

تأثیر بارهای غیر خطی بر روی توزیع دمای ترانسفورماتور خشک رزینی

داود عزیزیان

d.azizian@iran-transfo.com

واحد تحقیق و توسعه شرکت ایران ترانسفو- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

چکیده - ترانسفورماتورهای خشک مخصوصاً انواع رزینی آنها امروزه بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند و مشخصه ضد آتش، آنها را به یک گزینه مطلوب جهت استفاده در مناطق مسکونی و بیمارستانی تبدیل کرده است. با وجود محاسنی که اینگونه از ترانسفورماتورها دارند، محدوده دما در آنها بالاتر از انواع روغنی است که این خود بررسی رفتار حرارتی آنها را بسیار ضروری می‌نماید. امروزه بسیاری از بارها در شبکه‌های توزیع برق، غیر خطی هستند و نمی‌توان آنها را تنها شامل یک مؤلفه سینوسی با فرکانس پایه شبکه فرض کرد. بارهای غیر خطی سبب بروز مشکلات متعددی در ادوات شبکه می‌شوند که از آنجمله می‌توان به افزایش دمای ترانسفورماتور در معرض هارمونیکها اشاره کرد. بنابراین تحلیل رفتار حرارتی، تنها در برابر بارهای سینوسی، کافی نمی‌باشد و نیاز به بررسی این رفتار در حضور هارمونیکها به شدت احساس می‌شود. با توجه به اهمیت بالای مسائل حرارتی در ترانسفورماتورهای خشک رزینی، در این مقاله ضمن ارائه یک مدل ریاضی و تأیید صحت آن توسط نتایج تجربی، به پیش بینی توزیع درجه حرارت این نوع از ترانسفورماتورها در مقابل بارهای هارمونیکی پرداخته می‌شود.

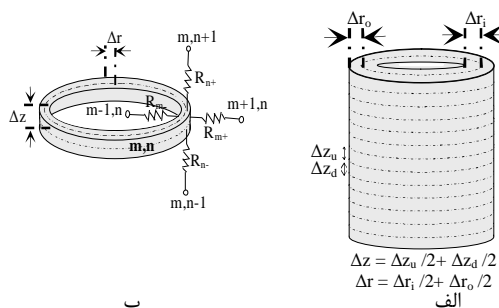
کلید واژه- ترانسفورماتور خشک رزینی، تلفات سیم‌پیچی، مدلسازی حرارتی، هارمونیک.

۱- مقدمه

استفاده از این سیال به‌مرور از رونق بیافتد، تا جائیکه امروزه استفاده از آن به کلی منتهی می‌باشد [۱].

اما با توجه به بر جای ماندن مشکل آتش سوزی و انفجار، محققان روی به ساخت ترانسفورماتورهایی آوردند که هیچگونه سیالی در ساختمان آنها به چشم نمی‌خورد. این نوع ترانسفورماتورهای خشک نامیده شدند، مشکل انفجار و آتش‌سوزی را برطرف کرده و برخی از مزایای ترانسفورماتورهای روغنی را نیز از دست داده‌اند. مثلاً در انواع روغنی، سیال وظیفه عایقی و در عین حال خنک‌کنندگی ترانسفورماتور را به طور همزمان بر عهده دارد. این در صورتیست که در ترانسفورماتورهای خشک، دیگر سیالی جهت خنک‌کاری وجود ندارد که این خود امکان ساخت آنها را در توان‌های بالا محدود می‌کند. نویسندگان در مقالات [۲] و [۳] مدلسازی حرارتی و تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توزیع دمای ترانسفورماتور خشک رزینی در

شرایط استفاده از ترانسفورماتورها در محیطهای صنعتی، خانگی و یا بیمارستانی تا حدود بسیار زیادی متفاوت می‌باشد. در محیطهایی که جمعیت زیادی در آنها ساکنند، می‌بایست ترانسفورماتورهای معینی مورد استفاده قرار گرفته و در ساخت آنها امنیت جانی و مالی افراد در نظر گرفته شود. از نظر تاریخی استفاده از ترانسفورماتورهای روغنی مرسوم بوده است، ولی با توجه به اینکه ترانسفورماتورهای روغنی خطر آتش سوزی و حتی انفجار دارند، برای استفاده در محیطهای مسکونی و بیمارستانی سازگار نمی‌باشند. بنابراین با توجه به این مشکل، متخصصان و طراحان به سمت روشهای نوین ساخت و طراحی ترانسفورماتور روی آوردند. سیر تحول اینگونه ترانسفورماتورهای غیر آتشگیر آنها را به سمت عایقهای مانند آسکارل سوق داد، اما سرطاناتر بودن آن موجب شد که



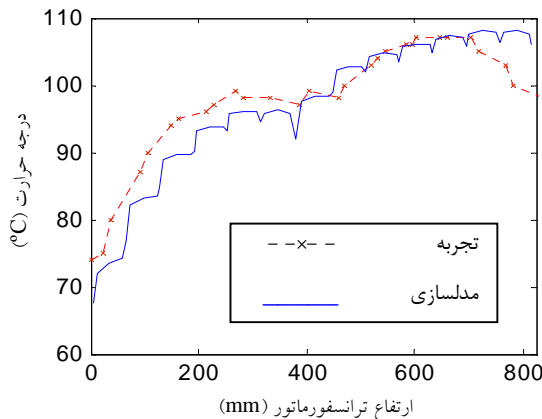
شکل ۲- الف- تقسیم‌بندی شعاعی و عمودی - ب- شماتیک یک گره که نماینده یک جزء استوانه‌ایست، به‌همراه ارتباطات مقاومتی با چهار گره مجاور

$$\frac{(T_{m,n} - T_{m-1,n})}{R_{m-}} + \frac{(T_{m,n} - T_{m+1,n})}{R_{m+}} + \frac{(T_{m,n} - T_{m,n-1})}{R_{n-}} + \frac{(T_{m,n} - T_{m,n+1})}{R_{n+}} = P_{m,n} \quad (1)$$

که در آن R_{m+} ، R_{m-} ، R_{n+} و R_{n-} مقاومت‌های حرارتی گره m,n نسبت به گره‌های خارجی، داخلی، بالایی و پایینی می‌باشند که مقادیر آنها در [۲] آورده شده‌اند. ضمناً $T_{m,n}$ و $P_{m,n}$ نمایانگر درجه حرارت و تلفات در گره m,n می‌باشند. $P_{m,n}$ می‌تواند بصورت ترکیب تلفات اهمی و فوکو، نشان داده شده در رابطه (۲)، نوشته شود:

$$P_{m,n} = P_{dc-1} + P_{eddy-1} = (1 + K_{eddy}) P_{dc-1} \quad (2)$$

که در آن P_{dc-1} ، P_{eddy-1} و K_{eddy} تلفات اهمی، تلفات فوکو و ضریب تلفات فوکو برای جریان سینوسی با فرکانس پایه می‌باشند [۴]. برای بررسی صحت نتایج حاصل از مدل‌سازی، یک ترانسفورماتور 80 kVA نمونه [۲] انتخاب و برای آن نتایج مدل و تجربه، در مواجهه با بار خطی، باهم مقایسه شده‌اند (شکل ۳).

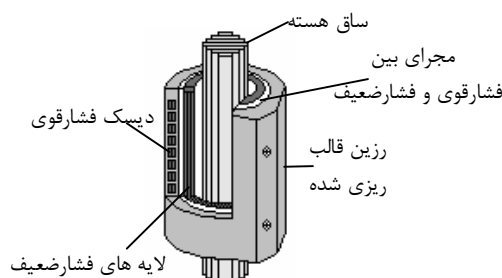


شکل ۳ - دمای سطح ترانسفورماتور

مقابل بارهای خطی را ارائه کرده‌اند. با این وجود بارها در شبکه‌های توزیع ترکیبی از بارهای خطی و غیر خطی می‌باشند و عموماً بار را نمی‌توان بصورت یک بار کاملاً خطی فرض کرد. بنابراین در سیم پیچی‌های ترانسفورماتورهای توزیع، جریان علاوه بر مولفه اصلی دارای هارمونیکهایی نیز می‌باشد که دامنه این هارمونیکها بسته به نوع بار تغییر می‌کند. با توجه به وجود هارمونیکهای جریان در شبکه و مشخصه حرارتی نامناسب ترانسفورماتورهای خشک رزینی، بسیار مهم است که رفتار حرارتی این نوع از ترانسفورماتورها در مواجهه با هارمونیکهای موجود در شبکه مورد بحث و بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه تا بحال هیچ تحقیقی در این زمینه ارائه نشده است، در این مقاله به بحث درباره تأثیر هارمونیکهای جریان بر روی توزیع درجه حرارت در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور خشک رزینی می‌پردازیم.

۲- مدل‌سازی ریاضی و تأیید صحت مدل

در این قسمت تنها به مختصری در ارتباط با ساختار ترانسفورماتور خشک رزینی و مدل‌سازی حرارتی در آن اکتفا و خواننده برای مطالعه بیشتر به [۱] و [۲] ارجاع داده می‌شود. شکل ۱ ترانسفورماتور خشک رزینی را که مورد بحث مقاله حاضر است نشان می‌دهد.



شکل ۱- شکل ظاهری ترانسفورماتور خشک رزینی

با توجه به ساختار استوانه‌ای ترانسفورماتور خشک رزینی (شکل ۱)، شکل ۲ گره‌بندی ترانسفورماتور در دو راستای شعاعی و عمودی را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی حرارتی، معادلات انتقال حرارت برای تک تک گره‌ها بدست آمده و از حل آنها درجه حرارت در تمام قسمت‌های ترانسفورماتور محاسبه می‌شود. برای گره (نماینده یک جزء استوانه‌ای) نشان داده شده در شکل ۲- ب معادله انتقال حرارت بصورت رابطه (۱) قابل ارائه است [۲].

تلفات اهمی- با توجه به اینکه هارمونیکها، مقدار مؤثر جریان را متأثر می‌سازند، تلفات اهمی بصورت زیر تغییر می‌کند:

$$P_{dc} = \sum_{h=1}^n P_{dc-h} = P_{dc-1} \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \quad (4)$$

که در آن P_{dc-h} نشان دهنده تلفات اهمی مرتبط با هارمونیک h ام می‌باشد.

تلفات فوکو- این قسمت از تلفات با مجذور فرکانس ارتباط دارد، بگونه‌ای که مقدار آن در فرکانسهای بالا در مقابل تلفات اهمی چشمگیر می‌شود. افزایش تلفات فوکو در حضور هارمونیکها بصورت زیر قابل بیان است [۶]:

$$P_{eddy} = \sum_{h=1}^n P_{eddy-h} = P_{eddy-1} \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2 \quad (5)$$

$$= K_{eddy} P_{dc-1} \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 h^2$$

که در آن P_{eddy-h} نشان دهنده تلفات فوکو مرتبط با هارمونیک h ام می‌باشد. از ترکیب روابط بالا تلفات کل گره m, n در رابطه (۲) بصورت زیر اصلاح می‌شود:

$$P_{m,n} = K_{additional} P_{dc-1} \quad (6)$$

که در آن $K_{additional}$ ضریب تلفات هارمونیک است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_{additional} = \sum_{h=1}^n \left[\left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 (1 + K_{eddy} h^2) \right] \quad (7)$$

در بخش آینده با اعمال این تلفات به نرم‌افزار مدلسازی حرارتی، تأثیر هارمونیکهای جریان بر روی توزیع درجه حرارت در ترانسفورماتور خشک رزینی مورد بحث قرار می‌گیرد.

هارمونیکهای ولتاژ: این قسم هارمونیکها تنها بر روی شار مغناطیسی و در نتیجه تلفات بی باری تأثیر می‌گذارند که در مقابل افزایش تلفات بار ناشی از هارمونیکهای جریان قابل چشم پوشی است.

جدول ۱ نیز به مانند شکل ۳، دقت بالای نرم‌افزار مدلسازی حرارتی را که در ادامه جهت بررسی رفتار حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی در مواجهه با بارهای غیر خطی مورد استفاده قرار گرفته است، نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر افزایش دمای متوسط (°C)

ترانسفورماتور نمونه	فشار ضعیف		فشار قوی	
	مدلسازی	تجربه	مدلسازی	تجربه
۸۰۰ kVA	۸۶/۸۸	۸۵	۹۱/۴۱	۹۳
۱۶۰ kVA	۷۱/۴۲	۷۳	۷۶/۸۷	۷۴
۳۱۵ kVA	۸۴/۰۲	۸۲	۸۶/۷۰	۸۳
۲۰۰ kVA	۹۳/۲۸	۹۰	۸۵/۴۵	۸۵
۴۰۰ kVA	۱۱۴/۱۲	۱۱۲	۱۰۸/۰۸	۱۰۶
۲۵۰ kVA	۱۰۰/۳۹	۹۹	۸۳/۳۸	۸۶
۱۰۰۰ kVA	۸۶/۵۵	۸۸	۶۹/۷۳	۷۱
۲۵۰۰ kVA	۱۰۱/۰۴	۱۰۰	۱۰۳/۴۱	۱۰۲
۳۱۵۰ kVA	۱۰۷/۶۸	۱۰۵	۹۳/۹۹	۹۳
۱۶۰۰ kVA	۸۴/۵۷	۸۷	۵۷/۴۸	۵۷
۶۳۰ kVA	۸۶/۳۱	۸۵	۸۴/۶۵	۸۸
۴۰۰ kVA	۱۰۰/۴۵	۹۹	۹۶/۶۵	۹۸

۳- هارمونیکها و تأثیر آنها بر تلفات

امروزه بار در شبکه‌های توزیع ترکیب بارهای خطی و غیر خطی می‌باشد که از آنجمله می‌توان به لامپهای فلورست، کامپیوترهای شخصی و پل‌های سه فاز جهت درایو موتور الکتریکی اشاره کرد. هارمونیکها عموماً از دو جهت بررسی می‌شوند:

هارمونیکهای جریان: در اکثر سیستم‌های قدرت هارمونیکهای جریان بسیار مهم و تأثیر گذارند. این هارمونیکها سبب ایجاد تلفاتی اضافه در ترانسفورماتورها می‌شوند. جریان بار ترانسفورماتور بصورت جریان هارمونیکي زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$I_L = \sum_{h=1}^n I_h \cdot \cos(h \cdot \omega t) \quad (3)$$

که در آن h شماره هارمونیک و I_h دامنه هارمونیک جریان h ام می‌باشند. در این مقاله از تلفات پوستی و فراری در ترانسفورماتور خشک صرف‌نظر شده است [۵] و تنها تلفات اهمی و فوکو مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴- تأثیر هارمونیکهای جریان بر روی توزیع درجه حرارت ترانسفورماتور خشک رزینی

- هارمونیکهای جریان تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی دمای ترانسفورماتور دارند. بطوری که در بعضی موارد تا ۵۰٪ نیز آنرا افزایش می دهند.

- نسبت دمای نقطه داغ به دمای متوسط را می توان برابر ۱/۳ در نظر گرفت. این مقدار به جریان بار ربطی ندارد و برای یک ترانسفورماتور مشخص مقداری ثابت است.

حال یک ترانسفورماتور ۱۱۵۰ kVA [۷]، بعنوان نمونه در نظر گرفته و نتایج حاصل از مدلسازی حرارتی آن در مواجهه با بار هارمونیک بررسی می شود (شکل ۴ و ۵).

جدول ۲ هارمونیکهای مربوط به یک چاپر ۶ پالسه را نشان می دهد.

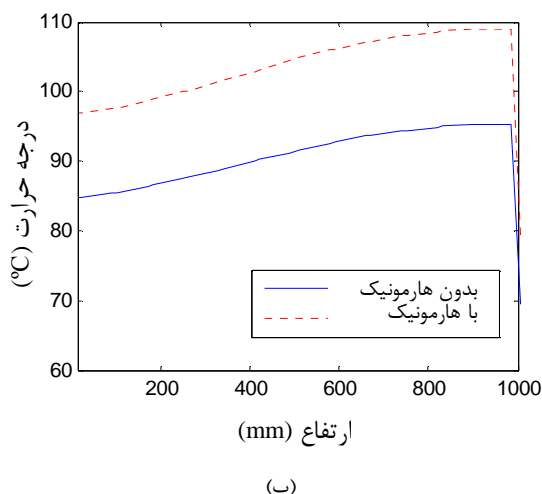
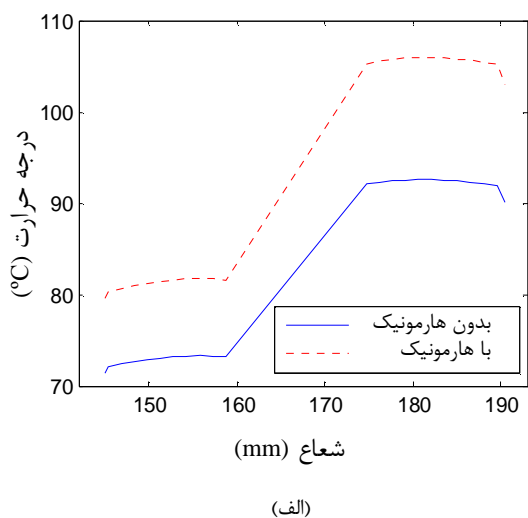
جدول ۲- دامنه هارمونیکهای جریان نسبت به مؤلفه اصلی

h	۱	۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵
دامنه (%)	۱۰۰	۲۳	۱۲	۷/۵	۵/۵	۴	۳	۲	۲

با استفاده از جدول ۲ و مباحث بخشهای پیشین، دمای متوسط و نقطه داغ برای ترانسفورماتورهای مختلف بصورت جدول ۳ بدست می آیند.

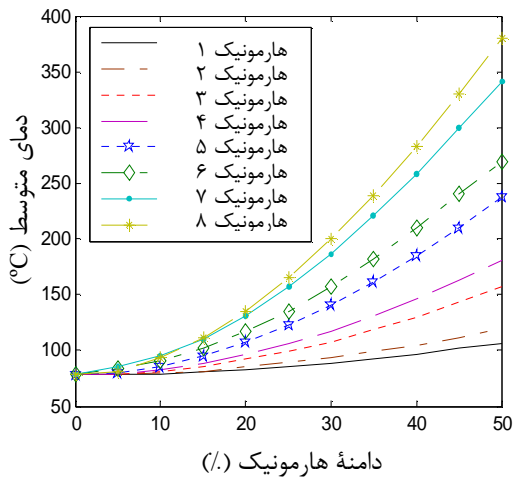
جدول ۳- دمای متوسط (AV) و نقطه داغ (HS)

توان (kVA)		بدون هارمونیک		با هارمونیک	
		مدلسازی	تجربه		
۲۵۰	فشار ضعیف	AV	۱۰۰/۳۹	۹۹	۱۱۱/۶۵
		HS	۱۱۱/۴۷	--	۱۲۳/۳۷
	فشار قوی	AV	۸۳/۳۸	۸۵	۹۱/۴۲
		HS	۱۰۹/۵۹	--	۱۱۹/۴۸
۳۱۵	فشار ضعیف	AV	۸۴/۰۲	۸۲	۹۵/۰۶
		HS	۹۱/۱۰	--	۱۰۱/۹۸
	فشار قوی	AV	۸۶	۸۲	۹۶/۴۴
		HS	۱۱۱/۲۵	--	۱۲۳/۸۶
۱۶۰۰	فشار ضعیف	AV	۸۵	۸۷	۱۰۰/۵۴
		HS	۱۲۷/۰۳	--	۱۵۴/۰۴
	فشار قوی	AV	۵۷/۴۸	۵۷	۶۵/۸۸
		HS	۷۹/۵۱	--	۸۲/۱۶
۲۵۰۰	فشار ضعیف	AV	۹۳/۵۱	۹۴	۱۱۰/۴۱
		HS	۱۳۲/۴۰	--	۱۶۲/۳۹
	فشار قوی	AV	۹۸/۶۶	۱۰۰	۱۰۵/۶۹
		HS	۱۲۷/۱۰	--	۱۳۶/۴۴
۳۱۵۰	فشار ضعیف	AV	۱۰۷/۶۸	۱۰۰	۱۴۳/۳۴
		HS	۱۵۲/۲۸	--	۲۱۹/۳۱
	فشار قوی	AV	۹۳/۹۹	۹۳	۱۰۲/۳۸
		HS	۱۲۰/۸۹	--	۱۳۲/۴۸

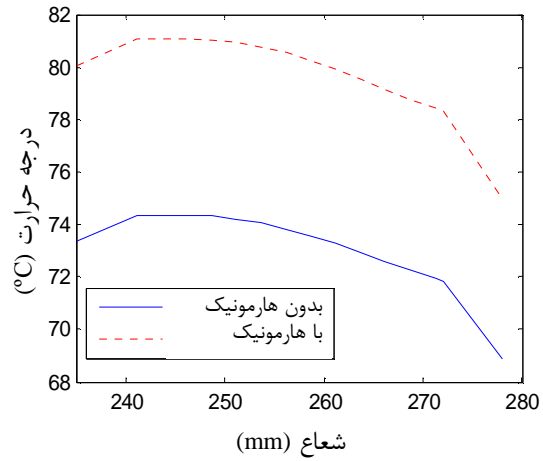


شکل ۴- دمای سیم پیچی فشار ضعیف در جهت الف) شعاعی ب) عمودی

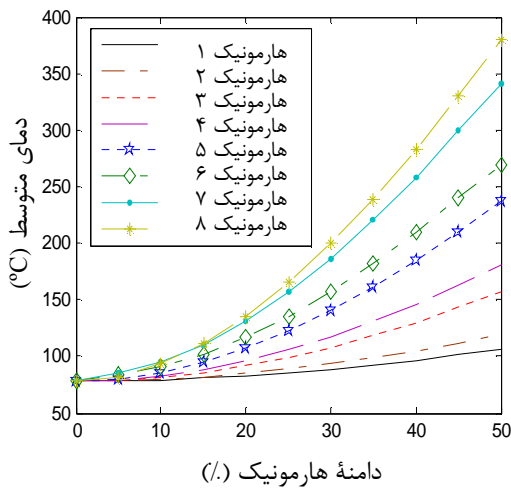
از بررسی این نتایج نکات زیر حائز اهمیتند:



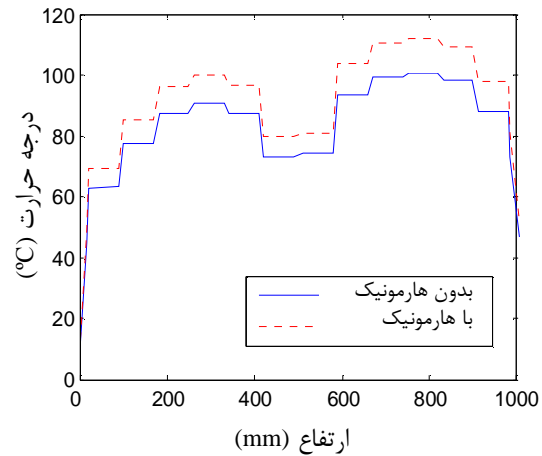
(الف)



(الف)



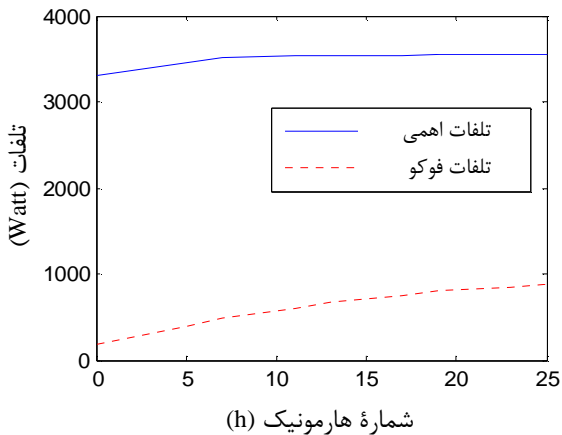
(ب)



(ب)

شکل ۵- دمای سیم پیچی فشار قوی در جهت الف) شعاعی ب) عمودی

شکل ۶- دمای متوسط سیم پیچی الف) فشار ضعیف و ب) فشار قوی بر حسب دامنه هارمونیکها

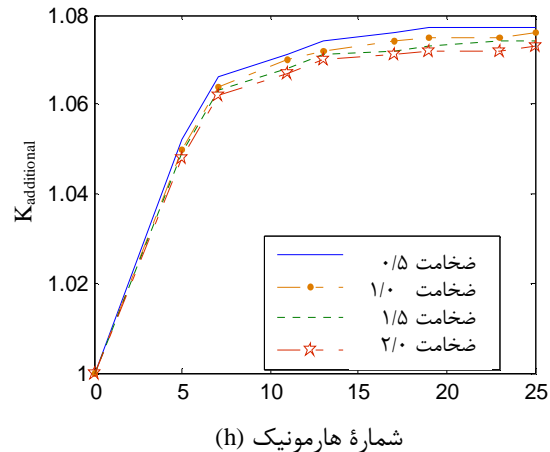


شکل ۷- تلفات سیم پیچی فشار ضعیف بر حسب شماره هارمونیک

شکل ۶ دمای متوسط سیم پیچی را بر حسب دامنه هارمونیکها نشان می دهد. آنچنان که از این شکل دیده می شود، به ازای دامنه برابر، هارمونیکهای با فرکانس بالاتر افزایش بسیار بیشتری در دمای ترانسفورماتور ایجاد می کنند. این مسئله بدلیل ارتباط تلفات فوکو، در رابطه (۵)، با مجذور فرکانس است. همانطوری که در شکل ۷ دیده می شود، در فرکانسهای بالا، تلفات فوکو و در نتیجه تأثیر آن بر روی دمای ترانسفورماتور، با سرعت بسیار بیشتری نسبت به تلفات اهمی افزایش می یابد.

شکل ۸ نیز تأثیر ضخامت های متفاوت فویل فشار ضعیف را بر روی $K_{\text{additional}}$ نشان می دهد.

- با توجه به ارتباط تلفات فوکو با مجذور فرکانس، تأثیر هارمونیکهای با فرکانس بالا بر روی این تلفات بسیار زیاد است، به گونه‌ای که در فرکانسهای بالا این تلفات در مقابل تلفات اهمی چشمگیر می‌شود.
- ضریب افزایش تلفات هارمونیکی ($K_{\text{additional}}$) می‌تواند مستقل از پارامترهای ترانسفورماتور در نظر گرفته شود. این بدین معناست که میزان تأثیر هارمونیکها بر تلفات مستقل از پارامترهای ترانسفورماتور است.



شکل ۸- تأثیر ضخامت فویل فشارضعیف بر روی ضریب تلفات هارمونیکی ($K_{\text{additional}}$)

از این شکل و نتایج دیگر بدست آمده، دیده می‌شود که ضریب تلفات هارمونیک، با تغییر در پارامترهای ترانسفورماتور به آرامی تغییر می‌کند.

سیاسگزاری

با تشکر از مدیر عامل محترم مؤسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران، جناب آقای مهندس میرعلیخانی، که در تمامی مراحل پروژه ما را یاری کردند.

مراجع

- [۱]. د. عزیزیان، "مدلسازی حرارتی ترانسفورماتورهای خشک رزینی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ۱۳۸۴.
- [2]. E. Rahimpour, D. Azizian, "Analysis of Temperature Distribution in Cast-Resin Dry-Type Transformers", Electrical Eng, April, 2006 (Published Online), DOI 10.1007/s00202-006-0008-4.
- [۳]. د. عزیزیان، ا. رحیم‌پور، "تأثیر عوامل مختلف بر روی توزیع دما در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور خشک رزینی" کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2006)، ۱۳۸۵.
- [4]. E. Rahimpour, "Hochfrequente Modellierung von Trnsformatoren zur Berechnung der Übertragungsfunktionen. Dissertation", Stuttgart, Shaker Verlag, ISBN 3826592271, 2003.
- [5]. A. A. Elmoudi, "Evaluation of Power System Harmonic Effects on Transformers", Doctoral Dissertation, Helsinki University, April. 2006.
- [6]. IEC Converter Transformers ", IEC Std. 61378-1-Transformers for Industrial Applications- Part 1, Sept. 1997.
- [۷]. ایران ترانسفو، دفتر فنی ترانسفورماتورهای خشک، برگه محاسبات ترانسفورماتور ۱۱۵۰ kVA، D13-C03.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدلی مبتنی بر یک مدل ریاضی جهت مدلسازی حرارتی ترانسفورماتور خشک رزینی ارائه و توسط نتایج تجربی تأیید شد. سپس با محاسبه تلفات در حضور هارمونیکها و اعمال آن به مدل ارائه شده، به بررسی تأثیر هارمونیکهای جریان بر روی توزیع درجه حرارت سیم پیچی‌های یک ترانسفورماتور خشک نمونه با توان ۱۱۵۰kVA پرداخته شد. از این بررسی نتایج زیر حاصل آمد:

- هارمونیکهای ولتاژ تنها بر روی تلفات بی‌باری تأثیر می‌گذارند که در مقابل تلفات بار قابل صرفنظر کردن است.
- افزایش دمای ترانسفورماتور در حضور هارمونیکهای جریان چشمگیر و غیر قابل چشم پوشی می‌باشد. بنابراین در نظر گرفتن آنها در طراحی ترانسفورماتور اهمیت بسیار دارد.
- نسبت دمای نقطه داغ به دمای متوسط سیم‌پیچی با و بدون حضور هارمونیکها ثابت و مستقل از جریان بار است.

