بر طبق نتایج نشان داده شده در جدول 2 بدترین جواب ها نیز مربوط به این دو آنتن می باشند. زیرا مسیر مستقیم بین پورت تخلیه جزئی و این پروب ها علاوه بر این که طولانی ترین مسیر است، از مواد مختلفی عبور می کند که باعث بزرگتر شدن خطا می شود.



شکل 7: نمونه سیگنال دریافت شده در پروب



شکل 8: شکل موج رسیده به پروب در حوزه فرکانس (زمان اوج برابر 0.12ns)

شکل 8 یک نمونه از سیگنال رسیده به پروب را در حوزه فرکانس (در زمان اوج 0.12 نانوثانیه) برای فرکانسهای 0 تا 10 گیگاهرتز بر حسب $\frac{dB}{m}$ نمایش می دهد.

- RF partial discharges signals", Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on, 2012 , pp. 891 - 896.
- [19] L. Zhou; W. Li, "Characteristic Estimation of Partial Discharge from Its Radiating Signal", Information, Communications and Signal Processing, Fifth International Conference on, pp. 757- 760, 2005.
- [20] R. Sarathi, A. V. Giridhar, A. Mani and K. Sethupathi, "Investigation of Partial Discharge Activity of Conducting Particles in Liquid Nitrogen under DC voltages using UHF Technique", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 3; June 2008.
- [21] L. Zhou; W. Li; Sh. Su, "The deduction of partial discharge pulse current from its radiating UHF signal", The 7th International Power Engineering Conference (IPEC), pp. 1-193, 2005.
- [22] D. Denissov, W. Köhler, S. Tenbohlen, R. Grund, T. Klein, "OPTIMIZATION OF UHF SENSOR GEOMETRY FOR ON-LINE PARTIAL DISCHARGE DETECTION IN CABLE TERMINATIONS", Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009 SAIEE, ISBN 978-0- 620-44584-9.
- [23] A. k. SAWHNEY, "Principles of Electrical Machines Design" Published by J.C, Fifth Edition in 1984.
- Transactions on, Vol. 26, Issue 4, pp. 2885 - 2886, 2011.
- [7] V. Jeyabalan, U. Usa, "Statistical Techniques for Partial-Discharge Location in Transformer Windings", Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 26, Issue 3, pp. 2064 - 2065, 2011.
- [8] V. Jeyabalan, S. Usa, "Frequency domain correlation technique for PD location in transformer winding", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 16, Issue 4, pp. 1160-1167, 2009.
- [9] S. Markalous, S. Tenbohlen, K. Feser, "Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, Vol. 15, Issue 6, pp. 1576-1583, 2008.
- [10] J. Tang, Y. Xie, "Partial discharge location based on time difference of energy accumulation curve of multiple signals", Electric Power Applications, IET, Vol. 5, Issue 1, pp. 175-180, 2011.
- [11] S. A. Ashraf, B. G. Stewart, Ch. Zhou, D. Hepburn, J. M. Jahabar, "Numerical Simulation of Partial Discharge Acoustic signals", High Voltage Engineering and Application, ICHVE, International Conference on, pp. 577-579, 2008.
- [12] S. Tenbohlen, A. Pfeffer, S. Coenen, "On-site experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and acoustic PD localization", Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the IEEE International Symposium on, pp. 1-5, 2010.
- [13] X. Song, Ch. Zhou, D. M. Hepburn, "An Algorithm for Identifying the Arrival Time of PD Pulses for PD Source Location", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, Annual Report Conference on, pp. 379-382, 2008.
- [14] CIGRE TF15/33.03.05. Partial discharge system for GIS: Sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method.
- [15] Y. Bo; Ch. Xiaolin; S. Xiang; H. Xie, "Study on the aging condition of stator bar based on Ultra-wideband PD detection technique", Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 7th International Conference on, Vol. 1, pp. 220- 223, 2003.
- [16] S. Jiancheng; X. Hengkun; Ch. Yonghong, "Study on UWB frequency characteristics of partial discharge as a criterion of aging degree of stator winding insulation", Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 6th International Conference on, vol.1, pp. 181 - 184, 2000.
- [17] Ch. Wenzhi, T. Zhiguo, L. Chengrong, Zh. Shusheng, W. Hao, W. Caixiong, L. Ru, Sh. Kang, "Development and application of data analysis software for transformers PD UWB RF location", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Annual Report Conference on, 2010, pp. 1-4.
- [18] O. El Mountassir, B. G. Stewart, S. G. McMeekin, A. Ahmadiania, "Effect of sampling rate on the location accuracy of measurements from radiated