

تحلیل بارداری استاتیکی روغن ترانسفورماتورها با استفاده از سیستم مدار بسته

بهروز وحیدی
 استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
 قادر رسولی هاشم آباد
 کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

بارداری استاتیکی ناشی از گردش روغن به عنوان عامل اصلی چندین شکست الکتریکی در ترانسفورماتورهای بزرگ خنک شونده با روغن شناسایی شده است. افزایش ظرفیت و ولتاژ نامی ترانسفورماتورهای قدرت در دو دهه اخیر موجب شده است که بررسی این پدیده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردد. در این مقاله ماهیت این پدیده، مکانیزم تولید بار و نحوه تجمع آنها که در نهایت منجر به شکست الکتریکی می‌شود توصیف شده است. مدار آزمایشگاهی حلقه بسته به منظور بررسی پدیده بارداری استاتیکی مورد استفاده قرار گرفته و به صورت تئوری برای جریان رانشی نسبی در داخل الکتروود فرمول محاسباتی دقیقی ارائه شده است. در انتها از روی نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، تاثیر دما، سرعت گردش روغن و اثر توقف گردش روغن بر پدیده بارداری بررسی و تحلیل شده است.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور، بارداری استاتیکی، روغن، شکست الکتریکی.

Transformers' Oil Static Electrification Analysis by Using Closed Cycle System

B. Vahidi
 Gh. Rassuly Hashemabad
 Dept. of Elect. Eng., Amir Kabir University of Technology
 Dept. of Elect. Eng., Amir Kabir University of Technology

Abstract

Static electrification of transformer oil due to oil circulation is main reason of several breakdown in power transformers. In last twenty years nominal power and voltage of transformers are increased rapidly, therefore analysis of this phenomena is very important. In the present paper mechanism of charge production and accumulation, which leads to breakdown is described. Closed cycle test configuration is used to investigating the phenomena and theoretical calculation is presented. Finally the effects of temperature, oil circulation velocity and oil stop on phenomena is investigated and analyzed.

Keywords: Transformer, Static electrification, Oil, Electrical breakdown.

۱- مقدمه

ترانسفورماتور قدرت یک جزء مهم و گران قیمت سیستم قدرت می‌باشد لذا عملکرد صحیح آن یک نیاز اساسی می‌باشد. بارداری استاتیکی ناشی از گردش روغن به عنوان عامل اصلی چندین شکست الکتریکی در ترانسفورماتورهای بزرگ خنک‌شونده با روغن شناسایی شده است که موجب نگرانی سازندگان و استفاده‌کنندگان این وسایل شده است. برای نخستین بار در ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۸۴ توسط کرافتس^۱ گزارشی در مورد خطا در ترانسفورماتور ناشی از جمع شدن بار استاتیکی گزارش شد [۱ و ۲] و در سال ۱۹۸۵ توسط دیکسن^۲ [۱ و ۳] و دیتزلر^۳ [۱ و ۴] گزارش مشابهی انتشار یافت. در سال ۱۹۸۶ در آفریقای جنوبی گزارشی در مورد خطای ترانسفورماتور ناشی از جمع شدن بار استاتیکی توسط هوچارت^۴ و گراندجین^۵ منتشر شد [۱ و ۵]. در استرالیا دو گزارش جداگانه توسط کراس^۶ [۱ و ۶] و انگلیز^۷ [۱ و ۷] در این مورد در سال ۱۹۸۸ انتشار یافت و این‌ها از اولین گزارشات در مورد وقوع خطا در ترانسفورماتورهای قدرت ناشی از بار استاتیکی بود. افزایش ظرفیت و ولتاژ نامی ترانسفورماتورها در دو دهه اخیر موجب شده است که اهمیت بررسی این پدیده بیشتر شود. افزایش ظرفیت ترانسفورماتورها موجب افزایش سرعت گردش روغن جهت بهبود امر خنک‌کنندگی سیم‌پیچ‌ها می‌شود. همچنین افزایش ولتاژ نامی موجب افزایش مقدار مواد عایق جهت افزایش استقامت الکتریکی آن شده و این عوامل باعث می‌شوند که مقدار بار ایجاد شده افزایش یابد به طوری که امروزه نه تنها تأثیرات پدیده بارداری استاتیکی قابل چشم‌پوشی نیست بلکه این پدیده به صورت یکی از فاکتورهای اساسی در طراحی ترانسفورماتور در آمده است تا طراحی ترانسفورماتور از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار باشد [۸].

۲- بیان پدیده

بارداری استاتیکی در ترانسفورماتورهای بزرگ خنک‌شونده با روغن در اثر تنش برشی ناشی از جریان روغن و گرمای ناشی از اصطکاک بین روغن و جسم جامد ایجاد می‌شود. بارداری استاتیکی ناشی از جریان روغن متشکل از چهار مرحله تولید بار، انتقال بارها، جمع شدن بارها، و جاری شدن بارها می‌باشد [۹ و ۱۰]. نخست بار خالص در ناحیه‌ای که بتواند در معرض جریان قرار گیرد تولید می‌شود. تولید بار در سطح مایع در حال جریان و جسم جامد، در لایه‌های دوگانه رخ می‌دهد و این به هنگامی است که تنش برشی و گرمای ناشی از آن، برای

گسیختن لایه‌های دوگانه الکتریکی و تبدیل آنها به بارهای مثبت و منفی آزاد، به اندازه کافی باشد. با توجه به ویژگی‌ها و نوع جسم جامد، برخی از این بارها در سطح جسم جمع می‌شوند و مابقی بارها با جریان روغن منتقل شده که در جایی جمع شده و یا همراه جریان روغن به حرکت خود ادامه می‌دهند. در نهایت در اثر جمع شدن این بارها در سطح روغن اختلاف پتانسیل ایجاد و در نتیجه آن تخلیه‌های جزئی در سطح عایق صورت می‌پذیرد که در صورت تجاوز مقدار پتانسیل از حد بحرانی، شکست الکتریکی کامل در ترانسفورماتور رخ می‌دهد [۱۱، ۱۲ و ۱۳].

نوع این بارها به ویژگی‌های روغن و جسم جامد بستگی دارد. اگر جسم جامد فلز باشد با توجه به این که فلزها در آخرین لایه الکترونی داری الکترون‌های آزاد اضافی هستند یون‌های مثبت را به خود جذب می‌کنند در نتیجه یون‌های منفی در روغن در حال جریان باقی می‌مانند.

۳- تئوری ایجاد بار و تجمع آن‌ها

همان طور که ذکر شد در سطح جسم جامد (عایق یا فلز)، تمایل تدریجی برای جذب نوعی از بارهای موجود در پیوندهای الکتریکی لایه‌های دوگانه وجود دارد و این در حالی است که نوع مخالف این بارها در محدوده مرزی باریکی در سطح تماس، توزیع می‌شوند. میزان نفوذ این بارها به داخل روغن به تعادل بین توزیع، مهاجرت و پدیده همرفتی بارها بستگی دارد. الف: اگر جسم جامد، فلز باشد با توجه به اینکه فلزها الکترون‌های آزاد زیادی در آخرین لایه الکترونی دارند، یون‌های مثبت موجود در روغن را به سمت خود جذب می‌کنند در نتیجه در سطح فلز، یون‌های مثبت با الکترون‌های فلز ترکیب می‌شوند و نتیجه آن باقی ماندن یون‌های منفی در روغن در حال جریان می‌باشد (شکل ۱).

ب: اگر جسم جامد عایق باشد، به هنگام جریان روغن و تماس آن با کاغذ، یون‌های منفی روغن جذب کاغذ شده و در نهایت روغن حاوی بارهای مثبت خواهد شد (شکل ۱).

علت این امر به ساختار کاغذ (سلولز) برمی‌گردد که از زنجیره‌های بنزن تشکیل شده است و واحد بنزن شامل ۶ گروه هیدروکسی (OH) می‌باشد. ساختار کاغذ در شکل (۲) نشان داده شده است. اتم‌های اکسیژن موجود در گروه OH الکترونگاتیویته بسیار بالایی دارند، به این علت، الکترون‌های پیوند OH به سمت اکسیژن جذب می‌شوند و نتیجه آن منفی شدن اتم اکسیژن و مثبت شدن اتم هیدروژن است. هیدروژن

دورتر از جداره در میانه جریان، جریان به صورت درهم^{۱۰} است. یک زیر لایه توزیع باریکی به ضخامت δ که منطقه گذر نامیده می‌شود بین این دو ناحیه ایجاد می‌گردد که در مرز این ناحیه مقادیر ضرایب توزیع درهم و مولکولی با هم برابر می‌شود [۱۲ و ۱۵]. مقدار δ به صورت زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$\delta = \frac{11.7\theta}{S^{1/3}v^*} \quad (2)$$

θ بیانگر لزجیت^{۱۱} سینماتیکی، S ثابت اشمیت^{۱۲} و v^* سرعت اصطکاکی^{۱۳} است که برابر است با [۱۳]:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho m}} \quad (3)$$

که τ_w تنش برشی جداره و ρ_m چگالی جرمی سیال می‌باشد. حال اگر رسانایی مایع و میزان سرعت آن به گونه‌ای باشد که $\delta \ll \lambda$ ، در این صورت توزیع بارها در معرض جریان درهم قرار می‌گیرد و بارها به آسانی به جریان در می‌آیند و به صورت غیرمنظم جمع می‌شوند. نیروهای کولمبی موجود بین این بارها باعث فاصله گرفتن بارها از هم و مهاجرت آنها می‌شود. نتیجه نهایی این فرآیند، به وجود آمدن بارهای سطحی در سطح خارجی ماده است. مدت زمانی که بارها به سطح ماده می‌رسند، زمان آرامش نامیده می‌شود که به صورت زیر حاصل می‌شود [۱۶]:

$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (4)$$

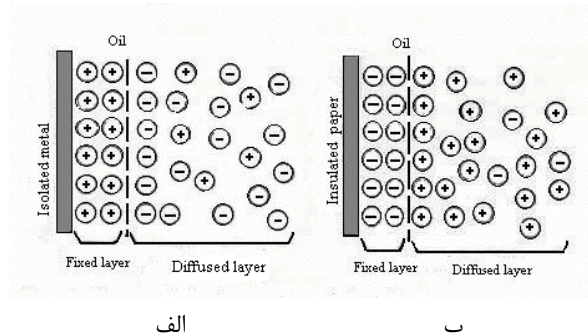
و زوال بار داخل ماده را نشان می‌دهد. اما در صورتی که رسانایی روغن زیاد باشد به طوری که طول دبابی کوچکتر از δ شود، در این صورت بار خالص به وجود نمی‌آید [۱۶ و ۱۷].

۴- تجهیزات آزمایشگاهی سیستم مدار بسته

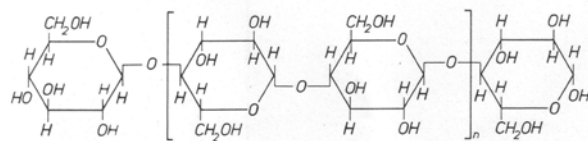
تجهیزاتی که برای مدل کردن بارداری استاتیکی توسط نویسندگان مقاله طراحی، ساخته و به کار گرفته شده است در شکل (۳) مشاهده می‌شود [۱۸]. الکتروود کواکسیالی که در این مدار به کار می‌رود و شرایط مشابه داخل ترانسفورماتور را ایجاد می‌کند، در شکل (۴) دیده می‌شود. الکتروود از دو استوانه

مثبت در این گروه‌ها تمایل زیادی به جذب بارهای منفی موجود در روغن دارند که در نتیجه آن یون‌های منفی به سطح کاغذ جذب می‌شوند.

علاوه بر موارد بالا، ثابت شده است که کاغذ عایق، تمایل به جذب ناخالصی‌ها و مواد زائد موجود در روغن دارد. که این ناخالصی‌ها با یون‌های منفی مثلاً مولکول‌های قطبی خنثی شامل اکسیژن، نیتروژن و نمک‌های آلی ترکیب می‌شوند و در نتیجه، باردار شدن روغن از نوع مثبت می‌باشد.



شکل ۱- مکانیزم تولید بار [۸]



شکل ۲- ساختار مولکولی سلولز

بعد از برقراری حالت مانا، توزیع بارها توسط نیروهای الکترواستاتیکی به تعادل رسیده و میزان وسعت لایه‌های دوگانه در سطح مشخص می‌شود. این مقدار به طول دبابی^۸ معروف است خارج از طول دبابی انگار که هیچ آشفستگی در وضعیت الکترواستاتیکی به وجود نیامده است. مقدار طول دبابی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \sqrt{D \frac{\epsilon}{\sigma}} \quad (1)$$

که D ضریب توزیع مولکول، σ رسانای ماده و ϵ نفوذپذیری ماده می‌باشند [۱۴].

از دیدگاه پدیده بارداری، برش طولی پروفیل جریان به دو منطقه با یک منطقه گذر بین آن‌ها تقسیم می‌شود [۱۲]. نزدیک جداره (سطح تماس روغن با جسم جامد)، زیر لایه‌ای به وجود می‌آید که جریان روغن در آن، از نوع جریان آرام^۹ می‌باشد.

از طرفی [۱۷، ۲۱ و ۲۲]:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (7)$$

از ترکیب دو رابطه ۵ و ۶ نتیجه می‌شود [۱۷ و ۲۰]:

$$-\nabla \cdot (D \nabla \rho) + \nabla \cdot (\sigma E(t)) + \nabla \cdot (V \rho) + \nabla \cdot (E(t) \cdot \nabla \sigma) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

با ثابت فرض کردن σ و D و فرض بر غیر قابل تراکم بودن

روغن ($\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$) و به کار بردن معادله $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$ نتیجه زیر

به دست می‌آید [۱۷ و ۲۰]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho - \frac{1}{\tau} \rho - \mathbf{V} \cdot \nabla \rho \quad (9)$$

که τ زمان آرامش بارها می‌باشد.

با توجه به این که تمام بارها در منطقه نزدیک به سطح تماس قرار می‌گیرند و همچنین با توجه به این که جریان کاملاً توسعه یافته فرض شده است در حالت دائم رابطه بالا در مختصات کارتزین به صورت زیر خلاصه می‌شود [۱۶]:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial r^2} + \frac{\rho}{\lambda^2} = 0 \quad (10)$$

که با در نظر گرفتن شرایط اولیه [۱۶]:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \rho = 0 \quad \left. \frac{\partial \rho}{\partial r} \right|_{r \rightarrow 0} = -\rho_s \quad (11)$$

توزیع بار شعاعی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۶، ۱۷ و ۲۰]:

$$\rho_V(\mathbf{r}) = \rho_s / \lambda e^{-r/\lambda} \quad (12)$$

کواکسیالی داخلی و بیرونی ساخته شده است. هر دو استوانه بیرونی و داخلی از سه قسمت تشکیل شده‌اند. دو قسمت انتهایی هر دو استوانه مسی بوده و از طریق استوانه تفلونی به هم متصل شده‌اند. استوانه داخلی با عایق تفلون (به ضخامت ۶ میلیمتر) پوشانده شده است. روغن از فاصله ۶ میلیمتری مابین استوانه بیرونی و پوشش تفلونی استوانه داخلی عبور می‌کند. استوانه داخلی الکتروود فشار ضعیف می‌باشد. قسمت فلزی ۱۰ سانتیمتری استوانه بیرونی به عنوان الکتروود فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد و ولتاژ الکتریکی به این قسمت اعمال می‌شود. از قسمت فلزی ۵ سانتیمتری استوانه بیرونی به عنوان قسمت اندازه‌گیری استفاده می‌شود که الکتروودتر به آن وصل می‌شود. طول الکتروود ۳۵ سانتیمتر است و مشخصات دیگر آن در شکل (۴) نشان داده شده است.

روغن توسط پمپ در این مدار به گردش درآورده می‌شود (جهت کنترل دبی از شیر فرعی^{۱۴} موازی با پمپ استفاده شد) و جریان رانشی توسط الکتروودتر متصل به الکتروود اندازه‌گیری می‌شود. در این قسمت هدف محاسبه جریان رانشی مربوط به بارداری استاتیکی است. در این آزمایش‌ها تأثیر دما، سرعت گردش روغن و زمان بر پدیده بارداری استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته شده است. الکتروودتر مورد استفاده، الکتروودتر Keithly 6514 می‌باشد که توانایی اندازه‌گیری ۱۴-۱۰ کولمب را دارد.

۵- محاسبات ریاضی مربوط به مدل‌سازی بارداری استاتیکی

با فرض جریان آرام، هم دما و هم شکل روغن در الکتروود، سرعت جریان روغن به صورت زیر می‌باشد [۱۹]:

$$V = \frac{8}{d^2} V_{avg} r(d-r) \quad (5)$$

که r فاصله از جداره لوله، d فاصله مابین استوانه بیرونی و پوشش تفلونی استوانه داخلی و V_{avg} میانگین سرعت روغن می‌باشد. در این صورت حرکت بارها در داخل الکتروود در اثر چهار عامل توزیع، همرفتی، هدایت و مهاجرت می‌باشد لذا چگالی جریان کل برابر خواهد بود با [۲۰]:

$$\mathbf{J} = -D \nabla \rho + \sigma \mathbf{E}(t) + \mathbf{E}(t) \cdot \nabla \sigma + V \rho \quad (6)$$

D ضریب توزیع بارها، σ رسانایی روغن، V سرعت جریان روغن و ρ چگالی حجمی بارها می‌باشند.

$$\partial I_o(z) = 2\pi\pi (J_a - J_w) \partial z \quad (15)$$

که J_a چگالی جریان تولید شده در سطح و J_w نمایش دهنده چگالی جریان ناشی از بارهای به حالت سکون رسیده می‌باشد. J_a مستقل از مختصات Z و وابسته به خصوصیات مواد است در حالی که J_w برابر است با [۱۶ و ۲۰]:

$$J_w = \sigma \frac{\rho_s}{\varepsilon} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن روابط فوق چگالی بار شعاعی برابر خواهد بود با:

$$\rho(r, z) = \frac{J_a \tau}{\sigma} \left(1 - e^{-\left(\frac{d^2}{64 V_{avg} \tau \lambda^2 Z} \right)} \right) \times e^{-\left(\frac{r}{\lambda} \right)} \quad (17)$$

که λ قبلاً محاسبه شده است (رابطه ۱) و ρ_s بار سطحی به ازای واحد سطح می‌باشد (بار مثبت در نظر گرفته شده است). حال جریان رانشی را برای حالتی که میدان الکتریکی اعمال نشده باشد (حالت بی‌باری)، محاسبه می‌کنیم. جریان حالت بی‌باری I_o برابر خواهد بود با [۱۱، ۱۴ و ۱۶]:

$$I_o = \int v \rho v(r) dV = 2 \times 2\pi \int_0^{\frac{d}{2}} \rho v(r) V(r) r dr \quad (13)$$

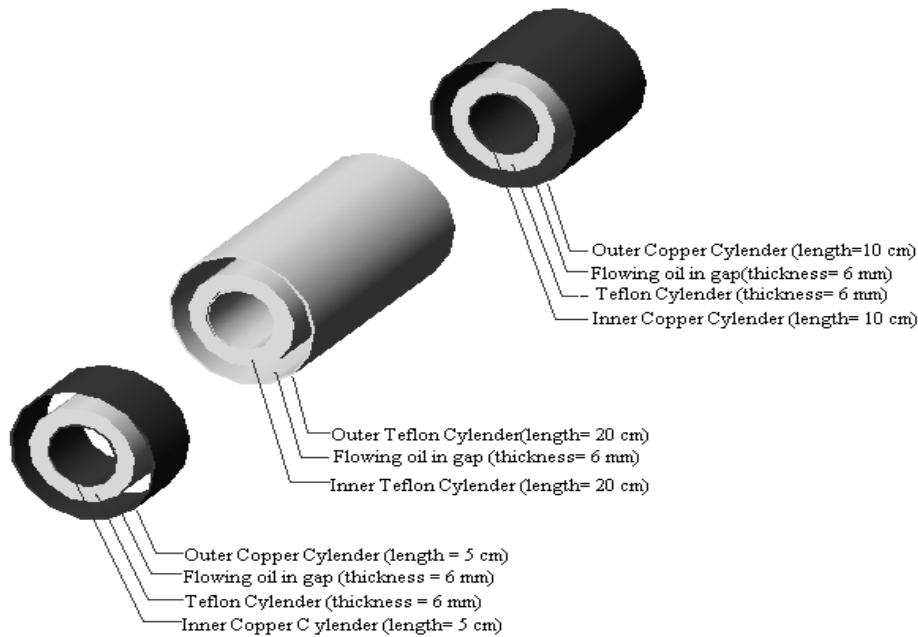
با در نظر گرفتن سرعت جریان روغن و توزیع بار شعاعی، جریان حالت بی‌باری به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I_o \simeq 64 \pi \frac{\rho_s}{d} V_{avg} \lambda^2 \quad (14)$$

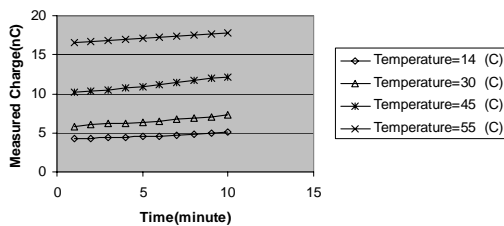
اگر یک جزء کوچک از الکتروود در جهت محوری (جهت Z) را در نظر بگیریم می‌توان نوشت [۱۶ و ۲۰]:



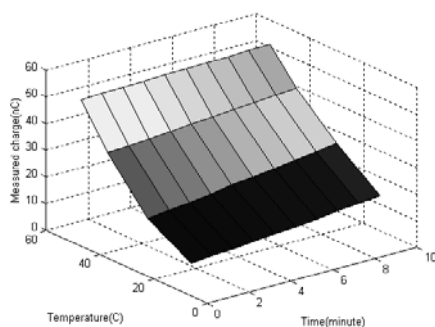
شکل ۳- تجهیزات مدار حلقه بسته



شکل ۴- الکتروود کواکسیالی



شکل ۶- تأثیر دما بر مقدار بار اندازه‌گیری شده در حالتی که سرعت گردش روغن ۱/۴ m/s می‌باشد.

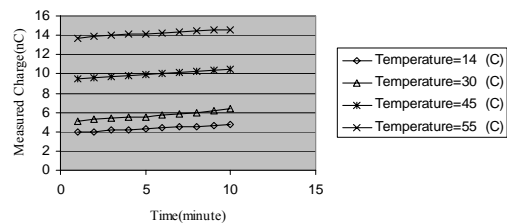


شکل ۷- تأثیر دما بر مقدار بار اندازه‌گیری شده در حالتی که سرعت گردش روغن ۱/۹ m/s می‌باشد.

۶- تأثیر دما و سرعت جریان روغن بر پدیده بارداری استاتیکی

۶-۱- تأثیر دما

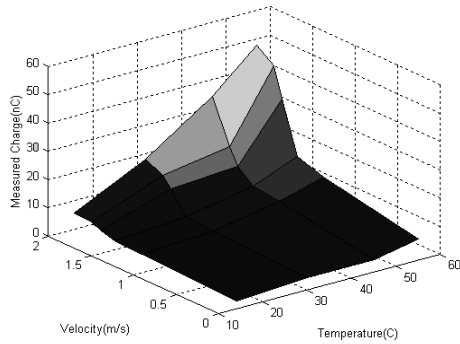
شکل‌های (۵، ۶ و ۷) نتایج آزمایشگاهی تأثیر دما بر میزان بار تولید شده را در سرعت‌های متفاوت نشان می‌دهد. با افزایش دما، ضریب رسانایی و ضریب نفوذ مولکولی افزایش یافته $\left(\frac{D}{\mu} = k \frac{T}{q}\right)$ ، لزجیت روغن کم شده و انرژی بارها بیشتر می‌شود، در نتیجه جریان یافتن بارها با جریان روغن راحت تر می‌شود. لذا جریان رانشی نسبی افزایش می‌یابد.



شکل ۵- تأثیر دما بر مقدار بار اندازه‌گیری شده در حالتی که سرعت گردش روغن ۱/۱ m/s می‌باشد.

۶-۲- تأثیر سرعت گردش روغن

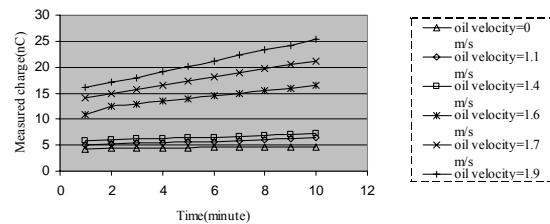
شکل‌های (۸، ۹، ۱۰ و ۱۱) نتایج به دست آمده از آزمایش را نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود جریان رانشی در اثر افزایش سرعت روغن افزایش می‌یابد و علت آن افزایش تنش برشی بر لایه‌های الکتریکی دوگانه موجود در سطح تماس روغن و جسم جامد در اثر افزایش سرعت روغن می‌باشد که منجر به تولید بار بیشتر می‌گردد.



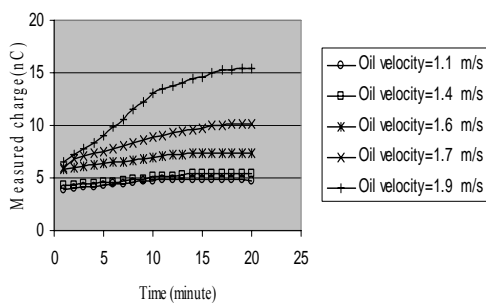
شکل ۱۱- میزان بار تولید شده در دما و سرعت‌های متفاوت

۶-۳- تأثیر توقف گردش روغن

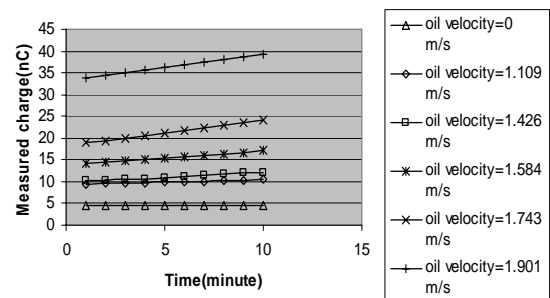
به این منظور در آزمایش‌های انجام گرفته در سرعت‌های متفاوت، بعد از ده دقیقه دقیقه گردش روغن، الکتروپمپ متوقف شده و روغن به حالت سکون در آمده است و بارهای اندازه‌گیری شده ثبت شده‌اند. شکل (۱۲) نتایج به دست آمده در دمای اتاق (۱۴) درجه سانتیگراد) را نشان می‌دهد.



شکل ۸- ارتباط بین سرعت گردش روغن و میزان بار تولیدی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد

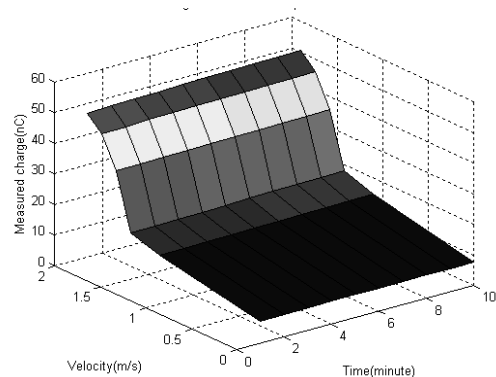


شکل ۱۲- تأثیر توقف گردش روغن بر پدیده بارداری استاتیکی در دمای ۱۴ درجه سانتیگراد



شکل ۹- ارتباط بین سرعت گردش روغن و میزان بار تولیدی در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد

همان طور که مشاهده می‌شود از دقیقه دهم (لحظه توقف الکتروپمپ)، میزان افزایش بار اندازه‌گیری شده کاهش پیدا می‌کند و نیز با افزایش زمان شیب منحنی‌ها کمتر می‌شود. از لحظه توقف الکتروپمپ تا لحظه سکون کامل روغن، از تنش برشی ناشی از سرعت سیال بر لایه‌های دوگانه الکتریکی سطح تماس روغن و قسمت فلزی الکتروپمپ کاسته می‌شود که در لحظه سکون کامل روغن، تنش برشی ناشی از سرعت روغن به صفر می‌رسد. با کاهش تنش برشی لایه‌های الکتریکی کمتری پاره شده لذا بار کمتری تولید می‌شود. با گذشت زمان، بارهای تولید شده به هنگام گردش روغن اندازه‌گیری شده و چون بعد از توقف الکتروپمپ عامل افزایش مقدار بار تولیدی از بین رفته

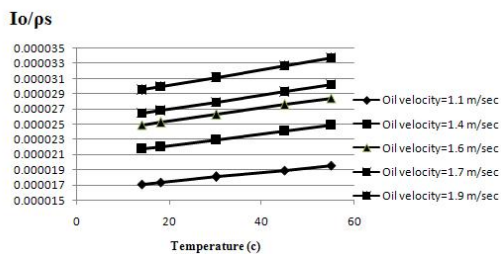


شکل ۱۰- ارتباط بین سرعت گردش روغن و میزان بار تولیدی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد

نتایج به دست آمده در این آزمایش نشان می‌دهند که بعد از توقف الکتروپمپ تا پایان دقیقه دهم مقدار بار اندازه‌گیری شده تغییر چندانی نمی‌کند. که این نتیجه تأثیر دما است که با تأثیر توقف الکتروپمپ مقابله می‌کند.

۷- نتایج تئوری

جهت انجام مقایسه نتایج تئوری با نتایج آزمایشگاهی، با استفاده از رابطه (۱۴) مقدار تئوری نسبت جریان بی‌باری به چگالی سطحی بار $\left(\frac{I_o}{\rho_s}\right)$ ، در دماها و سرعت های مختلف گردش روغن محاسبه شده و نتایج آن در شکل (۱۶) ارائه گردیده است.



شکل ۱۶- نسبت جریان بی‌باری به چگالی بار سطحی در دما و سرعت‌های مختلف روغن با استفاده از رابطه تئوری

نتایج تئوری نیز افزایش نسبت جریان بی‌باری به چگالی بار سطحی را در اثر افزایش دما و سرعت گردش روغن نشان می‌دهد، که علت آن افزایش ضریب رسانایی و ضریب نفوذ مولکولی در اثر افزایش دما و افزایش تنش برشی بر لایه‌های الکتریکی دوگانه موجود در سطح تماس روغن و جسم جامد در اثر افزایش سرعت گردش روغن می‌باشد.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله پدیده بارداری استاتیکی تشریح شده است. و برای مدارحلقه بسته، مدل ریاضی برای الکتروکواکسیالی توصیف شده است. برای جریان رانشی فرمول ریاضی ارائه گردید و در نهایت اثر دما و سرعت جریان روغن بر روی بارگیری روغن با استفاده از سیستم مدار بسته به طور عملی مشخص شده است که به صورت زیر خلاصه می‌شود:

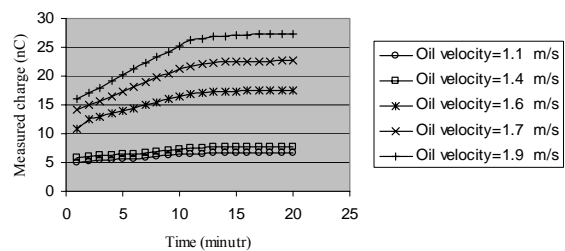
افزایش دما موجب افزایش رسانائی روغن، کاهش لزجیت و در نهایت افزایش انرژی بارها می‌شود که این امر موجب افزایش

است لذا میزان افزایش بار اندازه‌گیری شده دقیقه به دقیقه کاهش می‌یابد.

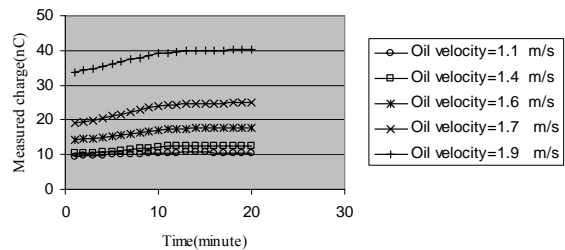
در شکل‌های (۱۳ و ۱۴) نتایج آزمایش‌های مشابه انجام گرفته در دماهای ۳۰ و ۴۵ درجه سانتیگراد ارائه شده‌اند.

این نتایج نیز کاهش میزان افزایش بار تولیدی را بعد از توقف الکتروپمپ نشان می‌دهند.

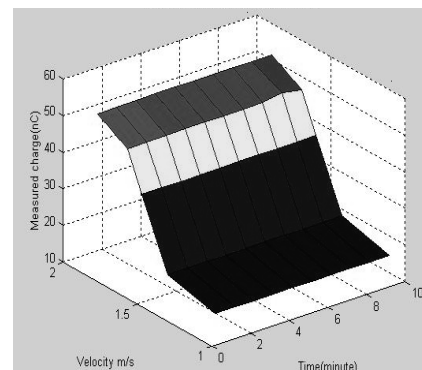
آزمایش مشابهی در دما ۵۵ درجه سانتیگراد انجام گرفته است که نتایج این آزمایش از لحظه توقف الکتروپمپ (شروع سنجش زمان از لحظه توقف الکتروپمپ می‌باشد) در شکل (۱۵) ارائه شده است.



شکل ۱۳- تأثیر توقف گردش روغن بر پدیده بارداری استاتیکی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۴- تأثیر توقف گردش روغن بر پدیده بارداری استاتیکی در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۵- تأثیر توقف گردش روغن بر پدیده بارداری استاتیکی در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد

- [9] R. M. Radwan, R. M. El-Dewieny, T. D. Aish and I. A. Metwally "Factors affecting transformer oil flow electrification in electric power apparatus," Proceedings of IEEE conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 642-647, 1990.
- [10] T. Yuming, W. Zanji, X. Dachuan and Z. Jianchao "Experimental and theoretical studies on static electrification phenomena owing to oil flow in EHV power transformers," Proceeding of The 6th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials. Xian Jiaotong University, pp. 835-840, 2000.
- [11] S. M. Gasworth, J. R. Melcher and M. Zahn, "Flow-Induced Accumulation in Thin Insulating Tubes," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 23, no. 1, pp. 103-115, 1988.
- [12] I. A. Metwally, "Influence of solid insulation phase on streaming electrification of transformer oil," IEEE Trans. on Dielectrics Electrical Insulation, vol. 4, no. 3, pp. 327-338, 1997.
- [13] M. Ieda, K. Goto, H. Okugo, T. Miamoto, H. Tsukioka and Y. Kohn, "Suppression of static electrification of insulation oil for large power transformers," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 23, no. 1, pp. 153-157, 1988.
- [14] D. A. B. Miller, "Semiconductor diodes," 243. Semiconductor optoelectronic devices, pp. 88-129, Winter 2002.
- [15] A. J. Morin, M. Zahn and J. R. Melcher, "Fluid electrification measurements of transformer pressboard/oil insulation in a Couette Charger," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 26, no. 5, pp. 870-901, 1991.
- [16] J. K. Nelson, "Dielectric fluids in motion," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 10, no. 3, pp. 16-28, 1994.
- [17] H. Migao, M. Higaki, and Y. Kamata, "Influence of AC and DC fields on streaming electrification of transformer oil," IEEE Trans. on Electrical Insulation. vol. 23, no. 1, pp. 129-135, 1988.
- [18] B. Vahidi, Gh. R. Hashemabad and S. H. Hosseinian, "Effects of different parameters on transformer oil electrification," Proceeding of IEEE TENCON 2004, Thailand, 2004, pp. 429-431.
- [19] I. H. Shames, "Mechanics of fluids," McGraw-Hill, 1988.
- [20] I. A. Metwally, "Flow electrification of transformer oil effect of mixed fields," IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 5, no. 4, pp. 518-526, 1998.

جریان رانشی نسبی می‌شود. جریان رانشی در اثر افزایش سرعت سیال بیشتر می‌شود که این در اثر افزایش تنش برشی بر لایه‌های دوگانه مجاور می‌باشد.

در لحظه توقف الکتروپمپ، از تنش برشی ناشی از سرعت سیال بر لایه‌های دوگانه الکتریکی سطح تماس روغن و قسمت فلزی الکتروود، کاسته می‌شود و این امر تا لحظه سکون کامل روغن که در این لحظه تنش برشی ناشی از سرعت روغن به صفر می‌رسد ادامه دارد. با کاهش تنش برشی لایه‌های الکتریکی کمتری پاره شده لذا بار کمتری تولید می‌شود.

مراجع

- [1] A. Sierota and J. Rungis, "Electrostatic charging in transformer oils (testing and assessment)," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, no. 5, pp. 840-870, 1994.
- [2] D. W. Crofts, "Failure of 450 MVA, 345/138 kV Autotransformer from static electrification," EPRI AC/DC Transmission Substations Task Force Meeting, New Orleans, LA, 1984.
- [3] M. M. Dixon, "Failure and repair of a Westing house 345/138 kV, 560 MVA autotransformer," EEI Electrical Systems and Equipment Committee Meeting, FL, 1985, Paper 5.
- [4] D. A. Ditzlel, "Failure and repair of a Westing House 345/138 kV autotransformer," Minutes of the fifty second Annual International Conference of Doble Clients, Doble Engineering Co., Watertown MA, 1985.
- [5] B. Hochart and J. P. Grandjean, "Oil charging tendency effect on large power transformers," Minutes of the fifty-fourth annual international conference of Doble Clients, Doble Engineering Co., Watertown, MA, 1987.
- [6] I. A. Cross, "Investigation of electrostatic problems in high voltage transformers," Restricted Investigation Report no. 17, to Electricity Commission of NSW, CSIRO Division of Wool Technology, Sydney, 1988.
- [7] B. D. Inglis, "Static electrification in 390 MVA Generator Transformer," Confidential Report on Consultancy for the Electricity Commission of NSW, CSIRO Division of Applied Physics, Sydney, 1988.
- [8] I. A. Metwally, "Characterization of static electrification in power transformer," IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 3, no. 2, pp. 307-315, 1996.

[22] I. A. Metwally and Y. A. Abed, "Static electrification phenomenon in large forced oil-cooled power transformer," Proceedings of Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, Austria, pp. 1020.1-1020.4, 1995.

[21] R. M. Radwan, "Investigation of static electrification due to transformer oil flow in electric power apparatus," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 27, no. 2, pp. 278-286, 1992.

پی‌نوشت‌ها

-
- 1- Crofts
 - 2- Dixon
 - 3- Ditzler
 - 4- Hochart
 - 5- Grandjean
 - 6- Cross
 - 7- Inglis
 - 8- Debye length
 - 9- Laminar flow
 - 10- Turbulent flow
 - 11- Viscosity
 - 12- Schmidt number
 - 13- Friction velocity
 - 14- Bypass valve