مدلسازی اثر بارگذاری بر قابلیت اطمینان ترانسفورمر

محمد پوراحمد [۱] ایرج احمدی [۲] تقی بارفروشی [۳]

۱- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری- ساری- ایران
eng2mpa@gmail.com

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه علم و فن آوری مازندران - بهشهر- ایران
iraj.ahmadi@mazust.ac.ir

۳- استادیار- گروه پژوهشی پست های فشارقوی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران
barforoshi@nit.ac.ir

چکیده: ترانسفورمر یکی از مهمترین اجزا سیستم قدرت بوده و تعیین قابلیت اطمینان آن بسیار حائز اهمیت می باشد. برای بدست آوردن قابلیت اطمینان کامل یک ترانسفورمر، تنها تعیین احتمال خرابی های اتفاقی اجزاء آن کافی نیست بلکه باید احتمال ترانسفورمر در مرحله فرسایش نیز تعیین گردد. برای بدست آوردن قابلیت اطمینان ترانسفورمر در مرحله فرسایش، تعیین عمر باقیمانده ترانسفورمر نقش مهمی ایفا می کند. یکی از پارامترهایی که روی عمر متوسط ترانسفورمر تاثیر می‌گذارد، دمای نقطه داغ سیم پیچ می باشد که آن به نوبه خود وابسته به بارگذاری ترانسفورمر می باشد. در این مقاله به تاثیر بارگذاری روی قابلیت اطمینان ترانسفورمر پرداخته شده است. درابتدا قابلیت اطمینان در دوره عمر مفید بررسی شده تا از نتایج آن برای قابلیت اطمینان کامل ترانسفورمر استفاده شود. سپس با مدلسازی حرارتی و استفاده از رابطه ضریب تسریع عمر، میزان تغییرات عمر متوسط ترانسفورمر بواسطه بارگذاری ارائه گردیده است و با استفاده از عمر متوسط محاسبه شده و تابع توزیع نرمال، قابلیت اطمینان ترانسفورماتور در مرحله فرسایش مدلسازی گردید. مشخصات الکترکی، حرارتی و همچنین داده های بار ساعتی یک ساله یک ترانسفورماتور واقعی، به مدل بدست آمده اعمال و تاثیر حالت های مختلف بارگذاری و بالا رفتن سن بر قابلیت اطمینان ترانسفورماتور در مرحله فرسایش و قابلیت اطمینان کامل ترانسفورمر شبیه سازی شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج شبیه سازی های نشان دهنده تاثیر زیاد بارگذاری بر قابلیت اطمینان ترانسفورمر بوده و از آنها می توان برای پایش قابلیت اطمینان و عمر باقیمانده ترانسفورمر بصورت بر خط (*On-line*) استفاده نمود.

کلمات کلیدی: قابلیت اطمینان، عمر باقیمانده ترانسفورمر، بارگذاری، ضریب تسریع عمر، مرحله فرسایش

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۸
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر ایرج احمدی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – مازندران – بهشهر – کیلومتر ۳ جاده دریا – دانشگاه علم و فناوری مازندران – دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۱- مقدمه

ترانسفورمرها از تجهیزات گران قیمت و اساسی شبکه‌های قدرت هستند که از مدار خارج شدن آنها باعث قطع طولانی مدت انرژی و متعاقب آن کاهش فروش و درآمد شرکت‌های برق می شود. از آنجا که تعمیر یا جایگزینی این تجهیزات مستلزم هزینه بسیار بالا و صرف زمان طولانی می باشد، اطلاع از قابلیت اطمینان آنها برای شرکت‌های برق از اهمیت بالایی برخوردار است.

قابلیت اطمینان ترانسفورمرها در مقالات متعددی مورد بحث قرار گرفته است. مدل قابلیت اطمینان ترانسفورمر برای خرابی اتفاقی اجزا در دوره عمر مفید در [۱] ارائه شده است. همچنین مدل قابلیت اطمینان ترانسفورمر در حالت خنک کنندگی ONAF در مرجع [۲] ارائه شده است. در این مقالات اجزا ترانسفورمر به زیر سیستم‌هایی تقسیم بندی شده و با استفاده از روش مدل سازی مارکوف قابلیت اطمینان سیستم تحلیل شده است. بررسی قابلیت اطمینان ترانسفورمر در مرجع [۲] با محوریت خنک‌کنندگی صورت پذیرفته است. اما به بحث‌های بارگذاری و فرسایش پرداخته نشده است.

عامل اصلی در پیر شدن و فرسایش ترانسفورمر که باعث ازدیاد نرخ خرابی آن می‌گردد، تخریب عایق می‌باشد. در تخریب عایق حرارت نقش اصلی را بازی می‌کند و محتمل‌ترین نقطه برای تخریب عایق نقطه داغ ترانسفورمر می باشد. به همین دلیل تخمین دمای نقطه داغ و در نتیجه طول عمر باقیمانده ترانسفورمرهای قدرت، جهت تحلیل قابلیت اطمینان آن، از دغدغه‌های اصلی دارندگان این تجهیزات، مخصوصاً در مواقعی که ترانسفورمر در شرایط اضافه بار پیوسته یا اضافه بارهای دوره‌ای قرار می‌گیرد، می‌باشد.

در مرجع [۳] اثر حرارتی بارگذاری به طور کامل شرح داده شده و در مورد شرایط بارگذاری فراتر از مقادیر نامی بحث شده است. در ادامه روش استفاده از استاندارد IEEE برای محدودیت‌های بارگذاری ترانسفورمر توضیح داده شده و مدل حرارتی طبق استاندارد برای بدست آوردن دمای نقطه داغ ارائه شده است. در مرجع [۴] یک مدل هیبریدی خروج وابسته به موقعیت ترانسفورمر برای چهار حالت شکست (مدل دمای نقطه داغ، مدل نقص فرسودگی وابسته به دمای نقطه داغ، مدل نقص اتفاقی وابسته به دمای محیط، مدل خروج بواسطه نقص حفاظت اضافه بار) بصورت ترکیبی بیان شده است. یکی از حالتهای این مدل خروج به سبب اختلال در حفاظت اضافه بار می باشد که با استفاده از تابع توزیع نرمال قابلیت اطمینان سیستم را بررسی نموده است. در مرجع [۵] روش جدیدی برای ارزیابی عمر ترانسفورمر با توجه به دمای محیط ارائه شده است. این تخمین عمر باقیمانده، می تواند زمان تعمیرات و یا جایگزینی ترانسفورمر را تعیین کند.

در مرجع [۶] روشی برای ارزیابی احتمالات افزایش دمای ماکزیمم ترانسفورمر و افت انتظاری عمر ترانسفورمر با در نظر گرفتن بار گذشته پست و دمای محیطی بیان شده است. ولی فرسایش و میزان عمر ترانسفورمر مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در مرجع [۷] به مسئله بارگذاری ترانسفورمر با رویکرد تحریک بیش از حد و تاثیر آن روی عمر ترانسفورمر پرداخته شده است.

در مرجع [۸] به تعیین قابلیت بارگذاری ترانسفورمر با در نظر گرفتن عملکرد فوق تحریک می‌پردازد. ابتدا مدل تخمین دمای نقطه داغ استاندارد IEEE معرفی می‌شود و در ادامه مدل، برای شرایط فوق تحریک اصلاح می‌گردد و در نهایت با استفاده از مدل اصلاح شده با توجه به نرخ های پیری عایق و تغییرات دمای محیط، قابلیت بارگذاری ترانسفورمر با شبیه سازی تعیین و میزان تاثیر فوق تحریک روی بار مجاز ترانسفورمر مشخص می‌گردد.

آنالیز گازهای حل شده در روغن (که مهمترین عایق ترانسفورمر می باشد) پر کاربرد ترین تکنیک در زمینه پایش وضعیت در ترانسفورمرهای قدرت است. در این روش رابطه بین مقادیر گازهای تولیدی و نوع خطای ترانسفورمر توسط روش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۹].

از عوامل مهم در تعیین عمر متوسط ترانسفورمرها زوال عایق می‌باشد که تابعی از دمای کار، رطوبت و اکسیژن موجود در عایق می‌باشد. امروزه با سیستمهای مدرن فرآوری و نگهداری روغن و دیگر عایقهای ترانسفورمر، اکسیژن و رطوبت عایق‌ها حداقل شده است. از آنجا که توزیع دما در ترانسفورمر یکنواخت نیست، تحقیقات روی تعیین داغ ترین نقطه ترانسفورمر (اصطلاحاً نقطه داغ) متمرکز شده است و از آن به عنوان عامل اصلی تعیین فرسایش عایقی یاد می شود [۱۰-۱۲].

در استاندارد IEEE C57.91-1995 مدل انتقال حرارتی ارائه شده است که می تواند دمای نقطه داغ را تعیین کند. برای تعیین دمای نقطه داغ در این مدل حرارتی، بارگذاری وارد روابط می شود. از این رو بارگذاری یکی از موارد تاثیر گذار روی دماهای ترانسفورمر مخصوصا دمای نقطه داغ می‌باشد [۸و۱۲].

تحقیقات گذشته بیشتر به قابلیت اطمینان در خرابی های اتفاقی، ارزیابی عمر متوسط و قابلیت بارگذاری ترانسفورمر پرداخته اند و اثر بارگذاری روی قابلیت اطمینان ترانسفورمر مورد بررسی قرار نگرفته است. تا زمانیکه ترانسفورمر به محدوده عمر متوسط وارد نشده است و در دوره عمر مفید قرار دارد، خرابی‌های اتفاقی اجزاء، در تعیین قابلیت اطمینان نقش اساسی را ایفا می نمایند. ولی پس از ورود ترانسفورمر به محدوده عمر متوسط، فرسایش نیز روی قابلیت اطمینان ترانسفورمر تاثیرگذار خواهد بود. مهمترین عامل در تعیین قابلیت اطمینان در مرحله فرسایش، عمر متوسط ترانسفورمر می باشد [۱۳]. همان طور که ذکر شد عمر متوسط ترانسفورمر متاثر از دمای نقطه داغ و نتیجتاً بارگذاری می باشد. در این مقاله تاثیر روند بارگذاری بر فرسایش و قابلیت اطمینان ترانسفورمر مدل می‌گردد و نشان داده می‌شود که علاوه بر خرابی‌های اتفاقی، فرسایش ترانسفورمر ناشی از بارگذاری سالیانه چه تاثیری روی قابلیت اطمینان آن خواهد داشت.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]

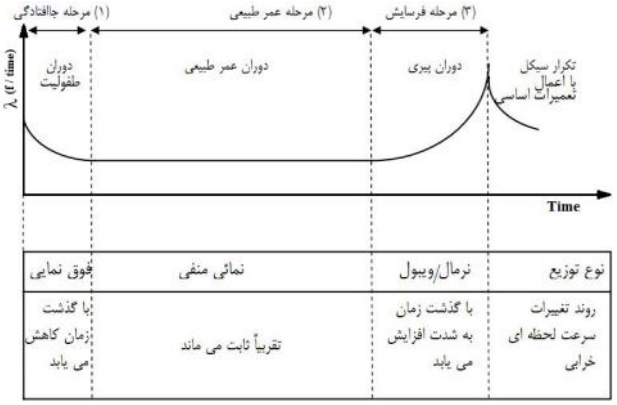
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

۲- قابلیت اطمینان ترانسفورمر

جهت بررسی قابلیت اطمینان ترانسفورمر، ابتدا مبانی قابلیت اطمینان مرور خواهد شد و سپس قابلیت اطمینان در مرحله فرسایش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۱- نمودار وقوع خطر بر حسب زمان

شکل (۱) که به منحنی وانی شکل معروف است به عنوان منحنی تغییرات آهنگ وقوع خطر (λ) برای بسیاری از قطعات فیزیکی واقعی شناخته شده می‌باشد. این منحنی به سه ناحیه تقسیم بندی می‌شود که نوع توزیع احتمال و روند تغییرات λ در هر یک از سه ناحیه در جدول پایین شکل ارائه شده اند.



شکل (۱) : منحنی تغییرات آهنگ وقوع خطر بر حسب زمان

این سه ناحیه عبارتند از :

۲-۲- مرحله جا افتادگی

در ابتدای راه اندازی، ترانسفورمر احتیاج به تنظیم شدن و رفع نواقص و سازگار شدن با محیط دارد و لذا امکان وقوع خطر بالاست. این موضوع بیشتر ناشی از خطاهای ساخت و یا طراحی نا مناسب باشد. در این ناحیه آهنگ وقوع خطر به عنوان تابعی از زمان روند نزولی دارد. در این مقاله به علت ناچیز بودن تاثیر این مرحله از آن صرف نظر شده است.

۲-۳- مرحله عمر طبیعی (عمر مفید)

این ناحیه با نام دوره عمر مفید یا مرحله عملکرد عادی شناخته می شود و ویژگی آن ثابت ماندن آهنگ وقوع خطر می‌باشد. وقوع شکست در این ناحیه صرفاً تصادفی است. در این دوره زمانی، از توزیع نمایی برای ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده می شود. توزیع نمایی یا توزیع با نمای منفی متداول‌ترین توزیع فراوانی است که در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌ها بکار می‌رود. با این شرایط، قابلیت اطمینان سیستم برای مدت زمان t وقتی آهنگ از کار افتادن λ ثابت و مستقل از زمان است از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \qquad (۱)$$

۳- مدلسازی قابلیت اطمینان ترانسفورمر در مرحله فرسایش

در اکثر پژوهش‌های گذشته در زمینه قابلیت اطمینان ترانسفورمر، بررسی‌ها بر مبنای عملکرد ترانسفورمر در دوره عمر مفید و با آهنگ وقوع خطر ثابت صورت گرفته است (کاربرد تابع توزیع نمایی). اما بعد از طی این دوره قطعات و تجهیزات به سن فرسودگی می‌رسند و شکست‌های زیادی رخ می‌دهد. به عبارت دیگر سرعت خرابی لحظه‌ای دستگاه‌ها روند افزایشی به خود گرفته و در نتیجه در این دوران هر مقدار از عمر دستگاه می‌گذرد، سرعت لحظه‌ای (احتمال خرابی) در آن بیشتر خواهد شد. این ناحیه به نام مرحله فرسایش شناخته می‌شود و مشخصه آن روند شدید افزایشی آهنگ وقوع خطر بر حسب زمان می باشد. در این ناحیه از توزیع نرمال یا ویبول برای ارزیابی قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. هدف این مقاله مدلسازی قابلیت اطمینان ترانسفورمر در این مرحله می‌باشد که در ادامه بحث خواهدشد.

با وجود تعیین زمان میانگین وقوع شکست (MTTF) ترانسفورمر، باید توجه شود که یک ترانسفورمر ممکن است در طی چنین دوره زمانی، وارد مرحله فرسایش شود، مگر آن که با اقدامات ویژه، مانند نگهداری و تعویض قطعات عملاً دوره عمر مفید را طولانی‌تر کرد. بنابراین صرفاً با محاسبه MTTF نمی‌توان انتظار داشت که ترانسفورمر به طور متوسط برای یک چنین مدت زمانی از کار نیافتد. در این شرایط می توان از تابع توزیع نرمال حول مقدار میانگین عمر در مرحله فرسایش برای مدل‌سازی زمان وقوع شکست استفاده کرد. با کاربرد این تابع و معرفی t به عنوان عمر ترانسفورمر، M به عنوان عمر میانگین در مرحله فرسایش و σ به عنوان انحراف استاندارد عمر در این مرحله می توان تابع چگالی احتمال از کار افتادن را تشکیل داد [۱۴]. آهنگ وقوع خطر روند افزایشی شدیدی نسبت به زمان دارد، لذا عمر میانگین M در این مرحله می تواند به مراتب کوچکتر از MTTF شود.

احتمال از کار نیافتادن ناشی از فرسایش در طی مدت زمان t در فاصله زمانی از T تا (T + t) بصورت رابطه (۲) بیان می شود (احتمالات مرحله فرسایش با اندیس ω نشان داده شده است).

$$R_{\omega}(t) = \int_{T+t}^{\infty} f(t).dt \Big/ \int_{T}^{\infty} f(t).dt = \frac{R_{\omega}(T+t)}{R_{\omega}(T)} \qquad (۲)$$

هرگاه از کار افتادگی‌های اتفاقی نیز در محاسبه احتمال کلی از کار نیفتادن منظور شود، به مفهوم همزمانی عدم وقوع از کار افتادن ناشی از دوره عمر مفید و عدم از کار افتادن ناشی از فرسایش خواهد بود. مجدداً در احتساب دامنه زمانی t از زمان T تا (T+t) هرگاه حادثه اتفاقی با اندیس c نشان داده شود برای احتمال کل داریم:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

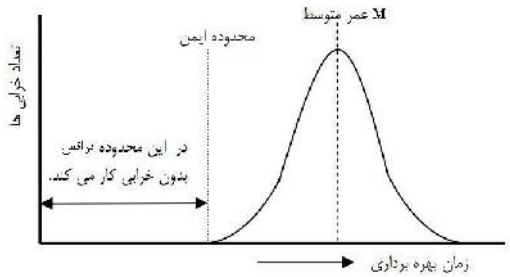
$$R(t) = R_c(t).R_\omega(t) = e^{-\lambda t}\frac{R_\omega(T+t)}{R_\omega(T)} \quad (۳)$$

با منظور کردن شروع دوره عمر از لحظه صفر (T = 0) رابطه (۳) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$R(t) = e^{-\lambda t}\frac{R_\omega(0+t)}{R_\omega(0)} = e^{-\lambda t}R_\omega(t) \quad (۴)$$
$$R_\omega(0) = 1$$

۳-۱- مقدار متوسط عمر

تعداد خرابی‌های ناشی از فرسایش یک ترانسفورمر در شکل (۲) نمایش داده شده است. در این شکل، M مقدار متوسط عمر ترانسفورمر می‌باشد. در این پایان نامه دو حالت برای عمر ترانسفورمر، که عاملی در تعیین قابلیت اطمینان می‌باشد، درنظر گرفته خواهد شد.



شکل (۲) توزیع نرمال عمر ترانسفورمر

۳-۱-۱- بدون در نظر گرفتن اثر فرسایش

در این حالت فرسایشی که توسط بارگذاری روی عمر ترانسقورمر اثر می‌گذارد در نظر گرفته نخواهد شد. بنابراین در این حالت متوسط عمر ترانسفورمر همان عمر استانداردی که شرکت سازنده تعیین می‌کند، در نظر گرفته می‌شود. برای بدست آوردن مقدار تابع توزیع نرمال از جدول استاندارد، از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$Z_1 = \frac{t-M}{\sigma} \quad (۵)$$

۳-۱-۲- با در نظر گرفتن اثر فرسایش

اگر اثر فرسایش روی عمر ترانسفورمر در نظر گرفته شود، بسته به شرایط بارگذاری، مقدار عمر می‌تواند از مقدار استاندارد بیشتر یا کمتر گردد. مقدار متوسط عمری که معمولا برای ترانسفورمر در نظر گرفته می شود در حالت عملکرد پیوسته ترانسفورمر در بار نامی می‌باشد. به عبارت دیگر اگر دمای نقطه داغ ترانسفورمر که یکی از عوامل اصلی ایجاد فرسایش می‌باشد به طور پیوسته ۱۱۰ درجه سانتیگراد باشد، مقدار عمر پیش بینی شده ترانسفورمر صحت خواهد داشت. ولی در واقع این طور نیست و ترانسفورمر در مدت بارگذاری سال‌های عمر خود ممکن است دچار اضافه باری‌ها و کم باری‌های بسیاری گردد و مقدار M کمتر و یا بیشتر از حالت عادی شود [۳و۱۲]. دراین حالت مقدار عمر ترانسفورمر با در نظر گرفتن اثر فرسایش بصورت رابطه (۶) محاسبه خواهد شد:

$$M_i = M + t - F_{aacu} \quad (۶)$$

که در آن M_i میانگین عمر ترانسفورمر با در نظر گرفتن فرسایش (ساعت)، M میانگین عمر ترانسفورمر بدون در نظر گرفتن فرسایش (ساعت)، t زمان بهره برداری (ساعت)، F_{aacu} ضریب تسریع فرسودگی تجمعی (ساعت) می باشد. در این حالت برای بدست آوردن مقدار تابع توزیع نرمال از جدول استاندارد از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$Z_2 = \frac{t-M_i}{\sigma} \quad (۷)$$

۳-۲- ضریب تسریع فرسودگی

در راهنمای بارگذاری ***IEEE*** ضریب تسریع فرسودگی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{aa} = Exp\left[\frac{B}{\theta_{H,R}+273} - \frac{B}{\theta_H+273}\right] \quad (۸)$$

که در آن F_{aa} ضریب تسریع فرسودگی عایق، θ_H دمای نقطه داغ (متغیر اصلی)، B ثابت فرسودگی (بطور نمونه ۱۵۰۰۰)، $\theta_{H,R}$ دمای نقطه داغ سیم پیچ در بار نامی (۹۵ درجه سانتیگراد اگر $\Delta\theta_{W/A,R}$ =55°C باشد و ۱۱۰ درجه سانتیگراد اگر $\Delta\theta_{W/A,R}$= 65°C باشد) می‌باشند. اگر مقدار F_{aa} بزرگتر از ۱ شود دمای نقطه داغ بزرگتر از ۱۱۰ درجه سانتیگراد خواهد بود و به افت سریعتر عمر منجر خواهد شد. جدول ۱ مقادیر ضریب تسریع فرسودگی را به ازاء دماهای مختلف نقطه داغ ارائه می‌دهد[۱۲].

جدول(۱) : ضریب تسریع فرسودگی

دمای نقطه داغ °C	ضریب تسریع فرسودگی
۱۱۰	۱
۱۱۷	۲
۱۲۴	۴
۱۳۱	۸
۱۳۹	۱۶
۱۴۷	۳۲
۱۵۶	۶۴
۱۶۴	۱۲۸
۱۷۳	۲۵۶
۱۸۰	۴۲۵

بر مبنای جدول ۱ به طور سرانگشتی می توان گفت: ضریب تسریع فرسودگی به ازای هر ۷°C افزایش در دمای نقطه داغ، دو برابر می‌شود.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

خطای این قانون در دماهای بالا قابل توجه است. برای مثال اگر عمر نرمال ۲۰/۶ سال انتخاب شده باشد (پیشنهاد *IEEE*) با دمای کارکرد ثابت $117^{o}C$ در نصف این زمان، عمر عایق پایان می یابد.

از آنجاییکه فرسودگی عایق یک فرایند تجمعی می‌باشد یک ضریب تسریع فرسودگی معادل می‌تواند بعنوان مجموع رابطه (۸) روی فاصله های زمانی گسسته بیان شود. این مقدار مجموع در رابطه (۹) ارائه شده است.

$$F_{aacu} = \frac{\sum_{n=1}^{N} F_{aa_n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^{N} \Delta t_n} \qquad (۹)$$

که در آن F_{aacu} ضریب فرسودگی معادل برای دوره زمانی کل، Δt_n فاصله زمانی (ساعت)، N تعداد کل فاصله‌های زمانی، $F_{aa,n}$ ضریب تسریع فرسودگی برای دمایی که در فاصله زمانی Δt_n وجود دارد، می‌باشند.

۳-۳- محاسبه دمای نقطه داغ با استفاده از مدل حرارتی استاندارد IEEE

برای داشتن ضریب تسریع فرسودگی و متوسط عمر ترانسفورمر ابتدا باید دمای نقطه داغ را در دست داشت. بهترین راه برای بدست آوردن این دما استفاده از مدل حرارتی در استاندارد IEEE می‌باشد. که مهمترین متغییر آن میزان بارگذاری می باشد. در این مدل دمای نقطه داغ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \qquad (۱۰)$$

که در آن $\boldsymbol{\theta_H}$ دمای نقطه داغ سیم پیچ بر حسب °C، $\boldsymbol{\theta_A}$ دمای محیط بر حسب °C، $\boldsymbol{\Delta\theta_{TO}}$ افزایش دمای روغن قسمت بالای تانک نسبت به دمای محیط بر حسب °C، $\boldsymbol{\Delta\theta_H}$ افزایش دمای نقطه داغ سیم پیچ نسبت به دمای روغن بالای تانک بر حسب °C می‌باشند.

افزایش دمای روغن بالای تانک نسبت به دمای محیط نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta\theta_{TO} = \left(\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,i}\right)\left[1 - Exp\left(\frac{-1}{\tau_{TO}}\right)\right] + \Delta\theta_{TO,i} \qquad (۱۱)$$

که در آن $\boldsymbol{\Delta\theta_{TO,U}}$ افزایش دمای نهایی روغن قسمت بالای تانک نسبت به محیط، $\boldsymbol{\Delta\theta_{TO,i}}$ افزایش دمای اولیه روغن قسمت بالای تانک نسبت به محیط، $\mathbf{t}$ مدت زمان تغییرات بار برحسب ساعت، $\boldsymbol{\tau_{TO}}$ ثابت زمانی روغن ترانسفورمر برای هر بارگذاری می‌باشد.

در مدت افزایش یا کاهش بار، یک حالت گذرای حرارتی در داخل ترانسفورمر اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود دما بالا و پایین برود. بواسطه جرم بالای ترانسفورمر، زمانی طول می‌کشد تا حرارت از یک مقدار اولیه به یک مقدار نهایی برسد. از اینرو افزایش دمای اولیه و نهایی روغن بالای تانک بصورت روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\Delta\theta_{TO,i} = \Delta\theta_{TO,R}\left[\frac{K_i^2 R + 1}{R + 1}\right]^n \qquad (۱۲)$$

$$\Delta\theta_{TO,U} = \Delta\theta_{TO,R}\left[\frac{K_U^2 R + 1}{R + 1}\right]^n \qquad (۱۳)$$

که در آن $\boldsymbol{\Delta\theta_{TO,R}}$ افزایش دمای روغن بالای تانک نسبت به محیط در بار نامی (در زمان گزارش تست ترانسفورمر بدست می آید)، $\boldsymbol{K}$ نسبت بار $\boldsymbol{L}$ به بار نامی بر حسب پریونیت، $\boldsymbol{R}$ نسبت تلفات بار در بار نامی به تلفات بی باری، $\boldsymbol{n}$ توان تجربی که برای محاسبه تغییرات $\boldsymbol{\Delta\theta_{TO}}$ با تغییرات بار استفاده می‌شود. همچنین برای محاسبه افزایش دمای نقطه داغ سیم پیچ از روابط زیر استفاده می شود:

$$\Delta\theta_H = \left(\Delta\theta_{H,U} - \Delta\theta_{H,i}\right)\left(1 - Exp\left(-\frac{1}{\tau_w}\right)\right) + \Delta\theta_{H,i} \qquad (۱۴)$$

$$\Delta\theta_{H,U} = \Delta\theta_{H,R} K_U^{2m} \qquad (۱۵)$$

$$\Delta\theta_{H,i} = \Delta\theta_{H,R} K_i^{2m} \qquad (۱۶)$$

که در آن $\boldsymbol{\Delta\theta_{H,i}}$ افزایش دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالای تانک اولیه بر حسب $\boldsymbol{°C}$، $\boldsymbol{\Delta\theta_{H,U}}$ افزایش دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالای تانک نهایی بر حسب $\boldsymbol{°C}$، $\boldsymbol{\Delta\theta_{H,R}}$ افزایش دمای نقطه داغ نسبت به دمای روغن بالای تانک در بار نامی بر حسب $\boldsymbol{°C}$ می باشد [۱۰و۱۴]. $\boldsymbol{n}$ و $\boldsymbol{m}$ بسته به نوع سیستم خنک کنندگی ترانسفورمر مقادیر متفاوتی دارند که از جدول ۲ قابل استخراج می باشد[۱۲].

جدول (۲) : توان‌های استفاده شده در روابط تعیین دما

نوع خنک کنندگی	*m*	*n*
ONAN	۰/۸	۰/۸
ONAF	۰/۸	۰/۹
OFAF غیر مستقیم	۰/۸	۰/۹
OFAF مستقیم	۱/۰	۱/۰

۴-۳- تاثیر سایر پارامترها

همان گونه که در روابط مدل سازی حرارتی ترانسفورمر بیان شد، دمای محیط یکی از عوامل مهم در تغییرات دمای نقطه داغ ترانسفورمر می باشد، به همین منظور دمای محیطی که ترانسفورمر در آن قراردارد باید در شبیه سازی منظور گردد.

معمولا در زمان بهره برداری ترانسفورمر، ولتاژ بطور پیوسته ثابت نیست. تغییر ولتاژ تاثیر فراوانی روی توان ظاهری یعنی همان بارگذاری خواهد داشت (به دلیل تغییر در جریان)، به همین منظور تغییرات ولتاژ مربوط به ترانسفورمر در مدت بارگذاری به صورت یک

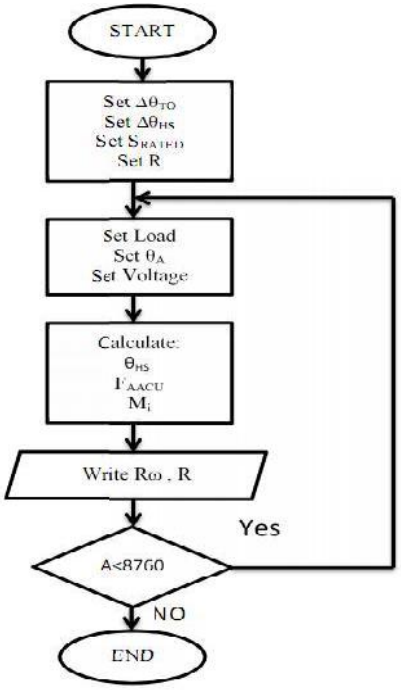
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

داده باید در فرایند تعیین نقطه داغ به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شود:

$$S_{new} = \frac{S_{old} \times V_{new}}{V_{base}} \quad (۱۷)$$

که در آن S_{old} توان کشیده شده از ترانسفورمر ، V_{new} ولتاژی که توان تحت آن کشیده می شود، V_{base} ولتاژ نامی ترانسفورمر و S_{new} توان معادل ترانسفورمر در محاسبات تعیین نقطه داغ می باشند.

تمامی اعمال صورت گرفته در شبیه سازی در فلوچارت شکل (۳) نمایش داده شده است:



شکل (۳) : فلوچارت شبیه سازی برای یک سال

۴- شبیه سازی و مطالعه عددی

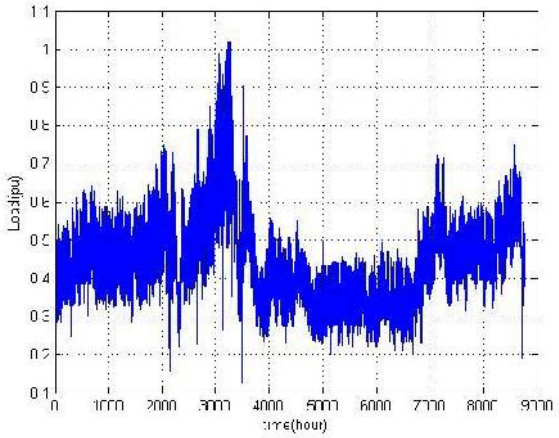
برای مطالعه اثر بارگذاری روی قابلیت اطمینان ترانسفورمر یک ترانسفورمر قدرت از یکی از پست‌های تبدیل کشور جهت انجام شبیه سازی انتخاب شد. در این شبیه سازی روابط مدل حرارتی برای محاسبه دمای نقطه داغ و متعاقب آن بدست آوردن ضریب تسریع فرسودگی در آن گنجانده شده تا مدل قابلیت اطمینان ترانسفورمر در مرحله فرسایش را بدست دهد و بوسیله آن رفتار حالت‌های مختلف بارگذاری از قبیل بارگذاری‌های سنگین و سبک روی قابلیت اطمینان ترانسفورمر مورد مطالعه قرار گیرد.

۴-۱- اطلاعات ترانسفورمر مورد مطالعه

اطلاعات ترانسفورمر انتخاب شده جهت شبیه سازی در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین منحنی مقادیر بار ترانسفورمر بر حسب ساعت در سال پایه در شکل (۴) نمایش داده شده است.

جدول (۳) : مشخصات ترانسفورمر

پارامتر	مقادیر
توان نامی	۲۰۰MVA
نسبت تبدیل	۴۰۰/۲۳۰Kv
سیستم خنک کنندگی	ONAF
$\Delta\theta_{hst,rated}$	۴۵°
$\Delta\theta_{top\text{-}oil,rated}$	۴۵°
$\tau_{winding}$	۰/۱ ساعت
τ_{oil}	۳/۵ ساعت
R	۴/۷
m	۰/۸
n	۰/۹
M	۱۸۰۰۰۰ ساعت



شکل (۴) : نمودار بارگذاری ترانسفورمر نمونه در سال پایه

۴-۲- نتایج شبیه سازی

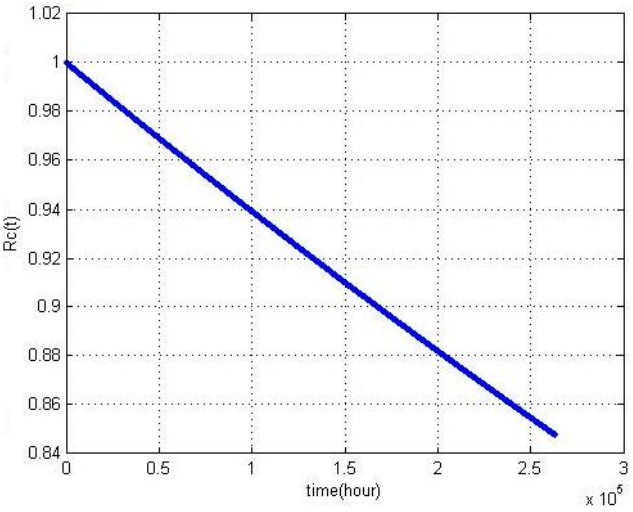
عمر متوسط ترانسفورمر (M) نقش مهمی در تعین قابلیت اطمینان در دوره فرسایش ایفا می‌کند. بر مبنای تابع چگالی احتمال، تقریبا در زمان $M-3\sigma$ مرحله فرسایش شروع می شود و تقریبا در زمان $M+3\sigma$ عمر ترانسفورمر به اتمام می رسد. مقدار عمر متوسط طبق استاندارد **IEEE** ، ۱۸۰۰۰۰ ساعت و انحراف استاندارد ۱۵۰۰۰ ساعت در نظر گرفته شده است. با این توضیحات برای حالت‌های مختلف، قابلیت اطمینان در ادامه شرح داده شده است.

۴-۲-۱- قابلیت اطمینان ترانسفورمر بدون در نظر گرفتن اثر فرسایش (دوره عمر مفید)

همانطور که در قبل گفته شد اگر از فرسایش صرفنظر گردد، قابلیت اطمینان ترانسفورمر با توزیع نمایی قابل توصیف است. با توجه به نتایج بدست آمده در مرجع [۲] و با استفاده از روش کاهش حالت مدل قابلیت اطمینان خرابی های اتفاقی در نهایت بصورت مدل مارکوف دو وضعیتی (سالم و خراب) تبدیل شد که در آن نرخ خرابی ترانسفورمر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]

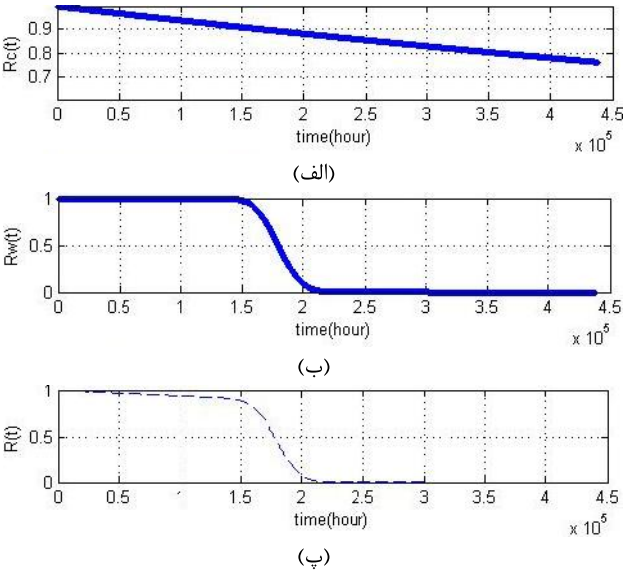
f/yr ۰/۰۰۵۵ بدست آمد. با این شرایط مدت زمان میانگین تا وقوع شکست در دوره عمر مفید m، ۱۸۱ سال می باشد. در این شرایط نمودار قابلیت اطمینان ترانسفورمر در دوره عمر مفید بر حسب زمان بصورت نشان داده شده در شکل (۵) می باشد.



شکل (۵) : نمودار قابلیت اطمینان ترانسفورمر در دوره عمر مفید

۴-۲-۲- قابلیت اطمینان ترانسفورمر با در نظر گرفتن فرسایش و بدون در نظر گرفتن اثر بارگذاری

در این حالت عمر متوسط ترانسفورمر ثابت بوده و میزان بارگذاری نقشی در قابلیت اطمینان ترانسفورمر بازی نمی کند. شکل (۶) نمودار قابلیت اطمینان ترانسفورمر بدون در نظر گرفتن اثر بارگذاری را نمایش می دهد.



شکل (۶) : نمودار قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن اثر بارگذاری
(الف) قابلیت اطمینان حادثه ای، (ب) قابلیت اطمینان فرسایش
(پ) قابلیت اطمینان کلی

با توجه به میانگین عمر ترانسفورمر که ۱۸۰۰۰۰ ساعت است مرحله فرسایش حدودا در زمان ۱۳۵۰۰۰ ساعت شروع می‌شود و در زمان ۲۲۵۰۰۰ ساعت به اتمام می رسد بدین معنی که در این زمان قابلیت اطمینان ترانسفورمر تقریبا صفر خواهد شد.

قابلیت اطمینان در این حالت حاصلضرب دو عبارت است. (۱) قابلیت اطمینان ناشی از حوادث اتفاقی (توزیع نمایی) که در شکل (۶- الف) نمایش داده شده است. و (۲) قابلیت اطمینان ناشی از فرسایش (توزیع نرمال) که در شکل (۶- ب) نمایش داده شده است.

نمودار شکل (۶– پ) نشان دهنده حاصلضرب نقطه به نقطه دو منحنی بالا و نشان دهنده قابلیت اطمینان کلی ترانسفورمر در این حالت است. همان طور که در این نمودار دیده می‌شود به دلیل ثابت بودن عمر متوسط، نزول قابلیت اطمینان به طور پیوسته و یکنواخت طبق تابع چگالی نرمال می‌باشد.

۴-۲-۳- قابلیت اطمینان ترانسفورمر با در نظر گرفتن اثرات بارگذاری سبک بر فرسایش

اثر بار گذاری بر روند فرسایش ترانسفورمر به صورت تغییر در مقدار عمر متوسط ترانسفورمر (M) نمایان می‌گردد. برای در نظر گرفتن اثر بارگذاری بر روند فرسایش ترانسفورمر در یک دوره زمانی باید مقدار متوسط بار در هر ساعت آن دوره مشخص باشد. با توجه به اینکه مقادیر ساعتی بار واقعی در سال پایه موجود است و اینکه مقدار رشد بار در منطقه مورد مطالعه حدود ۵٪ می‌باشد می‌توان میزان بار را برای سال‌های آینده پیش‌بینی نمود و با افزودن ۵ درصد به مقادیر بارگذاری سال قبل به بار سال بعد دست یافت. با توجه به اینکه در شرایط اضطراری حداکثر بارگذاری تا ۱/۲ پریونیت برای زمان محدود مجاز است، اگر در روند شبیه سازی میزان بار پیش بینی شده از ۱/۲ پریونیت فراتر رود مقدار آن در ۱/۲ پریونیت تثبیت می‌گردد و فرض می‌شود بقیه بار توسط پست‌های مجاور تامین می‌گردد. همچنین فرض می‌گردد هر ۵ سال یکبار شرکت برق با در مدار آوردن ترانسفورمر یا پست جدیدی بار را از روی ترانسفورمر تحت مطالعه بر می‌دارد. به همین دلیل منحنی ساعتی بار هر ۵ سال یکبار به مقدار سال پایه برگردانده می‌شود.

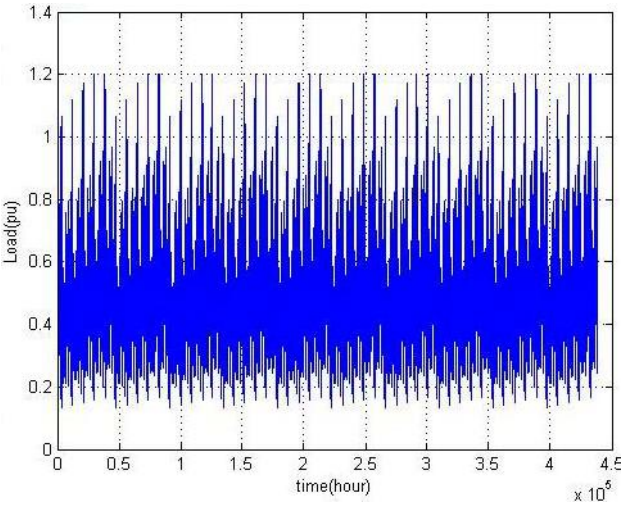
با توجه به موارد ذکر شده در بالا نمودار بار پیش‌بینی شده برای ترانسفورمر در یک دوره ۵۰ ساله در شرایط بارگذاری سبک در شکل (۷) نشان داده شده است.

شکل (۸) دمای نقطه داغ ترانسفورمر را تحت بارگذاری سبک نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، دمای نقطه داغ از ^{oC}۱۱۰ بالاتر می رود که این امر باعث فرسایش تدریجی ترانسفورمر می‌گردد. اما به علت برداشته شدن بار در پایان هر ۵ سال دما از ۱۷۵ درجه سانتیگراد تجاوز نمی‌کند.

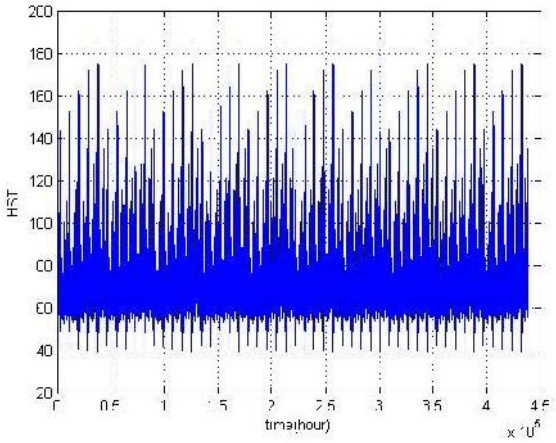
نمودار قابلیت اطمینان ترانسفورمر در این حالت بارگذاری در شکل (۹) ارائه شده است. با توجه به این نمودار با وارد کردن اثر بارگذاری به شبیه سازی نتایج زیر حاصل شده است:

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1-Spring 2017

مرحله فرسایش از زمان ۲۲۰۰۰۰ ساعت شروع شده است. با توجه به



شکل (۷): بارگذاری سبک در یک دوره ۵۰ ساله و با برداشتن بار ۵ ساله

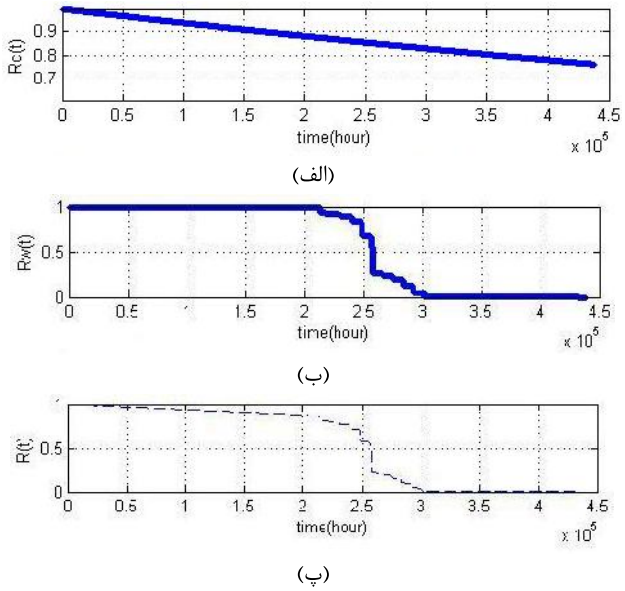


شکل (۸): نمودار دمای نقطه داغ ترانسفورمر برای بارگذاری سبک

میزان بارگذاری عمر متوسط محاسبه شده در این زمان معادل ۲۶۵۰۰۰ ساعت بوده است که حدود ۸۵۰۰۰ ساعت از حالت بدون در نظر گرفتن بارگذاری (یعنی مقدار ۱۸۰۰۰۰ ساعت) که در شکل (۶) نشان داده شده است بیشتر می‌باشد. به عبارت دیگر با این حالت بارگذاری، به عمر ترانسفورمر اضافه شده است و بدلیل تغییرات عمر، قابلیت اطمینان در زمان ۳۱۰۰۰۰ ساعت صفر می گردد در حالیکه در شکل (۶) در ۲۲۵۰۰۰ ساعت صفر شده بود.

با این توضیحات مشخص است در بارگذاری سبک عمر ترانسفورمر از مقدار متوسط پیش بینی شده در استاندارد بیشتر است. علت یکنواخت نبودن سیر نزولی این نمودار بعلت تغییرات بار و به تبع آن تغییرات متوسط عمر ترانسفورمر (M) در طول زمان می باشد.

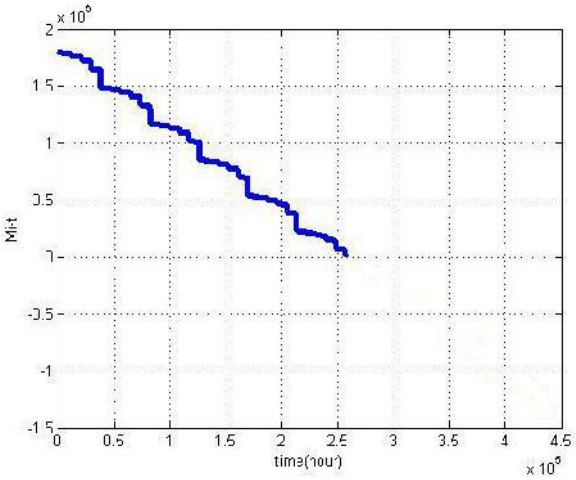
شکل (۱۰) تغییرات عمر باقیمانده ترانسفورمر در بارگذاری سبک را نشان می دهد همان طور که پیداست در اواخر هر دوره ۵ ساله به دلیل سنگین شدن بارگذاری با شیب بیشتری نزول می کند و با سبک شدن بارگذاری در ابتدای دوره بعدی شیب آن به سرعت کم می شود.



شکل (۹): نمودارهای قابلیت اطمینان ترانسفورمر با در نظر گرفتن اثر بارگذاری در شرایط بارگذاری سبک

(الف) قابلیت اطمینان حادثه ای، (ب) قابلیت اطمینان فرسایش

(پ) قابلیت اطمینان کلی



شکل (۱۰): عمر باقیمانده ترانسفورمر برای بارگذاری سبک

۴-۲-۴- قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن اثر بارگذاری سنگین بر فرسایش

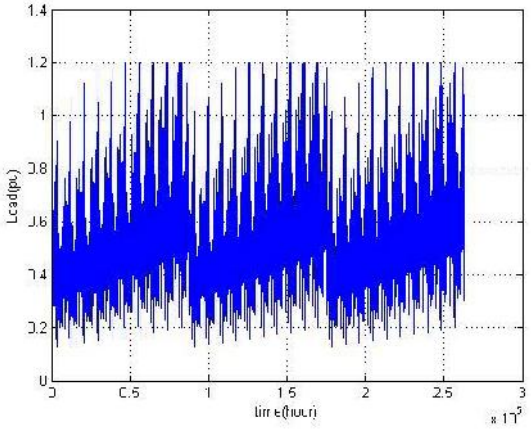
با توجه به بارگذاری بخش قبل اگر بدلیل شرایط بد اقتصادی شرکت‌های برق یا هر دلیل دیگری برداشتن بار ترانسفورمر تحت مطالعه از طریق در مدار آوردن ترانسفورمر یا پست جدید به تعویق افتد، یعنی بجای اینکه هر ۵ سال این اتفاق بیفتد در هر ۱۰ سال انجام شود نمودار بارگذاری همانند شکل (۱۱) خواهد بود. لازم به ذکر است در این شرایط نیز به دلیل وجود رله های حذف بار هیچگاه بار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]

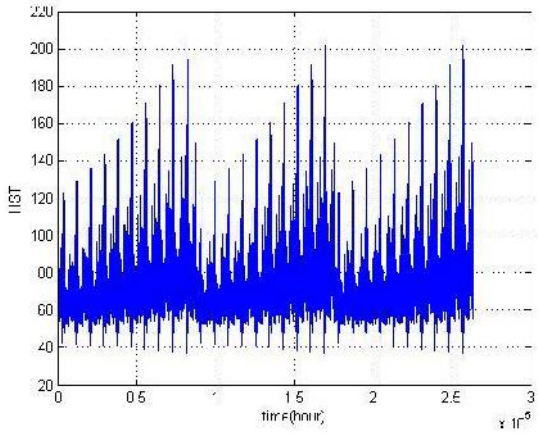
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

لحظه ای ترانسفورمر از ۱/۲ پریونیت تجاوز نمی کند.



شکل (۱۱) : بارگذاری سنگین در یک دوره ۳۰ ساله، با برداشتن بار ۱۰ ساله

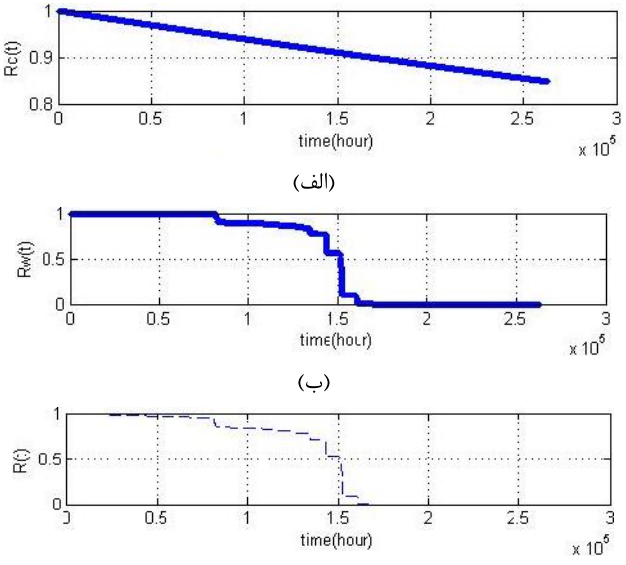
شکل (۱۲) دمای نقطه داغ ترانسفورمر را تحت بارگذاری سنگین نشان می دهد. همانطور که دیده می شود دمای نقطه داغ به علت تداوم اضافه باری در چندین ساعت، تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد بالا می رود. که باعث افت شدید عمر یا به عبارت دیگر موجب بالا رفتن تساعدی ضریب تسریع عمر ترانسفورمر می گردد.



شکل (۱۲): نمودار دمای نقطه داغ ترانسفورمر برای بارگذاری سنگین

نمودار قابلیت اطمینان ترانسفورمر حالت بارگذاری سنگین در شکل(۱۳) ارائه شده است. همان طور که از این شکل ملاحظه می‌شود، قابلیت اطمینان ترانسفورمر تا زمان ۸۰۰۰۰ ساعت طبق منحنی نمایی دوره عمر مفید می‌باشد که در این زمان قابلیت اطمینان برابر۹۵/۵۳٪ می‌باشد. ولی از این زمان به بعد یعنی اواخر دهه اول بدلیل اضافه بار شدن ترانسفورمر به دفعات زیاد، تجهیز وارد مرحله فرسایش می‌گردند و در نهایت در زمان ۱۷۰۰۰۰ یا در اواخر دهه دوم کار ترانسفورمر، قابلیت اطمینان آن صفر می شود. در حالی که در حالت بدون در نظر گرفتن بارگذاری قابلیت اطمینان در این زمان ۸۹/۸۷٪ است.

شکل (۱۴) تغییرات عمر باقیمانده ترانسفورمر به بارگذاری سنگین را نشان می‌دهد، شیب این نمودار در مقایسه با نمودار شکل (۹) بدلیل ادامه داشتن سنگینی بارگذاری در سال پنجم به مراتب بیشتر شده و در اواسط دهه دوم به صفر می‌رسد یعنی حدود ۱۰۰۰۰۰ ساعت زودتر

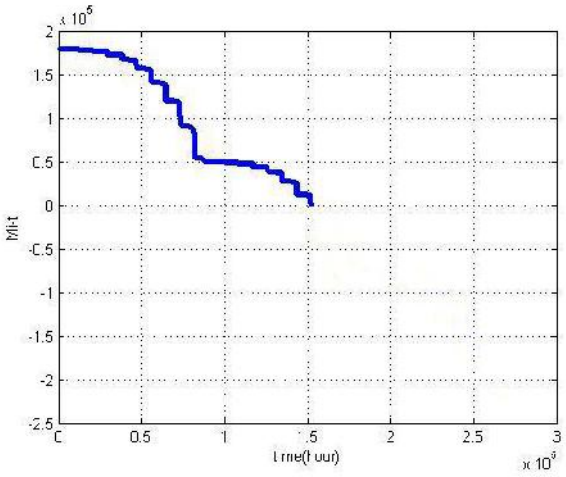


شکل (۱۳): نمودارهای قابلیت اطمینان ترانسفورمر با در نظر گرفتن تاثیر میزان بارگذاری در شرایط بارگذاری سنگین

(الف) قابلیت اطمینان حادثه ای، (ب) قابلیت اطمینان فرسایش

(پ) قابلیت اطمینان کلی

از حالت بارگذاری سبک و ۳۰۰۰۰ ساعت زودتر از حالت بدون در نظر گرفتن بارگذاری، عمر ترانسفورمر به صفر می‌رسد.



شکل (۱۴): عمر باقیمانده ترانسفورمر برای بارگذاری سنگین

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی برای بررسی تاثیر بارگذاری بر قابلیت اطمینان ترانسفورمر ارائه شد. با استفاده از این مدل قابلیت اطمینان ترانسفورمر در دوره عمر مفید، در حالت بدون در نظر گرفتن بارگذاری، با در نظر گرفتن بارگذاری سبک و بارگذاری سنگین مورد شبیه سازی قرار

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

گرفت. نتایج بدست آمده از این شبیه سازی ها به وضوح نشان داد که مطالعه قابلیت اطمینان ترانسفورمر بدون در نظر گرفتن اثر بارگذاری به نتایج درستی منتهی نمی شود. همچنین نشان داده شد با مدیریت مناسب بار ترانسفورمر می توان قابلیت اطمینان آنرا در مقادیر بالاتری حفظ نمود.

نتایج این تحقیق می تواند مورد استفاده بهره برداران سیستم قدرت قرار گیرد تا تصمیمات درست برای پخش بار سیستم قدرت جهت تنظیم بارگذاری و بهبود قابلیت اطمینان ترانسفورمرهای سیستم اتخاذ نمایند.

مراجع

[1] R. Jharaniya, M. Ahfazkhan, "Reliability state space model of Power Transformer" , International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 3 No. 8 August 2011

[2] Mobin Sefidgaran, Mohammad Mirzaie, Ataollah Ebrahimzadeh, "Reliability Model of The Power Transformer with ONAF Cooling". Int. J. Electr. Power Energ. Syst., doi:10.1016/j.ijepes.2011.10.002, 2011

[3] Joe Perez, "Fundamental principles of transformer thermal loading and protection" , 2010 63rd Annual Conference for protective Relay Engineering, ERLphase Power Technol., Winnipeg, MB, Canada, pp. 1-14, March 29 2010- April 1 2010.

[4] Jian He, Yuanzhang Sun, Peng Wang, Lin Cheng, "A Hybrid Condition- Dependent Outage Model of a Transformer in Reliability". IEEE Transactions on power delivery, vol. 24, no.4, pp. 2025-2033, Oct. 2009.

[5] Kashira T. Muthanna, abhinanda Sarkar, Kaushik Das, Kurt Waldner "Transformer Insulation Life Assessment, " IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 150-156, January 2006.

[6] William E. featheringill. "Power Transformer Loading" IEEE Transactions on industry applications, vol. IA-19, no.1, pp. 21 - 27 1983.

[7] Wilbur R .Ossman ,Senior Member ,IEEE ,Neil H .Woodley ,Senior Member ,IEEE , Robert C .Craft , AND R .H .Miller, "Substation Expansion ,Reliability ,and Transformer Loading Policy Analysis" . IEEE transactions on Power and System, vol. pas-88 , no. 8, pp. 1195 – 1205, August 1969.

[۸] مهدی ثواقبی، احمد غلامی، ابولفضل واحدی، "قابلیت بارگذاری ترانسفورمر در شرایط فوق تحریک،" بیست ویکمین کنفرانس بین المللی برق، ص ۲۴۰۸-۲۴۱۳ ، ۱۳۸۵.

[۹] امید قادری، محمدرضا فیضی، "ارائه یک سیستم ترکیبی جدید در تشخیص نوع خطا در ترانسفورماتورهای قدرت بر اساس مقادیر گازهای حل شده در روغن" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۰، ص ۴۸-۴۱.

[۱۰] عباس شیری، عباس شولایی و حسین نصیر اقدم، "مدلسازی حرارتی ترانسفورمر جهت بررسی تاثیر دمای محیط برروی عمر عایقی ترانسفورمر" یازدهمین کنفرانس شبکه های توزیع برق، مازندران، اردیبهشت ۸۵.

[11] Mohd Taufiq Ishak and Zhongdong Wang, "Transformer Hotspot Temperature Calculation using IEEE Loading Guide". International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, china, pp. 1017 – 1020, 2008.

[12] Carlos R. T. Castro, Sergio R. Barbosa, Helder L. Ferreira, Luise E. Samico, Ivan J. S. lopes, Selenio r. Silvs, "Power Transformer Loading Studies Considering Over excitation". IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exhibition, pp. 651 – 656, 2004.

[13] IEEE std C57.91-1995, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers" 1995.

[14] IEEE std C57.12.00-2000, "IEEE standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers"2000.

[15] Billinton, R., and Allan, R.N., Reliability evaluation of engineering system, (Plenum, New York, 1994, 2nd edn.).

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.7.8]