

بررسی عمر عایق ترانسفرماتور

علی تراب

دانشگاه آزاد اسلامی واحد جهرم
a_torab2002@yahoo.com

سید حسین عادلزاده

دانشگاه آزاد اسلامی واحد جهرم
h_adelzade2003@yahoo.com

علی مبارکی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد جهرم
mobaraki_ali@yahoo.com

چکیده - هدف این مقاله بررسی معیارها و روشهایی است که با استفاده از آنها بتوان عمر عایقی ترانسفرماتور را تخمین زد. تخمین عمر ترانسفرماتور با جلوگیری از بروز اختلالاتی در ترانسفرماتور (از قبیل سوختن سیم پیچها، انفجار و ...) می تواند ایمنی بالای شبکه توزیع، ایمنی اپراتور ها و اقتصادی کردن شبکه توزیع و ... را در پی داشته باشد. تلاشهای بسیاری از سال ۱۹۲۰ تا کنون برای روشمند کردن و یافتن معیارهای مناسبی برای تخمین عمر عایق انجام شده است در این نوشتار معیارهای استحکام کششی، استحکام گسیختگی، درجه پلیمرزاسیون و گسترش گاز بررسی و مقایسه شده است و نهایتاً روشی فراگیر در این زمینه شرح داده می شود.

کلمات کلیدی: استحکام کششی، پیر شدن عایقی، درجه پلیمرزاسیون، عمر عادی عایق.

۱. مقدمه

در دهه ۱۹۲۰ آقای مونتسینگر^۱ اولین کسی بود که موضوع عمر عایقی را مورد بررسی قرار داد [1]. او خصوصیت‌های مکانیکی عایق (استحکام کششی) را به عنوان معیاری در از بین بردن عمر عایق مطرح کرد. او در مقاله خود بیان داشت که افزایش دما، عمر عایق را کاهش می دهد. اما مقاله [2] Read & Satterlee در سال ۱۹۴۷، افزایش دما را به عنوان تنها عامل کاهنده عمر عایق، رد کرد.

در دهه ۱۹۵۰ گروهی از کمیته ترانسفرماتور AIEE متشکل از تولید کنندگان و مصرف کنندگان ترانسفرماتورهای توزیع و قدرت به بررسی تجربیات مربوط به عمر عایق ترانسفرماتور تا آن روز پرداختند. ترانسفرماتورهای توزیع نمونه از هر تولید کننده تحت یک سری بارهای انتخاب شده در شرایط مختلف قرار داده شدند و داده های هر محقق برای باز بینی به کمیته فرستاده شد.

آزمایش بدین گونه بود که انواع ترانسفرماتورها متناوباً بارگزاری شدند؛ و یک چرخه خنک کنندگی در سه دمای نقطه داغ^۲ ۱۸۰، ۱۴۰ و ۲۲۰ درجه انجام می گرفت. زمان آزمایش برای هر دما توسط تئوری جریان تعیین می شد. دما نیز توسط یک ترموکوپل که بین سیم پیچها و مخزن کارگذاری شده بود اندازه گیری می شد. آزمایش آنها نتایج خوبی به همراه داشت. آنها درجه پلیمرزاسیون را به عنوان معیاری بهتر از خصوصیت مکانیکی ارائه کردند و تا به امروز از این دو معیار استفاده می شود.

در سالهای اخیر مقالاتی در مورد گسترش گاز به عنوان معیاری برتر در تخمین عمر عایق مطرح شده است. این مقالات، تخمین عمر عایق را بر اساس اندازه گیریهای گاز CO₂ و furfural^۳ با آنالیز گازهای حل شده، مناسبتر می دانند [3]. در سال ۱۹۴۸، داکین^۴ پیشرفتهای قابل ملاحظه ای در نرخ پیر شدن عایقی^۵ مطرح کرده است [4].

^۲ Hottest_spot^۳ C4H3OCHO^۴ Dakin^۵ Insulation aging^۱ Montsinger

را ارائه نمود که بعدها بصورت گسترده مورد استفاده قرار گرفت. او اشاره میکند که سرعت تخریب ویژگی های مکانیکی برای هر ۵ تا ۱۰ درجه افزایش دما دو برابر می شود. عامل دو برابر شدن همیشه ثابت نیست. این دو برابر شدن در محدوده دمایی بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه به ازای هر ۶ درجه افزایش دما صورت میگیرد اما در دماهای بالای ۱۲۰ این دو برابر شدن به ازای هر ۸ درجه افزایش دما می باشد.

در سال ۱۹۸۴ داکین پیشرفتهای قابل ملاحظه ای در نرخ پیر شدن عایق مطرح میکند. او تشخیص داد پیر شدن سلولوز حاصل واکنش شیمیایی است، بنابراین می توان تغییر یک ویژگی اندازه گیری شده را بصورت ثابت نرخ واکنش K_0 بیان کرد.

از ضریب ثابت نرخ واکنش K_0 - به عنوان تابعی از دما - در فاصله زمانی که پیر شدن اتفاق می افتد، می توان تغییرات ویژگی اندازه گیری شده را محاسبه نمود. بیان ریاضی ثابت نرخ واکنش به صورت زیر است [4]:

$$K_0 = A' \exp\left(\frac{B}{\theta + 273}\right) \quad (1)$$

که در آن A' و B ثابتهای تجربی و θ دما می باشد. داکین نشان داد همه داده های نرخ پیر شدن عایق در مقایسه با کمیته AIEE، که شامل داده های آزمایش مونتسینگر بودند در معادله فوق میگنجد. رابطه داکین از معادله نرخ واکنش آرنیوس بدست آمده است و مورد قبول جامعه فنی سالهای اخیر است. هر گاه از روش مورد بحث فوق جهت تعریف عمر عایق ترانسفرماتور مورد استفاده قرار می گیرد دو موضوع مطرح میشود:

- نرخ پیر شدن عایقی.
 - معیاری برای نقطه انتهایی عمر عایق.
- دو موضوع فوق با در نظر گرفتن عمر عایق بصورت کمیته پریونیت با تعریف رابطه (۲) بعنوان عمر عایق از هم جدا میشوند

$$Per_Unit_Life = A \exp\left(\frac{B}{\theta + 273}\right) \quad (2)$$

که A ثابت پریونیت اصلاح شده است که با انتخاب ۱۱۰ درجه به عنوان دمای مرجع برای $Per_Unit_Life = 1$ بدست می آید.

او معادله ای بر اساس "نرخ واکنش آرنیوس"^۶ بیان کرد که مورد قبول جامعه فنی سالهای اخیر است. جالب توجه است که تمامی داده های نرخ پیر شدن عایقی از کمیته AIEE و آزمایشات مونتسینگر در رابطه داکین میگنجد.

در سال ۱۹۷۶ تا ۱۹۸۲، EPRI، تحقیقاتی را در مورد انتخاب معیار عمر عایق ترانسفرماتور انجام داده است و به این نتیجه رسیدند که نتایج آزمون مونتسینگر بسیار محافظه کارانه است [13] [14] [15].

ما در این مقاله، معیارهای بیان شده را بررسی و سپس با هم مقایسه کرده و سرانجام روشی فراگیر شرح می دهیم که با توجه به آن عمر عایق ترانسفرماتور تعیین گردد.

۲. بررسی معیارهای تخمین عمر عایق

ترکیب اصلی مواد عایقی در بیشتر ترانسفرماتورها سلولوز است که یک ترکیبی آلی شامل زنجیره بلندی از حلقه های گلوکز یا مونومر میباشند. درجه مولکولی پلیمرزاسیون به متوسط تعداد حلقه های گلوکز در مولکول بر می گردد که بین ۱۰۰۰ تا ۱۴۰۰، برای مواد جدید است.

یک تک رشته سلولوز حاوی تعداد زیادی زنجیره های بلند است که هر یک نقش مستقیمی در استقامت مکانیکی مواد اصلی دارد. درجه پلیمرزاسیون یک معیار مناسب برای بیان وضعیت مقاومت مکانیکی و عملکرد سلولوزی ماده است.

سه مکانیسم اصلی در پیر شدن عایقی موثر است: ۱- هیدرولیز. ۲- اکسیداسیون. ۳- تجزیه شدن بوسیله گرما^۷. عوامل موثر بر این سه مکانسیم آب، اکسیژن و گرماست. که هر یک تاثیری بر نرخ پیر شدن عایق دارد. که جداگانه باید کنترل گردند.

در یک سیستم حفاظتی پیشرفته روغن، نقش رطوبت و اکسیژن در از دست رفتن عمر عایق کم رنگ می شود، اما دما به عنوان یک پارامتر مهم، باید مورد توجه قرار گیرد. از اوایل تولید ترانسفرماتور گرما بعنوان عاملی مهم در از بین بردن خواص مکانیکی عایق مورد نظر قرار گرفته است. مونتسینگر اولین داده های مربوط به تخمین عمر عایق را منتشر کرد و مشاهدات مربوط به نرخ کاهش عمر عایق

⁶ Arrhenius reaction rate

⁷ Pyrolysis

و B شیب نرخ پیر شدن عایق است که مشابه معادله (۱) است.

مقدار A وابسته به زمان است و بعنوان معیار نقطه انتهایی عمر عایق که متغیرهایی مانند آب و اکسیژن در آن تأثیر دارند، در نظر گرفته می شود. محققان بسیاری نرخ پیر شدن سلولوزی را در شرایط کنترل شده اندازه گیری کرده اند و نتایجشان را بفرم رابطه (۲) بیان کردند. برخی محققان، ویژگی های مکانیکی، برخی دیگر درجه پلیمرزاسیون و برخی هم سرعت گسترش گاز را برای بدست آوردن مقدار B در نظر گرفته اند. جدول ۱ نتایج این تحقیقات را نشان می دهد. (تمامی آزمایشات انجام شده در دامنه دمایی ۱۳۵ تا ۱۵۵ درجه می باشد). نتایج آزمایش "هد"^۸ بسیار مورد توجه قرار گرفته است چون مقدار B بر اساس استحکام کششی، استحکام گسیختگی، تغییر طول، درجه پلیمرزاسیون و گسترش گاز بیان می شود. ثابت B مربوط به "لامپ"^۹ در جدول مذکور جزء کمترین ها ست، که این خود باعث مشکل تعیین دقیق شیب می شود. از جدول ۱ می توان دریافت که مقدار یکسانی برای B وجود ندارد. اما باید متذکر شد که داده های آزمایشهای مربوط به مواد، در شرایط مختلف با هم برابر نیستند. بررسیهای جدید نشان میدهد که $B=15000$ مقدار مناسبی خواهد بود و از آن در رسم منحنی عمر عایق ترانسفرماتور در مقالات استاندارد امروزی استفاده شده است [5].

B	معیار	مرجع
18000	استحکام کششی ۲۰٪	Dakin[4]
18000	استحکام کششی ۲۰٪	Sumner[7]
15250	مکانیکی DP/ انتشار گاز	Head[8]
15500	استحکام کششی ۱۰٪	Lawson[9]
11350	DP	Lawson[9]
14580	DP ی ۲۵۰	Shroff[10]
11720	DP ی ۲۰۰	Lampe[11]
14300	انتشار گاز	Goto[12]
14830 *	استحکام کششی ۵۰٪	ASA C57.92-1948
16054	استحکام کششی ۵۰٪	ANSI C57.92-1981

* دامنه دمای اندازه گیری بین ۱۲۰ تا ۱۵۰ درجه بوده است.

جدول ۱: مقادیر مختلف ثابت نرخ پیر شدن عایقی یا B.

امروزه ما برای تعیین نقطه نهایی عمر عایق می توانیم مانند سالهای ۱۹۶۰ از آزمونهای کارکردی روی دستگاههای واقعی استفاده کنیم. اما این کار فقط برای ترانسفرماتورهای توزیع کوچک مقرون به صرفه است و برای ترانسفرماتورهای توزیع قدرت قابل قبول نیست؛ اما روشهای دیگری در این نوع ترانسفرماتور ها بکار گرفته می شود، که شامل استفاده از خصوصیات قابل اندازه گیری مانند خصوصیات الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی است. خصوصیت دیگری که مورد بررسی قرار گرفته است قدرت دی الکتریکی است که بسیار نزدیک به عملکرد ترانسفرماتور می باشد، اما تخریب آن خیلی آهسته صورت می گیرد، بنا براین در اکثر موارد، خصوصیات مکانیکی (استحکام کششی) را بعنوان معیار نقطه انتهایی انتخاب می کنند.

ارزیابی تست عمر و بررسی مدل های مختلف ترانسفرماتورهای قدرت توسط EPRI در سال ۱۹۷۶ تا ۱۹۸۲ منتشر شده است [13] [14] [15]. آنها ثابت کرده اند که انتخاب معیار عمر ۵۰٪ استحکام کششی بسیار محافظه کارانه است. در طی یک برنامه مشخص نشان داده شد که عمر پیچه های ترانسفرماتور، ۶٫۲ برابر، بیشتر از عمری است که از استحکام کششی ۵۰٪ بدست آمده بود، بدون اینکه دچار شکست عایقی شوند یا سیم پیچها اتصال کوتاه شوند.

معیار دیگر نقطه انتهایی استفاده از یک سطح مشخص درجه پلیمرزاسیون است که مزیت هایی نسبت به اندازه گیری های استحکام کششی دارد از جمله: کوچک بودن نمونه مورد نیاز، ساده بودن اندازه گیری آن و کم بودن نتایج پراکنش نتایج می باشد.

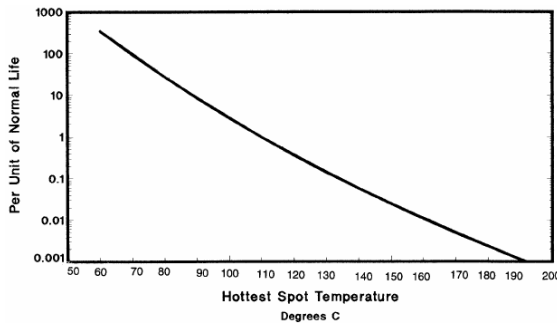
محققان بسیاری نشان دادند رابطه خوبی بین کاهش ویژگی های مکانیکی و کاهش سطح DP^{۱۰} وجود دارد. استفاده از DP بعنوان معیار نقطه انتهای می تواند مبنای کاهش ویژگی مکانیکی باشد.

محققان سطح DP های مختلفی را در محدوده ۱۰۰ تا ۲۵۰ برای نقطه انتهایی انتخاب کرده اند. به نظر میرسد در این محدوده عدد ۲۰۰ مقدار خوبی برای ترانسفرماتورهای قدرت باشد. اما ترانسفرماتورهای

¹⁰ درجه پلیمرزاسیون

⁸Head
⁹ Lampe

در راهنماهای بار گزاری ترانس^{۱۱} [5] نمودار شکل ۱ را بعنوان نمودار عمر عایق پریونیت ترانسفرماتور در نظر می گیرند. این منحنی برای ترانسفرماتورهای توزیع و قدرت نیز مورد استفاده قرار می گیرد، چون هر دو دارای عایقهای سلولوزی مشابهی هستند.



شکل ۱: منحنی عمر عایق پریونیت ترانسفرماتور بر حسب دمای نقطه داغ.

منحنی شکل فوق، دما را به عنوان عاملی مؤثر، در پیر شدن عایق ترانسفرمر، برجسته می کند. در بخش پیشین این مقاله، در مورد ضرائب A, B توضیح داده شد و مقدار 15000 را برای ثابت B در نظر گرفتیم، همچنین ثابت A مقداری است که با انتخاب دمای ۱۱۰ درجه (به عنوان دمای مرجع)، مقدار عمر پریونیت عایق برابر با عدد یک می شود. بر اساس این توضیحات می توان معادله (۳) را به صورت معادله (۴) بیان کرد.

$$PERUNITLIFE = 9.80 \times 10^{-18} \exp\left(\frac{15000}{\theta_H + 273}\right) \quad (4)$$

از مقایسه نمودار شکل ۱ و رابطه (۴) دیده میشود که عمر عایق ترانسفرماتور با افزایش دما کاسته می شود و همچنین موارد زیر قابل استخراج است:

- افزایش سرعت پیر شدن عایق در بالای ۱۱۰°C.
- کاهش پیر شدن عایقی در دمای زیر ۱۱۰°C.

در اینجا برای بررسی بیشتر نیاز به معرفی یک ضریب جدید، بنام FAA می باشد که بصورت زیر بیان می شود: FAA یک ضریب افزایش برای نرخ پیر شدن عایق است و عمر عادی ترانسفرماتور را برای دماهای بالا، تعدیل می

کوچکتر که تحت سطوح استرس مکانیکی کمتری قرار دارند ممکن است سطوح کمتری از DP را به خود اختصاص دهند.

در سالهای اخیر توجه محققان بر روی معیار دیگری برای تخمین عمر عایقی معطوف شده است. استفاده از تکنیک گازهای حل شده می تواند گامی مهم در این راه باشد. چنانکه بیان شد تستهای خصوصیت مکانیکی بخوبی بیانگر مطلب نبودند، زیرا بایستی تعداد کافی نمونه های کاغذ، از ترانسهای در حال کار آزمایش شوند، و داده های حاصل از آزمایش بسیار پراکنده بوده و نتایج درستی را در بر ندارد.

همچنین یک روش معتبر اندازه گیری DP کاغذ عایق بود، استفاده از این روش وقتی امکان دارد که ترانسفرماتور برای بررسی داخلی - که معمولاً در هر سال یک بار صورت می پذیرد - باز شود.

بر این اساس متخصصین نظرشان را به سمت تخمین عمر عایق بر اساس اندازه گیری CO₂ و furfural با آنالیز گازهای حل شده معطوف کردند. به کمک این روش، توانستند در هر لحظه عمر عایق ترانسفرماتور را مورد بررسی قرار دهند.

۳. بیان روشی برای تخمین عمر عایق ترانسفرماتور

نتایج آزمایشها حاکی بر آن است که ارتباط تنگاتنگی بین عمر عایق، زمان و دما وجود دارد که این ارتباط از تئوری نرخ واکنش آرنیوس (رابطه ۳) پیروی می کند.

$$Per_Unit_Life = A \exp\left(\frac{B}{\theta_H + 273}\right) \quad (3)$$

دقت شود که معادله فوق همان معادله (۲) می باشد که: θ_H ، نقطه داغ سیم پیچی (°C) و A, B همان ضرایب ثابت در معادله (۲) هستند.

با استفاده از نتایج آزمایشات مونتسینگر، داکین و کمیته AIEE و ... می توان نمودار عمر عایق پریونیت ترانسفرماتور، که ارتباط بین عمر عایق و نقطه داغ سیم پیچها را بیان می کند، استخراج کرد.

¹¹ Transformer Loading Guides

معیار	عمر عادی عایق (ساعت)	عمر عادی عایق (سال)
استحکام کششی ۵۰٪	65 000	7.42
استحکام کششی ۲۵٪	135 000	15.41
DP=200	150 000	7.12
داده های آزمون عمر ترانسفرماتورهای توزیع	180 000	20.55

جدول ۲: عمر عادی عایق ترانسفرماتور با معیارهای مختلف .

عمرمورد انتظارعایق برای یک ترانسفرماتور در حال کار در دمای ثابت (دمای نقطه داغ) از تقسیم عمر عادی ترانسفرماتور بر FAA بدست می آید [6] .

$$\text{Expected life} = \frac{\text{Normal insulation life}}{FAA} \quad (۴)$$

از آنجا که یک ترانسفرماتور برای یک مدت طولانی در دمای ثابت کار نمی کند بنابراین FAA را برای بازه های زمانی مختلف حساب کرده، آنگاه پیر شدن عایق در یک دوره زمانی کل، توسط رابطه (۷) قابل محاسبه است .

$$f_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA} t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (۷)$$

که :

F_{EQA} : پیر شدن معادل عایق برای تمامی زمانها.

n : اندیس دوره زمانی (t) .

N : کل بازه های زمانی.

F_{AA} : عامل شتاب پیر شدن عایقی برای بازه زمانی Δt_n .

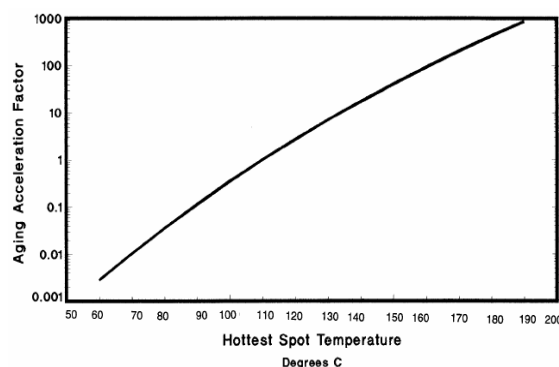
t : زمان هر یک از دوره ها.

با داشتن F_{EQA} و عمرعادی عایق می توان درصد از بین رفتن عمر عایق را از رابطه (۸) محاسبه کرد :

$$\text{Loss_of_life\%} = \frac{F_{EQA} \times t \times 100}{\text{Normal_insulation_life}} \quad (۸)$$

کند . منحنی FAA (شکل ۱) ، مبنایی برای محاسبه عامل شتاب پیر شدن عایقی در بار و دمای ثابت یا بار و دمای متغیر در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته می باشد.

منحنی FAA بر حسب دمای نقطه داغ در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: منحنی FAA بر حسب دمای نقطه داغ .

اگر ۱۱۰ درجه را بعنوان دمای مرجع در نظر بگیریم ، زمانی که دمای سیم پیچها بیشتر از ۱۱۰ درجه باشد ، FAA مقداری بزرگتر از یک را دارد و در دماهای کمتر از ۱۱۰ درجه ، FAA مقداری کمتر از یک دارد . مقالات استاندارد IEEE که در مورد بارگزاری ترانسفرماتور منتشر شده است [5]، رابطه FAA را بصورت زیر بیان میکند :

$$F_{AA} = EXP \left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right) \quad (5)$$

اکنون به موضوعاتی در مورد عمر عادی عایق ترانسفرماتور می پردازیم و با توجه به معادلات بالا و عمر عادی عایق، روندی را برای محاسبه عمر عایق در پیش می گیریم. عمر عادی عایق ترانسفرماتور مدت زمانی است که ترانسفرماتور در آن زمان با دمایی ثابت کار کند ، بدون اینکه در سیستم عایقی آن نقصی ایجاد شود . معمولاً مدت زمان را بر حسب ساعت و دمای ثابت را ۱۱۰ درجه در نظر گرفته شده است . با توجه به معیارهایی که تا کنون ذکر کردیم ، می توان عمر عادی عایق را در دمای مبنا (۱۱۰ درجه) بدست آورد . جدول ۲ عمرعادی عایق با معیارهای مختلف دریک سیستم خالی از اکسیژن و رطوبت در دمای ۱۱۰ درجه را نشان می دهد.

۴. نتیجه گیری

تخمین عمر عایق در دماهای مختلف بپردازیم. بر اساس روش ذکر شده و استفاده از کامپیوترها میتوان به دقت مطالعات افزود. برای مثال می توان دمای سیم پیچ ترانسفرماتور را در هر لحظه اندازه گیری کرد و توسط کامپیوتر FAA مربوطه را محاسبه کرده و با رسم نمودارها و روابط مربوط به آن، عمر عایق ترانسفرماتور را مورد مطالعه قرار داد.

با توجه به مقایسات انجام شده بین معیارهای مختلف می توان درجه پلیمرآزاسیون را به عنوان معیاری معتبر مورد استفاده قرار داد. اما با توجه به نیازهای موجود (مثلا نیاز به آگاهی لحظه ای برای تخریب عایق) می توان روشهای مناسبتری اعم از انتشار گاز CO₂ و furfural در ترانسفرماتور را بعنوان راهکارهای نوین فعلی، دنبال کرد. در قسمت دوم مقاله سعی بر آن شده که بتوان با توجه به معیارهای موجود و استفاده از رابطه داکین، به مطالعه

مراجع

- [8] Head, G., Gale, P.S., and Lawson, W. G. , "Effects of High Temperature and Electric Stress on the Degradation of Oil-Filled Cable Insulation," presented at the 3rd International Conference on Dielectric Materials, Measurements, and Applications, Birmingham, England, Sept. 1979.
- [9] Lawson, W. G., Simmons, M. A., and Gale, P.S. "Thermal Aging of Cellulose Paper Insulation," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-12, no. 1, Feb. 1977.
- [10] Shroff, D. H. and Stannet, A. W., "A Review of Paper Aging in Transformers," *IEE Proceedings*, vol. 132, pt. C, no. 6, Nov. 1985.
- [11] Lampe, W., Spicar, E., and Carranger, K. "Continuous Purification and Supervision of Transformer Insulation Systems in Service," *IEEE Paper A 78 111-7*, presented at the IEEE Winter Power Meeting, Jan./ Feb. 1978.
- [12] Goto, K., Tsukioka, H., and Mori, E. "Measurement of Winding Temperature of Power Transformers and Diagnosis of Aging Deterioration by Detection of CO₂ and CO," *CIGRE Paper 12-02*, 1990.
- [13] "Basic Transformer Life Characteristics," EPRI Report EL-2443, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, June 1982.
- [1] Montsinger, V. M., "Loading Transformers by Temperature," *AIEE Transactions*, vol. 49, 1930, pp. 776-792.
- [2] Satterlee, R. D. and Reed, R. D., "Controlled Temperature and Insulation Protection in the Operation of Transformers," *AIEE Transactions*, vol. 61, pp. 753-758, 1944.
- [3] Hisao Kan Teruo Miyamoto, Yoshihiro Makino, Sadao Namba, Takashi Hara , "Absorption of CO₂ and CO gases and furfural in Insulation oil into paper insulation in oil-immersed Transformers" Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 5-8, 1994
- [4] Dakin, T. W. "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Reaction Rate Phenomenon," *AIEE Transactions*, vol. 66, pp. 113-122, 1947.
- [5] "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers" *IEEE Std C57.91-1995* June 14, 1995 .
- [6] Thermal Overload Protection of Power Transformers – Operating Theory and Practical Experience Rich Hunt, M.S., P.E. & Michael L. Giordano B.S., P.E.
- [7] Sumner, W. A., Stein, G. M. and Lockie, A.M., "Life Expectancy of Oil-Immersed Insulation Structures," *AIEE Transactions*, vol. 72, pp. 924-930, 1953.



[14] “Basic Research on Transformer Life Characteristics,” EPRI Report 2622, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Sept. 1982.

[15] McNutt, W. J. and Kaufman, G. H., “Evaluation of a Functional Life Model for Power Transformers,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, May 1983, pp. 1151–1162.