

بکارگیری مدار معادل مشروح توسعه یافته در ابعاد بزرگ برای مطالعه حالت گذرای ترانسفورماتور

جعفر نصرتیان اهور^۱ سعید سیدطبايی^۲ گئورک قره پتیان^۳

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی - دانشگاه شاهد- تهران- ایران

Jafar.ahoor@yahoo.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی - دانشگاه شاهد- تهران- ایران

stabaii@shahed.ac.ir

۳- استاد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران

grptian@aut.ac.ir

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 و در آن یک روش ابتکاری جهت تخمین پارامترهای مدار معادل مشروح ارائه شده است تا بر مشکل تخمین پارامترها در مدارهای معادل بزرگ غلبه نماید. این روش ابتکاری بر روی مدل مشروح نوزده بخشی پیاده‌سازی شده است. از حل معادلات حالت مدار معادل ترانسفورماتور، پاسخ فرکانسی آن استخراج شده است. در این بررسی، عناصر مدار معادل وابسته به فرکانس مدل شده‌اند. در این مقاله همچنین مدار معادل مشروح جدیدی ارائه شده است که رفتار ترانسفورماتور را در مقایسه با مدل‌های پیشین با کیفیت مطلوب‌تری مدل می‌کند. روشی جهت اعتبارسنجی مدار معادل استخراج شده ارائه شده است. روش‌ها و ایده‌های جدید بیان شده بر روی یک سیم پیچ واقعی با توان نامی ۶۰/۰،۴ آمپر و ولتاژ نامی ۲۰ کیلو ولت در آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور؛ مدار معادل مشروح؛ تابع تبدیل؛ آنالیز پاسخ فرکانسی؛ الگوریتم ژنتیک؛ معادله حالت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سعید سیدطبايی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - بزرگراه خلیج فارس - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه شاهد- دانشکده مهندسی - گروه برق

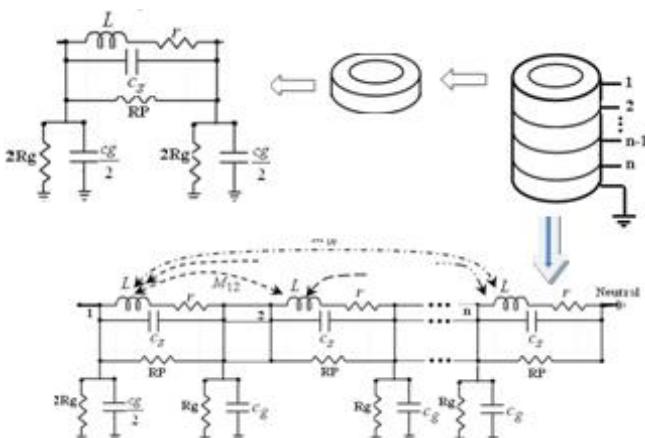


۱- مقدمه

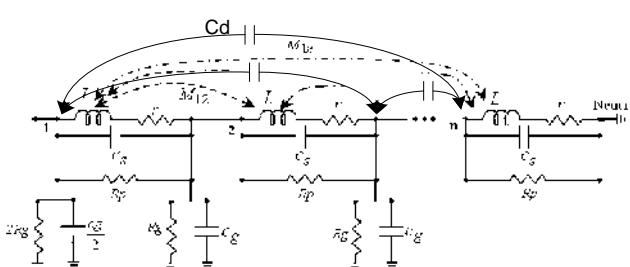
توسعه یافته با نتایج اندازه‌گیری‌های عملی مقایسه شده‌اند و نهایتاً بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌های این مقاله پرداخته است.

۲- معرفی مدل مشروح توسعه یافته

در مطالعات پیشین [۱۱-۹] مدل مشروح مرسوم نظیر شکل (۱) استفاده شده است. در شکل (۱) هر بخش مدل فشرده تعدادی از دورهای سیم‌پیچ را نشان می‌دهد. لذا در این مدل‌سازی هر سیم‌پیچ با تعداد محدودی بخش مدل می‌شود. هر بخش شامل خاصیت خازنی سری و موازی (C_s و C_g)، اندوکتانس‌های خودی و متقابل (L و L_{gj})، مقاومت تلفات عایقی سری و موازی (R_p و R_g) و مقاومت اهمی سیم‌پیچ (۳) است. در این مقاله به مدار معادل مشروح شکل (۱)، خازن‌های پراکنده‌گی بین دیسک‌ها (Cd) اضافه شده است تا مدل مشروح توسعه یافته شکل (۲) حاصل شود.



شکل (۱): مدار معادل مشروح سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور



شکل (۲): مدار معادل مشروح توسعه یافته

با مقایسه شکل (۱) و (۲) ملاحظه می‌شود که تعداد پارامترهای مدل مشروح توسعه یافته بیشتر از مدل مشروح مرسوم است که این مساله یافتن مقادیر مناسب پارامترهای مدل را پیچیده‌تر می‌کند.

ترانسفورماتور قدرت اغلب یکی از بزرگترین و گران قیمت‌ترین تجهیزات در سیستم‌های قدرت هستند [۱]. لذا مراقبت‌های ویژه در طراحی، ساخت، نصب و راه اندازی، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری آن ضروری است. تکنیک‌های تشخیصی الکتریکی، مکانیکی و شیمیایی متفاوتی جهت شناسایی عیوب ترانسفورماتور ارائه شده است و این تحقیقات به طور گسترده ادامه دارد. یکی از تکنیک‌های جدید ارزیابی وضعیت ترانسفورماتور تحلیل پاسخ فرکانسی است که به ویژه برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم‌پیچ کارآمد و موثر است.

برای یافتن یک مدل مناسب و دقیق جهت بررسی رفتار ترانسفورماتور در حالت گذرا، تلاش‌های مختلفی صورت گرفته است که می‌توان به مدل‌سازی مبتنی بر ساختار فیزیکی ترانسفورماتور، مدل جعبه سیاه [۴-۲] و مدل هیبرید [۴] اشاره نمود. مدل مشروح یکی از مرسوم‌ترین مدل‌های ترانسفورماتور قدرت است که مبتنی بر ساختار فیزیکی ترانسفورماتور است [۴-۲]. در یک مدل مشروح اعتبار و دقت مدل بستگی به مقادیر پارامترهای مدل، تعداد بخش‌های مدار معادل وتابع خطای انتخاب شده دارد. هنگامی که تعداد بخش‌های مدار معادل بزرگ انتخاب می‌شوند گرچه محدوده اعتبار فرکانسی مدل افزایش می‌یابد ولی در مقابل تعیین مقادیر مناسب پارامترها پیچیده‌تر شده و با توجه به بزرگتر شدن ابعاد معادلات سیستم، حل آن نیز زمان بر می‌شوند لذا برقراری مصالحه‌ای بین دقت مدل و ابعاد مدار معادل در فرآیند مدل‌سازی مورد نیاز است. روش‌های مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی نظری الگوریتم ژنتیک، مورچگان [۷-۵] و ... جهت تعیین پارامترهای مدار معادل بکار رفته‌اند. به دلیل پیچیدگی مساله در یافتن پارامترهای مدل، اغلب مدل‌های بکار گیری شده با تعداد بخش‌های محدود بوده‌اند در این مقاله یک روش ابتکاری جهت تعیین پارامترهای مدار معادل مدل مشروح بزرگ ترانسفورماتور معرفی می‌شوند.

در این مقاله پس از بررسی مدل همگن و ناهمگن مدل مشروح مرسوم [۵-۲] ملاحظه شد که با این مدل فرکانس‌های روزانس موثر به نحو مطلوبی قابل شناسایی است لیکن روزانس‌های غیرموثر قابل شناسایی نیست. لذا مدار معادل مشروح توسعه یافته‌ای ارائه می‌شود که علاوه بر فرکانس‌های روزانس موثر، توانایی شناسایی فرکانس‌های غیر موثر را نیز دارد.

در بخش دوم این مقاله مدل مشروح توسعه یافته معرفی شده است. عوامل مختلفی سبب پیچیده شدن مدل‌سازی ترانسفورماتور می‌شود که در بخش سوم مقاله به آنها اشاره شده است. همچنین در بخش سوم این مقاله، جهت دستیابی به مدل مناسب و کاهش زمان بهینه‌سازی یک روش کارآمد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی مدار معادل مرسوم و

۳-۱- نکات موثر در تعیین پارامترهای مدار معادل

ماهیت رفتار ترانسفورماتور، غیرخطی و وابسته به فرکانس است [۸]. 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، مدلها مختصی جهت مطالعات حالت گذراخواه فرکانس بالا ارائه شده است [۱۲-۸]. در این مقاله مدل‌های مشروح شکل (۱) و (۲) جهت مدلسازی رفتار ترانسفورماتور بررسی شده‌اند. در مدل مشروح با بزرگتر شدن ابعاد مدل یافتن پارامترهای مدار معادل پیچیده می‌شود [۱۲-۸]. در اغلب مطالعات پیشین به جهت پیچیده شدن شرایط مدلسازی و افزایش قیود حاکم بر آن، تعداد بخش‌های مدار معادل کمتر از ده بخش انتخاب شده است [۵]. در این مقاله یک روش ابتکاری جهت تعیین مدار معادل مشروح بزرگ ترانسفورماتور ارائه می‌شود. جهت سادگی مدلسازی، اغلب مدل همگن فرض می‌شود لیکن در این مقاله علاوه بر مدلها همگن، مدل‌های ناهمگن نیز بررسی شده‌اند. برای تعیین پارامترهای مدار معادل فرضیات و نکات زیر بکارگرفته شده‌اند تا بتوان با بزرگ شدن ابعاد مدل، پارامترهای مدار معادل را به نحو مطلوب تعیین نمود.

• ساختار ماتریس اندوکتانس

فرض کنید یک سیم‌پیچ دارای N حلقه است و در آن L_{11} اندوکتانس خودی حلقه اول و اندوکتانس‌های $m_{1,2}, m_{1,n}, \dots, m_{1,3}$ نظری رابطه (۲)، توصیف کننده اندوکتانس‌های تزویج بین حلقه اول و سایر حلقه‌ها است.

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

هر گاه ساختار سیم‌پیچ همگن فرض شود می‌توان ماتریس اندوکتانس سیم‌پیچ را نظری رابطه (۳) بنامود:

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

ضروری است براساس ساختمان سیم‌بندی ترانسفورماتور، اندوکتانس تزویج بین حلقه‌ها از قواعد خاصی تبعیت نماید تا مدل استخراج شده یک مدل منطبق بر واقعیات باشد در اغلب مراجع نامساوی‌هایی نظری نامساوی‌های رابطه (۴) استفاده شده‌اند [۵ و ۶]:

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

جهت پیشگیری از ایجاد پاسخ‌های نادرست و غیرواقعی در مرجع [۶] الگوی مشخصی ارائه شده است که در رابطه (۵) این الگو بیان

۲-۱- تعیینتابع تبدیل با بکارگیری معادلات فضای

حال

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

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A]x + [B]u \\ y &= [C]x + [D]u \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن x : بردار فضای حالت، \dot{x} : مشتق اول بردار فضای حالت، u : بردار تحریک سیستم، y : بردار خروجی و (A, B, C, D) : ماتریس ضرایب ثابت هستند.

انتخاب جریان سلف‌ها و ولتاژ خازن‌های موازی به عنوان متغیرهای حالت جهت توصیف رفتار دینامیکی مدار معادل مشروح شکل (۱) کافی است [۱۰]. در [۱۰] از مقاومت‌های عایقی (R_P ، R_g) صرفنظر شده است. اما در این مقاله این مقاومتها لحاظ شده است. در [۱۰] گره یک به عنوان نقطه تحریک سیستم انتخاب شده است اما در این مقاله یک توصیف عمومی بکار رفته 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 شود از عناصر بین گره یک و دو نمی‌توان صرفنظر کرد. در این مقاله در حالیکه سیم‌پیچ فشار ضعیف مدار باز است، امپدانس معادل ترانسفورماتور از دریچه گره یک و زمین در سمت فشارقوی به عنوان تابع تبدیل ترانسفورماتور انتخاب شده است.

۳- چگونگی تعیین پارامترهای مدار معادل با استفاده از الگوریتم ژنتیک

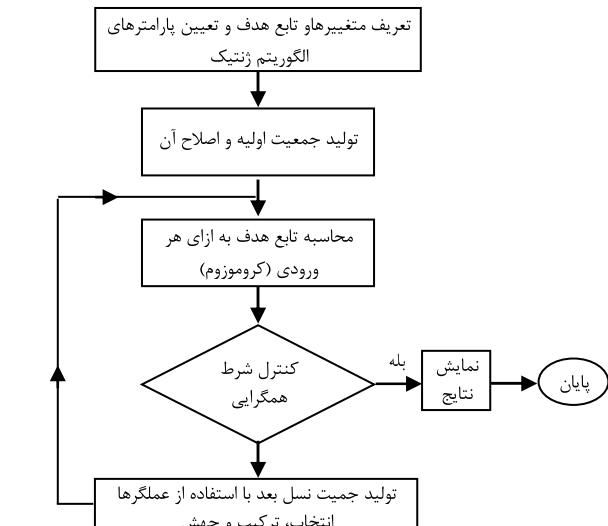
بعد از مدلسازی ترانسفورماتور هدف یافتن مقادیر مناسب پارامترهای مدل است. روش‌های تحلیلی و تخمینی مختلفی جهت تعیین پارامترهای این مدل ارائه شده است [۱۱-۹]. روش تعیین پارامترها مبتنی بر محاسبه، نیازمند اطلاعات ساختار داخلی ترانسفورماتور است و با استفاده از روابط تحلیلی این پارامترها محاسبه می‌شوند [۸-۱۰]. از سوی دیگر روش‌های محاسباتی دارای خطای قابل ملاحظه‌اند [۱۰]. در روش تخمین پارامتر، یک ویژگی از ترمینال ترانسفورماتور اندازه گیری شده و تلاش می‌شود به نحوی پارامترها تعیین شوند که تابع خطای فی مابین شبیه‌سازی و اندازه گیری حداقل سازی شود [۷-۵]. برای دستیابی به یک مدل مناسب و قابل قبول، بکارگیری روابط و قیودی که ارتباط منطقی بین پارامترهای مدار معادل را لحاظ می‌نماید ضروری است. برخی از این قیود در [۵] بیان شده‌اند و بکارگیری این قیود مدارهای معادل غیرواقعی را حذف می‌نماید.

سیم پیچ افزایش می یابد که در این مقاله به طور تقریبی با رابطه (۸) مدل شده است:

$$r \propto \sqrt{f} \quad (8)$$

۲-۳- معرفی الگوریتم ژنتیک بکارگیری شده

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه سازی توانمند است که با تعریف متغیرهای بهینه سازی وتابع هدف شروع می شود [۱۵]. برای هر ورودی (هر کروموزوم) تابع ریاضی تعریف شده به عنوان تابع هدف مقداری را به عنوان خروجی ارائه می کند. این خروجی بیانگر میزان مناسب بودن یا نبودن ورودی است. پس از تعریف تابع هدف و انتخاب مناسب بودن یا نبودن ورودی است. پس از تعریف تابع هدف و انتخاب متغیرهای مساله ضروری است متناسب با دقت مورد انتظار، نسبت به کدینگ متغیرها اقدام شود (غلب در مبنای دودویی این کدینگ صورت می گیرد). پس از انتخاب نحوه کدینگ متغیرها، بایستی جمعیت آغازین را به عنوان نقطه شروع 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 (۴) تولید می شوند.



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 به نحوی تعیین می شود تا تابع خطا تعريف شده در رابطه (۶) حداقل شود. برای این منظور پارامترهای جدید مدار معادل مبتنی بر بهینه سازی پاسخ نسل قبل به علاوه بردار تغییرات کوچک (مثبت و منفی) نظری رابطه (۹) تعیین می شوند. بردار تغییرات کوچک با استفاده از الگوریتم ژنتیک ایجاد می شوند و میزان تغییرات هر پارامتر کمتر از $\pm 1\%$ آخرين مقدار بهینه برای آن پارامتر است.

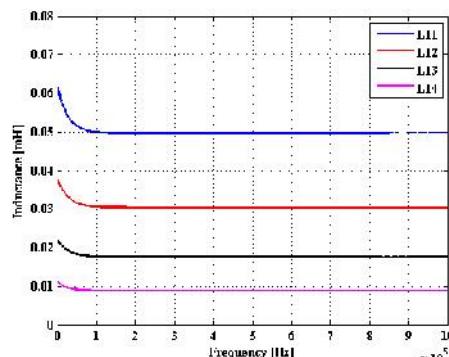
می شود. بررسی های این مقاله نیز نشان می دهد استفاده از این الگو از ارائه پاسخ های غیر واقعی پیشگیری می کند لذا مورد توصیه است.

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

نامعادلات (۴) و (۵) اطمینان می دهند که ساختار تعیین شده، مدل یک ترانسفورماتور واقعی است.

- **وابستگی عناصر ماتریس اندوکتانس به فرکانس**

ماتریس اندوکتانس ترانسفورماتور از اندوکتانس های خودی و متقابل تشکیل می شود. این اندوکتانس ها با افزایش فرکانس کاهش می یابند [۱۳]. در [۱۳] روند تغییرات این اندوکتانس ها به ازای تغییر فرکانس از چند هرتز تا چندین کیلوهرتز مبتنی بر اندازه گیری های تجربی نظری شکل (۳) ارائه شده است.



شکل (۳): تغییرات اندوکتانس به ازای تغییر فرکانس

- **نحوه تعریف تابع خطا و بکارگیری آن در بهینه سازی**

یکی از مرسم ترین روش ها جهت تخمین پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور حداقل سازی اختلاف بین منحنی مرجع (f) ناشی از اندازه گیری و نتایج شبیه سازی (S) براساس مدار معادل است [۱۵]. در این مقاله نیز این تابع خطا (EF) استفاده شده است:

$$EF = \sum_{i=1}^P \frac{|r_i - s_i|}{r_i} \quad (6)$$

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

- **مدل مقاومت عایقی**

مقاومت عایقی سیم پیچ ترانسفورماتور (R) با افزایش فرکانس (f) کاهش می یابد که در این مقاله نظری رابطه (۷) مدل می شود:

$$R \propto \frac{1}{f} \quad (7)$$

- **مدل مقاومت اهمی سیم پیچ**

رابطه ریاضی تغییرات مقاومت اهمی سیم پیچ (r) به ازای تغییرات فرکانس (f) قدری پیچیده است [۸]، با افزایش فرکانس مقاومت اهمی

استفاده شده است [۱۶] که دقت بسیار بالایی در اندازه گیری Series دارد.



شکل (۵): تجهیزات تست مورد استفاده

۳-۴- شبیه‌سازی با مدل مشروح مرسوم

در این مقاله برای حالت‌های مختلف همگن و ناهمگن پارامترهای مدار معادل مشروح مرسوم تعیین می‌شوند. ترانسفورماتور مورد مطالعه به دو شکل تک سیم پیچ (حالتهای (الف ۱) تا (الف ۵)) و دو سیم پیچ (حالات (ب ۱) و (ب ۲)) به شرح زیر مدلسازی می‌شود.

- شبیه‌سازی حالت (الف ۱): در این حالت، مدار معادل مشروح شبکه نظیر شکل (۱) به صورت تک سیم پیچ استفاده شده است که هر بخش دارای مقادیر و پارامترهای مشابه با سایر بخش‌ها است. این فرض سبب ساده‌سازی مدار، کاهش تعداد پارامترهای مجهول و افزایش سرعت همگرایی مساله خواهد شد. در این حالت مساله دارای ۲۴ پارامتر مجهول شامل r, R_p, R_g, C_s, C_g متقابل است. به عنوان نمونه در جدول (۱) پارامترهای تخمین زده شده مدار معادل مشروح آورده شده است.

- شبیه‌سازی حالت (الف ۲): در این حالت با توجه به ساختمان ترانسفورماتور واقعی، اندوکتانس چهار دیسک ابتدا و چهار دیسک آنها مشابه و سایر دیسک‌ها مشابه فرض شده‌اند. در کل سیم پیچ مقاومت اهمی سیم پیچ، مقاومت عایقی و خازن‌های معادل یکسان فرض می‌شوند. در این حالت ۳۸ پارامتر مجهول تعیین می‌شود.

- شبیه‌سازی حالت (الف ۳): در این حالت تمام پارامترها به جز C_g مشابه بند (الف ۲) هستند و C_g در دیسک‌های نزدیک به زمین دارای مقادیر بزرگتری هستند. این حالت دارای ۵۶ پارامتر مجهول است.

- شبیه‌سازی حالت (الف ۴): در این حالت همه پارامترها به جز C_s و C_g مشابه پارامترها بند (الف ۳) است. در این حالت پارامترهای C_s و C_g دیسک‌ها متفاوت فرض شده است. لذا در این حالت ۷۴ پارامتر مجهول است.

$$VP^{new} = VP^{old} + \Delta VP \quad (9)$$

که د رآن داریم:

VP^{new} : بردار جدید پارامترهای مدار معادل:

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

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

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

ΔVP : بردار تغییرات جزئی پارامترهای مدار معادل با استفاده از الگوریتم ژنتیک:

$$\Delta [L_1 \ m_{1,2} \ m_{1,3}, \dots, m_{1,n} \ r \ R_p \ R_g \ C_s \ C_g]$$

در بکارگیری الگوریتم ژنتیک در این مقاله تعداد جمیت اولیه برابر ۵۰۰، احتمال ترکیب ۰,۹۵ و احتمال جهش ۰,۰۵ انتخاب شده است.

۳-۳- چگونگی تخمین اولیه بردار پارامترهای مدار معادل

بردار اولیه پارامترهای مدار معادل براساس توصیه‌ها و قیود فنی و روابط تحلیلی بیان شده در [۵ و ۸] تعیین شده است. همچنین در طول فرآیند بهینه‌سازی جهت کاستن زمان بهینه‌سازی و کاهش فضای جستجوی مساله استفاده از شرط اندوکتانس معادل ارائه شده در [۶] نظری رابطه (۱۰) در فرکانس قدرت توصیه می‌شود:

$$L_{eq} = N_{ladder} \times L_{11} + 2 \times \sum_{i=1}^{N_{ladder}-1} (N_{ladder}-i) \times m_{1,i+1} \quad (10)$$

که در آن L_{eq} : اندوکتانس معادل سیم پیچ در فرکانس قدرت، N_{ladder} : تعداد سکشن‌های مدار معادل، L_{11} : اندوکتانس خودی در فرکانس قدرت و $m_{1,i+1}$: اندوکتانس متقابل در فرکانس قدرت است.

با لحاظ نمودن نامعادله‌های (۴) می‌توان اندوکتانس‌های تزویج را براساس مضربی از اندوکتانس خودی بیان نمود و با استفاده از رابطه (۱۰) می‌توان یک تخمین اولیه برای اندوکتانس خودی و تزویج بدست آورده.

۴- مطالعات موردی

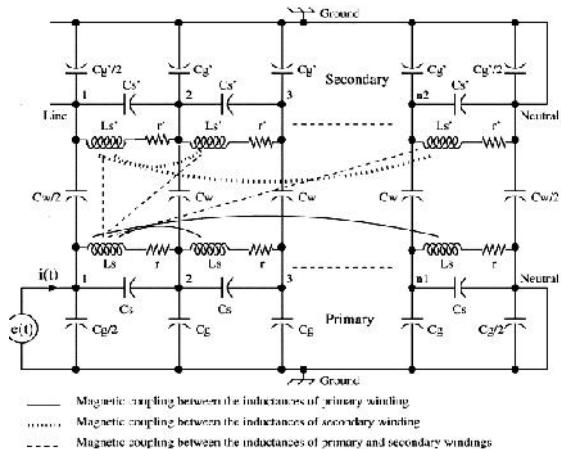
۴-۱- معرفی سیستم مورد آزمایش

در این مقاله آزمایش‌ها بر روی یک ترانسفورماتور ۲۰/۰، ۴ کیلوولت با قدرت اسمی ۱۶۰۰ کیلوولت آمپر انجام شد [۵]. در شکل (۵) این ترانسفورماتور نشان داده شده است.

۴-۲- معرفیتابع تبدیل مورد استفاده

در این مقاله امپدانس ورودی ترانسفورماتور مورد مطالعه از دیدگاه ترمیinal فشار قوی آن هنگامی که فشار ضعیف آن مدار باز است اندازه‌گیری شده و به عنوان تابع تبدیل ترانسفورماتور استفاده شده است. برای اندازه گیری این تابع تبدیل از دستگاه امپدانس آنالایزر Wayne Kerr Precision Impedance Analyzer 6500B مدل

دیسک فشارقوی با دیسک مشابه آن در فشارضعیف، فقط یک خازن و مقاومت عایقی فرض شده است. در این حالت ۶۹ پارامتر مجهول آند



شکل (۷): مدار معادل ترانسفورماتور دو سیم پیچه تک فاز

حالت (ب۲): این حالت مشابه حالت (ب۱) است با این تفاوت که بین هر دیسک فشارقوی با تمام دیسک های فشارضعیف المانهای خازن با مقدار متفاوت و المان مقاومتی مشابه فرض شده اند. این حالت ۸۷ پارامتر مجهول دارد.

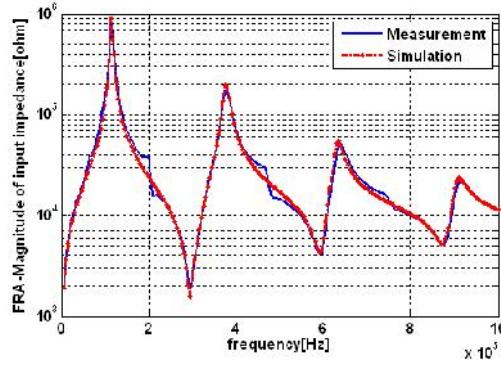
حالت (ب۲) کامل تر حالت (ب۱) است لذا نتایج بهینه سازی و تعیین تابع تبدیل آن در شکل (۸) آورده شده است. با بررسی شکل های (۶) و (۸) ملاحظه می شود که همه مدل های مسروخ مرسوم فوق توانایی مدل نمودن رزونانس های موثر را دارند. اما رزونانس های غیرموثر با استفاده از این مدل های مسروخ در وضعیت همگن یا ناهمگن قابل شناسایی نیست.

۴-۴- شبیه سازی با مدل مسروخ توسعه یافته

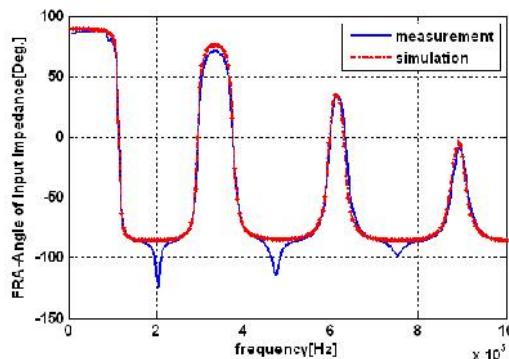
در این حالت مدار معادل مسروخ توسعه یافته شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفته است. ترانسفورماتور مورد مطالعه به صورت مدل دو سیم پیچه نظری شکل (۷) مدل شده است. در این حالت به شکل (۷) خازن های پراکندگی نشان داده شده در شکل (۲) اضافه می شود. گرچه این ملاحظات سبب پیچیده شدن فرآیند تخمین پارامترهای مدار معادل مسروخ می شود لیکن به واقعیت نزدیکتر است. نتایج شبیه سازی و تعیین پارامترها در شکل (۹) نشان داده شده است. با بررسی شکل (۹) ملاحظه می شود علاوه بر رزونانس های موثر، این مدل توانایی شناسایی رزونانس های غیرموثر را نیز دارد.

- شبیه سازی حالت (الف۵): در این حالت به جز پارامترهای r , R_p و C_g سایر پارامترهای هر دیسک با دیسک دیگر متفاوت است. این حالت دارای ۲۳۱ پارامتر مجهول است.

در بین شبیه سازی های حالت (الف۱) تا (الف۵)، حالت (الف۵) کامل تر از بقیه است که نتایج بهینه سازی وتابع تبدیل آن در شکل (۶) آورده شده است.



(a): دامنه



(b): فاز

شکل (۶): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه سازی و اندازه گیری حالت (الف۵)

جدول (۱): پارامترهای مدار مسروخ ترانسفورماتور در حالت شبیه سازی الف-۱

پارامتر مدار	مقادیر	پارامتر مدار	مقادیر
$L_{11}[\text{mH}]$	0.395941	$m_{1-13}[\text{mH}]$	0.007293
$m_{1-2}[\text{mH}]$	0.329200	$m_{1-14}[\text{mH}]$	0.006640
$m_{1-3}[\text{mH}]$	0.286400	$m_{1-15}[\text{mH}]$	0.005988
$m_{1-4}[\text{mH}]$	0.246600	$m_{1-16}[\text{mH}]$	0.005339
$m_{1-5}[\text{mH}]$	0.208864	$m_{1-17}[\text{mH}]$	0.004690
$m_{1-6}[\text{mH}]$	0.173084	$m_{1-18}[\text{mH}]$	0.004042
$m_{1-7}[\text{mH}]$	0.139726	$m_{1-19}[\text{mH}]$	0.003397
$m_{1-8}[\text{mH}]$	0.124284	$c_{s1}[\text{pf}]$	107
$m_{1-9}[\text{mH}]$	0.111001	$c_{g1}[\text{pf}]$	4.76000
$m_{1-10}[\text{mH}]$	0.009873	$r[\Omega]$	0.06889
$m_{1-11}[\text{mH}]$	0.008738	$R_p[\text{M}\Omega]$	0.56778
$m_{1-12}[\text{mH}]$	0.007974	$R_g[\text{M}\Omega]$	28.90219

- حالت (ب۱): در این حالت سیم پیچ اولیه و ثانویه نظری شکل (۷) به صورت دو سیم پیچ مدل سازی شده است. در این حالت بین هر

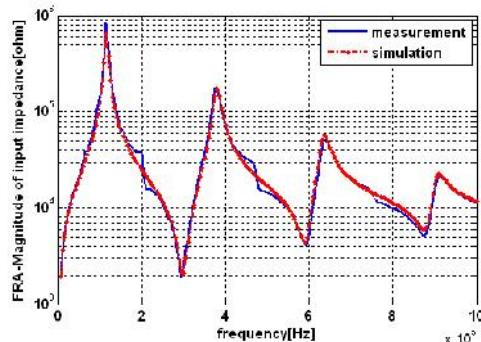
۴-۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی مدل مشروح مرسوم و توسعه یافته

وقتی تعداد بخش‌های مدار معادل بزرگتر می‌شود و یا مدل به صورت ناهمگون فرض می‌شود یافتن پارامترهای مدار معادل سخت‌تر می‌شود. با مقایسه حالت‌های مختلف بررسی شده می‌توان نکات زیر را بیان نمود:

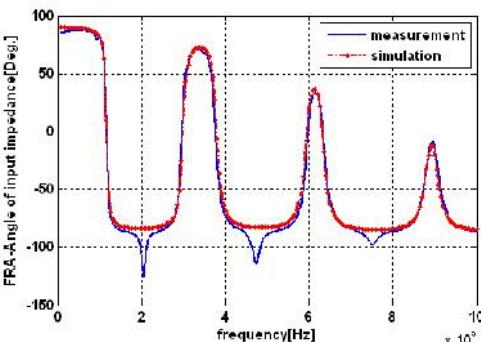
- ✓ برای یافتن پارامترهای مدار معادل روش ابتکاری ارائه شده یک روش کارآمد است که می‌تواند در شبکه‌های با تعداد بخش‌های زیاد و فرض مدل ناهمگون پارامترهای مدار معادل را با دقت و سرعت مطلوب تعیین کند. در این شبیه‌سازی تعیین پارامترهای مدار معادل بدون در اختیار داشتن اطلاعات هندسی و ساختمان ترانسفورماتور صورت گرفت که این موضوع بیانگر قوت و توانایی روش ابتکاری معرفی شده است.
- ✓ روش ارائه شده در این مقاله انطباق بین نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی را به طور مطلوب‌تری ارایه می‌کند.
- ✓ تخمین پارامترهای مدار معادل حالت (الف ۱) ساده‌تر و سریع‌تر از سایر حالت‌ها است لیکن دقت آن از سایر حالت‌ها کمتر است با این اوصاف این حالت به عنوان مدار معادل حالت پایه برای حالت‌های بعدی استفاده شده است تا زمان بهینه‌سازی را کمتر نماید.
- ✓ مدل‌های مشروح مرسوم و مدل مشروح توسعه یافته توانایی مدل نمودن رزونانس‌های موثر را دارند. اما تنها مدار معادل مشروح توسعه بافتۀ توانایی نمایش رزونانس‌های غیر موثر را دارد.
- ✓ یافتن راهی که بین مدارهای معادل ارائه شده مدار معادل بهینه را تعیین نماید ضروری است.

۵- تعیین مدار معادل بهینه

صرفانطباق مشخصه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی نمی‌تواند تضمین کننده صحت مدار معادل استخراج شده باشد. در اغلب مطالعات پیشین [۶-۵] اشاره شده است که در انطباق مشخصه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده پاسخ یکتا وجود ندارد و این مساله بر پیچیدگی شناسایی مدار معادل مناسب و مطلوب می‌افزاید. در این مطالعات با توجه به اینکه نقطه اتصال بین دیسک‌ها در سیم‌پیچ در دسترس بود نسبت به اندازه‌گیری تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی مدل بررسی از دیدگاه گره دو نسبت به زمین و گره نوزده به زمین اقدام شد و با نتایج شبیه‌سازی‌ها در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) مقایسه شد.

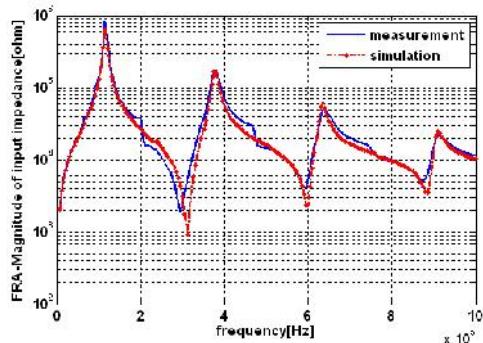


شکل (۸): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

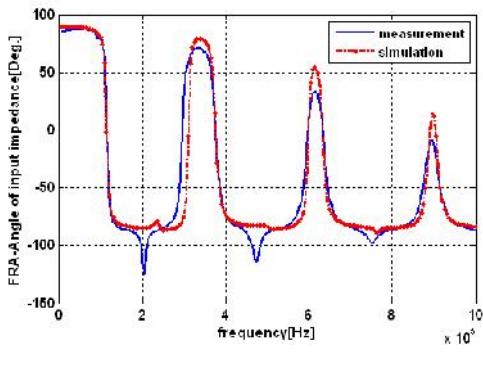


حالت (۲)

شکل (۸): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری



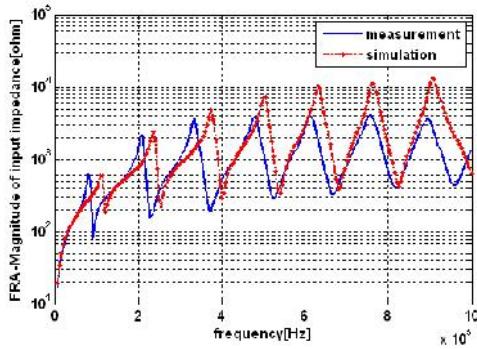
شکل (۹): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مدل



مشروح توسعه یافته

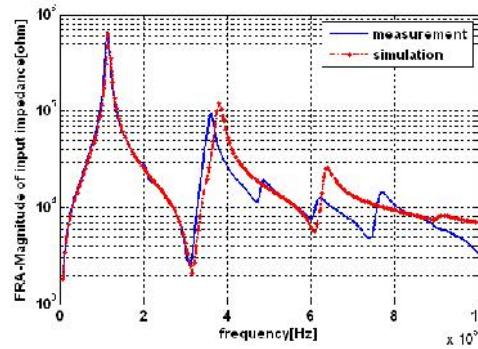
شکل (۹): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مدل





نتایج مدل مشروح توسعه یافته

شکل (11): تابع تبدیل از گره شماره ۱۹



نتایج حالت (ب) مدل مشروح مرسوم

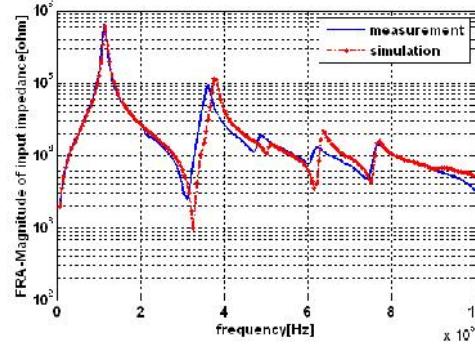
در مدل مشروح مرسوم، عدم توجه به رزونانس‌های غیرموثر سبب دستیابی به مدل‌های می‌شود که گرچه از دیدگاه ترمینال یک به طور مطلوب بر مشخصه رفتاری ترانسفورماتور منطبق هستند لیکن از دیدگاه گره‌های داخلی با خطای بسیار فاحشی رفتار آن را مدل می‌کنند. در حالیکه مدل مشروح توسعه یافته ضمن شناسایی رزونانس‌های موثر و غیر موثر از دیدگاه ترمینال یک، از دیدگاه گره‌های داخلی کیفیت رفتاری بهتری از ترانسفورماتور ارائه می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش مناسب و سریع جهت استخراج پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور مبتنی بر الگوریتم زنتیک ارائه شد. الگوریتم‌های پیشین با بزرگ شدن ابعاد مدار معادل به سختی امکان یافتن پارامترهای مناسب برای مدار معادل را داشتند که با استفاده از تکنیک ارائه شده می‌توان پارامترهای مدار معادل شبکه‌های بزرگ را با دقت قابل قبولی 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 می‌نمایند در این مقاله از مدل‌های وابسته به فرکانس المانها استفاده شده است. روشی جهت اعتبار سنجی مدل‌ها ارائه شد و ضرورت اعتبار سنجی مدل‌ها تشریح شد. در این مقاله مدار معادل مشروح توسعه یافته ارائه شد و ملاحظه شد که مدار معادل توسعه یافته در مقایسه با مدل‌های مشروح مرسوم کیفیت رفتاری بهتری از ترانسفورماتور ارائه می‌نماید.

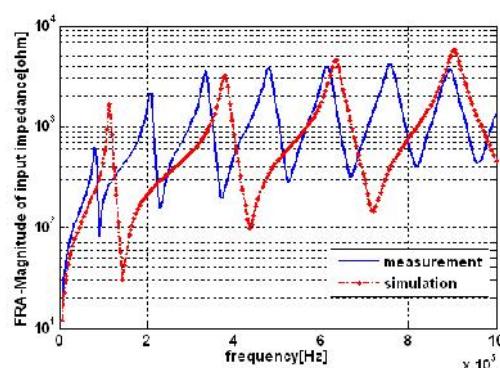
مراجع

- [1] E.bjerkan" High frequency modeling of power transformers " Doctoral Thesis, Trondheim, May 2005
- [2] P. Vaessen, "Transformer model for high frequencies," IEEE Trans. Power Del., vol. 3, no. 4, pp. 1761–1768, Oct. 1988.
- [3] 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.



نتایج مدل مشروح توسعه یافته

شکل (10) تابع تبدیل از دیدگاه گره شماره دو ملاحظه می‌شود که از دیدگاه گره‌های داخلی دقت مدل مشروح توسعه یافته بهتر از مدل مشروح مرسوم است. با بررسی نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها از دیدگاه گره داخلی سیم پیچ‌ها می‌توان دریافت که صرفاً انطباق مشخصه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی از ترمینال اصلی نمی‌تواند بیانگر دقت مدل باشد و ضروری است به اعتبارسنجی مدل دقت ویژه‌ای داشت. همانگونه که در شبیه‌سازی‌ها ملاحظه می‌شود مدل مشروح مرسوم شکل (1) امکان مدل نمودن رزونانس‌های غیرموثر را ندارند.



نتایج حالت (ب) مدل مشروح مرسوم



- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] Juan A. Martinez-Velasco," Power System Transients Parameter Determination" CRC Press, 2010 by Taylor and Francis Group, LLC
- [9] 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.
- [10] 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
- [11] 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
- [12] Pablo Gómez, Francisco de León." Accurate and efficient computation of the inductance matrix of transformer winding for the simulation of very fast transients" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 26, NO. 3, JULY 2011
- [13] Enrique E. Mombello," Impedances for the Calculation of Electromagnetic Transients Within Transformers" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 17, NO. 2, APRIL 2002
- [14] Gómez, F. de León and 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
- [15] 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.
- [16] 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>