بهبود مدل وابسته به فرکانس ترانسفورماتور با هسته هوایی جهت مطالعات حالت گذرا

جعفر نصرتیان اهور [1]، سعید سیدطبایی [2] و گئورک قره پتیان [3]

1- برق منطقه ای باختر و دانشگاه شاهد تهران 2- دانشگاه شاهد تهران 3- دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران

چکیده —در این مقاله آنالیز پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور با لحاظ ساختار سیم پیچی آن با استفاده از مدار معادل مشروح مورد بررسی قرار گرفته است. یک روش ابتکاری جهت تخمین پارامترهای مدار معادل مشروح ارائه گردیده است تا بر مشکل تخمین پارامترها در مدارهای معادل یزرگ غلبه نماید. این روش ابتکاری بر روی مدل مشروح نوزده و هفتاد و شش سکشنی پیاده سازی گردیده است. از حل معادلات حالت مدار معادل ترانسفورماتور، پاسخ فرکانسی آن استخراج شده است و عناصر مدار معادل وابسته به فرکانس مدل گردیده است. در این مقاله مدار معادل مشروح جدیدی ارائه شده است که کیفیت رفتار ترانسفورماتور را در مقایسه با مدلهای پیشین با کیفیت مطلوب تری مدل می کند. روشی جهت اعتبارسنجی مدار معادل استخراج شده ارائه شده است. روش ها و ایده های جدید بیان شده بر روی یک سیم پیچ واقعی با توان نامی 1,6مگا ولت آمپر و ولتاژ نامی 20/0,4 کیلو ولت در آزمایشگاه پیاده سازی شده است.

واژه‌های کلیدی — ترانسفورماتور؛ مدار معادل مشروح؛ تابع تبدیل؛ آنالیز پاسخ فرکانسی؛ الگوریتم ژنتیک؛ معادله حالت

۱. مقدمه

ترانسفورماتور قدرت اغلب بزرگترین و گران ترین تجهیز در سیستم های قدرت هستند[1]. لذا مراقبت های ویژه در طراحی، ساخت، نصب و راه اندازی، بهره برداری و تعمیر و نگهداری آن ضروری است. تکنیک های تشخیصی الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی متفاوتی جهت شناسایی عیوب ترانسفورماتور ارائه شده است و این تحقیقات به طور گسترده ادامه دار است. یکی از تکنیک های جدید ارزیابی وضعیت ترانسفورماتور تحلیل پاسخ فرکانسی است[2] که به ویژه عیوب مکانیکی سیم پیچ کارآمد و موثر است.

برای یافتن یک مدل مناسب و دقیق در بررسی رفتار ترانسفورماتور در حالت گذرا تلاش های مختلفی صورت گرفته است که می توان به مدلسازی مبتنی بر ساختار فیزیکی ترانسفورماتور [3-5]، مدل جعبه سیاه [6-7] و مدل هیبرید [8] اشاره نمود. مدل مشروح یکی از مرسوم ترین مدل های ترانسفورماتور قدرت است که مبتنی بر ساختار فیزیکی ترانسفورماتور است[3-8]. در یک مدل مشروح اعتبار و دقت مدل بستگی به مقادیر پارامترهای مدل، تعداد سکشن های مدار معادل و تابع خطای انتخاب شده دارد. هنگامی که تعداد سکشن های مدار معادل بزرگ انتخاب می گردد گرچه محدوده اعتبار فرکانسی مدل افزایش می یابد در مقابل تعیین مقادیر مناسب پارامترها پیچیده تر شده و با توجه به بزرگتر شدن ابعاد معادلات سیستم، حل آن نیز زمان بر می گردد لذا برقراری مصالحه ای بین دقت مدل و ابعاد مدار معادل در فرآیند مدلسازی نیاز است. روش های مختلفی با استفاده از الگوریتم های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک، مورچگان [9-12] و ... جهت تعیین پارمترهای مدار معادل بکارگیری شده اند. به دلیل پیچیدگی یافتن پارامترهای مدل، اغلب مدلهای بکارگیری شده با تعداد سکشن های محدود بکارگیری شده است در این مقاله یک روش ابتکاری جهت تعیین پارامترهای مدار معادل مدل مشروح بزرگ ترانسفورماتور معرفی می گردد.

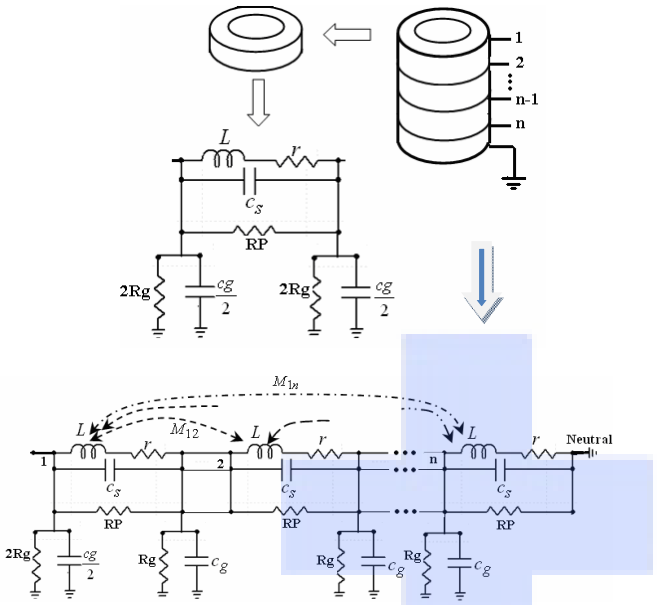
در این مقاله برای شبیه سازی رفتار گذرای ترانسفورماتور، مدلهای مشروح بزرگ با نوزده و هفتاد و شش سکشن استفاده شده است و مبتنی بر

اندازه گیری پاسخ فرکانس از ترمینال های یک ترانسفورماتور واقعی 20/0.4 kv با قدرت اسمی 1600 کیلوولت، مدل مشروح متقارن آن استخراج شده است که سایر مشخصات و ابعاد هندسی ترانسفورماتور در [9] آورده شده است. فاکتورهای مختلفی سبب پیچیده شدن مدلسازی ترانسفورماتور می گردد که در این مقاله این عوامل بررسی شده است.

۲. تعیین تابع تبدیل مدل مشروح سیم پیچ های ترانسفورماتور جهت مطالعات حالت گذرای فرکانس بالا

ماهیت رفتار ترانسفورماتور، غیرخطی و وابسته به فرکانس است [13]. هدف اصلی در مدلسازی ترانسفورماتور یافتن مدار معادلی است که رفتار مدل مشابه با مقادیر اندازه گیری شده از ترمینال ترانسفورماتور واقعی باشد. در مدلسازی ترانسفورماتور، مدلهای مختلفی جهت مطالعات حالت گذرای فرکانس بالا ارائه می گردد[13-16]. در اینجا مدل مشروح گسترده نظیر شکل (1) جهت مدلسازی رفتار ترانسفورماتور انتخاب شده است. در مدل مشروح با بزرگتر شدن ابعاد مدل یافتن پارامترهای مدار معادل پیچیده می گردد[13-16]. در اغلب مطالعات پیشین به جهت پیچیده شدن شرایط مدلسازی و افزایش قیود حالم بر آن، تعداد سکشن های مدار معادل کمتر از ده سکشن انتخاب شده است [9]. در این مقاله یک روش ابتکاری جهت تعیین مدار معادل مشروح بزرگ ترانسفورماتور ارائه می گردد. در مدلهای پیشین [9 و21-25] مدل مشروح نظیر شکل (1) استفاده می گردد[9] در این مقاله خازن های پراگندگی بین دیسک های مختلف مدار معادل نیز لحاظ شده است که ان را مدل مشروح توسعه یافته می نامیم.

در شکل (1) هر سکشن مدل فشرده تعدادی از دورهای سیم پیچ را نشان می دهد. لذا در این مدلسازی هر سیم پیچ با تعداد محدودی سکشن مدل می گردد. هر سکشن شامل خاصیت خازنی سری و موازی (C_s و C_g)، اندوکتانس های خودی و متقابل (L و M_{ij})، مقاومت تلفات عایقی سری و موازی (Rp وRg) و مقاومت اهمی سیم پیچ (r) را شامل می شود. در مدلسازی ترانسفورماتور هدف یافتن مقادیر مناسب این پارامترها است که روابط مختلفی برای بدست آوردن پارامترهای این مدل ارائه شده است[1]. یکی از نکاتی که بر پیچیدگی مدلسازی ترانسفورماتور می افزاید وابستگی به فرکانس این المانها است.



شکل (1): مدار معادل مشروح سیم پیچ های ترانسفومراتور

معادلات فضای حالت یکی از روش های موثر و کاربردی جهت توصیف دینامیکی رفتار یک سیستم است. شکل عمومی فضای حالت یک سیستم خطی تغییر ناپذیر بازمان به شرح زیر است:

$$\dot{x} = [A]x + [B]u$$
$$y = [C]x + [D]u \qquad (2)$$

که در آن:

x : بردار فضای حالت

$\dot{x}$: مشتق اول بردار فضای حالت

u : بردار تحریک سیستم

Y: بردار خروجی

(A, B, C, D) : ماتریس ضرایب ثابت

می باشد.

انتخاب جریان سلف ها و ولتاژ خازن های موازی به عنوان متغییرهای حالت جهت توصیف رفتار دینامیکی مدار معادل مشروح شکل (1) کافی است[15]. در [15] از مقاومت های عایقی (RP , Rg) صرفنظر گردیده

است اما در این مقاله این مقاومتها نیز لحاظ شده است. در [15] گره یک به عنوان نقطه تحریک سیستم انتخاب شده است اما در این مقاله یک توصیف عمومی بکارگیری شده است تا بتوان به ازای انتخاب هر نقطه از سیستم به عنوان نقطه تحریک بتوان تابع تبدیل سیستم را محاسبه نمود. به عنوان نمونه اگر گره دو به عنوان نقطه تحریک انتخاب گردد از عناصر بین گره یک و دو نمی توان صرفنظر کرد.

۳. تعیین پارامترهای وابسته به فرکانس مدار معادل مشروح

پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور به روش محاسبه یا تخمین قابل تعیین است. روش تعیین پارامترها مبتنی بر محاسبه، نیازمند اطلاعات ساختار داخلی ترانسفورماتور است و با استفاده از روابط تحلیلی این پارامترها محاسبه می گردند[1و13] از سوی دیگر اغلب روش های محاسباتی دارای خطای قابل ملاحظه ای است[33] به نحوی که در مطالعات دقیق قابل اعتماد نیستند لذا روش تخمین پارامتر به عنوان یک روش جایگزین می تواند مورد استفاده قرار گیرد. در روش تخمین پارامتر یک ویژگی از ترمینال ترانسفورماتور اندازه گیری می گردد و تلاش می گردد به نحوی پارامترها تعیین گردند که تابع خطای فی مابین شبیه سازی و اندازه گیری حداقل سازی گردد[20-23]. برای دستیابی به یک مدل مناسب و قابل قبول، بکارگیری روابط و قیودی که ارتباط منطقی بین پارامترهای مدار معادل را لحاظ می نماید ضروری است که برخی از این قیود در [24-25] بیان شده اند و بکارگیری این قیود مدارهای معادل غیرواقعی را حذف می نماید. در ادامه نکاتی بیان می شود که می تواند در روند مدلسازی موثر باشد.

۳.۱ نکات قابل توجه در تعیین پارامترهای مدار معادل

در تخمین و تعیین پارامترها موارد مختلفی نظیر نحوه تخمین پارامترها، ساختار ارتباطی پارامترها و چگونگی مدلسازی وابسته به فرکانس المانها، زمان شبیه سازی و ... مهم و تعیین کننده است. برای تعیین پارامترهای مدار معادل فرضیات و نکات زیر بکارگیری شده است:

- ساختار ماتریس اندوکتانس

فرض کنید یک سیم پیچ دارای N حلقه باشد و در آن L_{11} اندوکتانس خودی حلقه اول و اندوکتانس های $m_{1,2}, m_{1,3}, \ldots m_{1,n}$ نظیر رابطه (2) توصیف کننده اندوکتانس های تزویج بین حلقه اول و سایر حلقه ها باشد.

$$l = \begin{bmatrix} L_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \ldots & m_{1,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

هر گاه ساختار سیم پیچ همگن فرض شود می توان ماتریس اندوکتانس را نظیر رابطه (3) بنا نمود:

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \ldots & m_{1,n} \\ m_{1,2} & L_{1,1} & m_{1,2} & \ldots & m_{1,n-1} \\ m_{1,3} & m_{1,2} & L_{1,1} & \ldots & m_{1,n-2} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ m_{1.n} & m_{1,n-1} & m_{1,n-2} & \ldots & L_{1,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ضروری است براساس ساختمان سیم بندی ترانسفورماتور، اندوکتانس تزویج بین حلقه ها از قواعد خاصی تبعیت نماید تا مدل استخراج شده یک مدل منطبق بر واقعیات باشد در اغلب مراجع[9، 21-22 و 24-25] نامساوی هایی نظیر نامساوی زیر استفاده می شود :

$$\begin{aligned} &0.4L_{i,i} < m_{i,i+1} < 0.85L_{i,i} \\ &0.5m_{i,j-1} < m_{i,j} < 0.95m_{i,i} \\ &\forall i = 1,2,\ldots N-1, \forall j = 2,3,\ldots N-1 \end{aligned} \quad (4)$$

جهت پیشگیری از دستیابی به پاسخ های نادرست و غیرواقعی در مرجع [9] الگوی مشخصی ارائه شده است که در رابطه (5) این الگو بیان می شود. بررسی های این مقاله نیز نشان می دهد استفاده از این الگو از ارائه پاسخ های غیر اقعی پیشگیری می کند لذا مورد توصیه است.

$$(m_{ij} - m_{ik}) > (m_{ik} - m_{in}) \;\; If \;\; |i-j| > |i-k| > |i-n| \quad (5)$$

نامعادلات 4 و 5 اطمینان می دهد که ساختار تعیین شده، مدل یک ترانسفورماتور واقعی است.

بردار اولیه پارامترهای مدار معادل براساس توصیه ها و قیود فنی و ورابط تحلیلی بیان شده در [9 و 22 و 24] قابل تعیین است. در طول فرآیند بهینه سازی جهت کاستن زمان بهینه سازی و کاهش فضای جستجوی مساله از شرط اندوکتانس معادل ارائه شده در [22] نظیر رابطه (8) در فرکانس قدرت توصیه می گردد:

$$L_{eq} = N_{ladder} \times L_{11} + 2 \times \sum_{i=1}^{N_{ladder}-1} (N_{ladder} - i) \times m_{1,i+1} \qquad (6)$$

که در آن:

L_{eq} : اندوکتانس معادل سیم پیچ در فرکانس قدرت

N_{ladder} : تعداد سکشن های مدار معادل

L_{11} : اندوکتانس خودی در فرکانس قدرت

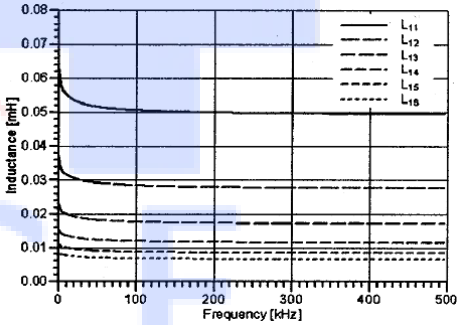
$m_{1,i+1}$: اندوکتانس متقابل در فرکانس قدرت

می باشد.

با لحاظ نمودن نامعادله (4) می توان اندوکتانس های تزویج را براساس مضربی از اندوکتانس خودی بیان نمود و سپس با استفاده از رابطه (6) یک تخمین اولیه برای اندوکتانس خودی و تزویج بدست آورد.

- وابستگی عناصر ماتریس اندوکتانس به فرکانس

ماتریس اندوکتانس ترانسفورماتور از اندوکتانس های خودی و متقابل تشکیل می گردد. این اندوکتانس ها با افزایش فرکانس کاهش می یابند[17]. در [17] مبتنی بر اندازه گیری های تجربی روند تغییرات این اندوکتانس ها به ازای تغییر فرکانس از چند هرتز تا چندین کیلوهرتز نظیر شکل (2) تشریح شده است.



شکل 2: روند تغییرات اندوکتانس خودی و متقابل ترانسفورماتور با هسته هوایی[17]

با ملاحظه شکل (2) روند تغییرات اندوکتانس ها به ازای تغییر فرکانس شبیه تابع نمایی است لذا در این مقاله با استفاده از داده های تجربی شکل (2)، تغییرات اندوکتانس خودی و متقابل به ازای تغییر فرکانس به صورت یک تابع نمایی نظیر رابطه (7) مدل می گردد.

$$L(f) = A + (1 - A)e^{-B \times f} \qquad (7)$$

که انتخاب $A = 0.8$ و $B = 3.7 \times 10^{-5}$ انطباق مناسبی بین مدل ریاضی و داده های تجربی [17] را ارائه می کند[31].

- نحوه تعریف تابع خطا و بکارگیری آن در بهینه سازی

یکی از مرسوم ترین روش ها جهت تخمین پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور حداقل سازی اختلاف بین منحنی مرجع (ناشی از اندازه گیری) و نتایج شبیه سازی براساس مدار معادل است و توابع خطای مختلفی ارائه و بکارگیری شده است[9 و24-26]. در این مقاله تابع خطا نسبی بین دو منحنی مرجع (که با اندیس r نامیده می شود) و منحنی حاصل از شبیه سازی براساس مدار معادل (که با اندیس s نامیده می شود) استفاده شده است و به شرح زیر تعریف گردیده است:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{P} \frac{|r_i - s_i|}{r_i}}{P} \qquad (۸)$$

که در آن P تعداد نمونه های انتخاب شده از منحنی می باشد.

- مدل مقاومت عایقی

مقاومت عایقی سیم پیچ ترانسفورماتور با افزایش فرکانس کاهش می یابد[32] که در این مقاله نظیر رابطه (9) مدل می گردد:

$$R \propto \frac{1}{f} \qquad (۹)$$

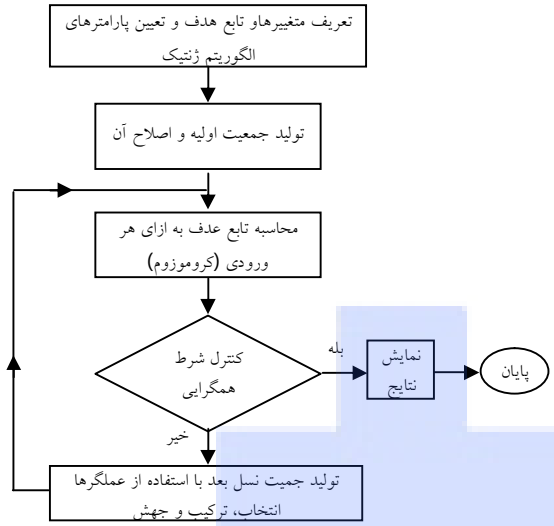
- مدل مقاومت اهمی سیم پیچ

با افزایش فرکانس مقاومت اهمی سیم پیچ افزایش می یابد. روابط تحلیلی و شناخته شده ای برای مدلسازی وابسته به فرکانس مقاومت اهمی سیم پیچ ها ارائه شده است[13]. استفاده از مدلهای تحلیلی سبب پیچیده شدن فرآیند مدلسازی می گردد زیرا اغلب نیازمند اطلاعات ساختمان ترانسفورماتوراست و اطلاعات ساختمان ترانسفورماتور اغلب در اختیار سازندگان است. در این مقاله مدل مقاومت اهمی[32] به طور تقریبی به شرح زیر مدل می شود:

$$r \propto \sqrt{f} \qquad (۱۰)$$

۳.۲ روند تخمین و بهینه سازی پارامترها

روش های مختلفی نظیر جستجوی کامل، الگوریتم ژنتیک، مورچگان [9-12] و ... جهت تعیین پارامترهای مدار معادل بکارگیری شده اند. الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی توانمند است که با تعریف متغییرهای بهینه سازی و تابع هدف شروع می گردد[27-29]. برای هر ورودی (هر کروموزوم) تابع ریاضی تعریف شده به عنوان تابع هدف مقداری را به عنوان خروجی ارائه می کند که این خروجی بیانگر میزان مناسب بودن یا نبودن ورودی است. پس از تعریف تابع هدف و انتخاب متغییرهای مساله ضروری است متناسب با دقت مورد انتظار، نسبت به کدینگ متغییرها اقدام گردد (اغلب در مبنای دودویی این کدینگ صورت می گیرد). پس از انتخاب نحوه کدینگ متغییرها، بایستی جمعیت اولیه را به عنوان نقطه آغازین الگوریتم ایجاد نمود که جمعیت اولیه نامیده می شود. جمیعت نسل بعدی از روی نسل قبل و با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک (انتخاب، ترکیب و جهش) براساس فلوچارت شکل (3) تولید می گردند.



شکل (3): فلوچارت عملکرد الگوریتم ژنتیک در مسایل بهینه سازی

الگوریتم ژنتیک به دنبال یافتن مناسب ترین مقادیری است که تابع هدف با ازای آن مطلوب ترین مقدار را دارد. در این مقاله بردار پارامترهای مدار معادل (VP) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به نحوی تعیین می گردد تا تابع خطا تعریف شده در رابطه (8) حداقل گردد. برای این منظور پارامترهای جدید مدار معادل مبتنی بر بهینه ترین پاسخ نسل قبل به علاوه بردار تغییرات کوچک (مثبت و منفی) نظیر رابطه (11) تعیین می گردند که بردار تغییرات کوچک با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه می گردند و میزان تغییرات هر پارامتر کمتر از $\pm 1\%$ آخرین مقدار بهینه برای آن پارامتر انتخاب شده است.

$$VP^{new} = VP^{old} + \Delta VP \qquad (11)$$

که در آن :

VP^{new}: بردار جدید پارامترهای مدار معادل

$[L_1 \;\; m_{1,2}\; m_{1,3},...,m_{1,n} \;\; r \;\; R_p \;\; R_g \;\; C_s \;\; C_g]^{new}$

VP^{pld}: بردار پارامترهای مدار معادل از نسل قبل الگوریتم

$[L_1 \;\; m_{1,2}\; m_{1,3},...,m_{1,n} \;\; r \;\; R_p \;\; R_g \;\; C_s \;\; C_g]^{old}$

ΔVP :بردار تغییرات جزئی پارامترهای مدار معادل با استفاده از الگوریتم ژنتیک : $\Delta[L_1 \;\; m_{1,2}\; m_{1,3},...,m_{1,n} \;\; r \;\; R_p \;\; R_g \;\; C_s \;\; C_g]$

در بکارگیری الگوریتم ژنتیک در این مقاله تعداد جمیت اولیه برابر 500، احتمال ترکیب 0,95 و احتمال جهش 0,05 انتخاب شده اند.

٤. مطالعات موردی

٤.١ معرفی سیستم مورد آزمایش

در این مقاله آزمایش ها بر روی سیم پیچ یک ترانسفورماتور 20/0,4 کیلوولت با قدرت اسمی 1600 کیلوولت آمپر انجام شده است که سیم پیچ فشار قوی آن به روش دیسکی دوبل سیم پیچی شده و دارای 19 دیسک دوبل است و هر دیسک آن شامل 20 یا 21 حلقه است که در شکل(4) این ترانسفورماتور نشان داده شده است.

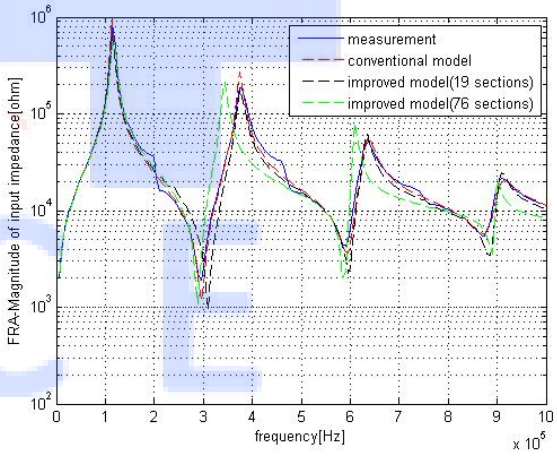
شکل (4): تجهیزات تست مورد استفاده

۴.۲ معرفی تابع تبدیل مورد استفاده

در این مقاله امپدانس ورودی ترانسفورماتور مورد مطالعه از دیدگاه ترمینال فشار قوی آن هنگامی که فشار ضعیف آن مدار باز است اندازه گیری شده و به عنوان تابع تبدیل ترانسفورماتور استفاده شده است. برای اندازه گیری این تابع تبدیل از دستگاه امپدانس آنالیزر مدل Wayne Kerr Precision Impedance Analyzer 6500B Series استفاده شده است[30] که دقت بسیار بالایی در اندازه گیری دارد. نتایج اندازه گیری ها در شکل (5) نشان داده شده است.

۴.۳ نتایج شبیه سازی ها

در مدلهای پیشین [13-16] مدل مشروح نظیر شکل (1) استفاده شده است در این مقاله خازن های پراگندگی بین دیسک های مختلف مدار معادل نیز لحاظ شده است که آن را مدل مشروح توسعه یافته می نامیم. در این مقاله براساس نکات بیان شده در بخش سوم این مقاله، پارامترهای مدار معادل مشروح مرسوم با نوزده سکشن و مدار معادل مشروح توسعه با نوزده و هفتاد و شش سکشن تعیین شده اند که در شکل (5) نتایج این شبیه سازی ها نشان داده شده است. در نگاه اول به نظر می رسد از دیگاه ترمینال اصلی مدل مشروح مرسوم کمی بهتر از مدل های مشروح توسعه یافته است.



شکل (5): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری از دیدگاه ترمینال ترانسفورماتور

وقتی تعداد سکشن های مدار معادل بزرگتر می گردد همچنین مدل به صورت ناهمگون فرض می شود یافتن پارامترهای مدار معادل سخت تر می گردد. برای یافتن پارامترهای مدار معادل روش ابتکاری ارائه شده یک روش کارآمد است که می تواند در شبکه های با تعداد سکشن بزرگ و فرض مدل ناهمگون پارامترهای مدار معادل را با دقت و سرعت مطلوب تعیین کند. در این شبیه سازی تعیین پارامترهای مدار معادل بدون در اختیار داشتن اطلاعات هندسی و ساختمان ترانسفورماتور صورت گرفت که این موضوع بیانگر قوت و توانایی روش ابتکاری معرفی سده است. روش ارائه شده در این مقاله انطباق بین نتایج اندازه گیری و شبیه سازی را به طور مطلوب تری ارائه می کند.

۴.۴ چگونگی اعتبارسنجی مدار معادل

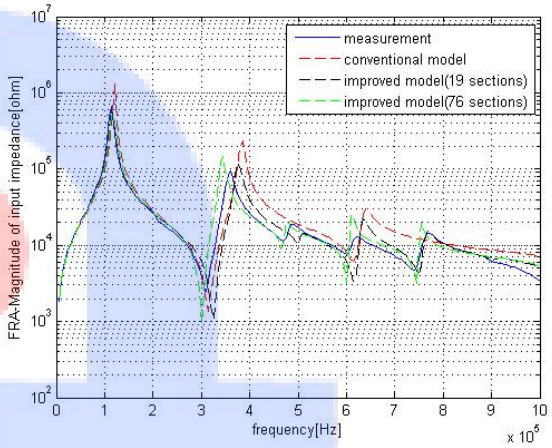
صرفا انطباق مشخصه اندازه گیری شده و شبیه سازی نمی تواند تضمین کننده صحت مدار معالد استخراج شده باشد. در مطالعات پیشین [21-22 و 24] اشاره شده است که در انطباق مشخصه اندازه گیری شده و شبیه سازی شده پاسخ یکتا وجو ندارد و این مساله بر پیچیدگی شناسایی مدار معادل مناسب و مطلوب می افزاید. در این مطالعات با توجه به اینکه نقطه اتصال بین دیسک ها در سیم پیچ در دسترس بود نسبت به اندازه گیری تابع تبدیل ترانسفورماتور مورد بررسی از دیدگاه ترمینال داخلی آن اقدام شد و با نتایج شبیه سازی ها مقایسه گردید. به عنوان نمونه نتایج انداره گیری و شبیه سازی ها برای ترمینال داخلی دو و نوزده در شکل های 6 و 7 نشان داده شده است. ملاحظه می گردد مدل مشروح توسعه یافته روند رفتار ترانسفورماتور را بهتر از مدل مشروح مرسوم توصیف می کند. در مواردی که امکان دسترسی به ترمینال داخلی ترانسفورماتور میسر نیست استفاده از دو تابع تبدیل مختلف از دیدگاه ترمینال اصلی می تواند در اعتبارسنجی مدار معادل استفاده شود.

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

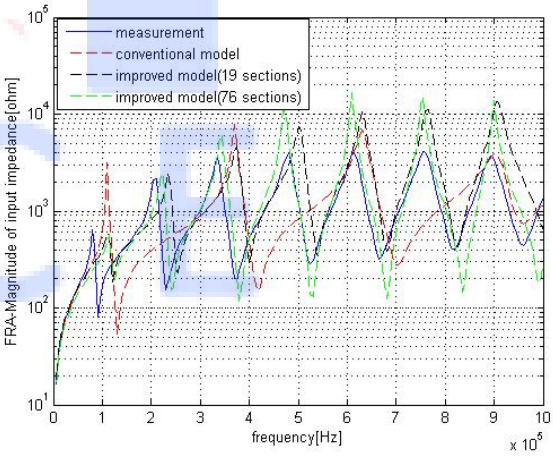
در این مقاله مدار معادل مشروح توسعه یافته ای جهت مدلسازی رفتار ترانسفورماتور در حالتهای گذاری فرکانس بالا معرفی گردید و کارایی آن با مدار معادل مشروح مرسوم مقایسه گردید. ملاحظه شد مدار معادل مشروح توسعه یافته کیفیت رفتار ترانسفورماتور را در مقایسه با مدلهای پیشین با کیفیت مطلوب تری مدل می کند.

در این مقاله یک روش مناسب و سریعی جهت استخراج پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه گردید.

الگوریتم های پیشین با بزرگ شدن ابعاد مدار معادل به سختی امکان یافتن پارامترهای مدار معادل را داشتند که با استفاده از تکنیک ارائه شده می توان پارامترهای مدار معادل شبکه های بزرگ را با دقت قابل قبولی نیز تعیین نمود. روش ارائه شده در تخمین پارامترهای مدار معادل در این مقاله در ساختار سیم پیچی همگن و ناهمگن قابل استفاده است. در مدلسازی حالت گذرای ترانسفورماتور، المانهای مدار معادل به ازای تغییرات فرکانس تغییر می نمایند در این مقاله مدلهای وابستگی به فرکانس المانها استفاده گردید. روشی جهت اعتبار سنجی مدل ها ارائه شد و ضرورت اعتبار سنجی مدلها تشریح گردید.



شکل 6: تابع تبدیل از دیدگاه ترمینال داخلی شماره 2



شکل 7: تابع تبدیل از دیدگاه ترمینال داخلی شماره 19

منابع

1-E.bjerkan" High frequency modeling of power transformers " Doctoral Thesis, Trondheim, May 2005

2- M. Florkowski and J. Fargul, “A high-frequency method for determining winding faults in transformers and electrical machines,” Rev. Sci. Instrum., vol. 76, nov, pp. 114701-1-114701-6., 2005

3- V. Rashtchi, E. Rahimpour, and E. Rezapour, “Using a genetic algorithm for parameter identification of transformer R-L-C-M model,” Elect. Eng., vol. 88, no. 5, pp. 417–422, 2006.

4- V. Brandwajn, H. W. Dommel, I, and I. Dommel, “Matrix representation of three-phase N-winding transformers for steady-state and transient studies,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, no. 6, pp. 1369–1378, Jun. 1982.

5- C. Arturi, “Transient simulation and analysis of a three phase five-limb step-up transformer following an out-of-phase synchronization,” IEEE Trans. Power Del., vol. 6, no. 1, pp. 196–207, Jan. 1991.

6- P. Vaessen, “Transformer model for high frequencies,” IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 4, pp. 1761–1768, Oct. 1988.

7- A. Morched, L. Marti, and J. Ottewangers, “A high frequency transformer model for the EMTP,” IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 3, pp. 1615–1626, Jul. 1993.

8- G. B. Gharehpetian, H. Mohseni, and K. Moller, “Hybrid modeling of inhomogeneous transformer windings for very fast transient over voltage studies,” IEEE Trans. Power Del., vol. 13, no. 1, pp. 157–163, Jan. 1998.

9-Masoud M. Shabestary, Ahmad Javid Ghanizadeh, G. B. Gharehpetian, and Mojtaba Agha-Mirsalim” Ladder Network Parameters Determination Considering Nondominant Resonances of the Transformer Winding” IEEE Transaction on power delivery , Volume: 29 , Issue: 1 , Page(s): 108 – 117, 2014

10- J. B. Grimbleby, “Automatic analogue circuit synthesis using genetic algorithms,” Proc. Inst. Elect. Eng., Circuits, Devices Syst., vol. 147, no. 6, pp. 319–323, 2000.

11-M. Bigdeli, D. Azizian, H. Bakhshi, and E. Rahimpour, “Identification of transient model parameters of transformer using genetic algorithm,” in Proc. IEEE Conf. Power Syst. Technol., 2010, pp. 1–6.

12-A. Shintemirov, W. J. Tang, W. H. Tang, and Q. H. Wu, “Improved modelling of power transformer winding using bacterial swarming algorithm and frequency response analysis,” Elect. Power Syst. Res., vol. 80, pp. 1111–1120, 2010.

13-Juan A. Martinez-Velasco,“ Power System Transients Parameter Determination” CRC Press, 2010 by Taylor and Francis Group, LLC

14- A. Shintemirov, W. H. Tang, and Q. H. Wu, “A hybrid winding model of disc-type power transformers for

frequency response analysis," IEEE Trans. Power Del., vol. 24, no. 2, pp. 730–739, Apr. 2009.

15- K. Ragavan and L. Satish " An Efficient Method to Compute Transfer Function of a Transformer From its Equivalent Circuit" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005

16- M. Popov, L. van der Sluis, R. P. P. Smeets, and J. L. Roldan, "Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings," IEEE Trans.Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 238–247, Jan. 2007

17-Enrique E. Mombello," Impedances for the Calculation of Electromagnetic Transients Within Transformers" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 17, NO. 2, APRIL 2002

18- Gómez, F. deLeónand F. P. Espino-Cortés" Improvement of a Method to Compute the Inductance Matrix of Multilayer Transformer Windings for Very Fast Transients" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 28, NO. 2, APRIL 2013

19- Ebrahim Rahimpour and Mehdi Bigdeli" Simplified Transient Model of Transformer based on Geometrical Dimensions used in Power Network Analysis and Fault Detection Studies" POWERENG 2009, Lisbon, Portugal, March 18-20, 2009"

20- P. Karimifard, G. B. Gharehpetian, A. J. Ghanizadeh, and S. Tenbohlen, "Estimation of simulated transfer function to discriminate axial displacement and radial deformation of transformer winding,"COMPEL: Int. J. Comput. Math. Elect. Electron. Eng., vol. 31, no. 4,pp. 1277–1292, 2012.

21- Pritam Mukherjee and L. Satish," Construction of Equivalent Circuit of a Single and Isolated Transformer Winding From FRA Data Using the ABC Algorithm" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 27, NO. 2, APRIL 2012

22- L. Satish, Subrat K. Sahoo" Locating faults in a transformer winding: An experimental study" Electric Power Systems Research Volume 79, Issue 1, January 2009, Pages 89–97

23- A. Shintemirov, W. H. Tang, Z. Lu, and Q. H. Wu, "Simplified transformer winding modeling and parameter identification using particle swarm optimizer with passive congregation," App. Evol. Comput., vol. 4448, Lect. Notes Comput. Sci., pp. 145–152, 2007.

24- K. Ragavan and L. Satish, "Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: Experimental study," IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 3, pp. 1557–1565, Jul. 2007

25- M. Agha-Mirsalim, Electrical Machines and Transformers. Tehran, Iran: Prof. Hesabi Publ., 2000.

26-N.Watson and J.Arrillaga "Power Systems Electromagnetic Transients Simulation" IET Power and Energy Series 39,

27- K. F. Man, K. S. Tang, and S. Kwong, "Genetic algorithms: Concepts and applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 43, no. 5, pp. 519–534, Oct. 1996.

28-32- H. Seifi, M. S. Sepasian, " Electric Power System Planning" , Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

29- Randy L. Haupt , Sue Ellen Haupt " Practical Genetic Algorithms", John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2004

30- Wayne Kerr Electronics Co., Technical data sheet of precision impedance analyzers, Oct. 2008, Issue B. [Online]. Available: http://www.waynekerrtest.com/global/html/products/impedanceanalysis/ 6500B.htm

۳۱- A.Ahmadi and J.Nosratian "Mathematical model for self and mutual inductance of air core transformer on transient studies" 20th Electrical power distribution conference,2015,Iran

32- حرمت الله فیروزی و محمد خارزی "روش آنالیز پاسخ فرکانسی FRA" انتشارات نیکان کتاب زنجان-1389-چاپ اول

۳۳- P. Gómez, F. deLeón"Accurate and Efficient Computation of the Inductance Matrix of Transformer Windings for the Simulation of Very Fast Transients" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 3, JULY 2011