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

جعفر نصرتیان اهور[1] سعید سیدطبایی[2] گئورک قره‌پتیان[3]

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 سیم‌پیچی 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 سیم‌پیچ واقعی با توان نامی ۱٫۶مگا ولت آمپر و ولتاژ نامی ۲۰/۰٫۴ کیلو ولت درآزمایشگاه 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 سیدطبایی

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]

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

۱- مقدمه

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 ادامه‌دار است. یکی از تکنیک‌های جدید ارزیابی وضعیت ترانسفورماتور تحلیل پاسخ فرکانسی است که به ویژه برای تشخیص عیوب مکانیکی سیم‌پیچ کارآمد و موثر است..

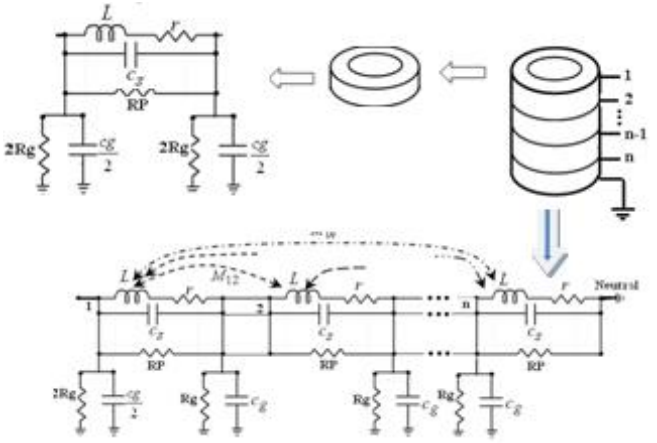
برای یافتن یک مدل مناسب و دقیق جهت بررسی رفتار ترانسفورماتور در حالت گذرا، تلاش‌های مختلفی صورت گرفته است که می‌توان به مدلسازی مبتنی بر ساختار فیزیکی ترانسفورماتور، مدل جعبه سیاه [۲-۳] و مدل هیبرید [۴] اشاره نمود. مدل مشروح یکی از مرسوم‌ترین مدل های ترانسفورماتور قدرت است که مبتنی بر ساختار فیزیکی ترانسفورماتور است[۲-۴]. در یک مدل مشروح اعتبار و دقت مدل بستگی به مقادیر پارامترهای مدل، تعداد بخش‌های مدار معادل و تابع 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 زمان‌بر می‌شوند لذا برقراری مصالحه ای بین دقت مدل و ابعاد مدار معادل در فرآیند مدلسازی مورد نیاز است. روش‌های مختلفی با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک، مورچگان [۵-۷] و ... جهت تعیین پارامترهای مدار معادل بکار رفته‌اند. به دلیل پیچیدگی مساله در یافتن پارامترهای مدل، اغلب مدلهای بکارگیری شده با تعداد بخش های 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[۲-۵] ملاحظه شد که با این مدل فرکانس های رزونانس موثر به نحو مطلوبی قابل شناسایی است لیکن رزونانس‌های غیرموثر قابل شناسایی نیست. لذا مدار معادل مشروح توسعه یافته‌ای ارائه می‌شود که علاوه بر فرکانس های رزونانس موثر، توانایی شناسایی فرکانس‌های غیر موثر را نیز دارد.

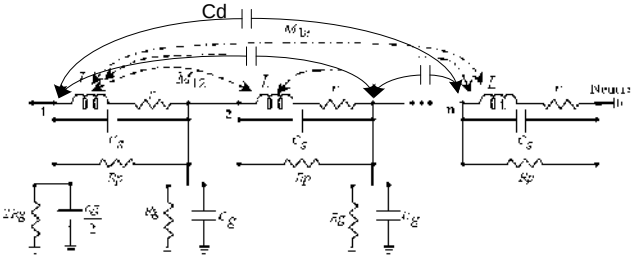
در بخش دوم این مقاله مدل مشروح توسعه‌یافته معرفی شده است. عوامل مختلفی سبب پیچیده شدن مدلسازی ترانسفورماتور می‌شود که در بخش سوم مقاله به آنها اشاره شده است. همچنین در بخش سوم این مقاله، جهت دستیابی به مدل مناسب و کاهش زمان بهینه‌سازی یک روش کارآمد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی مدار معادل مرسوم و توسعه‌یافته با نتایج اندازه‌گیری‌های عملی مقایسه شده‌اند و نهایتا بخش پنجم به جمع‌بندی یافته‌های این مقاله پرداخته است.

۲- معرفی مدل مشروح توسعه‌یافته

در مطالعات پیشین [۹-۱۱] مدل مشروح مرسوم نظیر شکل (۱) استفاده شده است. در شکل (۱) هر بخش مدل فشرده تعدادی از دورهای سیم‌پیچ را نشان می دهد. 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 M_{ij})، مقاومت تلفات عایقی سری و موازی (R_P , R_g) و مقاومت اهمی سیم‌پیچ (r) است. در این مقاله به مدار معادل مشروح شکل (۱)، خازن‌های پراکندگی بین دیسک‌ها(C_d) اضافه شده است تا مدل مشروح توسعه‌یافته شکل (۲) حاصل شود.



شکل (۱): مدار معادل مشروح سیم‌پیچ‌های ترانسفومراتور



شکل(۲): مدار معادل مشروح توسعه‌یافته

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]

۲-۱- تعیین تابع تبدیل با بکارگیری معادلات فضای حالت

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:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= [A]x + [B]u \\ y &= [C]x + [D]u \end{aligned} \qquad (۱)$$

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 سلف ها و ولتاژ خازن های موازی به عنوان متغییرهای حالت جهت توصیف رفتار دینامیکی مدار معادل مشروح شکل (۱) کافی است[۱۰]. در [۱۰] از مقاومت های 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 فشارضعیف مدار باز است، امپدانس معادل ترانسفورماتور از 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. روش های تحلیلی و تخمینی مختلفی جهت تعیین پارامترهای این مدل ارائه شده است[۹-۱۱]. روش تعیین پارامترها مبتنی بر محاسبه، نیازمند اطلاعات ساختار داخلی ترانسفورماتور است و با استفاده از روابط تحلیلی این پارامترها محاسبه می شوند[۸-۱۴] . از سوی دیگر روش‌های محاسباتی دارای خطای قابل ملاحظه‌اند[۱۴]. در روش تخمین پارامتر، یک ویژگی از ترمینال ترانسفورماتور اندازه‌گیری شده و تلاش می‌شود به نحوی پارامترها تعیین شوند که تابع خطای فی مابین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری حداقل‌سازی شود [۵-۷]. برای دستیابی به یک مدل مناسب و قابل‌قبول، 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.

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، مدلهای مختلفی جهت مطالعات حالت گذرای فرکانس بالا ارائه شده است[۸-۱۲]. 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[۸-۱۲]. 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 مدلهای همگن، مدل های 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 $m_{1,2}$ $m_{1,n}$ . . . ,$m_{1,3}$, نظیر رابطه (۲)، توصیف کننده اندوکتانس‌های تزویج بین حلقه اول و سایر حلقه ها است.

$$l = \begin{bmatrix} L_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \dots & m_{1,n} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

هر گاه ساختار سیم‌پیچ همگن فرض شود می‌توان ماتریس اندوکتانس سیم‌پیچ را نظیر رابطه (۳) بنا نمود:

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \dots & m_{1,n} \\ m_{1,2} & L_{1,1} & m_{1,2} & \dots & m_{1,n-1} \\ m_{1,3} & m_{1,2} & L_{1,1} & \dots & m_{1,n-2} \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ m_{1.n} & m_{1,n-1} & m_{1,n-2} & \dots & L_{1,1} \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

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 نظیر نامساوی‌های رابطه (۴) استفاده شده‌اند[۵و۶] :

$$\begin{aligned} &0.4L_{i,i} < m_{i,i+1} < 0.85L_{i,i} \\ &0.5m_{i,j-1} < m_{i,j} < 0.95m_{i,i} \\ &\forall i = 1,2,....N-1, \forall j = 2,3,...N-1 \end{aligned} \qquad (٤)$$

جهت پیشگیری از ایجاد پاسخ‌های نادرست و غیرواقعی در مرجع [۵و۶] الگوی مشخصی ارائه شده است که در رابطه (۵) این الگو بیان

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

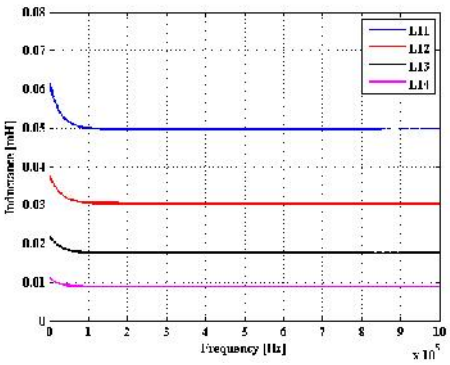
می‌شود. بررسی‌های این مقاله نیز نشان می‌دهد استفاده از این الگو از ارائه پاسخ‌های غیرواقعی پیشگیری می‌کند لذا مورد توصیه است.

$$(m_{ij} - m_{ik}) > (m_{ik} - m_{in}) \;\; If \; |i-j| > |i-k| > |i-n| \qquad (۵)$$

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

- **وابستگی عناصر ماتریس اندوکتاس به فرکانس**

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



شکل(۳): تغییرات اندوکتانس به ازای تغییر فرکانس

- **نحوه تعریف تابع خطا و بکارگیری آن در بهینه‌سازی**

یکی از مرسوم‌ترین روش ها جهت تخمین پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور حداقل‌سازی اختلاف بین منحنی مرجع (r: ناشی از اندازه گیری) و نتایج شبیه‌سازی (s) براساس مدار معادل است[۵]. در این مقاله نیز این تابع خطا (EF) استفاده شده است:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{P} \frac{|r_i - s_i|}{r_i}}{P} \qquad (٦)$$

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

- **مدل مقاومت عایقی**

مقاومت عایقی سیم‌پیچ ترانسفورماتور (R) با افزایش فرکانس(f) کاهش می‌یابد که در این مقاله نظیر رابطه (۷) مدل می‌شود:

$$R \propto \frac{1}{f} \qquad (۷)$$

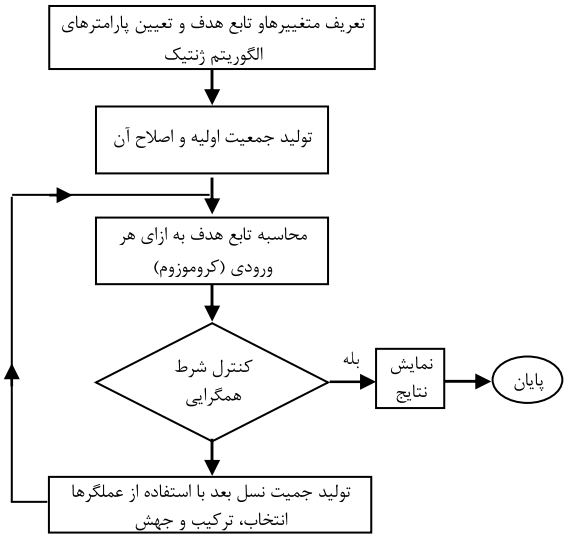
- **مدل مقاومت اهمی سیم‌پیچ**

رابطه ریاضی تغییرات مقاومت اهمی سیم‌پیچ (r) به ازای تغییرات فرکانس(f) قدری پیچیده است[۸]، با افزایش فرکانس مقاومت اهمی سیم‌پیچ افزایش می‌یابد که در این مقاله به طور تقریبی با رابطه (۸) مدل شده است:

$$r \propto \sqrt{f} \qquad (۸)$$

۳-۲- معرفی الگوریتم ژنتیک بکارگیری شده

الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی توانمند است که با تعریف متغییرهای بهینه سازی و تابع هدف شروع می‌شود[۱۵] . برای هر ورودی (هر کروموزوم) تابع ریاضی تعریف شده به عنوان تابع هدف مقداری را به عنوان خروجی ارائه می‌کند. 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 شود (اغلب در مبنای دودویی این کدینگ صورت می‌گیرد). پس از انتخاب نحوه کدینگ متغییرها، بایستی جمعیت آغازین را به عنوان نقطه شروع الگوریتم ایجاد نمود که جمعیت اولیه نامیده می‌شود. جمیعت نسل بعدی از روی نسل قبل و با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک (انتخاب، ترکیب و جهش) براساس فلوچارت شکل (۴) تولید می‌شوند.



شکل (۴): فلوچارت عملکرد الگوریتم ژنتیک در مسایل بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک به دنبال یافتن مناسب‌ترین مقادیری است که تابع هدف با ازای آن مطلوب‌ترین مقدار را دارد. در این مقاله بردار پارامترهای مدار معادل (VP) با استفاده از الگوریتم به نحوی تعیین می‌شود تا تابع خطا تعریف شده در رابطه (۶) حداقل شود. برای این منظور پارامترهای جدید مدار معادل مبتنی بر بهینه‌ترین پاسخ نسل قبل به علاوه بردار تغییرات کوچک (مثبت و منفی) نظیر رابطه (۹) تعیین می‌شوند. بردار تغییرات کوچک با استفاده از الگوریتم ژنتیک ایجاد می‌شوند و میزان تغییرات هر پارامتر کمتر از ±1% آخرین مقدار بهینه برای آن پارامتر است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]

$$VP^{new} = VP^{old} + \Delta VP \qquad (۹)$$

که د رآن داریم:

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^{old}: 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 ۵۰۰، احتمال ترکیب ۰,۹۵ و احتمال جهش ۰,۰۵ انتخاب شده اند.

۳-۳- چگونگی تخمین اولیه بردار پارامترهای مدار معادل

بردار اولیه پارامترهای مدار معادل براساس توصیه‌ها و قیود فنی و 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] نظیر رابطه (۱۰) در فرکانس قدرت توصیه می‌شود:

$$L_{eq} = N_{ladder} \times L_{11} + 2 \times \sum_{i=1}^{N_{ladder}-1} (N_{ladder} - i) \times m_{1,i+1} \qquad (۱۰)$$

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 و $m_{1,i+1}$: اندوکتاس متقابل در فرکانس قدرت است.

با لحاظ نمودن نامعادله های (۴) می‌توان اندوکتانس های 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 آورد.

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- 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 اندازه‌گیری شده و به عنوان تابع تبدیل ترانسفورماتور استفاده شده است. برای اندازه گیری این تابع تبدیل از دستگاه امپدانس آنالایزر مدل Wayne Kerr Precision Impedance Analyzer 6500B Series استفاده شده است[۱۶] که دقت بسیار بالایی در اندازه گیری دارد.

شکل (۵): تجهیزات تست مورد استفاده

۴-۳- شبیه‌سازی با مدل مشروح مرسوم

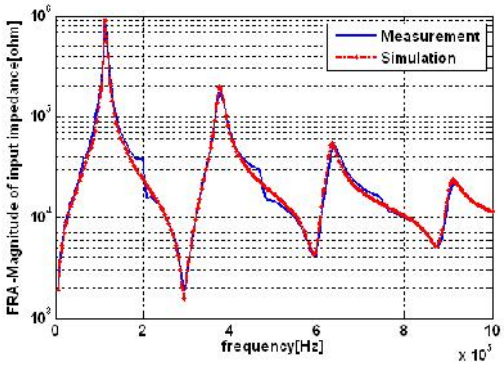
در این مقاله برای حالت های مختلف همگن و ناهمگن پارامترهای مدار معادل مشروح مرسوم تعیین می شوند. ترانسفورماتور مورد مطالعه به دو شکل تک سیم پیچ (حالتهای (الف ۱) تا(الف ۵)) و دو سیم پیچ (حالت های (ب۱و۲)) به شرح زیر مدلسازی می شود.

- **شبیه‌سازی حالت(الف۱):** در این حالت، مدار معادل مشروح شبکه نظیر شکل(۱) به صورت تک سیم‌پیچ 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، اندوکتانس خودی و اندوکتانس‌های متقابل است. به عنوان نمونه در جدول (۱) پارامترهای تخمین زده شده مدار معادل مشروح آورده شده است.
- **شبیه‌سازی حالت (الف۲):** در این حالت با توجه به ساختمان ترانسفورماتور واقعی، اندوکتانس چهار دیسک ابتدا و چهار دیسک انتها مشابه و سایر دیسک ها مشابه فرض شده‌اند. در کل سیم‌پیچ مقاومت اهمی سیم‌پیچ، مقاومت عایقی و خازن‌های معادل یکسان فرض می‌شوند. در این حالت ۳۸ پارامتر مجهول تعیین می‌شود.
- **شبیه‌سازی حالت (الف۳):** در این حالت تمام پارامترها به جز C_g مشابه بند (الف۲) هستند و C_g در دیسک های نزدیک به زمین دارای مقادیر بزرگتری هستند. این حالت دارای ۵۶ پارامتر مجهول است.
- **شبیه‌سازی حالت (الف۴):** 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 دیسک ها متفاوت فرض شده است. لذا در این حالت ۷۴ پارامتر مجهول‌اند.

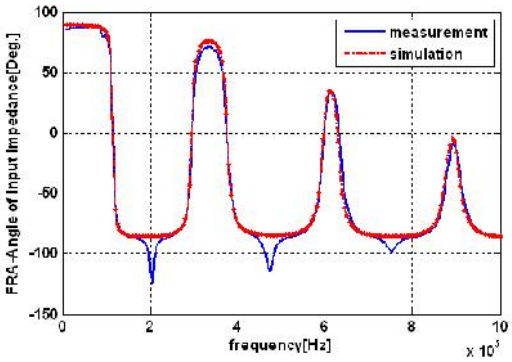
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

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

در بین شبیه‌سازی های حالت(الف ۱) تا (الف ۵)، حالت (الف ۵) کامل‌تر از بقیه است که نتایج بهینه‌سازی و تابع تبدیل آن در شکل (۶) آورده شده است.



(a): دامنه



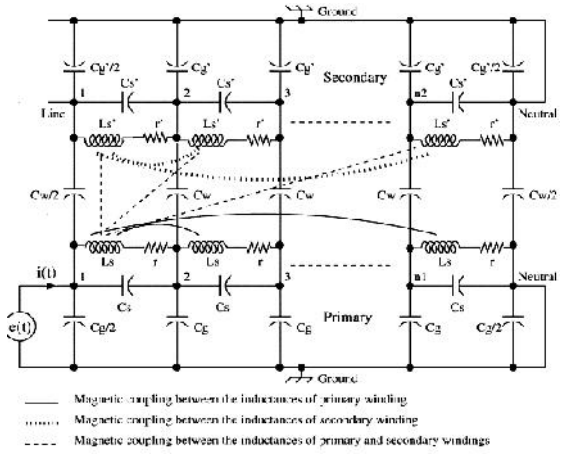
(b): فاز

شکل (۶): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری حالت (الف۵)

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

پارامتر مدار	مقدار	پارامتر مدار	مقدار
L_{11}[mH]	0.395941	m_{1-13}[mH]	0.007293
m_{1-2}[mH]	0.329200	m_{1-14}[mH]	0.006640
m_{1-3}[mH]	0.286400	m_{1-15}[mH]	0.005988
m_{1-4}[mH]	0.246600	m_{1-16}[mH]	0.005339
m_{1-5}[mH]	0.208864	m_{1-17}[mH]	0.004690
m_{1-6}[mH]	0.173084	m_{1-18}[mH]	0.004042
m_{1-7}[mH]	0.139726	m_{1-19}[mH]	0.003397
m_{1-8}[mH]	0.124284	cs_1[pf]	107
m_{1-9}[mH]	0.111001	cg1[pf]	4.76000
m_{1-10}[mH]	0.009873	r[Ω]	0.06889
m_{1-11}[mH]	0.008738	Rp[MΩ]	0.56778
m_{1-12}[mH]	0.007974	Rg[MΩ]	28.90219

- **حالت (ب۱):** در این حالت سیم‌پیچ اولیه و ثانویه نظیر شکل (۷) به صورت دو سیم‌پیچ مدلسازی شده است. در این حالت بین هر دیسک فشارقوی با دیسک مشابه آن در فشارضعیف، فقط یک خازن و مقاومت عایقی فرض شده است. در این حالت ۶۹ پارامتر مجهول‌اند



شکل (۷): مدار معادل ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه تک فاز

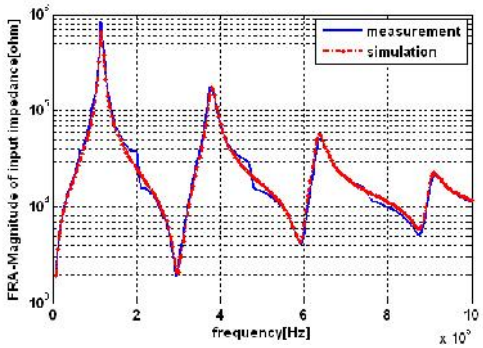
- **حالت (ب۲):** این حالت مشابه حالت (ب۱) است با این تفاوت که بین هر دیسک فشارقوی با تمام دیسک‌های فشارضعیف المانهای خازن با مقدار متفاوت و المان مقاومتی مشابه فرض شده‌اند. این حالت ۸۷ پارامتر مجهول دارد.

حالت (ب۲) کامل‌تر حالت (ب۱) است لذا نتایج بهینه‌سازی و تعیین تابع تبدیل آن در شکل (۸) آورده شده است. با بررسی شکل‌های (۶) و (۸) ملاحظه می‌شود که همه مدلهای مشروح مرسوم فوق توانایی مدل نمودن رزونانس‌های موثر را دارند. اما رزونانس‌های غیرموثر با استفاده از این مدلهای مشروح در وضعیت همگن یا ناهمگن قابل شناسایی نیست.

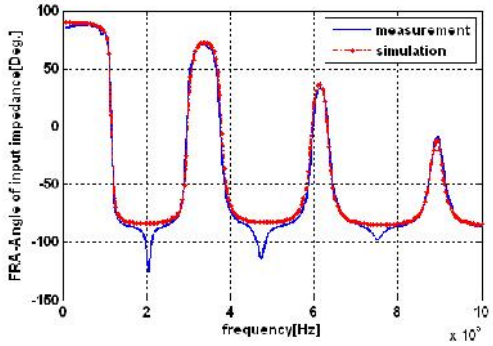
۴-۴- شبیه‌سازی با مدل مشروح توسعه یافته

در این حالت مدار معادل مشروح توسعه‌یافته شکل (۲) مورد بررسی قرار گرفته است. ترانسفورماتور مورد مطالعه به صورت مدل دو سیم‌پیچه نظیر شکل (۷) مدل شده است. در این حالت به شکل (۷) خازن‌های پراکندگی نشان داده شده در شکل(۲) اضافه می‌شود. گرچه این ملاحظات سبب پیچیده شدن فرآیند تخمین پارامترهای مدار معادل مشروح می‌شود لیکن به واقعیت نزدیکتر است. نتایج شبیه‌سازی و تعیین پارامترها در شکل (۹) نشان داده شده است. با بررسی شکل (۹) ملاحظه می‌شود علاوه بر رزونانس‌های موثر، این مدل توانایی شناسایی رزونانس‌های غیرموثر را نیز دارد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]

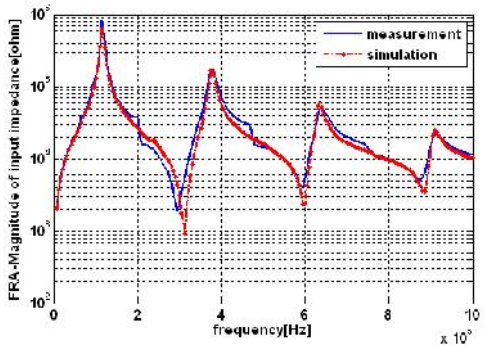


(a): دامنه

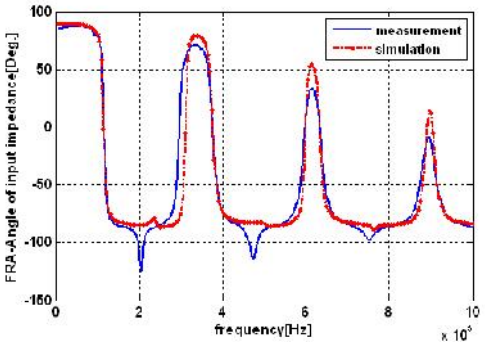


(b): فاز

شکل (۸): مقایسه تابع تبدیل حاصل از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری حالت (ب۲)



(a): دامنه



(b): فاز

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

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

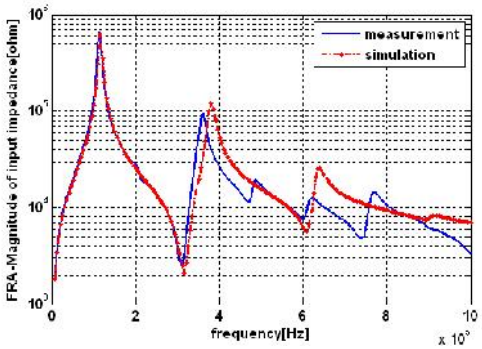
وقتی تعداد بخش‌های مدار معادل بزرگتر می‌شود و یا مدل به صورت ناهمگون فرض می‌شود یافتن پارامترهای مدار معادل سخت‌تر می‌شود. با مقایسه حالت‌های مختلف بررسی شده می‌توان نکات زیر را بیان نمود:

- ✓ 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 (الف۱) ساده تر و سریع‌تر از سایر حالت‌ها است لیکن دقت آن از سایر حالت‌ها قدری 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 بافته توانایی نمایش رزونانس‌های غیر موثر را دارد..
- ✓ یافتن راهی که بین مدارهای معادل ارائه شده مدار معادل بهینه را تعیین نماید ضروری است.

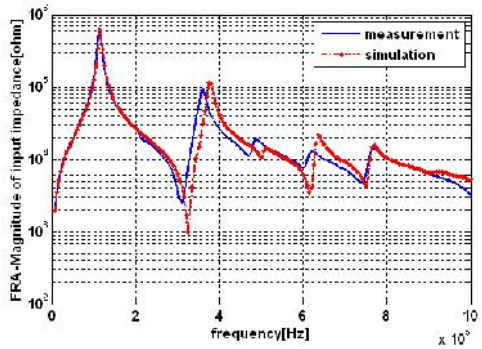
۵- تعیین مدار معادل بهینه

صرفا انطباق مشخصه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی نمی‌تواند تضمین کننده صحت مدار معادل استخراج شده باشد. در اغلب مطالعات پیشین [۵-۶] 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 ترانسفورماتور مورد بررسی از دیدگاه گره دو نسبت به زمین و گره نوزده به زمین اقدام شد و با نتایج شبیه-سازی‌ها در شکل های (۱۰) و (۱۱) مقایسه شد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017



نتایج حالت (ب۲) مدل مشروح مرسوم

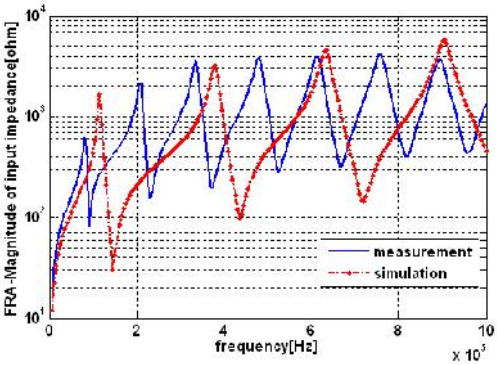


نتایج مدل مشروح توسعه یافته

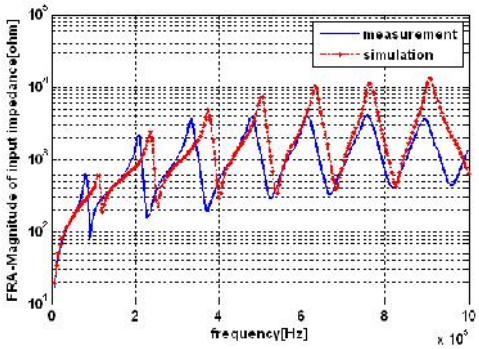
شکل (۱۰) تابع تبدیل از دیدگاه گره شماره دو

ملاحظه می‌شود که از دیدگاه گره‌های داخلی دقت مدل مشروح توسعه‌یافته بهتر از مدل مشروح مرسوم است.

با بررسی نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌ها از دیدگاه گره داخلی سیم پیچ‌ها می‌توان دریافت که صرفا 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 (۱) امکان مدل نمودن رزونانس‌های غیرموثر را ندارند.



نتایج حالت (ب۲) مدل مشروح مرسوم



نتایج مدل مشروح توسعه یافته

شکل (۱۱): تابع تبدیل از گره شماره ۱۹

در مدل مشروح مرسوم، عدم توجه به رزونانس‌های غیرموثر سبب دستیابی به مدل هایی 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 توسعه‌یافته 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 ژنتیک 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 می توان پارامترهای مدار معادل شبکه های 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]

[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, Franciscode 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. 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

[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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-25]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.9.0]