

ارائه یک مدار معادل حرارتی برای تحلیل گرمایی ترانسفورماتورهای قدرت با بارهای هارمونیکی

مرتضی میخک بیرانوند، بهروز رضایی علم، مهرداد جعفربلند، ولی‌اله ابراهیمیان و محسن عسگری

مفید ترانسفورماتورها تعریف می‌شود. مهم‌ترین عامل پیری عایق‌ها را می‌توان مسایل حرارتی به خصوص نقاط داغ ایجادشده در سیم‌پیچ‌ها دانست. در شرایط کاری غیر نامی ترانسفورماتورها، مسایل حرارتی حایز اهمیت بیشتری می‌شوند چرا که احتمال افزایش حرارت از حد معمول ترانسفورماتورها وجود دارد.

حضور جریان‌های غیر سینوسی یکی از شرایط کاری غیر نامی ترانسفورماتور است که عموماً از طریق بارهای غیر خطی شبکه‌های قدرت به ترانسفورماتور تحمیل می‌شود. علی‌رغم این که مطالعات زیادی تا کنون بر روی اضافه تلفات تحمیل‌شده به ترانسفورماتور به دلیل بارهای هارمونیکی صورت گرفته است [۱] و [۲]، اما مطالعات کمتری روی تعیین دقیق توزیع گرمایی ترانسفورماتور به ازای بارهای هارمونیکی انجام شده است [۳] تا [۵]. مطالعاتی را که روی محاسبه تلفات ترانسفورماتورها در حضور جریان‌های غیر سینوسی پرداخته شده‌اند در دو محور استانداردهای IEEE [۲] و [۶] و روش‌های آنالیز المان محدود [۷] می‌توان تقسیم‌بندی کرد که روش‌هایی برای تخمین تلفات اضافی ترانسفورماتور در این شرایط ارائه داده‌اند. در این مقاله یک روش جامع آنالیز گرمایی ترانسفورماتور با بارهای هارمونیکی بر اساس مدار معادل حرارتی ارائه می‌شود که قادر به تخمین دمای نواحی مختلف ترانسفورماتور به ازای بارهای هارمونیکی است.

تحلیل گرمایی ترانسفورماتور از طریق مدار معادل حرارتی به دلیل سادگی و شباهت‌سازی معادلات آن با قوانین الکتریکی، مورد استقبال قرار گرفته است. سوئیفت ابتدا با به کارگیری شباهت‌سازی الکتریکی-گرمایی، یک مدار معادل حرارتی ساده برای تحلیل گرمایی ترانسفورماتورها روغنی معرفی کرد [۸]. مطالعات سوسا و همکارانش معطوف بر تخمین دقیق پارامترهای مدار معادل حرارتی گردید به نحوی که وابستگی مقاومت‌های حرارتی غیر خطی به دما در مدل‌سازی‌های گرمایی لحاظ گردید و از نتایج عملی مختلف برای تخمین ضرایب مقاومت‌های حرارتی غیر خطی و خازن‌های گرمایی معادل استفاده شد [۹] تا [۱۱]. تحقیقات دیگری روی توسعه مدار معادل حرارتی ترانسفورماتور قدرت صورت گرفته است اما در این مدار معادل‌های حرارتی ارائه‌شده، اجزای مختلف ترانسفورماتور به صورت تفکیک‌شده مدل نشده‌اند به گونه‌ای که تلفات سیم‌پیچ‌ها و تلفات بی‌باری به عنوان منبع تولید حرارت لحاظ می‌شوند و صرفاً دمای نقاط داغ سیم‌پیچ‌ها^۱ و دمای روغن در ناحیه بالای تانک^۲ حاصل می‌شود [۱۲] تا [۱۴]. به کارگیری این مدار معادل‌های حرارتی برای تحلیل گرمایی ترانسفورماتورها با بارهای هارمونیکی مناسب نیستند چرا که اولاً تلفات سرگردان در تانک نواحی کلمپینگ در آنها لحاظ نمی‌شود و بنابراین تلفات اضافی دقیق

چکیده: بیشترین خرابی‌های ترانسفورماتورهای قدرت ناشی از مشکلات حرارتی می‌باشد که این مشکلات در شرایط کاری غیر نامی مثل تغذیه بارهای هارمونیکی بیشتر بروز پیدا می‌کند. تحلیل گرمایی ترانسفورماتور و گرمای اضافی تحمیل‌شده به ترانسفورماتور به علت وجود هارمونیکی‌ها موضوع مورد بررسی این مقاله است. در این مقاله یک مدار معادل حرارتی جدید ارائه می‌شود به نحوی که دمای اجزای مختلف ترانسفورماتورهای قدرت روغنی را به صورت تفکیک‌شده در شرایط تغذیه بارهای هارمونیکی مشخص می‌کند. تلفات اجزای مختلف ترانسفورماتور به عنوان منبع تولید حرارت بایستی محاسبه شوند و به این منظور در این مقاله یک روش مدل‌سازی المان محدود^۳ بعدی مناسب پیشنهاد شده است که قادر به محاسبه تلفات اجزای مختلف ترانسفورماتور قدرت با ساختار هندسی پیچیده است. مقایسه نتایج به دست آمده از مدار معادل حرارتی پیشنهادشده با دماهای نقاط داغ سیم‌پیچی و میانگین روغن به دست آمده از IEEE Std C57.91 نشان می‌دهد مدار معادل حرارتی پیشنهادی از دقت کافی برای تخمین توزیع دمای ترانسفورماتور تغذیه‌کننده بارهای هارمونیکی برخوردار است. به منظور جلوگیری از افزایش دمای ترانسفورماتور با تغذیه بارهای هارمونیکی، کاهش بارگیری ترانسفورماتور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه: المان محدود، ترانسفورماتور قدرت روغنی، جریان‌های غیر سینوسی، کاهش بارگیری، مدار معادل حرارتی.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای قدرت از گران‌قیمت‌ترین و استراتژیک‌ترین تجهیزات سیستم‌های قدرت محسوب می‌شوند و از این رو بهره‌بردارهای شبکه قدرت همواره سعی بر جلوگیری از رخ‌دادن خرابی برای ترانسفورماتورها دارند چرا که علاوه بر هزینه فراوان تعمیر آن، زمان‌بر بودن تعمیر و جایگزین کردن ترانسفورماتور در حین تعمیر چالشی بزرگ ایجاد خواهد کرد. پیرشدن عایق و در پی آن، شکست عایقی از شایع‌ترین عوامل خرابی ترانسفورماتورها می‌باشد. اهمیت این موضوع به قدری زیاد است که آهنگ پیری عایق‌ها به عنوان عامل تعیین‌کننده عمر

این مقاله در تاریخ ۵ شهریور ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۱ خرداد ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد. این تحقیق توسط برق منطقه‌ای باختر (زیرمجموعه توانیر و وزارت نیرو) بر اساس قرارداد شماره ۹۶/۸۳ پشتیبانی شده است.

مرتضی میخک بیرانوند، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، (email: mikhak.mo@fu.lu.ac.ir).

بهروز رضایی علم (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران، (email: rezace.bh@lu.ac.ir).

مهرداد جعفربلند، دانشکده مهندسی برق و اویونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران، (email: j_mehrdad405@hotmail.com).

ولی‌اله ابراهیمیان، شرکت برق منطقه‌ای باختر، اراک، ایران، (email: h.ebrahimian1388@gmail.com).

محسن عسگری، شرکت برق منطقه‌ای باختر، اراک، ایران، (email: m.asgari@brec.ir).

1. Winding Hot-Spot

2. Top-Oil

الکترومغناطیسی و محاسبه تلفات ترانسفورماتور قدرت با لحاظ کردن ساختار هندسی واقعی استفاده می‌شود. با استفاده از مدل‌سازی الکترومغناطیسی تلفات در یک دمای ثابت محاسبه می‌شود ولی با توجه به وابستگی زیاد تلفات اهمی و تلفات جریان گردابی با دما، این تلفات از طریق یک رابطه تحلیلی به صورت وابسته به دما در مدار معادل حرارتی پیشنهادی تعریف می‌شوند.

مقایسه نتایج به دست آمده از مدار معادل حرارتی پیشنهاد شده با دمای نقاط داغ سیم‌پیچی و دمای میانگین روغن به دست آمده از IEEE Std C57.91 نشان می‌دهد مدار معادل حرارتی پیشنهادی از دقت کافی برای تخمین توزیع دمای ترانسفورماتور تغذیه‌کننده بارهای هارمونیک برخوردار است. این نکته قابل توجه است که مدار معادل حرارتی پیشنهادی علاوه بر دمای نقاط داغ سیم‌پیچی و دمای میانگین روغن، توزیع دمایی هسته، تانک و نواحی فلزی را نیز ارائه می‌دهد که آن را می‌توان از مزیت‌های این مدار معادل حرارتی برشمرد. نتایج نشان می‌دهد که بارهای هارمونیک گرمای اضافی به تمام نواحی ترانسفورماتور قدرت تحمیل می‌کند که نقاط داغ سیم‌پیچی بیشترین افزایش دما را در این شرایط تجربه می‌کنند. علاوه بر این آشکار می‌شود که بارهای هارمونیک با درصد THD بالا باعث می‌شوند که توزیع دمایی ترانسفورماتور فراتر از محدودیت‌های مجاز برود. در این مقاله به منظور جلوگیری از افزایش دمای ترانسفورماتور با تغذیه بارهای هارمونیک، کاهش بارگیری^۲ ترانسفورماتور پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- بررسی تلفات ترانسفورماتور به ازای تغذیه بارهای هارمونیک

به منظور بررسی سطح تخریب مجموع هارمونیک‌های یک سیگنال، به صورت متعارف از شاخص THD استفاده می‌شود

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_H^2}}{Y_1} \quad (1)$$

در واقع THD برابر با نسبت مقدار rms همه هارمونیک‌ها به هارمونیک پایه Y_1 می‌باشد. برای بررسی ترانسفورماتور تحت جریان‌های هارمونیک، ۴ حالت مشخص شده در جدول ۱ را در این مقاله بررسی می‌کنیم. در این چهار حالت، دامنه هر هارمونیک ۲/۵٪ نسبت به مرحله قبلیش بزرگ‌تر شده است. برای این که یک مقایسه صحیح از عملکرد ترانسفورماتور با جریان سینوسی و جریان غیر سینوسی داشته باشیم، مقدار مؤثر جریان در هر چهار حالت ۱ pu باقی مانده است [۷]. علی‌رغم این که در این چهار حالت مقدار مؤثر جریان‌های غیر سینوسی برابر با مقدار مؤثر جریان سینوسی می‌باشد ولی بایستی بررسی شود که وجود هارمونیک‌ها به چه میزان اضافه حرارت به ترانسفورماتور تحمیل می‌کند.

جریان‌های بار غیر سینوسی باعث افزایش تلفات DC سیم‌پیچ‌ها، تلفات جریان گردابی و تلفات اضافی ترانسفورماتور می‌شوند در حالی که تلفات هسته تقریباً ثابت می‌ماند [۲۱]. این نکته قابل ذکر است که چگالی شار هسته ترانسفورماتور وابسته به ولتاژ می‌باشد و هارمونیک‌های جریان تأثیر چندانی بر تلفات هسته ندارد. تلفات DC سیم‌پیچ با توان دوم هارمونیک‌های جریان افزایش می‌یابد

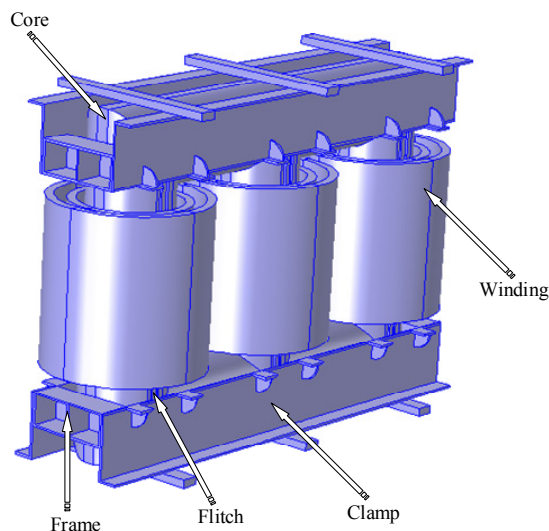
جدول ۱: محتوای هارمونیک جریان بار ترانسفورماتور بر حسب پروبیت در ۴ حالت مختلف با مقدار مؤثر ۱ PU.

حالت	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
هارمونیک	I_h	I_h	I_h	I_h
۱	۰/۹۸۳	۰/۹۳۷	۰/۹۵۹	۰/۹۴
۵	۰/۱۴۷	۰/۱۷۰	۰/۱۹۲	۰/۲۱۲
۷	۰/۰۸۸	۰/۱۱۲	۰/۱۳۴	۰/۱۵۵
۱۱	۰/۰۳۸	۰/۰۶۳	۰/۰۸۶	۰/۱۰۸
۱۳	۰/۰۲۹	۰/۰۵۴	۰/۰۷۷	۰/۰۹۹
۱۷	۰/۰۱۰	۰/۰۲۴	۰/۰۵۸	۰/۰۸۰
۱۹	۰	۰/۰۲۴	۰/۰۴۸	۰/۰۷۱
THD (%)	۱۸/۲۲	۲۳/۰۱	۲۸/۳۲	۳۳/۹

ناشی از بارهای هارمونیک در آنها در نظر گرفته نمی‌شود و ثانیاً اضافه دمای تحمیل شده به نواحی مختلف ترانسفورماتور بر اثر بارهای هارمونیک مشخص نمی‌شود. از این رو در این مقاله مدار معادل حرارتی جدیدی ارائه می‌شود به نحوی که در آن نواحی مختلف ترانسفورماتور به صورت جداگانه مدل می‌شوند و تأثیر بارهای هارمونیک در آن لحاظ می‌شود. تلفات توان اجزای مختلف ترانسفورماتور برای مدل پیشنهادی مورد نیاز هستند.

در ترانسفورماتورهای قدرت بزرگ به دلیل وجود شار نشتی قوی، تلفات سرگردان در نواحی فلزی^۱ مقدار قابل توجهی خواهد داشت و قابل صرف نظر نیستند. روش‌های آنالیزی مختلفی به منظور بررسی تلفات سرگردان در ساختارهای فلزی ترانسفورماتور ارائه شده است [۱۵] و [۱۶]. علی‌رغم پیاده‌سازی ساده روش‌های آنالیزی، این روش‌ها برای حل مسایل پیچیده از دقت کافی برخوردار نیستند.

در صورتی که بتوان با پیاده‌سازی رفتار غیر خطی مواد و لحاظ کردن اثر پوستی نواحی هادی از طریق المان محدود، معادلات الکترومغناطیسی را برای ترانسفورماتور حل کرد می‌توان تلفات ترانسفورماتور را با دقت بالایی تخمین زد. از سه طریق می‌توان مدل‌سازی المان محدود را برای ترانسفورماتور استفاده کرد: روش (خطی) حوزه فرکانس، روش استپ به استپ برای آنالیز غیر خطی مسئله و روش شبه غیر خطی [۱۷]. علی‌رغم دقت بالای روش استپ به استپ، این روش حجم محاسباتی زیادی را برای حل حالت گذرای مسئله صرف خواهد کرد. از طرفی مدل‌سازی حوزه فرکانس با مدل خطی دارای خطای زیادی می‌باشد و بنابراین روش شبه غیر خطی گزینه مناسبی برای آنالیز تلفات نواحی مختلف ترانسفورماتور می‌باشد. روش‌های شبه غیر خطی مختلفی برای مدل‌سازی الکترومغناطیسی و محاسبه تلفات جریان گردابی ترانسفورماتورها تا کنون معرفی شده است اما این روش‌ها علاوه بر پیچیدگی پیاده‌سازی، همگرایی را در حل‌کننده‌های تکراری در مدل‌سازی المان محدود سخت می‌کنند [۱۸] و [۱۹]. مرجع [۲۰] تئوری نفوذپذیری مغناطیسی را برای پیاده‌سازی خواص غیر خطی مواد فرورمغناطیسی در مدل‌سازی هارمونیک زمانی معرفی کرد که این روش به سادگی می‌تواند در فرمول‌بندی پتانسیل برداری در مدل‌سازی المان محدود پیاده‌سازی شود. این روش علی‌رغم استفاده از حجم محاسباتی کم در مدل‌سازی هارمونیک زمانی می‌تواند نتایجی با دقت محاسبات حالت گذرا برای مسئله ارائه می‌کند. در این مقاله با پیاده‌سازی تکنیک‌های مؤثر، این روش جهت مدل‌سازی



شکل ۱: نمای ۳ بعدی ترانسفورماتور در دست بررسی.

همان گونه که در روابط فوق مشاهده می‌شود، تلفات نواحی مختلف در بار نامی بایستی معلوم باشند تا بتوان مقدار آنها را به ازای هارمونیک‌های مختلف مشخص کرد. از آنجایی که اطلاعات مربوط به تلفات نواحی مختلف ترانسفورماتور به صورت تفکیک شده توسط کارخانه سازنده مشخص نمی‌شود بنابراین در این مقاله از یک روش المان محدود سه‌بعدی برای تخمین تلفات نواحی مختلف ترانسفورماتور استفاده می‌شود.

۳- مدل سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور با المان محدود

تلفات به عنوان منبع اصلی تولید گرما در ترانسفورماتور می‌باشند، از این رو محاسبه تلفات به عنوان یکی از گام‌های مهم آنالیز گرمایی ترانسفورماتور است. به دلیل ساختار هندسی پیچیده ترانسفورماتور از قبیل سیم‌پیچ‌ها، هسته، دیواره‌های تانک، کلمپ یوغ، قاب هسته و رابط‌های کلمپ‌ها فقط مدل ۳ بعدی می‌تواند به صورت دقیق این اجزا را پیاده‌سازی کند و با تخمین چگالی شار، تلفات نواحی مختلف را مشخص کند. مشخصات یک ترانسفورماتور قدرت ۱۲۵ MVA در جدول ۲ نشان داده شده و شکل ۱ مدل ۳ بعدی پیاده‌سازی شده ترانسفورماتور در نرم‌افزار کامسول را نشان می‌دهد.

در استیل مغناطیسی نرم (عمق اثر پوستی کم است، بنابراین بیشترین تلفات در جداره‌های فلز رخ می‌دهد و افزایش ضخامت فلز تأثیری در کاهش مقاومت مسیر جریان گردابی ندارد و این باعث می‌شود در ترانسفورماتورهای بزرگ که نیاز به ساختار فلزی با استقامت مکانیکی بالا دارند از این نوع فلزها استفاده شود. برای به دست آوردن تلفات سرگردان ساختار فلزی و تلفات هسته ترانسفورماتور بایستی مدل غیر خطی نواحی فلزی و هسته تشکیل شده از مواد فرومغناطیسی پیاده شود چرا که توزیع شار و تلفات جریان گردابی وابسته به نفوذپذیری مغناطیسی غیر خطی می‌باشد. علاوه بر آن از آنجایی که تلفات هیستریزس بر اساس مقدار چگالی شار تعیین می‌شود بنابراین تعیین دقیق تلفات هیستریزس نیز متأثر از مدل سازی غیر خطی مسئله می‌باشد.

جهت اجتناب از صرف حجم محاسباتی بالا در مدل سازی حوزه زمان المان محدود، از مدل سازی هارمونیک زمانی المان محدود برای محاسبات سه‌بعدی با تعداد مش زیاد می‌توان استفاده کرد. مدل سازی هارمونیک

جدول ۲: مشخصات ترانسفورماتور قدرت.

مقدار	پارامترها	
۱۲۵ MVA	توان نامی	
۲۳۰ KV	ولتاژ اولیه	
۶۳ KV	ولتاژ ثانویه	مشخصات اصلی
۵۰ Hz	فرکانس	
YN,d11	اتصال سیم‌پیچ‌ها	
mild steel	نوع مواد تجهیزات فلزی	
M6	نوع ورق‌های هسته	
۷۵۱ mm	قطر ساق‌ها	مشخصات هسته
۳۹۹۰×۳۰۴۲ mm	ماکسیمم سطح مقطع عبور شار	
۱۵۴۰ mm	ارتفاع پنجره	
۱۸۰۶ mm	فاصله بین مرکز دو ساق مجاور	
مس	نوع هادی	
٪۱۲٫۵	درصد اتصال کوتاه	
۷۲۶/۳۴۴	تعداد دورهای سیم‌پیچ اولیه/ ثانویه	مشخصات سیم‌پیچ‌ها
۱۴۵۰/۳۹۲ mm	ارتفاع سیم‌پیچ اولیه/ ثانویه	
۱۱۶۱/۸۹۳ mm	قطر درونی سیم‌پیچ اولیه/ ثانویه همراه با عایق	
۱۴۰۰/۱۰۴۰ mm	قطر بیرونی سیم‌پیچ اولیه/ ثانویه همراه با عایق	

$$P_{DC} = rR \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \quad (2)$$

تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها متناسب با توان دوم مقدار rms جریان و فرکانس‌های هارمونیک‌های آن می‌باشد و

$$P_{EDW} = P_{EDW-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2 \quad (3)$$

در این رابطه P_{EDW-R} تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها در شرایط نامی و بدون هارمونیک می‌باشد. استاندارد IEEE یک ضریب تلفات هارمونیک برای تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها به صورت زیر تعریف می‌کند [۶]

$$F_{HL} = \frac{P_{EDW}}{P_{EDW-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h(pu))^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h(pu))^2} \quad (4)$$

در استاندارد IEEE، تلفات جریان گردابی P_{EDW} محاسبه نمی‌شود و صرفاً ارزیابی غیر مستقیمی از تلفات ترانسفورماتور از طریق مشخصات هارمونیک‌های جریان دارد. استاندارد ۱۹۹۷، IEC ۶۱۳۷۸ Part-۱ و IEEE وابستگی تلفات سرگردان به هارمونیک‌ها را به صورت زیر تعریف می‌کنند [۶]

$$P_{stray} = P_{stray-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{1/\alpha} \quad (5)$$

ضریب تلفات هارمونیک برای تلفات سرگردان، مشابه تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ به صورت زیر تعریف می‌شود [۶]

$$F_{HL-stray} = \frac{P_{stray}}{P_{stray-R}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{1/\alpha}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h(pu))^2 h^{1/\alpha}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} (I_h(pu))^2} \quad (6)$$

واحد وزن اندازه‌گیری شده توسط کارخانه سازنده برای محاسبات مجموع تلفات هسته استفاده شود [۲۳]. با پیاده‌سازی تئوری نفوذپذیری نسبی مؤثر برای هسته ترانسفورماتور، توزیع چگالی شار در هر المان از هسته حاصل می‌شود و سپس تلفات هر المان از طریق میانه‌یابی منحنی تلفات BP (منحنی تلفات بر حسب چگالی شار) به دست آمده به دست آمده و تلفات هسته از مجموع این تلفات محاسبه می‌گردد.

منابع تولید گرما در سیم‌پیچ‌ها شامل تلفات DC و تلفات جریان گردابی می‌باشد. سیم‌پیچ‌ها از تعداد زیادی دیسک با توزیع آمپر- دور یکنواخت تشکیل شده است، بنابراین تلفات RI^2 برای همه دیسک‌ها مشابه است و به سادگی محاسبه می‌شود اما تلفات جریان گردابی دیسک‌ها متفاوت هستند و وابسته به موقعیت قرارگیری دیسک‌ها هستند. برای محاسبه تلفات جریان گردابی بایستی توزیع چگالی شار پراکندگی در هادی‌ها مشخص شود که این منظور با شبیه‌سازی المان محدود با پیاده‌سازی مش‌های مستطیلی زیاد برای سیم‌پیچ‌ها حاصل می‌شود. با تعیین میزان چگالی شار شعاعی و محوری برای هر هادی، مؤلفه‌های شعاعی و محوری تلفات جریان گردابی هر هادی را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [۲۴]

$$P_{eddy} = \frac{\sigma f^2 B^2 d^2}{24} \quad (11)$$

در این رابطه، B پیک چگالی شار ناشی بر حسب تسلا، f فرکانس و d طول هادی عمود بر جهت چگالی شار ناشی در واحد متر است. در اینجا چگالی شار شعاعی و محوری بر روی یک هادی ثابت و برابر با میانگین چگالی شار دیسک مربوط به آن فرض شده است. تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ از مجموع تلفات جریان گردابی دیسک‌ها محاسبه می‌شود. در اینجا برای این که اهمیت در نظر گرفتن تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها و همچنین تلفات تانک و نواحی کلمپینگ آشکار شود، توزیع تلفات در این نواحی در شکل ۲ به نمایش درآمده است. مشاهده می‌شود که تلفات جریان گردابی و سرگردان در این نواحی مقدار قابل ملاحظه‌ای دارد که در نتیجه در تحلیل گرمایی ترانسفورماتور بایستی این تلفات را لحاظ کرد. نکته دیگری که بایستی مطرح شود این موضوع است که تلفات ناشی در دیسک‌های بالایی سیم‌پیچ‌ها بیشتر است که این امر باعث خواهد شد دمای دیسک‌های بالایی نسبت به سایر دیسک‌ها بالاتر رود. بر اساس مباحث مطرح‌شده تلفات نواحی مختلف ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بار سینوسی محاسبه گردیده‌اند که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. در این جدول P_{EDW} بیانگر تلفات کل جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها، $P_{stray-tank}$ مجموع تلفات هیستریزس و جریان گردابی تانک، $P_{stray-clamping}$ مجموع تلفات هیستریزس و جریان گردابی کلمپینگ (که کلمپ، فریم و flitch را شامل می‌شود)، $P_{no.load}$ تلفات هسته و PDC تلفات DC سیم‌پیچ‌ها هستند.

۴- ارائه مدار معادل حرارتی برای ترانسفورماتور قدرت

بر اساس تحلیل پدیده انتقال حرارت توسط شباهت‌سازی الکتریکی- گرمایی، مدار معادل‌های حرارتی مختلفی برای ترانسفورماتورهای قدرت ارائه شده است [۱۲] تا [۱۴]. شکل ۳ یک نمونه از مدار معادل حرارتی ساده‌شده برای ترانسفورماتورهای قدرت را نشان می‌دهد. این مدار شامل عناصر کثودکنانس گرمایی G ، خازن گرمایی C ، منبع تلفات P و دمای نقاط مختلف ترانسفورماتور θ است. در این مدار معادل کل تلفات ترانسفورماتور شامل تلفات سیم‌پیچی، تلفات هسته و تلفات سرگردان به

زمانی شرایط خطی را برای مسئله ایجاد می‌کند به گونه‌ای که از نفوذپذیری نسبی μ_r برای مدل کردن رفتار مواد فرومغناطیسی استفاده می‌شود. این مدل خطی خطای زیادی در نتایج ایجاد می‌کند بنابراین این روش گزینه مناسبی برای آنالیز تلفات نواحی مختلف ترانسفورماتور نیست. در این مقاله، تئوری نفوذپذیری نسبی مؤثر به منظور مدل‌سازی شبه غیر خطی هسته و ساختار فلزی ترانسفورماتور پیشنهاد می‌شود. این روش اجازه می‌دهد تا با به کارگیری منحنی مغناطیسی غیر خطی مؤثر $B_{eff}(H) = \mu_{ref} \times H$ ، محاسبات با پاسخ تقریبی مواد به تحریک هارمونیک زمانی در حالت ماندگار انجام شود تا از صرف محاسبات سنگین حوزه گذرا جلوگیری شود.

از طریق روش‌های انرژی ساده و انرژی متوسط می‌توان μ_{ref} را از منحنی اشباع واقعی $B(H)$ مواد استخراج کرد [۲۰]. منحنی حاصل از روش انرژی ساده، رفتار هارمونیک زمانی را با تقریب هارمونیک اول از منحنی اشباع واقعی $B(H)$ نشان می‌دهد. بر این اساس μ_{ref} از طریق رابطه زیر به دست می‌آید

$$\mu_{ref-se} = \frac{2}{H^2} \int_0^H B(H) dH \quad (7)$$

در اینجا H دامنه شدت میدان مغناطیسی (در هارمونیک زمانی)، $B(H)$ چگالی شار مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی حاصل از منحنی اشباع واقعی مواد و $H(t)$ شدت میدان مغناطیسی نوسانی متغیر با زمان (با یک هارمونیک پایه) با دوره تناوب اختیاری T می‌باشد. تلفات سرگردان ساختار فلزی ترانسفورماتور متشکل از تلفات جریان گردابی و تلفات هیستریزس می‌باشد. تلفات جریان گردابی سهم عمده تلفات سرگردان را شامل می‌شود و تلفات هیستریزس تقریباً ۲۵٪ از تلفات کل را شامل می‌شود [۲۲]. با اجرای لایه‌های مرزی برای مش‌بندی و پیاده‌سازی تئوری نفوذپذیری نسبی مؤثر برای مدل کردن رفتار مغناطیسی مواد این نواحی، می‌توان به سادگی بردار چگالی جریان گردابی در هر المان را محاسبه کرده و سپس تلفات جریان گردابی تمام حجم را از مجموع تلفات المان‌ها به صورت زیر به دست آورد

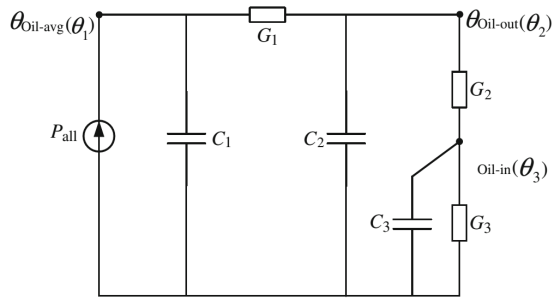
$$J_{ei} = -j\sigma\omega A_i \quad (8)$$

$$P_e = \frac{1}{\gamma} \operatorname{Re} \left[\sum_{i=1}^n (\rho_i J_{ei}^* \cdot J_{ei}) V_i \right] \quad (9)$$

در این روابط، n تعداد المان‌ها، ρ_i تانسور قطری مقاومت مواد، J_{ei} بردار چگالی جریان گردابی، J_{ei}^* مزدوج بردار چگالی جریان گردابی و V_i حجم هر المان می‌باشد. تلفات هیستریزس را می‌توان به صورت تابعی از مقدار ماکسیمم چگالی شار B_m دانست که منحنی مشخصه مربوط به هر مواد از اندازه‌گیری به دست می‌آید. تلفات هیستریزس در حجم مورد نظر را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$P_h = \sum_{i=1}^{ni} W_h^{(i)} (B_m^i) \rho V_i \quad (10)$$

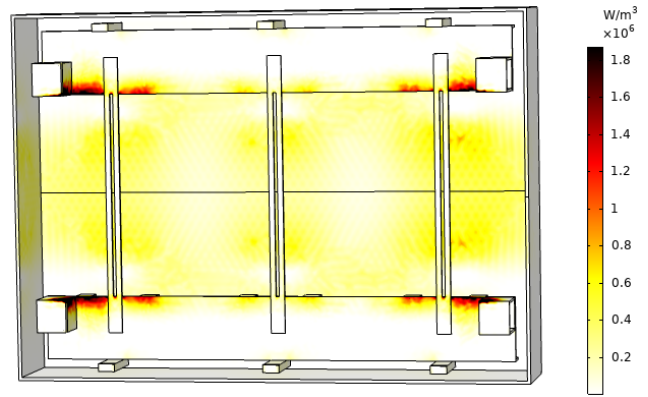
در اینجا $W_h^{(i)}$ تلفات DC (W/kg) و B_m^i پیک چگالی شار می‌باشد. با مشخص‌بودن پیک چگالی شار در هر المان، تلفات هیستریزس مربوط به آن را می‌توان از طریق منحنی $B_m - W_h$ استیل مغناطیسی مشخص کرد. مش‌بندی ورق‌ها و عایق‌های آنها برای هسته ترانسفورماتور امکان‌پذیر نیست، بنابراین نمی‌توان از (۹) برای محاسبه تلفات جریان گردابی هسته استفاده کرد. از آنجایی که هسته به صورت یکپارچه در محیط المان محدود ۳بعدی مدل می‌شود، توصیه می‌شود که از منحنی‌های تلفات در



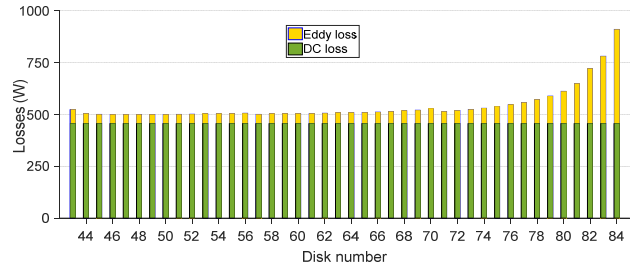
شکل ۳: یک نمونه مدار معادل حرارتی ساده شده [۲۵].

جدول ۳: تلفات ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بار سینوسی.

نوع تلفات	میزان تلفات (بر حسب وات)
$P_{no\ load}$	۱۶۵۱۱۶
P_{DC}	۲۷۲۴۳۳
P_{EDW}	۳۷۸۵۱
$P_{stray-tank}$	۳۰۷۷۱
$P_{stray-clamping}$	۳۳۳۷۶
P_{total}	۴۳۹۵۴۷

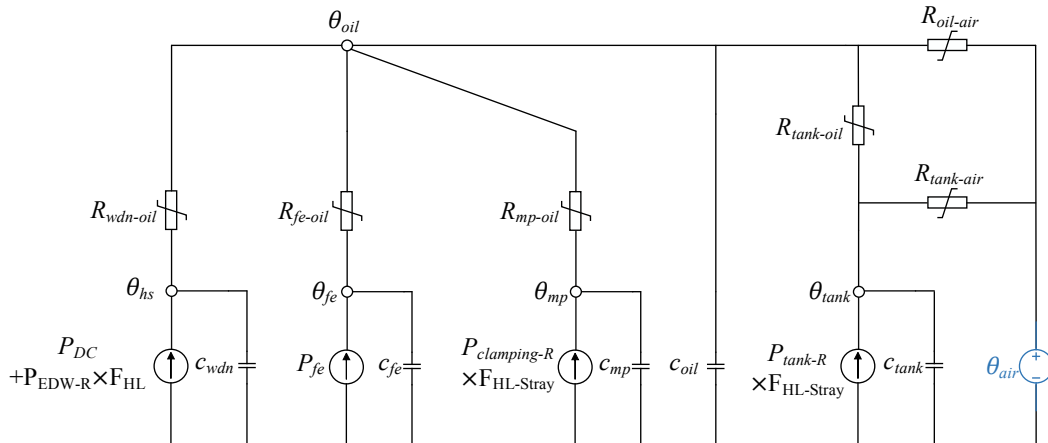


(الف)



(ب)

شکل ۲: توزیع تلفات درون ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بار سینوسی، (الف) کلمپینگ و تانک و (ب) دیسک‌های سیم‌پیچ فاز.



شکل ۴: مدار معادل حرارتی ارائه شده برای تحلیل گرمایی ترانسفورماتور.

- در این مدار معادل، P_{EDW-R} تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها در بار نامی، P_{tank-R} تلفات سرگردان تانک در بار نامی و $P_{clamping-R}$ تلفات سرگردان کلمپینگ در بار نامی می‌باشند. تلفات هسته مستقل از تغییرات بار و هارمونیک‌هاست اما وابستگی تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها و تلفات سرگردان تانک و کلمپینگ به هارمونیک‌های بار به ترتیب با ضرایب $F_{HL-Stray}$ و F_{HL} در این مدار معادل لحاظ شده است. با فرض این که دامنه مؤثر جریان ثابت باشد P_{DC} ثابت خواهد ماند و به این ترتیب با تغییر ضرایب $F_{HL-Stray}$ می‌توان به سادگی دمای نواحی مختلف ترانسفورماتور را به ازای بارهای هارمونیک مختلف از طریق این مدار معادل حرارتی محاسبه کرد.
- از آنجایی که در ترانسفورماتورهای قدرت، شار نشتی مقدار قابل ملاحظه‌ای دارد بنابراین نباید از تلفات سرگردان در تانک و نواحی فلزی کلمپ‌کننده ترانسفورماتور صرف نظر کرد. با توجه به وابستگی این تلفات به هارمونیک‌های جریان، اهمیت این تلفات در

صورت تجمیع شده به کار رفته است. به کارگیری این مدار معادل‌های حرارتی برای تحلیل گرمایی ترانسفورماتورها با بارهای هارمونیک مناسب نیستند چرا که اولاً تلفات سرگردان در تانک و نواحی کلمپینگ در آنها لحاظ نمی‌شود و بنابراین تخمین دقیقی از تلفات اضافی ناشی از بارهای هارمونیک در آنها در نظر گرفته نمی‌شود و ثانیاً اضافه دمای تحمیل شده به نواحی مختلف ترانسفورماتور بر اثر بارهای هارمونیک مشخص نمی‌شود.

علی‌رغم این که در بعضی از مطالعات اخیر، مدار معادل‌های گرمایی اصلاح‌شده‌ای ارائه گردیده که سعی در کاهش خطای محاسبه دمای نقاط داغ سیم‌پیچی و روغن داشته‌اند اما این مدل‌ها همچنان ابزار مناسبی برای تحلیل گرمایی ترانسفورماتور با بارهای هارمونیک نیستند [۲۶] و [۲۷]. از این رو در این مقاله مدار معادل حرارتی جدیدی به این منظور ارائه می‌شود که مدار معادل حرارتی پیشنهادشده در شکل ۴ نشان داده شده است. خصوصیات این مدار معادل حرارتی ارائه‌شده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

با حل (۱۴)، بردار حرارتی Θ حاصل می‌شود که بدین ترتیب دمای نقاط داغ سیمپیچ θ_{hs} ، دمای هسته θ_{fe} ، دمای نواحی کلمپینگ θ_{mp} و دمای تانک θ_{tank} مشخص می‌شوند. بدین ترتیب از طریق این مدل ارائه شده می‌توان بررسی کرد که آیا محدودیت‌های گرمایی ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بارهای هارمونیک حفظ می‌شوند یا نه.

همان گونه که در (۱۴) مشاهده می‌شود بردار تلفات توان P به عنوان منبع تولید حرارت ترانسفورماتور می‌باشد. مؤلفه‌های تولید تلفات در این بردار شامل تلفات سیمپیچ‌ها $P_{DC} + P_{EDW}$ (شامل تلفات DC و جریان گردابی)، تلفات هسته P_{fe} ، تلفات نواحی فلزی $P_{clamping}$ و تلفات تانک P_{tank} است. در اینجا تأثیر ضرایب هارمونیک F_{HL} و $F_{HL-Stray}$ در تلفات جریان گردابی سیمپیچ‌ها و تلفات سرگردان تانک و نواحی کلمپینگ لحاظ شده‌اند. در این مقاله از مدل‌سازی المان محدود ۳ بعدی تشریح شده در بخش قبلی برای تخمین این تلفات استفاده گردید که نتایج آن به صورت خلاصه در جدول ۳ مشخص شده‌اند.

نقاط داغ سیمپیچی عموماً در دیسک‌های بالایی سیمپیچ فشارضعیف رخ می‌دهد چرا که تلفات جریان گردابی این دیسک‌ها نسبت به سایر دیسک‌ها بزرگ‌تر است و علاوه بر این از آنجایی که روغن محصورکننده این دیسک‌ها نسبت به روغن پایین سیمپیچ دمای بیشتری دارد کاهش نرخ انتقال حرارت این دیسک‌ها را در پی دارد. از این رو برای محاسبه دمای نقاط داغ سیمپیچی بایستی تلفات متناسب با نقاط داغ را در مدار معادل حرارتی لحاظ کرد. برای لحاظ کردن گرمای اضافی تولیدشده در نقاط داغ سیمپیچ‌ها، Lading Guide-Annex G استفاده از معادله زیر را برای تصحیح تلفات میانگین سیمپیچی بر حسب دمای نقاط داغ پیشنهاد می‌دهد [۲۸]

$$P_{wdn}(\theta_{hs,R}) = P_{wdn}(\theta_{avg,R}) \cdot \frac{235 + \theta_{hs,R}}{235 + \theta_{avg,R}} \quad (15)$$

در این رابطه $P_{wdn}(\theta_{hs,R})$ تلفات سیمپیچی متناسب با دمای نقاط داغ نامی $\theta_{hs,R}$ و $P_{wdn}(\theta_{avg,R})$ تلفات میانگین سیمپیچی در دمای متوسط نامی $\theta_{avg,R}$ می‌باشد. در این مقاله تلفات میانگین سیمپیچی از طریق آنالیز المان محدود در دمای متوسط $70^\circ C$ محاسبه شده که از طریق معادله فوق تلفات متناسب با نقاط داغ سیمپیچی محاسبه می‌شود.

تلفات بار ترانسفورماتور (شامل تلفات سیمپیچ‌ها و تلفات جریان گردابی تانک و نواحی فلزی) وابسته به دما می‌باشند و از آنجایی که تلفات بار ترانسفورماتور از طریق المان محدود در یک دمای ثابت محاسبه می‌شوند بنابراین وابستگی این تلفات به دما، توسط رابطه تحلیلی در مدار معادل حرارتی لحاظ می‌شود. وابستگی تلفات متناسب با نقاط داغ سیمپیچ‌ها به دما از طریق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۹]

$$P_{wdn}(\theta_{hs}) = P_{DC}(\theta_{hs,R}) \cdot \frac{235 + \theta_{hs}}{235 + \theta_{hs,R}} + \quad (16)$$

$$F_{HL} \times P_{EDW}(\theta_{hs,R}) \cdot \frac{235 + \theta_{hs,R}}{235 + \theta_{hs}}$$

در اینجا P_{DC} و P_{EDW} تلفات DC و جریان گردابی سیمپیچ‌ها در دمای ثابت نامی $\theta_{hs,R}$ می‌باشند. قابل ذکر است که وابستگی تلفات جریان گردابی نواحی فلزی و تانک ترانسفورماتور نیز از معادله مشابه قسمت دوم سمت راست رابطه فوق تبعیت می‌کند که این وابستگی نیز در مدار معادل حرارتی ارائه شده لحاظ گردیده است. به دلیل تغییرات ناچیز تلفات هسته نسبت به دما، تلفات هسته به صورت ثابت در مدار معادل حرارتی لحاظ شده است.

جدول ۴: شباهت‌سازی کمیت‌های الکتریکی و گرمایی [۸].

متغیرها	الکتریکی	گرمایی
متغیر وابسته	i : جریان	P : توان انتقالی
متغیر سراسری	v : ولتاژ	θ : دما
عناصر اتلافی	R_{el} : مقاومت الکتریکی	R_{th} : مقاومت گرمایی
عناصر ذخیره‌کننده	C_{el} : خازن الکتریکی	C_{th} : خازن گرمایی

بررسی بارهای هارمونیک بیشتر می‌شود. در مدار معادل حرارتی ارائه شده در اینجا، این نواحی به صورت جداگانه لحاظ شده‌اند تا هم دقت آنالیز گرمایی ترانسفورماتور را بالا ببرد و هم این که دمای این نواحی ارائه شود. قابل ذکر است که دمای این نواحی از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که تجهیزات عایقی و جداکننده‌ها در معرض خسارت قرار دارند.

- به دلیل وجود سیستم‌های عایقی بین سیمپیچ‌ها، هسته و تجهیزات کلمپ‌کننده، از انتقال گرما به صورت هدایت گرمایی^۱ بین این نواحی صرف نظر می‌شود. علاوه بر این از آنجایی که رادیاتورها و تانک ترانسفورماتور قدرت در تماس با هوای محیط هستند بنابراین مقاومت‌های $R_{oil-air}$ و $R_{tank-air}$ از مجموع مقاومت‌های غیر خطی انتقال حرارت همرفت^۲ و تشعشع^۳ حاصل می‌شوند. قابل ذکر است که این مدار معادل را برای ترانسفورماتور خشک نیز می‌توان تعمیم داد اما در این حالت پارامترهای مقاومت‌های گرمایی تغییر خواهند کرد و بایستی سیال خنک‌کننده را هوا در نظر گرفت.
- تمامی پارامترهای فیزیکی روغن ترانسفورماتور به جز چسبندگی برای روغن ثابت هستند که لحاظ کردن چسبندگی روغن (μ) نسبت به دما باعث غیر خطی شدن مقاومت‌های گرمایی مدار معادل حرارتی شده است.
- در مدل ارائه شده، تغییرات دمای محیط با θ_{air} در نظر گرفته شده است.

در ادامه نحوه محاسبات مربوط به مدار معادل حرارتی ارائه شده تشریح می‌شود. با توجه به شباهت مدار معادل حرارتی با مدارهای الکتریکی، می‌توان از قوانین حاکم بر مدارهای الکتریکی برای حل مسایل انتقال حرارت استفاده کرد. قوانین حاکم بر کمیت‌های یک مدار به صورت زیر هستند

$$v = R_{el} \cdot i \quad \text{and} \quad i = C_{el} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

$$\theta = R_{th} \cdot P \quad \text{and} \quad P = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (13)$$

شباهت‌سازی بین پارامترهای الکتریکی و گرمایی به صورت خلاصه در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. بر این اساس معادلات ترمودینامیک را می‌توان به فرم معادله دیفرانسیل زیر بازنویسی کرد

$$P = G\Theta + C \frac{d\Theta}{dt} \quad (14)$$

که در آن P بردار توان گرمایی (منبع تولید حرارت)، G ماتریس هدایت گرمایی، Θ بردار گرما و C ماتریس خازن گرمایی می‌باشند.

1. Conduction
2. Convection
3. Radiation

$$G_r = \frac{L^3 \rho^* g \beta (\Delta \theta_{oil})}{\mu^*} \quad (23)$$

جایی که L مشخصه ابعاد طول، عرض یا قطر، g ثابت جاذبه، k هدایت گرمایی روغن، ρ چگالی روغن، β ثابت نمایی گرمایی، c_p ظرفیت گرمایی مخصوص روغن و μ چسبندگی روغن می‌باشند. بدین ترتیب مقاومت گرمایی همرفت طبیعی در ارتباط با سیال را می‌توان از طریق زیر محاسبه کرد

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (24)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A} \quad (25)$$

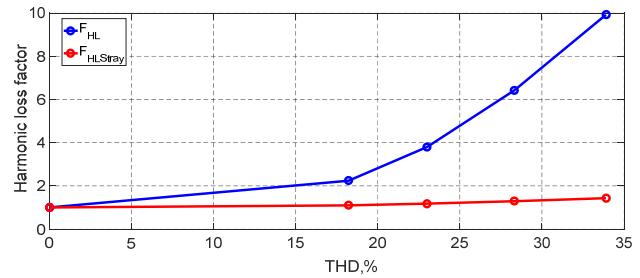
در اینجا A سطح مقطع ناحیه در ارتباط با روغن و h_{conv} ثابت انتقال حرارت همرفت می‌باشد. تمامی پارامترهای فیزیکی روغن ترانسفورماتور به جز چسبندگی روغن ثابت هستند اما تغییرات چسبندگی نسبت به دما زیاد است که این باعث غیر خطی شدن مقاومت‌های گرمایی مدار معادل حرارتی شکل ۴ می‌شود. جزئیات بیشتر در این مورد در [۹] بیان شده است.

حال با توجه به مدار معادل حرارتی ارائه شده، بردارها و ماتریس‌های مورد نیاز جهت (۱۴) بر اساس (۱۷) تا (۲۰) مشخص می‌شوند. این مجموعه معادلات از طریق روش عددی رانگ-کوتا در حوزه زمان حل می‌شوند. در این معادلات اطلاعات دمای محیط θ_{air} و بردار تلفات P به عنوان ورودی مدل تعریف می‌شوند.

۵- نتایج مدل‌سازی حرارتی

در این بخش بر اساس مدار معادل حرارتی ارائه شده در این مقاله به بررسی توزیع گرمایی ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بار نامی و بارهای هارمونیک مشخص شده در جدول ۱ پرداخته می‌شود. در بخش دوم نحوه وابستگی تلفات اجزای مختلف ترانسفورماتور به بارهای هارمونیک ارائه شد که نتایج آن در جدول ۳ به صورت خلاصه نشان داده شدند. شکل ۵ منحنی افزایش ضرایب F_{HL} و $F_{HL-Stray}$ را به ازای بارهای هارمونیک مختلف نشان می‌دهد که این ضرایب بر اساس (۴) و (۶) محاسبه می‌شوند. مشاهده می‌شود که تلفات جریان گردابی سیمپیچ‌ها نسبت به تلفات سرگردان افزایش شدیدی به ازای بارهای هارمونیک دارد. با توجه به تلفات محاسبه شده بر اساس مدل‌سازی المان محدود ۳ بعدی در بار نامی و ضرایب F_{HL} و $F_{HL-Stray}$ مشخص شده، در ادامه به بررسی گرمایی ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بار نامی و بارهای هارمونیک پرداخته می‌شود.

$$G = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{wdn-oil}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{1}{R_{fe-oil}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \frac{1}{R_{mp-oil}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{1}{R_{wdn-oil}} & \frac{1}{R_{fe-oil}} & \frac{1}{R_{mp-oil}} & \frac{1}{R_{wdn-oil}} + \frac{1}{R_{fe-oil}} + \frac{1}{R_{mp-oil}} + \frac{1}{R_{tank-oil}} + \frac{1}{R_{oil-air}} & \frac{1}{R_{tank-oil}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \frac{1}{R_{tank-oil}} & \frac{1}{R_{tank-oil}} + \frac{1}{R_{tank-air}} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad (20)$$



شکل ۵: ضریب هارمونیک بار برای تلفات جریان گردابی سیمپیچ و تلفات سرگردان ترانسفورماتور به ازای THD.

ماتریس خازن گرمایی C و کندوکنانس گرمایی G بیان‌کننده رفتار دینامیک داخلی ترانسفورماتور می‌باشند. مؤلفه‌های ماتریس خازن گرمایی C در (۱۹) مشخص شده که [۱۰] نحوه محاسبه این مؤلفه‌های خازن گرمایی برای ترانسفورماتور را بیان کرده است. به دلیل وابستگی انتقال حرارت convention به دمای سیال، مسیره‌های انتقال گرما در مدار معادل حرارتی شکل ۴ با مقاومت‌های غیر خطی مدل شده که این مقاومت‌های غیر خطی درایه‌های تشکیل‌دهنده ماتریس G می‌باشند. در ادامه نحوه محاسبه این مقاومت‌های غیر خطی تشریح می‌شوند

$$P = [P_{wdn} \quad P_{core} \quad P_{clamping} \quad \frac{\theta_{air}}{R_{oil-air}} \quad P_{tank} + \frac{\theta_{air}}{R_{tank-air}}]^T \quad (17)$$

$$\Theta = [\theta_{hs} \quad \theta_{fe} \quad \theta_{mp} \quad \theta_{oil} \quad \theta_{tank}]^T \quad (18)$$

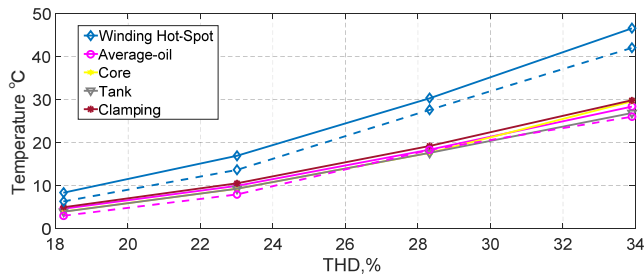
$$C = \begin{bmatrix} c_{wdn} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & c_{fe} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & c_{mp} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & c_{oil} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & c_{tank} \end{bmatrix} \quad (19)$$

در حالت همرفت طبیعی، Nusselt number مربوط به جریان سیال اطراف صفحات عمودی، افقی و استوانه‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Nu = C \cdot [G_r \cdot P_r]^n \quad (21)$$

جایی که C و n ثابت‌های تجربی هستند که می‌توان برای ترانسفورماتورهای قدرت آنها را به ترتیب ۰٫۵۹ و ۰٫۲۵ در نظر گرفت [۹]. بر اساس انتقال حرارت، اعداد Prandtl (P_r) و Grashof (G_r) را نیز می‌توان به ترتیب زیر بیان کرد

$$P_r = \frac{c_p L}{k} \quad (22)$$



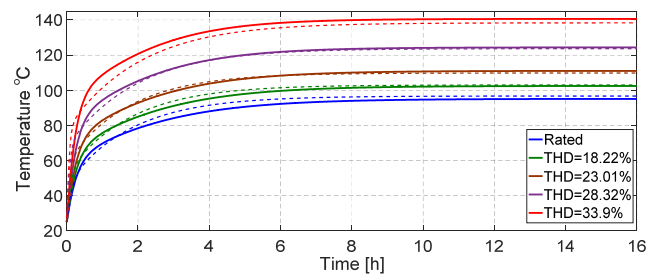
شکل ۷: افزایش دمای اجزای مختلف ترانسفورماتور به ازای بارهای هارمونیک مختلف به دست آمده از مدار معادل حرارتی ارائه شده (منحنی‌های خطچین از IEEE Std C57.91 محاسبه شده‌اند).

مدل بایستی دماهای کارکرد نامی، تلفات بی‌باری و بارداری و ثابت زمانی‌های حرارتی سیم‌پیچ موجود باشند و سپس دماهای جدید ترانسفورماتور را در شرایط کاری متفاوت ارائه دهد. در حالی که مدار معادل حرارتی نیازی به دماهای کارکرد نامی ترانسفورماتور ندارد که این مسئله به عنوان یکی دیگر از برتری‌های مدار معادل حرارتی ارائه شده محسوب می‌شود.

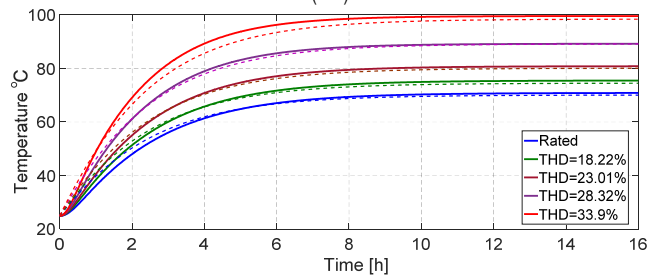
با اجرای مدار معادل حرارتی پیشنهادی و مدل IEEE، دمای نواحی مختلف ترانسفورماتور حاصل شده که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۶- الف و ۶- ب نشان می‌دهد که دماهای نقاط داغ و دمای میانگین روغن به دست آمده از دو مدل‌سازی فوق، اختلاف کمی با هم دارند که از اینجا می‌توان اعتبار مدار معادل حرارتی ارائه شده را مورد تأیید قرار داد. به وضوح مشاهده می‌شود که بارهای هارمونیک با دامنه مؤثر ۱ pu باعث افزایش چشم‌گیر دما در اجزای مختلف ترانسفورماتور می‌شود. برای انجام مقایسه ساده‌تر، شکل ۷ صعود دمای اجزای مختلف ترانسفورماتور از حد نامی را که بر اثر بارهای هارمونیک ایجاد شده است، نشان می‌دهد. از آنجایی که هارمونیک‌ها باعث افزایش شدید تلفات جریان گردابی سیم‌پیچ‌ها می‌شود، دمای نقاط داغ سیم‌پیچ‌ها بیشترین اضافه دما را تجربه کرده‌اند به گونه‌ای که به ازای $THD = 33.9\%$ دمای نقاط داغ به بیش از $140^\circ C$ رسیده که این دما می‌تواند باعث تولید حباب‌های گازی در روغن شود و یا به دلیل وجود رطوبت در ترانسفورماتور، باعث حل شدن بخار آب در عایق‌های سلولزی سیم‌پیچ‌ها شود. از آنجایی که استقامت دی‌الکتریک گازها نسبت به روغن و عایق به مراتب کمتر است بنابراین ظهور این حباب‌های گازی باعث شکست عایقی به خصوص در محل داغ‌ترین نقاط داغ سیم‌پیچ‌ها می‌شود [۲۸]. در اینجا می‌توان به این نتیجه رسید که بارهای هارمونیک ریسک شکست عایقی در ترانسفورماتور را افزایش می‌دهد و از این رو جلوگیری از افزایش دما به دلیل بارهای هارمونیک امری ضروری است.

همان گونه که مشاهده می‌شود، دمای تمام نواحی ترانسفورماتور در شرایط تغذیه بارهای هارمونیک افزایش یافته که این موجب می‌شود تا تجهیزات عایقی در تمام نواحی ترانسفورماتور (به خصوص واشرها و ادوات جانبی نگهدارنده‌ها) در معرض تنش‌های گرمایی قرار بگیرند. یکی دیگر از مسایل حایز اهمیت در ترانسفورماتورهای در معرض افزایش دما، کاهش عمر عایقی می‌باشد. در این مورد نیز دمای نقاط داغ سیم‌پیچی به عنوان بحرانی‌ترین عامل در افزایش نرخ پیری محسوب می‌شود.

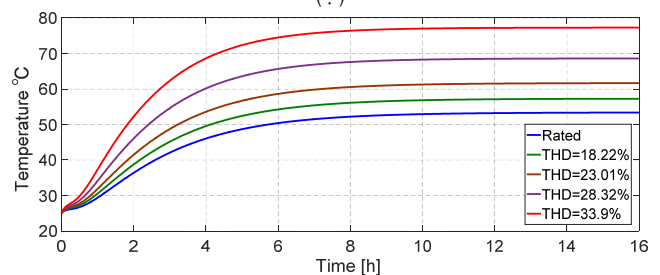
برای آشکارشدن بیشتر موضوع، در اینجا عمر عایقی ترانسفورماتور با هارمونیک‌های مختلف بررسی می‌شود. عمر عایقی ترانسفورماتور را می‌توان بر اساس داغ‌ترین نقطه در ترانسفورماتور تعریف کرد. قانون عکس‌العمل ارائه شده توسط دانشمند سوئدی به نام Svante Arrhenius، وابستگی خرابی عایقی نسبت به دما را بر اساس نتایج عملی به صورت



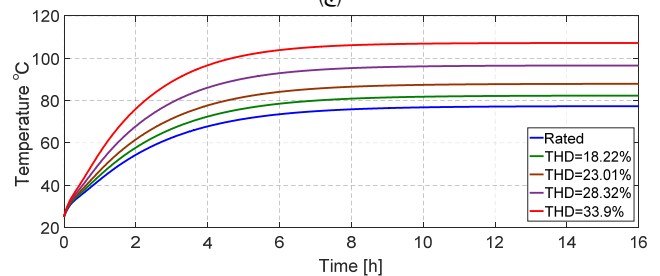
(الف)



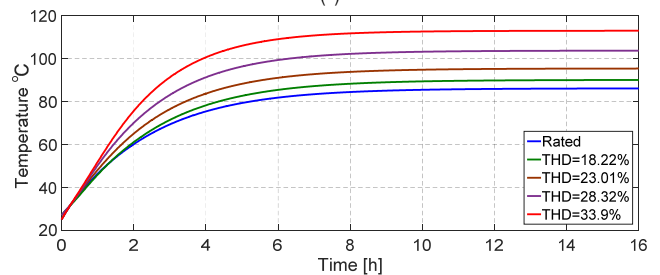
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۶: دمای اجزای مختلف ترانسفورماتور به ازای بار نامی و بارهای هارمونیک مختلف محاسبه شده از مدار معادل حرارتی پیشنهادی شامل (الف) نقطه داغ سیم‌پیچ‌ها (منحنی‌های خطچین از IEEE Std C57.91 محاسبه شده‌اند)، (ب) روغن (منحنی‌های خطچین از IEEE Std C57.91 محاسبه شده‌اند)، (ج) تانک، (د) نواحی فلزی و (ه) هسته.

برای اعتبارسنجی نتایج ارائه شده، مدل حرارتی جامع ارائه گردیده IEEE Lading Guide-Annex G نیز در اینجا پیاده‌سازی شده است. برخلاف مدار معادل حرارتی ارائه شده، مدل IEEE Std C57.91 فقط قادر به پیش‌بینی دمای نقاط داغ (و میانگین) سیم‌پیچی و دمای متوسط روغن (و روغن بالای ترانسفورماتور) است و اطلاعات دمایی در مورد دمای هسته، تانک و تجهیزات کلمپ‌کننده ارائه نمی‌دهد [۲۸]. در این

در اینجا تلفات RI^2 برابر 1 pu در بار نامی است و P_{EDW-R} ، P_{Load-R} و $P_{Stray-R}$ به ترتیب توان بارداری، تلفات جریان گردابی سیمپیچها و تلفات سرگردان در هنگام تغذیه بار نامی ترانسفورماتور با جریان سینوسی است. مقدار این تلفات برای ترانسفورماتور در دست بررسی در جدول ۳ نمایش داده شد. حال با توجه به این رابطه می توان میزان بارگیری ترانسفورماتور را به ازای THD های مختلف مشخص کرد که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده اند.

با اعمال ضریب کاهش بارگیری مشخص شده در جدول ۵، جریان مؤثر عبوری از ترانسفورماتور به ازای بارهای هارمونیکی کاهش می یابد که این باعث می شود تا میزان کل تلفات ترانسفورماتور تقریباً در حد اسمی خود باقی بماند. حال تلفات نواحی مختلف ترانسفورماتور با اعمال ضریب کاهش بارگیری مشخص شده در جدول ۵ محاسبه شده اند و آنها به عنوان ورودی مدار معادل حرارتی ارائه شده در این مقاله تعریف شده اند، با این کار تحلیل حرارتی به ازای شرایط جدید انجام شده که نتایج استخراج شده در شکل های ۸ نمایش داده شده اند. در اینجا دمای محیط ثابت فرض شده و علاوه بر این پروفایل بار روزانه ترانسفورماتور لحاظ نشده است. همان گونه که مشاهده می شود با این میزان کاهش بارگیری، دمای نواحی مختلف ترانسفورماتور به ازای بارهای هارمونیکی مختلف از حد اسمی خود تجاوز نمی کنند. برای وضوح بیشتر، میزان صعود دمای نواحی مختلف ترانسفورماتور به ازای این شرایط در شکل ۹ نشان داده شده اند. مشهود است که در این شرایط افزایش دما در هیچ ناحیه ای از ترانسفورماتور رخ نمی دهد و دمای نقاط داغ سیمپیچی به عنوان اثرگذارترین پارامتر گرمایی ترانسفورماتور تقریباً در حد اسمی خود حفظ شده است. در اینجا مشاهده می شود که کاهش دمای تانک و نواحی فلزی بیشتر از سایر اجزای ترانسفورماتور است، علت این موضوع آن است که با کاهش جریان مؤثر، علاوه بر کاهش دمای روغن (که به دلیل کاهش دمای سیمپیچها به عنوان مهم ترین منبع تولید حرارت ترانسفورماتور، دمای روغن نیز کاهش یافته است) که بر کاهش دمای این نواحی اثرگذار است، تلفات سرگردان این نواحی نیز کاهش می یابد که این موضوع باعث تشدید در کاهش دمای آنها می شود.

۷- نتیجه

در این مقاله یک مدار معادل حرارتی جدید برای مدل سازی گرمایی ترانسفورماتورهای قدرت با بارهای هارمونیکی ارائه شد. از آنجایی که بارهای هارمونیکی باعث افزایش تلفات سیمپیچها و تلفات سرگردان ترانسفورماتور شد بنابراین این مدل جدید به گونه ای ارائه شد که قادر به آشکارسازی دمای نواحی مختلف ترانسفورماتور از جمله نقاط داغ سیمپیچها، روغن، هسته، تانک و ساختار فلزی ترانسفورماتور می باشد. چون که در مدل ارائه شده، اجزای مختلف ترانسفورماتور مدل شده اند بنابراین تلفات اجزای مختلف ترانسفورماتور بایستی به عنوان ورودی مدل تعریف شوند که به منظور محاسبه این تلفات، از مدل سازی المان محدود ۳ بعدی استفاده شد. ساختار هندسی ترانسفورماتور قدرت توسط مدل المان محدود ۳ بعدی پیاده سازی شد تا بتوان تلفات سرگردان در ساختار فلزی و هسته را مورد ارزیابی دقیق قرار داد. نتایج حاصل از مدار معادل حرارتی مشخص کرد که نقاط داغ سیمپیچها بیشترین افزایش دما از حد عملکرد نامی را در ترانسفورماتور با بارهای هارمونیکی دارد. مقایسه نتایج به دست آمده از مدار معادل حرارتی پیشنهاد شده با دماهای نقاط داغ سیمپیچی و میانگین روغن به دست آمده از IEEE Std C57.91 نشان داد که مدار معادل حرارتی پیشنهادی از دقت کافی برای تخمین توزیع دمای

جدول ۵: ضریب کاهش بارگیری ترانسفورماتور به ازای THD های مختلف.

حالت	جریان نامی	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
THD (%)	۰	۱۸,۲۲	۲۳,۰۱	۲۸,۳۲	۳۳,۹
DF	۱	۰,۹۳۵۶	۰,۸۷۲۶	۰,۷۹۱	۰,۷۱۱۵

زیر تعریف می کند [۲۸]

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{TFA} - \frac{15000}{\Theta_H + 273} \right]} \quad (26)$$

$$F_{EOA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (27)$$

$$\%LL = \frac{F_{EOA} \times t \times 100}{\text{Normal Insulation life}} \quad (28)$$

در اینجا F_{AA} ضریب شتاب پیری (نرخ پیری)، Θ_H دمای ماکسیمم عایق، LL کاهش عمر عایقی، T کل بازه زمانی و NL عمر نرمال عایقی می باشد.

در اینجا با فرض این که ترانسفورماتور به صورت دائم تحت بارگیری بارهای هارمونیکی باشد محاسبات به این صورت خواهد شد که به ازای $THD = 18,22\%$ بیش از 48% از عمر عایقی ترانسفورماتور کاهش می یابد که می تواند خسارت اقتصادی زیادی را به سیستم قدرت تحمیل کند. با افزایش THD به مقدار $33,9\%$ ، عمر عایقی ترانسفورماتور بیش از 98% کاهش می یابد و این بدین معنی است که ترانسفورماتور در این شرایط نمی تواند مورد بهره برداری قرار گیرد. بدین منظور در شرایطی که ترانسفورماتور بارهای هارمونیکی را تغذیه می کند بایستی حتماً کاهش بارگیری صورت گیرد که در ادامه به این موضوع پرداخته می شود.

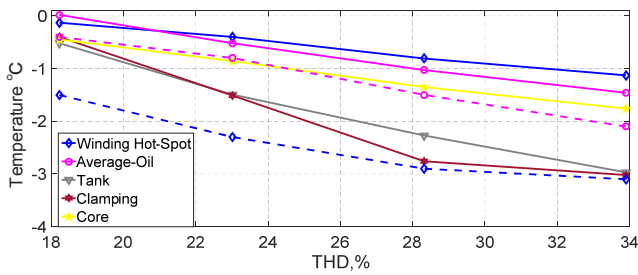
۶- اصلاح بارگیری ترانسفورماتور در شرایط وجود بارهای هارمونیکی بر اساس روش پیشنهادی IEEE STD C57.110

همان گونه که در بخش قبلی مشاهده شد، یک ترانسفورماتور با بارهای غیر سینوسی تحت اضافه دماهای چشم گیری قرار می گیرد. برای اجتناب از اضافه تلفات، $2008-2008$ IEEE Std C57.110 کاهش بارگیری ترانسفورماتور در این شرایط را پیشنهاد می دهد. در این روش، حداکثر جریان غیر سینوسی ترانسفورماتور به میزانی تعیین می شود که تلفات ترانسفورماتور برابر با تلفات ترانسفورماتور طراحی شده برای شرایط نامی باقی بماند [۲] و [۶]. در واقع با این کار مقدار تلفات ترانسفورماتور در شرایط حضور هارمونیکها برابر با تلفات ترانسفورماتور در شرایط کارکرد نامی باقی می ماند. تلفات بار ترانسفورماتور با جریان های بار سینوسی برابر است با [۶]

$$P_{Load-R}(pu) = 1 + P_{EDW}(pu) + P_{stray}(pu) \quad (29)$$

IEEE زمانی که ترانسفورماتور بارهای هارمونیکی را تغذیه می کند ضریب کاهش بارگیری را به صورت زیر مشخص می نماید [۶]

$$DF = \sqrt{\frac{P_{Load-R}(pu)}{1 + [F_{HL} \cdot P_{EDW-R}(pu)] + [F_{HL-stray} \cdot P_{stray-R}(pu)]}} \quad (30)$$



شکل ۹: صعود دمای اجزای مختلف ترانسفورماتور به ازای بارهای هارمونیکی مختلف و کاهش بارگیری شده (منحنی‌های خطچین از IEEE Std C57.91 محاسبه شده‌اند).

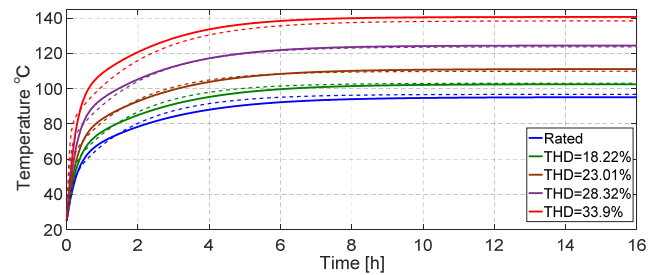
دما در نواحی مختلف ترانسفورماتور در محدوده مجاز خود باقی خواهد ماند. برای مثال به ازای THD به مقدار ۳۳/۹٪، میزان بارگیری ۰/۷۱۱۵ برای بارگیری دائمی ترانسفورماتور پیشنهاد شد.

۸- سپاسگزاری

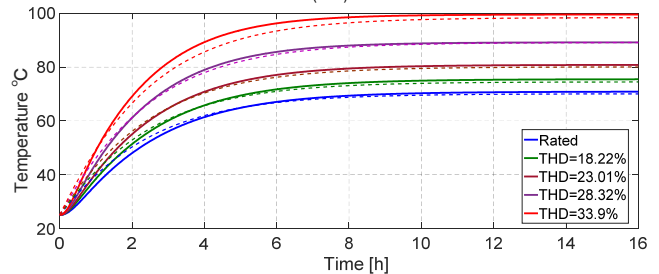
در اینجا جا دارد از برق منطقه‌ای باختر و امور برق انتقال لرستان به دلیل حمایت و مشارکت در این تحقیق تشکر نمایم.

مراجع

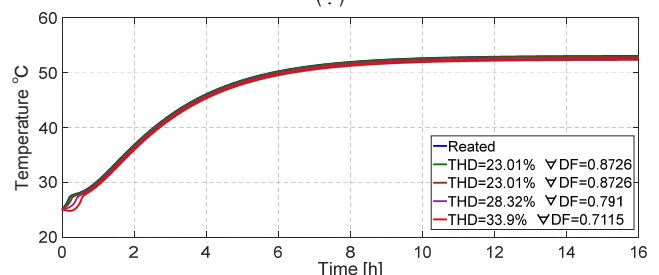
- [1] M. Sharifian and J. Faiz, "Derating of a distribution transformer for non-linear loads," *European Trans. on Electrical Power*, vol. 16, no. 2, pp. 189-203, Nov. 2006.
- [2] ANSI/IEEE Std C57.110, *IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, 1986.
- [3] P. Staats, et al., "A procedure for derating a substation transformer in the presence of widespread electric vehicle battery charging," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1562-1568, Oct. 1997.
- [4] S. Taheri, et al., "Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions," *Electric Power Systems Research*, vol. 86, no. 1, pp. 68-75, May 2012.
- [5] B. Das and Z. R. Radakovic, "Is transformer kVA derating always required under harmonics? A manufacturer's perspective," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 2693-2699, Mar. 2018.
- [6] IEEE Std C57.110-2008, *IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*, pp. 1-52, 2008.
- [7] M. Ghazizadeh, J. Faiz, and H. Oraee, "Derating of distribution transformers under non-linear loads using a combined analytical-finite elements approach," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 8, pp. 779-787, Sept. 2016.
- [8] G. Swift, T. S. Molinski, and W. Lehn, "A fundamental approach to transformer thermal modeling: I- Theory and equivalent circuit," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 171-175, Apr. 2001.
- [9] D. Susa, M. Lehtonen, and H. Nordman, "Dynamic thermal modelling of power transformers," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197-204, Feb. 2005.
- [10] D. Susa and M. Lehtonen, "Dynamic thermal modeling of power transformers: further development-part i," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1961-1970, Oct. 2006.
- [11] D. Susa and H. Nordman, "A simple model for calculating transformer hot-spot temperature," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1257-1265, Jun. 2009.
- [12] L. Zhu, et al., "An improved dynamic thermal circuit model for transformers and its application to evaluate capacity increase," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 13, pp. 1440-1449, Aug. 2017.
- [13] I. Iskender and A. Mamizadeh, "An improved nonlinear thermal model for MV/LV prefabricated oil-immersed power transformer substations," *Electrical Engineering*, vol. 93, no. 1, pp. 9-22, Mar. 2011.
- [14] A. Najafi and I. Iskender, "An improved thermal model for distribution transformer under unbalanced voltage conditions," *International J. of Thermal Sciences*, vol. 104, no. 1, pp. 373-385, Jun. 2016.



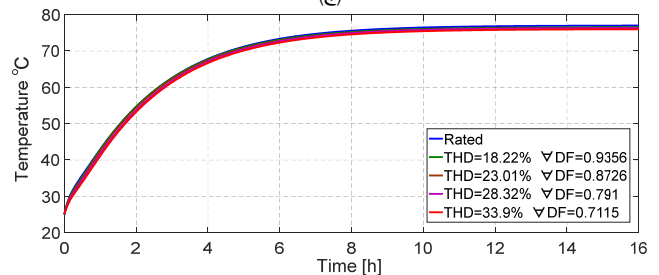
(الف)



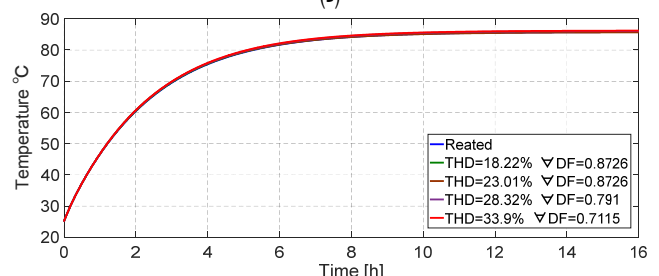
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۸: دمای اجزای مختلف ترانسفورماتور به ازای بار نامی و بارهای هارمونیکی مختلف کاهش بارگیری شده شامل (الف) نقطه داغ سیم‌پیچ‌ها (منحنی‌های خطچین از IEEE Std C57.91 محاسبه شده‌اند)، (ب) روغن (منحنی‌های خطچین از IEEE Std C57.91 محاسبه شده‌اند)، (ج) تانک، (د) نواحی فلزی و (ه) هسته.

ترانسفورماتور تغذیه‌کننده بارهای هارمونیکی برخوردار است. در این مقاله مشاهده شد که با افزایش THD به مقدار ۳۳/۹٪، عمر عایقی ترانسفورماتور بیش از ۹۸٪ کاهش می‌یابد و این بدین معنی است که ترانسفورماتور در این شرایط نمی‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به منظور جلوگیری از افزایش توزیع دمای ترانسفورماتور با تغذیه بارهای هارمونیکی از حد مجاز، کاهش بارگیری ترانسفورماتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با اعمال کاهش بارگیری پیشنهادی، توزیع

مرتضی میخک بیرانوند در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از موسسه هدف ساری و در سال ۱۳۹۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی مالک اشتر دریافت نمود. از سال ۱۳۹۳ نامبرده به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه لرستان وارد گردید و در سال ۱۳۹۸ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق قدرت از دانشگاه مذکور گردید. ایشان از سال ۱۳۹۰ تا کنون پروژه‌های تحقیقاتی مختلفی برای وزارت نیرو و... به انجام رسانده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند طراحی و بهینه‌سازی موتورهای الکتریکی، تحلیل مولتی فیزیک ترانسفورماتور قدرت و بررسی رفتارهای حالت گذرا ترانسفورماتور قدرت می‌باشد.

بهروز رضایی علم در سال ۱۳۷۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان و مدارک کارشناسی ارشد مهندسی برق-کنترل و دکتری برق-قدرت خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۴ از دانشگاه تهران دریافت نموده است و هم‌اکنون دانشیار گروه مهندسی برق-قدرت دانشکده فنی-مهندسی دانشگاه لرستان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: ماشین‌های الکتریکی، درایوهای الکتریکی و روش اجزاء محدود.

مهرداد جعفربلند به سال ۱۳۴۵ در اصفهان متولد شد. موفق به اخذ مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد قدرت به ترتیب در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه علم و صنعت و در سال ۱۳۷۳ از دانشگاه تربیت مدرس شد. به سال ۱۳۸۱ موفق به اخذ مدرک دکتری برق گردید. از سال ۱۳۷۳ عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر بوده و از سال ۱۳۹۰ دانشیار این دانشگاه است. هم‌زمان از سال ۱۳۶۸ تا سال ۱۳۹۱ در پژوهشکده دریایی مشغول به تحقیق بوده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان ماشین‌های الکتریکی، درایو و منابع پالسی است.

محسن عسگری مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق گرایش قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نمود. وی هم‌اکنون در مقطع دکتری در رشته مهندسی برق گرایش قدرت در آزمایشگاه تحقیقاتی عایق‌ها و فشارقوی زیرمجموعه قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سامانه‌های قدرت دانشگاه علم و صنعت ایران بر روی عایق‌های کامپوزیتی خطوط انتقال مشغول مطالعه و پژوهش است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: آنالیز میدان‌های الکتریکی در سیستم‌های عایقی، طراحی بهینه تجهیزات فشارقوی و بررسی تأثیر عوامل محیطی بر عملکرد عایق‌های خطوط هوایی و پست‌های فشارقوی.

ولی‌الله ابراهیمیان در سال ۱۳۸۰ مدرک کارشناسی برق خود را از دانشگاه صنعت آب و برق و در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دورود دریافت نمود. از سال ۱۳۸۱ نامبرده به عنوان کارشناس حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت در شرکت برق منطقه‌ای باختر به کار مشغول شده و در سال ۱۳۹۷ به دوره دکترای مهندسی برق دانشگاه لرستان در خرم‌آباد وارد گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان حفاظت سیستم‌های قدرت می‌باشد...

- [15] B. Szabados, et al., "A new approach to determine eddy current losses in the tank walls of a power transformer," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 2, no. 3, pp. 810-816, Jul. 1987.
- [16] Z. Valkovic, "Calculation of the losses in three-phase transformer tanks," *IEE Proc. C: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 1, pp. 20-25, Jan. 1980.
- [17] N. Takahashi, T. Sakura, and Z. Cheng, "Nonlinear analysis of eddy current and hysteresis losses of 3-D stray field loss model (problem 21)," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 37, no. 5, pp. 3672-3675, Sept. 2001.
- [18] H. V. Sande, et al., "An effective reluctivity model for nonlinear and anisotropic materials in time-harmonic finite element computations," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 41, no. 5, pp. 1508-1511, May 2005.
- [19] I. R. Ciric and F. I. Hantila, "An efficient harmonic method for solving nonlinear time-periodic eddy-current problems," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1185-1188, Mar. 2007.
- [20] G. Paoli, O. Biro, and G. Buchgraber, "Complex representation in nonlinear time harmonic eddy current problems," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 2625-2628, Sept. 1998.
- [21] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, and M. Ghofrani, "Mixed derating of distribution transformers under unbalanced supply voltage and nonlinear load conditions using TSFEM," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 780-789, Jan. 2010.
- [22] J. Olivares, et al., "2D finite-element determination of tank wall losses in pad-mounted transformers," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, no. 2, pp. 179-185, Jan. 2004.
- [23] X. Liu, Y. Yang, and F. Yang, "Numerical research on the losses characteristic and hot-spot temperature of laminated core joints in transformer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, no. 5, pp. 49-61, Jan. 2017.
- [24] P. Picher, et al., "Optimization of transformer overload using advanced thermal modelling," in *Proc. CIGRE Conf.*, Article A2-305, Paris, France, 29-30 Jan. 2010.
- [25] D. Susa and M. Lehtonen, "Dynamic thermal modeling of power transformers: further development-part ii," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1971-1980, Oct. 2006.
- [26] L. Wang, et al., "Improved dynamic thermal model with pre-physical modelling for transformers in ONAN cooling mode," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 34, no. 4, pp. 1442-1450, March. 2019.
- [27] L. Zhou, et al., "Oil exponent thermal modelling for traction transformer under multiple overloads," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 22, pp. 5982-5989, Oct. 2018.
- [28] IEEE Std. C57.91-2011, *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*, (Revision of pp. 1-123, 2012).
- [29] J. Zhang and X. Li, "Oil cooling for disk-type transformer windings-part 1: theory and model development," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1318-1325, Jun. 2006.