

## مونیتورینگ وضعیت عایق ترانسفورماتور با استفاده از اندازه گیری جریان پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون

بهزاد کیوانی  
دانشگاه صنعتی مالک اشتر  
behzad\_keivani@yahoo.com

ناهید کیوانی  
شرکت ایران ترانسفو- زنجان  
n.keivani@iran-transfo.com

### چکیده :

عملکرد صحیح و عاری از عیب ترانسفورماتورها در سیستم های قدرت از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. قابلیت اطمینان یک ترانسفورماتور تحت تأثیر وضعیت مواد عایقی بکار رفته در آن می باشد. اندازه گیری و ارزیابی پاسخ دی الکتریک یک از روشهای مونیتورینگ وضعیت عایق ترانسفورماتور ها می باشد. رطوبت و پیری تأثیر عمده ای در مشخصات دی الکتریک سیستم عایق کاغذ آغشته به روغن دارد. در این مقاله، از روش آنالیز جریان پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون که یک روش غیر مخرب تست عایق می باشد، برای تخمین میزان فرسودگی مواد عایقی ترانسفورماتور استفاده می شود.

واژه های کلیدی: تست دی الکتریک ، ترانسفورماتور ، سیستم عایقی

### ۱- مقدمه :

فرسودگی سیستم عایق کاغذ آغشته به روغن تحت تاثیر تنشهای حرارتی، شیمیایی و الکترومکانیکی قرار دارد. تنشهای حرارتی باعث تخریب سلولز موجود در عایق کاغذ و در نتیجه باعث تولید آب می شود که وجود این آب باعث کاهش ولتاژ شکست عایقی و تسریع فرسودگی عایق می گردد. با توجه به اینکه میزان هدایت مواد عایق مستقیمابه میزان رطوبت موجود در آن بستگی دارد، بنابراین آگاهی از میزان هدایت و به تبع آن محتوای رطوبت کاغذ و روغن ترانسفورماتور می تواند بعنوان معیاری برای خشک کردن یا تعویض مواد عایقی استفاده شود. استفاده از آنالیز جریان پلاریزاسیون روش مناسبی برای جداسازی تاثیرات رطوبت و پیری در تخریب سیستم عایقی ترانسفورماتور می باشد. همچنین این روش اطلاعات مفیدی درباره میزان رسانایی روغن و عایق کاغذی (بطور جداگانه ) را در برخواهد داشت.

## ۲- تئوری اساسی پاسخ دی الکتریک

اگر ماده عایق، یک ماده خطی، همگن و ایزوتروپیک فرض شود بصورت زیر از قانون آمپر تبعیت خواهد کرد: [۱]

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (۱)$$

در فضای آزاد یا خلا بردار جابجایی  $D(t)$  با میدان الکتریکی  $E(t)$  متناسب است. در مورد مواد دی الکتریک ایزوتروپیک، رابطه بین بردار جابجایی و میدان الکتریکی بصورت زیر خواهد بود:

$$D(t) = \epsilon_0 \epsilon_r E(t) + P(t) \quad (۲)$$

که در آن  $P(t)$  بردار پلاریزاسیون و  $\epsilon_r$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب قابلیت گذردهی خلا و ماده دی الکتریک می باشد. در صورتیکه یک میدان الکتریکی همگن به ماده دی الکتریک اعمال شود، چگالی جریان در ماده دی الکتریک باتوجه به قانون آمپر با معادله زیر بیان می شود:

$$\nabla \times H = \sigma E(t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E(t)}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (۳)$$

که در آن  $\sigma$  هدایت  $DC$  می باشد. قسمت اول معادله فوق جریان القائی است که بواسطه رسانایی حجمی مواد ( $\sigma$ ) ایجاد می گردد. قسمت دوم جریان جابجایی و قسمت سوم نیز جریان پلاریزاسیون می باشد. بردار پلاریزاسیون خود به دو قسمت تقسیم می شود. قسمت اول که "پلاریزاسیون سریع" نام دارد و تحت تاثیر میدان الکتریکی اعمال شده می باشد و قسمت دوم نیز که "پلاریزاسیون کند" نام دارد از انتگرال کانولوشن بین میدان الکتریکی اعمال شده و تابع  $f(t)$  که تابع پاسخ دی الکتریک نام دارد، تشکیل شده است [۲]:

$$P(t) = \epsilon_0 \chi_e E(t) + \Delta P(t) = \epsilon_0 \chi_e E(t) + \epsilon_0 \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (۴)$$

تابع پاسخ دی الکتریک که بیانگر خاصیت حافظه در ماده دی الکتریک می باشد دارای خواص زیر می باشد [۳]:

$$f(t) \equiv 0 \quad \forall t > 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0 \quad (۵)$$

## ۲- محاسبه جریان پلاریزاسیون:

برای محاسبه جریان پلاریزاسیون در حوزه زمان، پروسه پلاریزاسیون کند را مورد بررسی قرار می دهیم و از پلاریزاسیون سریع صرفنظر می کنیم. در اینصورت چگالی جریان عبوری از سطح ماده دی الکتریک را می توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{dD(t)}{dt} = \sigma E(t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{dE(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \quad (۶)$$

در مورد یک ماده همگن می توان چنین در نظر گرفت که شدت میدان  $E(t)$  ناشی از اعمال ولتاژ خارجی  $U(t)$  می باشد و جریان نیز از یک خازن با ظرفیت هندسی  $C_0$  عبور می کند که می تواند با رابطه زیر بیان گردد:

$$i(t) = C_0 \left[ \frac{\sigma}{\epsilon_0} U(t) + \epsilon_r \frac{dU(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) U(\tau) d\tau \right] \quad (۷)$$

فرض می کنیم که ماده مورد آزمایش بطور کامل دشارژ شده و سپس یک ولتاژ پله با مشخصه زیر به آن اعمال شده است.

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ U_0 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t > t_1 \end{cases} \quad (۸)$$

اعمال این ولتاژ باعث می شود تا جریان در زمانهای قبل از  $t=0$  صفر بوده و در بازه زمانی جریانی که جریان پلاریزاسیون نامیده می شود، از جسم عبور کند. جریان پلاریزاسیون از دو قسمت تشکیل شده است. یک قسمت مربوط به رسانایی ماده و قسمت دیگر مربوط به پروسه پلاریزاسیون متفاوت می باشد. جریان پلاریزاسیون (شارژ کننده) عبوری از ماده با رابطه زیر بیان می شود:

$$ip(t) = C_0 U_0 \left[ \frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right] \quad (9)$$

هنگامیکه ولتاژ پله حذف شده و ماده اتصال کوتاه شود، جریان دی پلاریزاسیون ایجاد خواهد شد که با رابطه زیر بیان می شود:

$$id(t) = -C_0 U_0 [f(t) - f(t+t_1)] \quad (10)$$

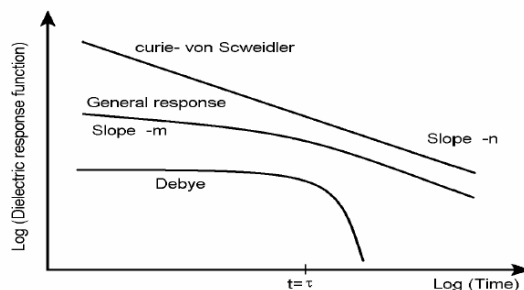
که  $t_1$  زمان اعمال ولتاژ پله به ماده می باشد.  $C_0$  ظرفیت هندسی ماده دی الکتریک می باشد که از رابطه  $C_0 = C/\epsilon_r$  بدست می آید و مقدار  $C$  نیز از طریق اندازه گیری در فرکانس قدرت بدست می آید.

### ۳- تخمین پاسخ دی الکتریک:

برای محاسبه و تخمین تابع پاسخ دی الکتریک  $f(t)$  با استفاده از اندازه گیری جریان دی پلاریزاسیون، فرض می شود که تابع پاسخ دی الکتریک یک تابع نزولی با زمان است. بنابراین اگر مدت زمان پلاریزاسیون به اندازه کافی طولانی باشد، بطوریکه  $f(t+t_1) \approx 0$  شود، تابع پاسخ دی الکتریک متناسب با جریان دی پلاریزاسیون خواهد بود. بنابراین از معادله (۱۰) داریم:

$$f(t) \approx \frac{-id(t)}{C_0 U_0} \quad (11)$$

مواد دی الکتریک مختلف هر کدام تابع پاسخ دی الکتریک مخصوص بخود دارند. [۴] در شکل (۱) برخی توابع پاسخ دی الکتریک معمول مشخص شده است.



شکل (۱): برخی توابع پاسخ دی الکتریک مرسوم

در مورد مایعات قطبی تابع مانند تابع Deby می باشد که با رابطه زیر مشخص می شود:

$$f(t) = \frac{\Delta \epsilon}{\tau_D} e^{-\frac{t}{\tau_D}} \quad (12)$$

تابع پاسخ دی الکتریک اکثراً مواد جامد در بازه وسیعی از زمان از مدل Curie von Schweidler تبعیت می کند:

$$f(t) = A t^{-n} \quad (13)$$

برای سیستم عایق کاغذ آغشته به روغن "تابع پاسخ عمومی" به صورت زیر بیان می شود: [۴ و ۵]

$$f(t) = \frac{A}{\left(\frac{t}{t_0}\right)^n + \left(\frac{t}{t_0}\right)^m}, \quad A, t_0 > 0, m, n > 0, m > 1 \quad (14)$$

#### ۴- تخمین رسانایی:

با استفاده از اندازه گیری جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون امکان تخمین رسانایی DC ماده مورد آزمایش وجود دارد. در صورتی که ماده مورد آزمایش به مدت طولانی و کافی شارژ شود، بطوریکه  $f(t+t_1) \approx 0$  شود، با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) داریم:

$$\sigma_r \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} (i_p(t) - i_d(t)) \quad (15)$$

رابطه فوق بیانگر میزان رسانایی مرکب سیستم عایقی می باشد. برای تخمین جداگانه رسانایی روغن و کاغذ لازم است سیستم عایقی را به صورت ترکیب سری عایقهای روغن و کاغذ در نظر بگیریم. (شکل ۲)

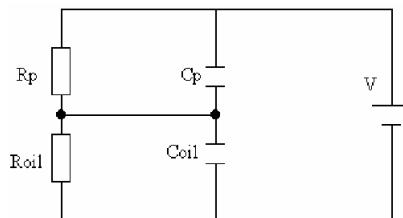


شکل (۲): سیستم عایقی مرکب

در شکل (۲) مقدار نسبی کاغذ موجود در سیستم است. محدوده تغییرات  $X$  در ترانسفورماتور معمولاً بین ۲۰ تا ۵۰ درصد می باشد. [۶] برای محاسبه دقیق مقدار  $X$  لازم است ساختار دقیق سیستم عایقی و پارامترهای طراحی آن مشخص شود. رسانایی کل سیستم با رابطه زیر به رسانایی روغن و کاغذ مربوط می شود: [۷]

$$\sigma_r \approx \frac{\varepsilon_0}{C_0 U_0} (i_p(t) - i_d(t)) \quad (16)$$

در رابطه فوق که بیانگر میزان رسانایی مرکب سیستم عایقی می باشد،  $i_p(t)$  و  $i_d(t)$  به ترتیب مقادیر نهایی جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون می باشند. برای تخمین جداگانه رسانایی روغن و کاغذ لازم است سیستم عایقی را به صورت ترکیب سری عایقهای روغن و کاغذ در نظر بگیریم. مقدار اولیه جریان پلاریزاسیون، معمولاً تحت تاثیر رسانایی روغن قرار دارد و رسانایی کاغذ تاثیری در آن ندارد. برای محاسبه جداگانه رسانایی روغن و کاغذ مدار شکل ۳ را در نظر می گیریم.



شکل (۳) دیاگرام شماتیک سیستم عایق ترانسفورماتور برای محاسبه رسانایی روغن و کاغذ

با توجه به شکل ۳ داریم:

$$V_{oil} = U_0 \frac{C_{paper}}{C_{paper} + C_{oil}} \quad (17)$$

و همچنین:

$$R_{oil} = \rho_{oil} \frac{1-X}{A} = \frac{1}{\sigma_{oil}} \left( \frac{1-X}{A} \right) \quad (18)$$

که در رابطه فوق  $1-X$  مقدار نسبی عایق روغن و  $A$  سطح مقطع موثر سیستم عایق ترانسفورماتور می باشد. برای محاسبه  $C_{paper}$  و  $C_{oil}$  داریم:

$$C_{paper} = \varepsilon_0 \varepsilon_{paper} \cdot \frac{A}{X} \quad (19)$$

$$C_{oil} = \varepsilon_0 \varepsilon_{oil} \cdot \frac{A}{1-X} \quad (20)$$

قابلیت گذردهی نسبی کل سیستم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{paper} \cdot \varepsilon_{oil}}{\varepsilon_{paper}(1-X) + \varepsilon_{oil} \cdot X} \quad (21)$$

با جاگذاری روابط ۱۸ تا ۲۱ در رابطه ۱۷ و با استفاده از رابطه زیر می‌توان مقدار اولیه جریان پلاریزاسیون را محاسبه نمود.

$$i_p(0) = \frac{V_{oil}}{R_{oil}} = \frac{U_0 \cdot \sigma_{oil} \cdot \varepsilon_r \cdot A}{\varepsilon_{oil}} \quad (22)$$

از طرفی ظرفیت خازنی هندسی ترانسفورماتور در واحد طول با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot A \quad (23)$$

بنابراین می‌توان رسانایی روغن را به صورت زیر بدست آورد:

$$\sigma_{oil} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{oil}}{\varepsilon_r C_0 U_0} \cdot i_p(0) \quad (24)$$

با توجه به اینکه در موارد عملی  $\sigma_{oil} \gg \sigma_{paper}$  می‌باشد، معمولاً مقدار نهایی (حالت دائم) جریان پلاریزاسیون فقط تحت تاثیر رسانایی کاغذ خواهد بود. بنابراین برای محاسبه رسانایی کاغذ می‌توان از مقادیر نهایی جریان پلاریزاسیون استفاده نمود. اگر مقاومت کل سیستم عایقی را  $R_r$  بنامیم خواهیم داشت:

$$R_r = R_{paper} + R_{oil} = \frac{1}{\sigma_r} \cdot \frac{1}{A} \quad (25)$$

و همچنین:

$$R_{paper} = \frac{1}{\sigma_{paper}} \cdot \frac{X}{A} \quad (26)$$

با جاگذاری روابط ۲۶ و ۱۸ در رابطه ۲۵ داریم:

$$\frac{1}{\sigma_r} = \frac{X \cdot \sigma_{oil} + (1-X) \cdot \sigma_{paper}}{\sigma_{oil} \cdot \sigma_{paper}} \quad (27)$$

رابطه فوق رسانایی کل سیستم عایقی را بر حسب رسانایی روغن و کاغذ بیان می‌کند. از طرفی اگر همان مراحل را که برای محاسبه  $i_p(0^+)$  انجام شد، در مورد  $i_p(\infty)$  انجام دهیم، خواهیم داشت:

$$i_p(\infty) = \frac{V_{paper}}{R_{paper}} = \frac{C_0 \cdot U_0 \cdot \sigma_{paper}}{\varepsilon_0 \cdot X} \quad (28)$$

بنابراین رسانایی کاغذ بصورت زیر محاسبه می‌شود:

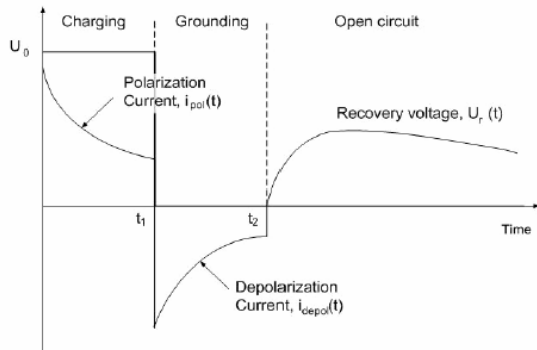
$$\sigma_{paper} = \frac{\varepsilon_0 \cdot X}{C_0 \cdot U_0} \cdot i_p(\infty) \quad (29)$$

در شکل ۲ مقدار نسبی کاغذ موجود در سیستم است. محدوده تغییرات  $X$  در ترانسفورماتور معمولاً بین ۲۰ تا ۵۰ درصد می‌باشد [۶]. برای محاسبه دقیقتر مقدار  $X$  لازم است ساختار دقیق سیستم عایقی و پارامترهای طراحی آن مشخص شود. همچنین مقادیر  $\varepsilon_{oil}$  و  $\varepsilon_{paper}$  به ترتیب برابر ۲/۲ و ۴/۵ در نظر گرفته می‌شود.

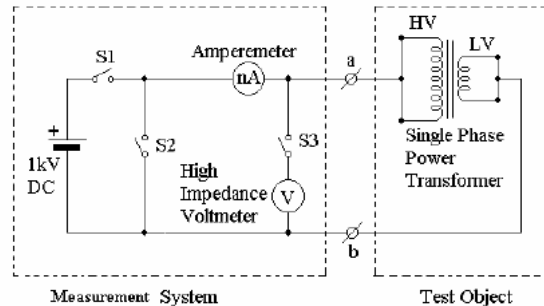
## ۵- اندازه گیری جریان پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون

برای اندازه گیری جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون یک ولتاژ پله با مشخصه ذکر شده در رابطه (۸) به مدت تقریباً زیاد و در حدود ۱۰۰۰۰ ثانیه به ماده مورد آزمایش اعمال می‌گردد. برای اینکه سیستم عایقی یک ترانس مورد آزمایش قرار گیرد، لازم است تا ترمینالهای فشارقوی و فشار ضعیف بصورتی که در شکل (۳) مشخص شده است، بهم وصل شوند. در شکل (۴) دیاگرام ساده ای از مدار تست دی الکتریک یک ترانس ترسیم شده است. در شکل (۵) نیز

ولتاژ اعمالی و جریانهای عبوری در طی مدت زمان اعمال ولتاژ مشخص شده اند. پس از طی زمان یاد شده، ولتاژ پله حذف شده و ماده دی الکتریک اتصال کوتاه می گردد. در این حالت با گذشت زمان جریان دی پلاریزاسیون با علامت منفی، افزایش می یابد. جریان های پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون تحت تاثیر خواص مواد عایق و همچنین



شکل (۵): نمودار ولتاژ و جریان در تست دی الکتریک



شکل (۴): مدار تست دی الکتریک

ساختار هندسی سیستم عایق قرار دارند. [۸]

#### ۵- مثال عملی و آنالیز نتایج: [۹]

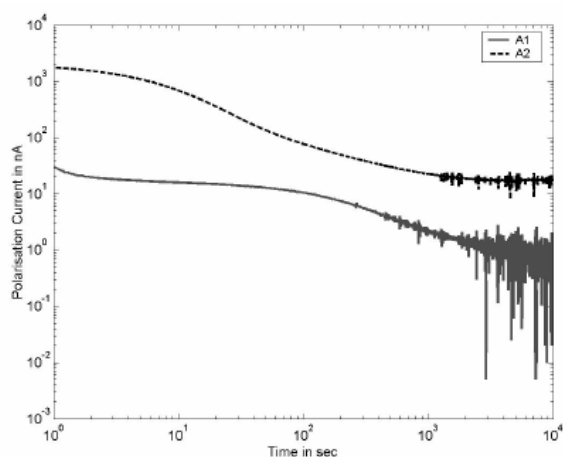
رسانایی روغن تاثیر زیادی در مقدار اولیه جریان P/D دارد. میزان رطوبت و رسانایی عایق کاغذی نیز تاثیر عمده در میزان جریان حالت دائم (مؤلفه DC ثابت جریان) دارد. بنابراین از مقادیر اولیه جریان پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون می توان میزان رسانایی روغن را تخمین زد و نیازی به اندازه گیری مستقیم رسانایی نمونه های روغن ترانس وجود نخواهد داشت. بطور مشابه تخمین رسانایی عایق کاغذ نیز از طریق اندازه گیری مقادیر حالت ماندگار جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون امکانپذیر خواهد بود. محاسبه و مدل سازی تابع پاسخ از طریق جریانهای دی پلاریزاسیون متناظر انجام می شود. برای این منظور لازم است نرم افزاری برای محاسبه و fitting منحنی های جریان دی پلاریزاسیون و بدست آوردن تابع پاسخ به شکل پارامتری طراحی شود و سپس با توجه به مقادیر  $f(t)$  و سایر اطلاعات ساختاری مانند ظرفیت بین عایق ها، رسانایی روغن و کاغذ محاسبه می شود. برای اینکه روش بیان شده در این مقاله روشن شود، نتایج اندازه گیری PDC بر روی ۳ ترانسفورماتور فرسوده مورد تحلیل قرار می گیرد. مشخصات ترانسفورماتورهای بکار رفته در جدول (۱) بیان شده است.

ملاحظات	سال ساخت	اتصال	نسبت ولتاژ (KV)	توان نامی (MVA)	ترانسفورماتور
کم بار	۱۳۶۲	Y/Δ	66/11	7	A1
پر بار	۱۳۶۴	Y/Y/Δ	132/66/1	30	A2
قبل از تعویض روغن	۱۳۶۴	Y/Y/Δ	330/132/16	100	B1
بعد از تعویض روغن	۱۳۶۵	Y/Y/Δ	330/132/16	100	B2

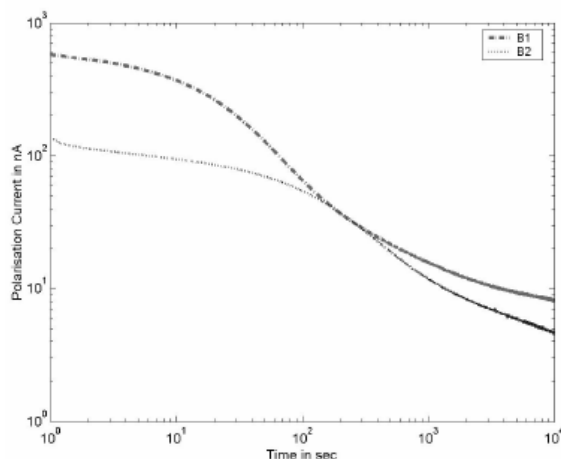
جدول (۱): مشخصات ترانسفورماتورهای مورد تست

برای روشن تر بودن نتایج و همچنین تاثیر کیفیت روغن آزمایش بر روی ترانس سوم در دو حالت انجام می شود. یکبار قبل از تعویض روغن و بار دوم بعد از تعویض روغن. نتایج مربوط به اندازه گیری PDC در شکل های (۶) تا (۹) مشخص شده است. از شکل های ۸ و ۹ آشکار است که مقادیر جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون برای ترانسفورماتور A2 بزرگتر از A1 می باشد که حاکی از ضعیف تر بودن سیستم عایقی ترانسفورماتور A2 نسبت به A1 می باشد که این موضوع نیز با توجه به شکل منحنی ها و مطالب ذکر شده به روشنی آشکار است. همچنین با توجه به شکل های ۶ و ۸ مشخص است که مقادیر اولیه جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون در مورد ترانس A1 یکنواخت تر از منحنی

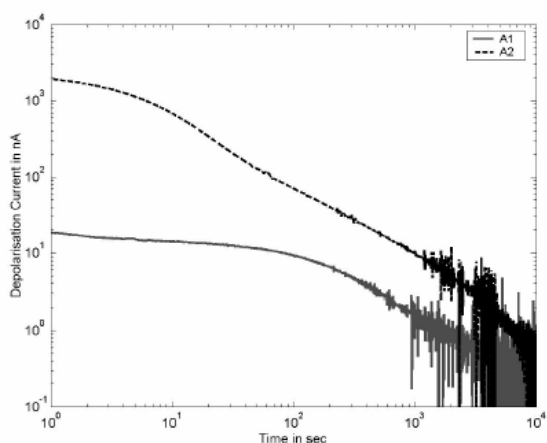
های مربوط به A2 می باشد که نشان دهنده میزان کمتر رطوبت روغن در ترانسفورماتور A1 نسبت به A2 می باشد. مقادیر رسانایی روغن و کاغذ با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون محاسبه و در جدول (۲) مشخص شده است. با توجه به این مقادیر که نشان دهنده مقدار رسانایی کمتر روغن و کاغذ ترانس A1 نسبت به A2 می باشد می توان دریافت که میزان تخریب عایق در ترانس A2 بیشتر می باشد. شکل های ۹ و ۷ منحنی های جریان پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون را برای ترانس دوم در دو حالت مورد آزمایش نشان می دهد. مشخص است که مقادیر جریانهای پلاریزاسیون و دی پلاریزاسیون در مقادیر اولیه در مورد B1 بیشتر از B2 می باشد. همچنین تست های اولیه منحنی ها در مورد B1 زودتر از دچار انحراف و خمیدگی شده اند. این مورد نشانگر آن است که با تعویض روغن میزان رطوبت روغن کاهش چشمگیری یافته است که این موضوع با استفاده از نتایج آنالیز گازهای محلول نیز که در جدول (۳) مشخص شده نیز به روشنی قابل درک است. قسمتهای نهایی منحنی های PDC اختلاف قابل توجهی ندارد که این موضوع حاکی از آن است که تعویض روغن تاثیر چندانی در میزان فرسودگی عایق کاغذ ندارد. چنانکه انتظار داریم محتوای ترکیبات فوران A1 و B2 نسبت به A2 و B1 بسیار کمتر می باشد. لازم به ذکر است که تصفیه و یا تعویض روغن باعث کاهش قابل توجه محتوی رطوبت و ترکیبات furan می شود.



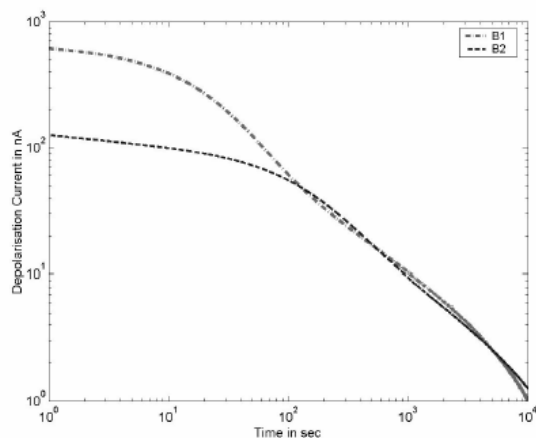
شکل (۶) جریان پلاریزاسیون ترانسفورماتورهای A1 و A2



شکل (۷) جریان پلاریزاسیون ترانسفورماتورهای B1 و B2



شکل (۸) جریان دی پلاریزاسیون ترانسفورماتورهای A1 و A2



شکل (۹) جریان دی پلاریزاسیون ترانسفورماتورهای B1 و B2

ترانسفورماتور	رسانایی روغن (s/m)	رسانایی کاغذ (s/m)
A1	$2.3 \times 10^{-13}$	$0.9 \times 10^{-14}$
A2	$15.4 \times 10^{-13}$	$22.6 \times 10^{-14}$
B1	$10.1 \times 10^{-13}$	$17.6 \times 10^{-14}$
B2	$6.25 \times 10^{-13}$	$8.53 \times 10^{-14}$

جدول (۲): رسانایی روغن و کاغذ

ترانسفورماتور	رطوبت در کاغذ (%)	رطوبت در روغن (%)	2-furfuraldehyde $\mu\text{g/g}$
A1	-	-	۰/۰۲
A2	-	-	۱/۰۳
B1	۲۸	۵/۴	۱/۹
B2	۱۰	۱/۴	۰/۲۶

جدول (۳): نتایج آنالیز گازهای محلول و ترکیبات فورانیک

#### ۶- نتیجه گیری:

در این مقاله یک روش جدید و غیر مخرب برای مونیتورینگ وضعیت عایق ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این روش ارزیابی وضعیت عایق کاغذ و روغن بطور جداگانه امکان پذیر خواهد بود. استفاده از این روش برای مونیتورینگ وضعیت عایقی سایر تجهیزات مانند کابلها، موتورها و ترانسفورماتورهای کم فشار خواهد بود. بحث درباره طراحی نرم افزارهای آنالیز دقیق نتایج آزمایش، در این مجال اندک امکان پذیر نمی باشد.

#### ۷- مراجع:

- [1] D.K.Cheng, Field & Wave Electromagnetics. Westly, pp.100-115, 1989
- [2] M.Farahani and H.Borsi, "Calculation & Measurement of Dielectric Response Function" *CIGRE Working Group* pp.1-5, 2001
- [3] A.Helgeson, "Analysis of Dielectric Response" 11<sup>th</sup> Int. Symp. On H.V Eng. London, UK 1999, pp.1-5
- [4] A.K.Soscher, Polarisation / depolarization in solids, Chelsea, Dielectric Press, 1994
- [5] A.Helgeson, U.Gafvert " Calculation of the Dielectric Resoonse Function from Recovery Voltage Measurement s ", CEIDP, USA, PP.97-101, 1995
- [6] U.Gafvert and E.Ildstad, " Modeling Return Voltage Measurement of Multi-Layer Insulation Systems", Proc.4<sup>th</sup> Int. Conf. On Properties & Application of Dielectric Materials, AUS, pp.123-126, 1994
- [7] G.Frimpong and J.Fuhr "Measurement & Modeling of Dielectric Response of Composite Oil/Paper Insulation" Proc.5<sup>th</sup> Int. Conf. On Properties & Application of Dielectric Materials, AUS, Vol.1, pp.86-89, 1997
- [8] T.K.Saha and Z.T.Yao "Analysis & Modeling of Dielectric Response of Power Transformer Insulation", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.12, pp.1555-61, 2002