به‌کارگیری روشی جدید جهت مطالعه حالت‌های گذرای فرکانس بالا در ترانسفورماتور دوطبقه مورد استفاده در سیستم‌های مترو

محمدامین ثبوتی[1]، داود عزیزیان[2]، مهدی بیگدلی[3] و گئورگ قره‌پتیان[4]

[1] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران، sobouti91@yahoo.com

[2] **نویسنده مسئول**، استادیار، گروه مهندسی برق، واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران، d.azizian@abhariau.ac.ir

[3] استادیار، گروه مهندسی برق، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران، mehdi.bigdeli@iauz.ac.ir

[4] استاد، گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، grptian@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۰)

دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۷ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۳۹۹

صفحات ۳۳ الی ۵۴

ISSN: 2322-3146

http: //jnsee.sut.ac.ir

چکیده

مدلسازی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی فرکانس بالا و شبیه‌سازی توزیع ولتاژ و جریان ناشی از امواج گذرای الکتریکی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی از درجه اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در مقالهٔ حاضر ضمن ارائهٔ مدل‌های اجزای محدود، روش تزویج میدان- مدار جهت مدلسازی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی فرکانس بالا در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی معرفی شده است. روش ارائه شده از مدل‌های اجزای محدود دو بعدی به همراه تزویج آن با یک مدار خارجی جهت مدل‌سازی رفتار گذرای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی استفاده میکند. در ادامهٔ مقاله، نتایج حاصل از مدل-های ارائه شده با نتایج بدست آمده از یک مدل اجزای محدود کامل سه‌بعدی و نیز نتایج حاصل از مدل مشروح مقایسه و اعتبار مدل تأیید می‌شود. در نهایت مدل فرکانس بالای تایید شده برای تحلیل پاسخ ضربهٔ ترانسفورماتور، مورد استفاده قرار گرفته است. چنانکه نشان داده شده است، مدل ارائه شده نه تنها ساده و سریع است، بلکه با دقت بالایی می‌تواند پاسخ ضربه را در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور کششی مدل کند.

واژه‌های کلیدی

ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه کششی،

حالت گذرا،

مدل‌سازی الکترومغناطیسی،

شبکهٔ نردبانی،

تزویج میدان- مدار،

اجزای محدود.

Sahand University of Technology

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering

Vol.7, No.1

Spring and Summer 2020

ISSN: 2322 – 3146

http://jnsee.sut.ac.ir

Employing a Novel Approach for High Frequency Transient Modeling in Multi-Winding Traction Transformer

Mohammad Amin Sobouti[1], Davood Azizian[2], Mehdi Bigdeli[3] and Gevork Gharehpetian[4]

[1]Department of Electrical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

[2] **Corresponding Author**, Department of Electrical Engineering, Abhar Branch, Islamic Azad University, Abhar, Iran, d.azizian@abhariau.ac.ir

[3]Department of Electrical Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

[4]Electrical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

The modeling of high frequency electromagnetic transients and the simulation of the voltage and the current distribution in the multi-winding traction transformer's windings are very important due to these transient waves. In the present article, in addition of presenting finite element models, the coupled field-circuit approach is proposed for the modeling of high frequency electromagnetic transients in a multi-winding traction transformer. The proposed method uses two-dimensional finite element models coupled with an external circuit to model the electromagnetic transient behavior of the multi-winding traction transformer. Afterwards, the results of the presented method are compared with the results obtained from a complete three-dimensional finite element model as well as the detail model's results and the results are validated. Finally, the validated high-frequency model is used to study the impulse response of the transformer. As shown, the proposed approach is a simple and fast method, and also has good accuracy in modeling of the impulse voltage distribution in the multi-winding traction transformer's windings.

Keywords

Multi-winding traction transformer,

Transient,

Electromagnetic modeling,

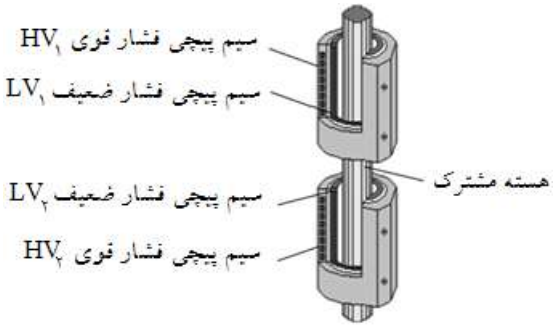
Ladder network,

Coupled field-circuit,

Finite element.

۱-مقدمه

با رشد روز افزون ترانسفورماتورها از نظر ابعاد، ساختارهای هسته، سیم‌پیچ‌ها، سیستم عایقی و توان‌های متنوع، طراحی آن‌ها از لحاظ مکانیکی، الکترومغناطیسی و عایقی با پیچیدگی‌های خاصی مواجه شده است. روند استفاده از ترانسفورماتورهای چند سیم‌پیچه با ساختارهای ویژه به شدت رو به رشد است. با توجه به روند رو به رشد استفاده از قطارهای برقی در شهرهای بزرگ، متوسط و حتی جدیداً شهرهای کوچک، ترانسفورماتورهای مورد استفاده در سیستم‌های ریلی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به استفاده گسترده از یکسوسازهای دوازده پالسه در شبکه‌های ریلی (کششی)، ترانسفورماتورهای چند سیم‌پیچه از درجهٔ اهمیت بالایی برخوردار شده‌اند. ترانسفورماتورهای مورد استفاده در این سیستم‌های یکسوساز دارای ساختار ویژه‌ای بوده و عموماً به صورت دوطبقه با جفت سیم‌پیچی‌های مجزای محوری ساخته می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱. شمای تک‌فاز ترانسفورماتور چهار سیم‌پیچه دو طبقه کششی [۱]

لازم به ذکر است در هنگام بهره برداری، سیم‌پیچ‌های فشارقوی با هم موازی می‌شوند و سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف هیچ ارتباط فیزیکی با هم ندارند. در ساختار سیم‌پیچ‌های این نوع ترانسفورماتورها، عموماً از ورق آلومنیومی و عایق‌های دی‌ام‌دی و مایلار به همراه رزین قالب‌ریزی شده استفاده می‌شود.

یکی از مسائل بسیار مهم در طراحی ترانسفورماتورها، به خصوص ترانسفورماتورهای چند سیم‌پیچه با ساختارهای ویژه، طراحی عایقی آن‌ها تحت شرایط متفاوت بارگیری می‌باشد. حالت‌های گذرای ناشی از ولتاژهای ضربه و شرایط کلیدزنی به خصوص در ادوات الکترونیک قدرت در شبکه‌های کششی، تأثیر بسیار زیادی در نحوه طراحی عایقی ترانسفورماتورهای چند سیم‌پیچه کششی دارند. صاعقه، کلیدزنی و اغتشاشات دیگر شبکه مانند اتصال‌های کوتاه داخلی و خارجی می‌توانند موجب اضافه ولتاژهایی در ترانسفورماتور شده و در شبکه‌های کششی و ادوات الکترونیک قدرت نیز تأثیر منفی بگذارند. بنابراین شناخت و بررسی پاسخ ترانسفورماتور به تنش‌های مختلف و کنترل شرایط می‌تواند به پی‌ریزی شبکهٔ کششی با قابلیت اطمینان بالا بیانجامد. عدم شناخت حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی باعث می‌شود که پیش‌بینی‌های لازم برای جلوگیری از ضربه‌ها و نوسانات گذرا صورت نگیرد. بنابراین ارائهٔ مدل‌های مناسب جهت تحلیل رفتار این نوع از ترانسفورماتورها به خصوص تحت شرایط گذرای فرکانس بالا از اهمیت زیادی برخوردار است.

مطالعه‌های متعدد در ارتباط با مدل‌سازی حالت‌های گذرای فرکانس بالا در ترانسفورماتورهای دو سیم‌پیچه روغنی و خشک انجام شده‌اند [۲-۸]. در سال ۱۹۵۳، در مقاله [۲]، یک مدل کلی مبتنی بر یک شبکهٔ خازنی را برای مدل‌سازی توزیع

گذرای ولتاژ ضربه در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور پیشنهاد شده است. با وجود دقت کافی در نتایج شبیه‌سازی با توجه به اهداف طراحی، برای هر ترانسفورماتور مورد مطالعه می‌بایست یک مدل خاص جدید پیشنهاد شود. تقریباً در همان زمان، در [۳] استفاده از یک شبکهٔ نردبانی معادل جهت مطالعهٔ رفتار گذرای سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور پیشنهاد شده است. این شبکهٔ نردبانی متشکل از تعداد محدودی از بخش‌های یکسان شامل اجزای سلفی و خازنی متمرکز می‌باشد. رفتار گذرای این شبکهٔ معادل زمانی که موج ضربه به آن اعمال می‌شود، به راحتی با محاسبهٔ عددی قابل ارزیابی است. مدل لویس که تأثیر تزویج سلفی را با اصلاح مقدار اندوکتانس خودی در نظر می‌گیرد، تنها قابل اعمال به یک سیم‌پیچ یکنواخت است. مولفان در مقاله [۴] نیز مدار معادلی مشابه مدل مرجع [۳] اما با تفاوت‌های مشخص را برای مدل‌سازی سیم‌پیچ‌های غیر یکنواخت و در نظر گرفتن اثر تزویج میان بخش‌ها ارائه کرده است [۴]. رفتار گذرای ترانسفورماتورهای خشک نیز به عنوان نسل جدیدی از ترانسفورماتورهای توزیع با استفاده از مدل‌های مشروح فرکانس بالا در [۷ و ۸] مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۹] با استفاده از مدل‌سازی خط انتقال چند سیمه (MTL) بهبودیافته، سیم‌پیچی ترانسفورماتورهای قدرت را برای مطالعهٔ تخلیه جزئی مورد بررسی قرار می‌دهد.

روش‌های مختلفی نیز برای محاسبهٔ پارامترهای مدل و ماتریس اندوکتانس سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورهای دو سیم پیچه مبتنی بر روش‌های تحلیلی [۹-۱۲]، اجزای محدود [۹- ۱۴] و روش‌های هوشمند [۱۵] ارائه شده‌اند. مراجع [۱۱، ۱۲ و ۱۴] اندوکتانس‌های خودی و متقابل بخش‌های سیم‌پیچی را با در نظر گرفتن تأثیر مشخصهٔ غیرخطی هسته آهنی محاسبه کرده‌اند. مشخصه‌های فرکانس بالای پارامترهای مدل‌های مشروح و فشردهٔ ترانسفورماتور در [۹ و ۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مقالهٔ [۱۲] نشان می‌دهد که در فرکانس‌های بالا هسته به عنوان یک عایق مغناطیسی و با رفتاری متفاوت از هوا عمل می‌کند و در نتیجه فرمول‌های تقریبی محاسبهٔ پارامترها مبتنی بر هسته هوایی موثر نیستند. به دلیل صرفنظر کردن از تلفات هسته، روش تحلیلی در محاسبهٔ پارامترهای مدل فشرده ترانسفورماتور، در روزنانس اول خطایی را نشان می‌دهد. مرجع [۱۳] به محاسبهٔ امپدانس‌های سیم-پیچ‌های ترانسفورماتور خشک با در نظرگرفتن تلفات وابسته به فرکانس هسته آهنی پرداخته و روشی جدید مبتنی بر شرایط مرزی امپدانس سطحی ارائه می‌کند. در این مقاله نشان داده شده است که امپدانس‌ها به طور قابل توجهی از جریان‌های گردابی در یوغ‌ها تأثیر می‌پذیرند. مقالهٔ [۸] نیز یک مدار معادل جدید برای محاسبهٔ گذراهای رزونانسی با در نظر گرفتن تلفات وابسته به فرکانس را مورد بررسی قرار می‌دهد. این مقاله از ایدهٔ مدارهای فاستر سری جهت ایجاد امپدانس‌های وابسته به فرکانس و روش برازنده کردن بردار برای تقریب نسبی ماتریس امپدانس استفاده می‌کند. مرجع [۱۶] مدل‌سازی جعبه خاکستری را جهت مطالعهٔ حالت‌های گذرای سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور قدرت مورد بررسی قرار داده و پارامترهای آن را با تطبیق تابع تبدیل ریاضی و پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده از پایانه، بدست آورده است.

استفاده از مدل‌های اجزای محدود جهت تحلیل مستقیم حالت‌های گذرا [۱۷]، تحلیل پاسخ فرکانسی [۱۰و۱۸] و تشخیص خطاهای سیم‌پیچ‌ها [۱۹] در ترانسفورماتورها، پیش‌تر در مراجع مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. روش اجزای محدود قطعاً روشی با دقتی بسیار بالاست که می‌تواند برای مدل‌سازی حالت‌های گذرای فرکانس بالا و تحلیل پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گیرد. برای حصول دقت بالا در این روش در فرکانس‌های بالا، لازم است که عایق و هادی با دقت بسیار بیشتری نسبت به فرکانس‌های پایین مدل شوند. درعین‌حال برای دستیابی به‌دقت کافی، هسته و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور نیز می‌بایست سه بعدی مدل شوند. در عمل و به‌دلیل محدودیت‌های سیستم کامپیوتری، چنین کاری ممکن نیست و مدل‌سازی سه‌بعدی

ترانسفورماتور، سبب کاهش دقت مدل‌سازی هادی و عایق می‌شود. درعین‌حال به دلیل خطا در محاسبهٔ تلفات جریان‌های گردابی، عملاً مدل‌های با هادی‌های مجتمع، با خطای بسیار بزرگی به خصوص در فرکانس‌های بالا مواجه هستند. برای رفع این مشکل، می‌بایست تلفات (مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها) و خازن‌های موازی مرتبط با فرکانس‌های بالا، را جداگانه محاسبه و به‌صورت یک مدار خارجی با مدل اجزای محدود با میدان تزویج کرد (روش تزویج میدان- مدار). مدل‌های دو و سه‌بعدی اجزای محدود تزویج شده به مدارهای الکتریکی در [۲۰ و ۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. روش تزویج میدان- مدار برای مدل‌سازی فرکانس بالای سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور نیز در[۱۸ و ۲۲] به کار گرفته شده است. البته در این مقاله به دلیل عدم مدل‌سازی دقیق تک‌تک هادی‌ها، رفتار اهمی سیم‌پیچی به صورت دقیق مدل نشده است که می‌تواند خطای بزرگی را به محاسبات تحمیل نماید. در [۲۲ و ۲۳] این روش برای تحلیل خطاهای داخلی و تغییر شکل‌پذیری سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد استفاده قرار گرفته است.

رفتارهای حرارتی و الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چند سیم پیچه کششی در مقاله‌های متفاوتی [۱ و ۲۴] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مرجع [۲۵] روشی جدید را جهت محاسبهٔ تلفات سیم‌پیچ‌های این ترانسفورماتور ارائه کرده است. پیش‌تر تعدادی مدار معادل نیز برای شبیه‌سازی رفتار فرکانس پائین ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی ارائه شده‌اند [۲۶-۲۸]، مرجع [۲۴]، مدارهای معادل خطی و غیرخطی جدیدی را مبتنی بر اندوکتانس‌های نشتی جهت مدل‌سازی رفتار ترانسفورماتور کششی مورد بحث در این مقاله، ارائه کرده است. یک روش دقیق مبتنی بر تزویج میدان-مدار نیز جهت مدل‌سازی فرکانس پایین ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی در [۲۹] ارائه شده است. با وجود چند مطالعهٔ اخیر، مدل جامع و دقیقی جهت بررسی رفتار گذرای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی در فرکانس‌های بالا ارائه نشده است.

با توجه به اهمیت مطالعهٔ حالت‌های گذرای فرکانس بالا چند سیم‌پیچه کششی ترانسفورماتور، در مقالهٔ حاضر ابتدا مدل‌های اجزای محدود دو و سه‌بعدی برای مدل‌سازی الکترومغناطیسی و محاسبهٔ میدان‌های مغناطیسی در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی ارائه شده است. از این مدل‌های اجزای محدود برای مدل‌سازی رفتار مغناطیسی سیم‌پیچ‌ها استفاده شده است و با ادغام و تزویج آن با مدارهای مقاومتی (معادل تلفات اجزای مختلف سیم‌پیچ) و خازنی (معادل با خاصیت عایقی اجزای مختلف سیم‌پیچ) خارجی که یک مدل نردبانی تزویج میدان- مدار را شکل می‌دهند، مدل دقیقی برای شبیه‌سازی رفتار گذرای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور در فرکانس‌های بالا ارائه شده است. برای افزایش دقت مدل‌سازی، خازن برای اجزای مختلف واحدهای سیم‌پیچی توسط روش اجزای محدود محاسبه شده است.

در ادامهٔ مقاله با اعمال موج ضربه به مدل پیشنهادی، پاسخ ضربه در سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج مدل با پاسخ ضربهٔ محاسبه شده توسط یک مدل کامل سه‌بعدی مقایسه و ارزیابی می‌شوند. چنانکه نشان داده شده است، مدل پیشنهادی، روشی بسیار دقیق برای مطالعهٔ رفتارهای گذرای فرکانس بالا در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی است و می‌تواند جایگزین روش‌های موجود شود.

نوآوری‌ها و نقاط قوت مقالهٔ حاضر در مقابل مطالعه‌های پیشین را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ارائهٔ یک مطالعهٔ جامع در خصوص حالت‌های گذرای فرکانس بالا در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه مورد استفاده در سیستم‌های مترو

- ارائه یک مدل دقیق مبتنی بر ادغام *محاسبهٔ* عددی میدان مغناطیسی و مدارهای الکتریکی جهت مطالعهٔ رفتار فرکانس بالای ترانسفورماتور
- مقایسهٔ نتایج روش ارائه شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی کامل ترانسفورماتور به صورت سه بعدی و نیز مدل مشروح جهت تأیید صحت و دقت مدل‌سازی
- به‌کارگیری مدل پیشنهادی جهت مطالعهٔ پاسخ سیستم در مواجهه با موج ضربهٔ اعمالی به ورودی ترانسفورماتور

۲- مدل اجزای محدود برای مدل‌سازی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی

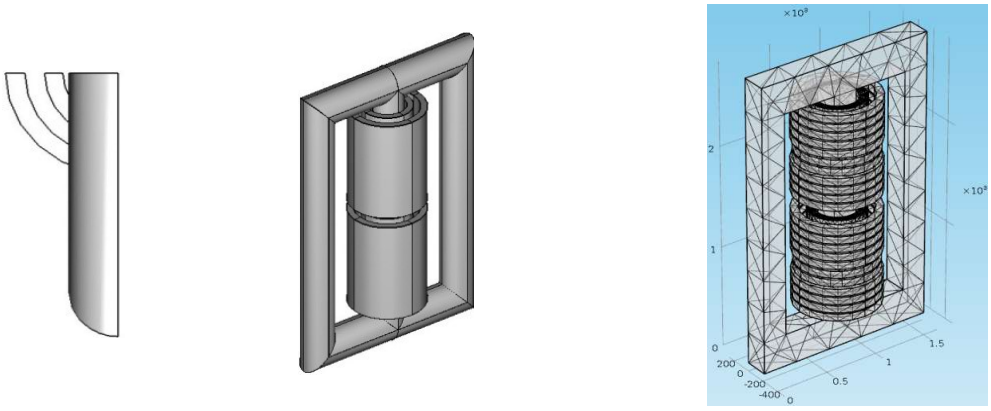
میدان‌های مغناطیسی را می‌توان با استفاده از معادلهٔ پوآسن در رابطهٔ (۱) مدل کرد.

$$\nabla^2 A - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu \cdot J \qquad (۱)$$

که در آن A، J، ε و μ به ترتیب بردار پتانسیل مغناطیسی، چگالی جریان، گذردهی نسبی استاتیک و ضریب نفوذپذیری هستند. در این مقاله برای حل معادلهٔ پواسن و استخراج میدان‌های مغناطیسی در نقاط مختلف ترانسفورماتور، از روش اجزای محدود استفاده شده است.

۲-۱- مدل اجزای محدود سه‌بعدی

مدل‌سازی الکترومغناطیسی یک ترانسفورماتور به صورت سه فاز کاری بسیار زمان‌بر و در بسیاری موارد غیرممکن است. با وجود تقارن در ساختار ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی، می‌توان نشان داد که مدل کردن ترانسفورماتور به صورت تک‌فاز خطای قابل توجهی در محاسبات اتصال کوتاه آن ایجاد نمی‌کند [۲۴ تا ۲۶ و ۲۹]. بنابراین در این مقاله به جای بررسی ترانسفورماتور به صورت سه فاز، آن را به صورت تک‌فاز با ساق برگشتی (شکل ۲) مدل خواهیم کرد. با وجود ساده‌سازی ناشی از تک‌فاز فرض کردن ترانسفورماتور دوطبقه، هنوز حجم محاسبات بسیار زیاد بوده و در مواردی که مدل‌سازی دقیق‌تر سیم‌پیچ‌ها لازم است، شبیه‌سازی مدل سه‌بعدی کامل همگرا نمی‌شود. با دقت در مدل سه فاز به راحتی می‌توان دو محور تقارن یافت (محورهای $\varphi=0$ و $\varphi=\pi/2$). با کمک این محورهای تقارن و اعمال شرط مرزی شار موازی، می‌توان مدل سه‌بعدی یک چهارم را به‌صورت شکل ۲–ب مورد استفاده قرار داد.



(ب) **(الف)**

شکل ۲. مدل‌های اجزای محدود سه‌بعدی الف) کامل و ب) یک چهارم

توجه شود که در مدل سه‌بعدی اجزای محدود برای مطالعهٔ حالت‌های گذرای فرکانس بالا، تمام بخش‌های ترانسفورماتور اعم از عایق، هادی و هسته می‌بایست مدل شده و مشخصات هر بخش از لحاظ مغناطیسی و الکتریکی به صورت دقیق مد نظر قرار گیرد.

۲-۲- مدل اجزای محدود دو بعدی

قطعاً مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق با در نظر گرفتن تمام جزئیات هادی‌ها و عایق‌ها امر مدل‌سازی را بسیار پیچیده می‌کند و در بسیاری مطالعات غیرممکن می‌سازد. بنابراین در بسیاری موارد استفاده از مدل سه‌بعدی سبب می‌شود که امکان مدل‌سازی جزئی‌تر هادی‌ها مقدور نباشد. در بسیاری موارد بهتر است که مدل سه‌بعدی به دو بعدی کاهش یافته و به جای آن دقت مدل‌سازی هادی‌ها افزایش یابد. برای این منظور می‌توان دو مدل دوبعدی را به صورت شکل ۳ ارائه داد.

(ب) (الف)

شکل ۳. مدل اجزای محدود دو بعدی با هسته الف) ساده و ب) معادل [۲۵]

مدل سادهٔ ارائه شده در شکل ۳- الف در بسیاری موارد از دقت کافی برخوردار است اما در شرایط عدم تقارن بارگیری، به سبب مدل‌سازی ساده هسته، خطایی را در محاسبهٔ میدان‌های مغناطیسی شعاعی سبب می‌شود. با وجود دقت بالاتر مدل هسته معادل در شکل ۳-ب در محاسبهٔ میدان‌های مغناطیسی، مدل‌سازی یوغ‌ها و ساق برگشتی در این مدل سبب خطای فاحشی در محاسبهٔ میدان‌های الکتریکی، محاسبهٔ خازن بین سیم‌پیچ‌ها و در نتیجه مدل‌سازی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی می‌شود [۲۱ و ۲۴].

بنابراین زمانی که هدف محاسبهٔ میدان‌های مغناطیسی بدون در نظرگرفتن تأثیر میدان‌های الکتریکی (خازن بین سیم‌پیچ‌ها)، توزیع جریان مرتبط با میدان‌های مغناطیسی (جریان‌های گردابی) و توزیع تلفات سیم‌پیچ‌ها (متناسب با مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها) باشد، بهترین روش، استفاده از مدل اجزای محدود با هسته معادل (شکل ۳-ب) با مدل‌سازی سیم‌پیچ‌ها به‌صورت هادی‌های مجتمع در لایه‌ها و بشقاب‌ها خواهد بود. مشخصات فنی ترانسفورماتور کششی خشک نمونه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ترانسفورماتور کششی نمونه [۲۶]

	$LV_۲$	$LV_۱$	$HV_۲$	$HV_۱$
توان نامی (MVA)	۲	۲	۲	۲
ولتاژ (V)	۷۵۰	۷۵۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰
نوع اتصال	D	Y	D	D
تعداد لایه‌ها	۴	۴	۱	۱
مجراهای محوری (mm)	۲×۱۴ + ۱×۱۲	۳×۱۴	------	------
تعداد بشقاب	۱	۱	۱۱	۱۱
مجراهای شعاعی (mm)	-----	-----	۵×۱۴ + ۴×۱۶ + ۱×۲۸	۵×۱۴ + ۴×۱۶ + ۱×۲۸
ارتفاع (mm)	۹۵۰	۹۵۰	۹۳۲	۹۳۲
قطر داخلی (mm)	۳۷۴	۳۷۵	۶۳۲	۶۳۲
قطر خارجی (mm)	۴۹۸	۴۹۸	۷۶۴	۷۶۴
تعداد دور	۱۵	۲۶	۶۹۳	۶۹۳

۲-۳- محاسبهٔ مقاومت سیم‌پیچ‌ها

۲-۳-۱- مقاومت‌های اهمی واحدهای سیم‌پیچ

تلفات یک هادی در ترانسفورماتور از دو مؤلفهٔ تلفات ثابت و تلفات گردابی تشکیل می‌شود. برخلاف تلفات ثابت، محاسبهٔ تلفات گردابی مستلزم دانستن نحوهٔ توزیع میدان مغناطیسی در سیم‌پیچی‌هاست. تلفات گردابی ناشی از شارهای نشتی در ورق‌های سیم‌پیچی ناچیز است، بااین‌حال به دلیل وجود میدان‌های شعاعی، تلفات گردابی بسیار زیادی در انتهای ورق‌های سیم‌پیچی ایجاد می‌شود. با دانستن شدت میدان مغناطیسی از بخش ۲، توزیع جریان و تلفات در هادی‌های سیم‌پیچی را می‌توان توسط روش‌های مختلفی محاسبه کرد.

روش اجزای محدود خالص (محاسبهٔ هم‌زمان میدان مغناطیسی و تلفات به روش اجزای محدود) جهت محاسبهٔ تلفات همه هادی‌ها، روشی بسیار زمان‌بر و گاهی غیرکاربردی است. در این مقاله برای کاهش زمان مدل‌سازی و افزایش دقت محاسبهٔ تلفات

در هر هادی، از روشی جدید مبتنی بر ادغام روش‌های اجزای محدود و تحلیلی [۲۵] برای محاسبهٔ هر چه دقیق‌تر تلفات هادی‌ها (و در نتیجه مقاومت سیم‌پیچ‌ها) در زمانی مناسب استفاده شده است. این روش شبه عددی، روش اجزای محدود را جهت محاسبهٔ میدان مغناطیسی و روش تحلیلی را جهت محاسبهٔ تلفات سیم‌پیچی‌ها با کمک توزیع میدان‌های مغناطیسی استفاده می‌کند.

در روش شبه عددی [۲۵]، برای محاسبهٔ تلفات به‌صورت زیر عمل می‌شود:

مرحلهٔ اول در مدل‌سازی الکترومغناطیسی ترانسفورماتور، محاسبهٔ جریان سیم‌پیچی‌های آن است. برای محاسبهٔ جریان سیم‌پیچی‌ها در حالت‌های مختلف بارگیری، می‌توان از مدار معادل ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه دوطبقه در [۲۶ و ۲۹] استفاده کرد. با دانستن جریان سیم‌پیچی‌ها (و درنتیجه چگالی جریان هر هادی)، می‌توان توزیع میدان مغناطیسی و سپس تلفات هادی‌ها را در سیم‌پیچی‌ها محاسبه کرد.

با دانستن توزیع جریان در سیم‌پیچ‌ها، توزیع میدان مغناطیسی در نقاط مختلف سیم‌پیچی‌ها با کمک مدل یکپارچه اجزای محدود دوبعدی [۲۴ و ۲۵] (مدل‌سازی هر لایه یا بشقاب به‌صورت یکپارچه و نه دورها به‌تنهایی) با دقت بسیار بالایی محاسبه می‌شود. با توجه به عدم مدل‌سازی جزئی تک‌تک هادی‌ها، قطعاً سرعت محاسبهٔ میدان مغناطیسی بسیار بالا خواهد بود.

با به دست آوردن توزیع میدان مغناطیسی در اطراف هر هادی، ضریب تلفات گردابی در هر هادی توسط روابط تحلیلی [۱ و ۲۵] محاسبه می‌شود.

بدیهی است که چنین روش ترکیبی، به دلیل عدم نیاز به مدل‌سازی جزئی سیم‌پیچی‌ها در روش اجزای محدود و درعین‌حال محاسبهٔ تلفات هر هادی به‌صورت مجزا در روش تحلیلی، می‌تواند دقتی بسیار بالا و زمان بسیار پایینی را برای واحدهای سیم‌پیچی به همراه داشته باشد.

توجه شود که مقاومت معادل اهمی متناظر تلفات را به‌راحتی می‌توان از رابطهٔ RI^2 محاسبه کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک روش اجزای محدود برای مقادیر مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌ها (R_s) در جدول‌های ۲ الی ۳ نشان داده شده است.

جدول۲. نتایج مقاومت اهمی بوبین LV برحسب میکرواهم (μ Ω) در فرکانس ۵۰ هرتز

	مقاومت اهمی LV_1	مقاومت اهمی LV_2
لایه‌ها	۲۶۰/۲۳	۷۵۷/۱۲۷
	۲۴۰/۱۴۰	۶۹۵/۵۴۵
	۲۱۹/۷۷۷	۵۴۵/۰۰۶
	۱۵۰/۰۸۵	۴۹۹/۴۷۹

جدول۳. نتایج مقاومت اهمی بوبین HV برحسب میلی اهم (mΩ) در فرکانس ۵۰ هرتز

دیسک‌ها	مقاومت اهمی HV_1	مقاومت اهمی HV_2
۱	۲۳/۲۹	۲۳/۲۹۶
۵-٤-۳-۲	۲۲/۹۱۶	۲۲/۹۱۶
۷-٦	۱۶/۶۰۹	۱۶/۶۰۹
۱۱-۱۰-۹-۸	۲۲/۹۱۶	۲۲/۹۱۶

۲-۳-۲- مقاومت عایقی واحدهای سیم‌پیچ

در [۳۰ و ۳۱] مدل وابسته به فرکانس مقاومت عایقی با رابطهٔ (۲) بیان شده است:

$$R_i = \frac{1}{\tan\delta \times 2\pi f C_i} \propto \frac{1}{f} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ بالا از وابستگی $\tan\delta$ و خازن C_i به فرکانس صرفنظر شده است. همان‌طور که دیده می‌شود مقاومت عایقی سیم‌پیچ ترانسفورماتور با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد.

۲-٤- محاسبهٔ خازن‌های سیم‌پیچ‌ها با کمک مدل‌سازی میدان‌های الکترواستاتیک

برای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی، خازن‌های میان اولین دور سیم‌پیچ فشارضعیف و هسته، خازن میان دورهای فشارضعیف، خازن میان آخرین دور سیم‌پیچ فشارضعیف و اولین دور بشقاب‌های سیم‌پیچ فشارقوی و خازن سری معادل هر بشقاب باید محاسبه شوند. در این مقاله خازن‌های بین صفحات سیم‌پیچ فشارضعیف و همچنین خازن بین صفحات سیم‌پیچ فشارقوی توسط روش اجزای محدود محاسبه و با روش تحلیلی سنتی (رابطهٔ خازن صفحه‌ای [۱۰]) مقایسه شده‌اند. این در حالی است که برای بدست آوردن خازن میان آخرین دور فشارضعیف و اولین دور فشارقوی تنها می‌توان از روش اجزای محدود استفاده کرد. در این مقاله از مدل اجزای محدود ارائه شده در شکل ۴ برای مدل‌سازی الکترواستاتیکی و میدان‌های الکتریکی در ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی استفاده شده است.

(ب) **(الف)**

شکل ٤. مدل اجزای محدود به منظور مدل‌سازی الکترواستاتیکی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی برای محاسبهٔ خازن‌های الف) خازن میان آخرین دور LV_1 و اولین دور HV_2 ب) خازن میان آخرین دور LV_2 و اولین دور HV_2

برای محاسبهٔ ضرایب خازنی یک سیستم شامل n هادی به روش انرژی [۱۰] به تعداد $\frac{n!}{2\times(n-2)!}$ (انتخاب ۲ از n) بار محاسبه نیاز خواهد بود که مستلزم صرف بسیار زیاد زمان می‌باشد. در این مقاله، از روشی بر پایهٔ محاسبهٔ بارهای الکتریکی در هر هادی جهت محاسبهٔ خازن‌ها استفاده شده است که سبب کاهش تعداد محاسبات می‌شود.

با اعمال ولتاژ V_i به هادی iام (بقیه ولتاژها برابر صفر) و محاسبهٔ میدان الکتریکی توسط روش اجزای محدود، می‌توان بار الکتریکی روی هر هادی را به دست آورد [۳۲]. با محاسبهٔ بار همه هادی‌ها (با تعداد n) و تشکیل بردار بارهای الکتریکی ($\boldsymbol{Q}$)، ستون iام ماتریس خازنی ($\boldsymbol{C}$) به صورت (۳) به دست می‌آید.

$$[C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni}]^T = Q/V_i \quad (۳)$$

برای محاسبهٔ همهٔ ستون‌های ماتریس، این روال برای تک‌تک هادی‌ها اجرا می‌شود. به‌این‌ترتیب برای تعیین ماتریس خازنی تنها به n دفعه مدل‌سازی و محاسبه نیاز می‌باشد. جدول‌های ۴ تا ۷ نتایج محاسبهٔ خازن‌های نمونه را به روش تحلیلی و روش اجزای محدود نشان می‌دهند. سایر خازن‌ها نیز به همین ترتیب بدست می‌آیند.

جدول٤. نتایج خازن دورLV و هسته(زمین) بر حسب پیکوفاراد(PF)

روش تحلیلی	روش اجزای محدود	خازن اولین دور LV
۳۳۳	۳۹۹/۷	LV_1
۳۳۸/۷	۴۰۴/۹	LV_2

جدول ۵. نتایج خازن بین دورهای LV برحسب نانوفاراد(nF)

شماره لایه‌ها		۱	۲	۳	٤
	LV_1	۱۱۲	۱۲۲	۱۳۳	۲۱۵
	LV_2	۵۶	۶۱	۸۰/۴	۸۶/۱
	LV_1	۱۰۲/۶	۱۰۲/۶	۱۰۲/۶	۱۸۳
	LV_2	۵۱/۲	۵۱/۲	۶۱/۴	۶۱/۴

جدول ٦. نتایج نمونه خازن آخرین دور LV_1 و اولین دور دیسک‌های HV_1 برحسب پیکو فاراد(pF)

	دیسک‌های HV_1										
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
آخرین لایه LV_1	۲۳/۶	۲۰	۱۹/۸	۱۹/۹	۱۹/۹	۲۱	۲۱	۱۹/۹	۱۹/۹	۱۹/۷	۲۱/۲

جدول ۷. نتایج نمونه خازن بین دورهای HV_1 برحسب نانوفاراد(nF)

دیسک‌ها	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
روش اجزای محدود	۰/۸۳۳	۰/۹۲۷	۰/۹۲۷	۰/۹۲۷	۰/۹۲۷	۳/۳۳۳	۳/۳۳۳	۰/۹۲۷	۰/۹۲۷	۰/۹۲۷	۰/۸۳۳
روش تحلیلی	۰/۷۷۴	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۳/۱۳۸	۳/۰۸۲	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۱/۰۵۰	۰/۷۷۴

۳- مدل نردبانی تزویج میدان-مدار برای مدل‌سازی رفتار الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی

همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره شد مدل‌سازی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی با دقت بالا از طریق مدل اجزای محدود سه‌بعدی با جزئیات کافی، ممکن نیست. در مدل‌سازی هستهٔ ساده (شکل ۳ الف) میدان‌های مغناطیسی شعاعی در این نوع از ترانسفورماتورها با دقت مناسبی مدل نمی‌شوند. درعین‌حال برای مدل‌سازی میدان‌های الکتریکی، مدل با هسته معادل نمی‌تواند قابل استفاده باشد؛ در این مدل ساق برگشتی معادل یک الکترود استوانه‌ای عمل کرده و سبب بروز خطای فاحشی در محاسبات الکتریکی خواهد شد.

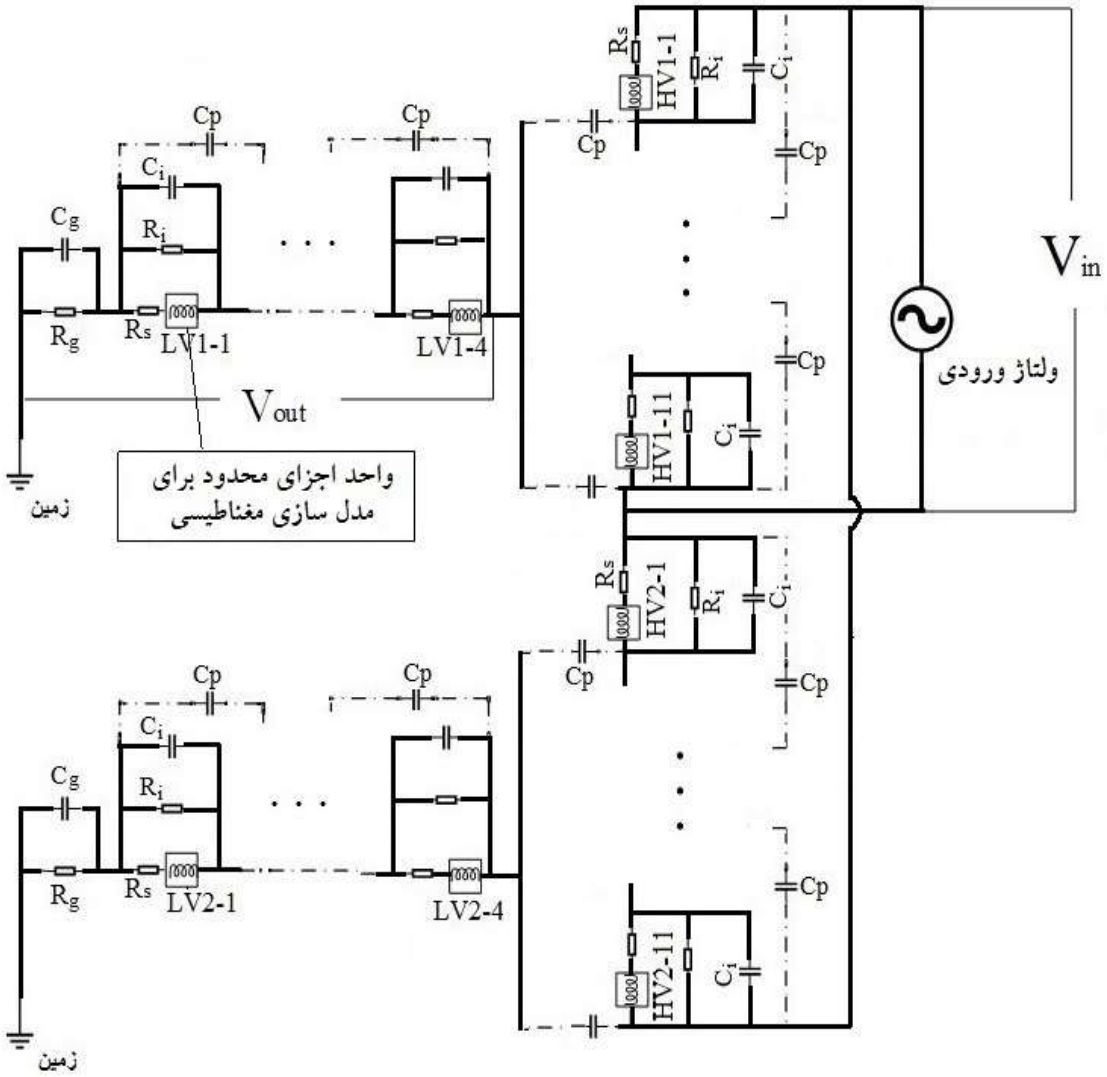
از طرف دیگر در بسیاری موارد مدل‌سازی سه‌بعدی به صورت کامل و دقیق ممکن نیست و در بهترین شرایط تنها با ساده‌سازی مدل و یکپارچه مدل سیم‌پیچی‌ها می‌توان به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی کرد که این مسئله خود سبب بروز خطای بسیار بالایی در محاسبات می‌شود.

ضمناً توجه شود که مدل‌سازی رفتار اهمی سیم‌پیچی‌ها به صورت دقیق نیز نیاز به مدل‌سازی کامل هادی‌ها دارد که این مسئله در مدل‌سازی حالت‌های گذرای فرکانس بالا امری نشدنی است.

برای رفع این مشکل در روش اجزای محدود، در این مقاله از میدان‌ها و مشخصات الکتریکی سیم‌پیچی‌ها و مواد مختلف صرف‌نظر شده است و صرفاً مدل‌سازی میدان‌های مغناطیسی انجام خواهد شد. برای این منظور از مدل هسته معادل در شکل ۳-ب استفاده شده که بشقاب‌ها و لایه‌ها به صورت واحدهای حامل جریان مدل می‌شوند. بدیهی است در محاسبهٔ میدان‌های مغناطیسی نیاز چندانی به مدل‌سازی کامل و جز به جز هادی‌ها نمی‌باشد. البته برای جلوگیری از بروز خطا در محاسبات به دلیل برقراری جریان-های گردابی، هدایت الکتریکی واحدهای حامل جریان برابر صفر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه هدایت الکتریکی سیم‌پیچی‌ها حذف شده، رفتار اهمی آن‌ها در این مدل قابل مطالعه نمی‌باشد.

برای وارد کردن اثر میدان‌های الکترواستاتیکی و خاصیت اهمی سیم‌پیچی‌ها در مطالعهٔ حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور، از مقاومت‌های سری و خازن‌های سری موازی که به صورت مدارهای خارجی به مدل اجزای محدود مغناطیسی اعمال شده‌اند، استفاده می‌شود.

شکل ۵ را در نظر بگیرید که در آن واحدهای حامل جریان لایه و بشقاب در سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و فشارقوی با یکدیگر سری شده و پایانه‌های ترانسفورماتور را ایجاد می‌کنند.



شکل ۵. مدل تزویج میدان مدار نردبانی برای ترانسفورماتور کششی نمونه

دیده می‌شود که هر واحد حامل جریان شامل یک اندوکتانس یا واحد مغناطیسی می‌باشد. این واحدهای مغناطیسی همان مدل اجزای محدود جهت مدل‌سازی میدان‌های مغناطیسی می‌باشند که قطعاً بین این واحدهای مغناطیسی تزویج وجود خواهد داشت. مقاومت‌های سری نیز خاصیت اهمی هر واحد حامل جریان (لایه و بشقاب) را نشان می‌دهند که روش محاسبهٔ آن‌ها در قسمت قبل ارائه شده است. روش محاسبهٔ خازن‌های سری و موازی در هر واحد که توصیف کننده رفتار میدان‌های الکترواستاتیکی می‌باشند، در بخش قبل توضیح داده شده است. همان‌طوری‌که در قسمت قبل نیز دیده شد، علاوه بر خازن‌های سری که خازن بین دو واحد مجاور می‌باشند، خازن‌هایی نیز بین آخرین لایه‌های سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف و بشقاب‌های سیم‌پیچی‌های فشارقوی وجود دارد که در شکل مشخص شده‌اند.

لازم به ذکر است که از خازن بین سیم‌پیچی‌های فشار ضعیف بالا و پایین صرف‌نظر شده است. در این روش به جای اعمال یک جریان خارجی ثابت به مدل اجزای محدود دو بعدی، این جریان از طریق یک مدار خارجی مشابه شکل ۶ به مدل اعمال می‌شود.

روش تزویج میدان–مدار می‌تواند با دقت بسیار بالایی رفتار ترانسفورماتور را به خصوص در حالت‌های گذرا مدل کند قبلاً روش مشابهی بدون خازن‌گذاری و به‌صورت یکپارچه جهت مدل‌سازی فرکانس پایین ترانسفورماتور چند سیم‌پیچی کششی مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال با توجه به عدم وجود یک مدل فرکانس بالا برای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچی کششی، در این مقاله برای اولین بار یک مدل مبتنی بر روش تزویج میدان–مدار نردبانی جهت مدل‌سازی حالت‌های گذرای فرکانس بالا در این ترانسفورماتور ارائه شده است.

معادلات مدارهای خارجی به صورت ماتریسی مطابق (۴) قابل توصیف است:

$$[V] = [E_W] + [R][I] + \left[\frac{1}{C_m}\right]\int [I]\,dt \qquad (۴)$$

که در R و C ماتریس‌های مقاومت و خازن خارجی می‌باشند. I، V و E_W نیز بردارهای جریان، ولتاژ داخلی و ولتاژ تحریک واحدهای سیم‌پیچی هستند.

رابطه‌ی (۵) ولتاژ تحریک هر واحد سیم‌پیچی در رابطهٔ ۴ را به صورت انتگرال بردار پتانسیل مغناطیسی در روی سطح واحدهای سیم‌پیچی تعریف می‌کند:

$$dsE(t) = \frac{2\pi rN}{S_w}\int \frac{dA}{dt} \qquad (۵)$$

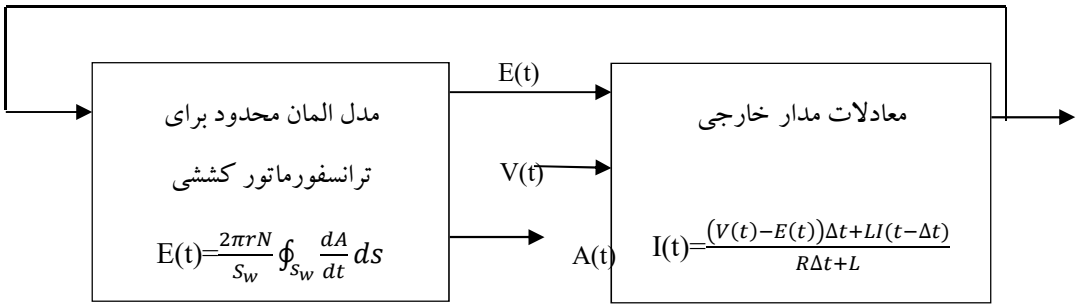
که r شعاع، N تعداد دور و S_w سطح مقطع واحد سیم‌پیچی می‌باشند. با ترکیب دو رابطهٔ (۴) و (۵)، رابطهٔ ماتریسی اساسی برای توصیف روش ارائه شده تزویج میدان مدار به دست می‌آید [۲۹]:

$$\begin{bmatrix}0 & 0\\ G & L\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{A}_R\\ \dot{I}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}K & D\\ 0 & R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A_R\\ I\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ V\end{bmatrix} \qquad (۶)$$

$$\begin{bmatrix}K & D\\ D^T & -L-\frac{R\Delta t}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}A\\ I\end{bmatrix}_{m+1} = \begin{bmatrix}-\mathrm{K} & \mathrm{D}\\ \mathrm{D^T} & \mathrm{L}-\frac{\mathrm{R}\Delta\mathrm{t}}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{A}\\ -\mathrm{I}\end{bmatrix}_{\mathrm{m}} + \begin{bmatrix}0\\ -\frac{\mathrm{V_m}+\mathrm{V_{m+1}}}{2}\Delta\mathrm{t}\end{bmatrix} \qquad (۷)$$

که در آن $[V]$ بردار ولتاژهای ورودی، $[R]$ و $[L]$ ماتریس مقاومت‌ها و اندوکتانس‌ها می‌باشند. همچنین ماتریس‌های $[K]$، $[D]$ و $[G]$ به مشخصات ساختاری سیم‌پیچ‌ها بستگی دارند [۲۱و ۲۹].

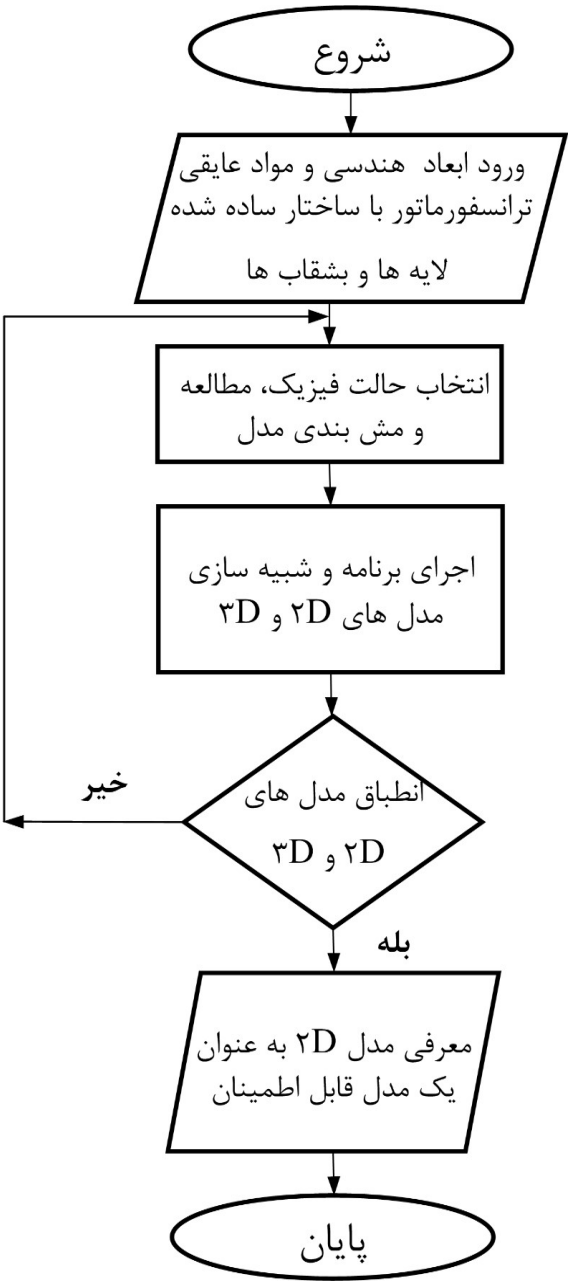
بنابراین چنانکه در شکل ۶ دیده می‌شود، در روش تزویج میدان- مدار ارائه شده، جریانی که از طریق معادلهٔ ماتریسی بالا و در گام زمانی قبلی محاسبه شده است، به عنوان تحریک به مدل اجزای محدود مغناطیسی اعمال و مجدداً بردار پتانسیل مغناطیسی و بردارهای جریان برای گام زمانی بعدی محاسبه می‌شوند.



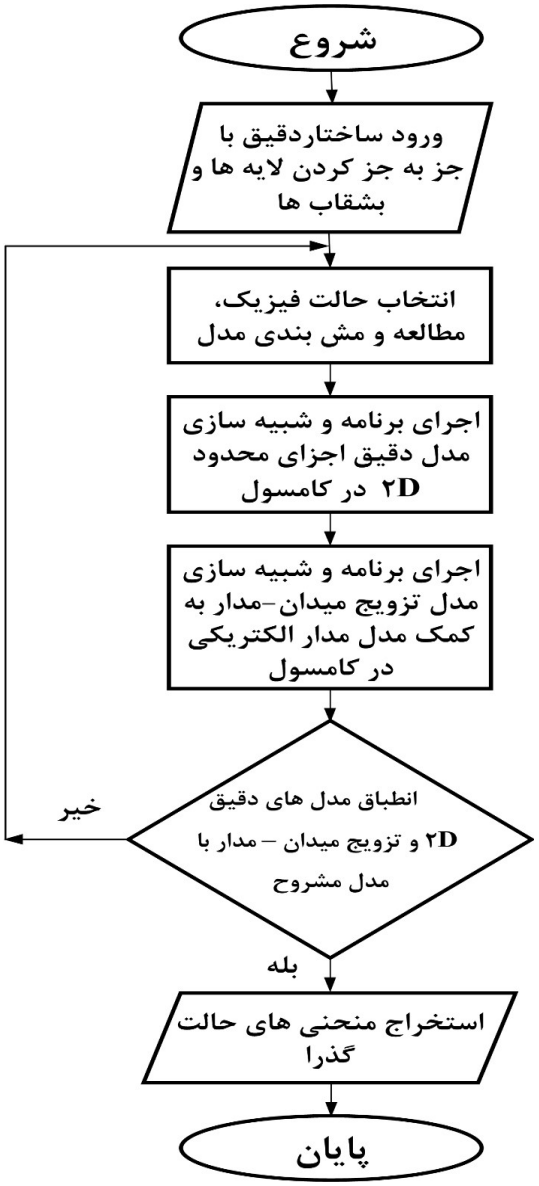
شکل ٦. شمای کلی تحلیل به روش تزویج میدان–مدار

٤- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله از روش تزویج میدان-مدار برای مدل‌سازی حالت‌های گذرای فرکانس بالای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی استفاده می‌شود. برای این منظور مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی اجزای محدود به کار گرفته شده است. شکل‌های ۷ و ۸ به‌ترتیب روندنمای (فلوچارت) مدل‌سازی حالت‌های گذرای فرکانس بالای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی جهت اعتبار سنجی مدل های اجزای محدود و تزویج میدان- مدار ارائه شده را نشان می‌دهد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی در حالت‌های مختلف ارائه می‌شود. گام تحلیل و شبیه‌سازی نیز ۰/۱۴۲ میکروثانیه انتخاب شده است.



شکل۷. شمای کلی روندنمای (فلوچارت) اعتبارسنجی مدل‌های اجزای محدود

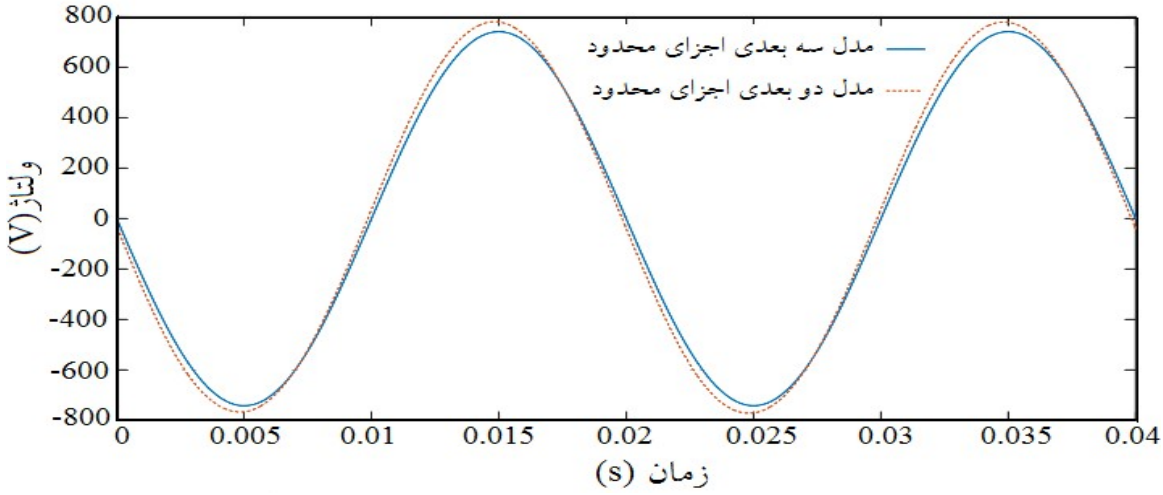


شکل۸. شمای کلی روندنمای (فلوچارت) مدل تزویج میدان- مدار

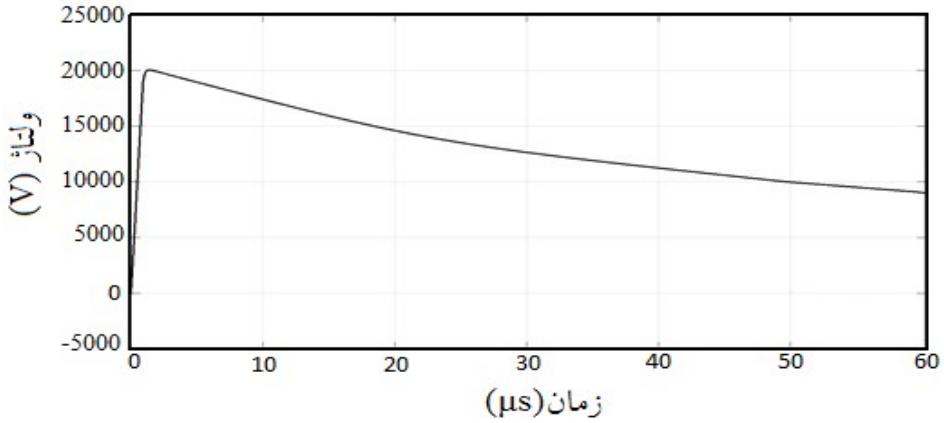
٤-١- اعتبارسنجی مدل‌های اجزای محدود

مدل‌سازی کامل ترانسفورماتور به صورت سه‌بعدی در محیط اجزای محدود در عمل بسیار زمان‌بر و در بسیاری موارد ناممکن است [۲۴ تا ۲۶ و ۲۸]. بنابراین در این بخش ساختار ترانسفورماتور مورد مطالعه تا حد امکان ساده و از مدل‌سازی تک‌تک دورها و لایه‌ها به صورت مجزا صرف‌نظر شده است. لازم به ذکر است که نتایج مدل‌سازی در این ساختار ساده شده از دقت کافی برخوردار نبوده و صرفاً جهت اعتبارسنجی مدل اجزای محدود دوبعدی در مقابل مدل سه‌بعدی استفاده می‌شود. لذا با اعمال ولتاژ نامی مطابق مشخصات فنی موجود در جدول ۱ و همچنین ولتاژ ضربهٔ استاندارد به پایانهٔ ورودی (Vin)، ولتاژ خروجی نمونه‌گیری

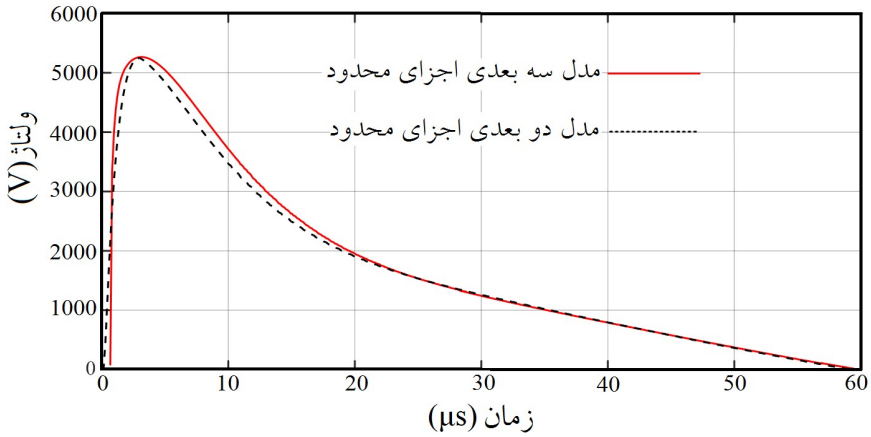
شده از پایانهٔ خروجی (Vout) نشان داده شده در شکل ۵ بدست می‌آید. برای این منظور، نتایج مقایسهٔ مدل‌های سه‌بعدی و دوبعدی برای تحلیل رفتار فرکانس پایین و فرکانس بالای ترانسفورماتور به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل۹ نتایج پاسخ فرکانس پایین، حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی



(الف)



(ب)

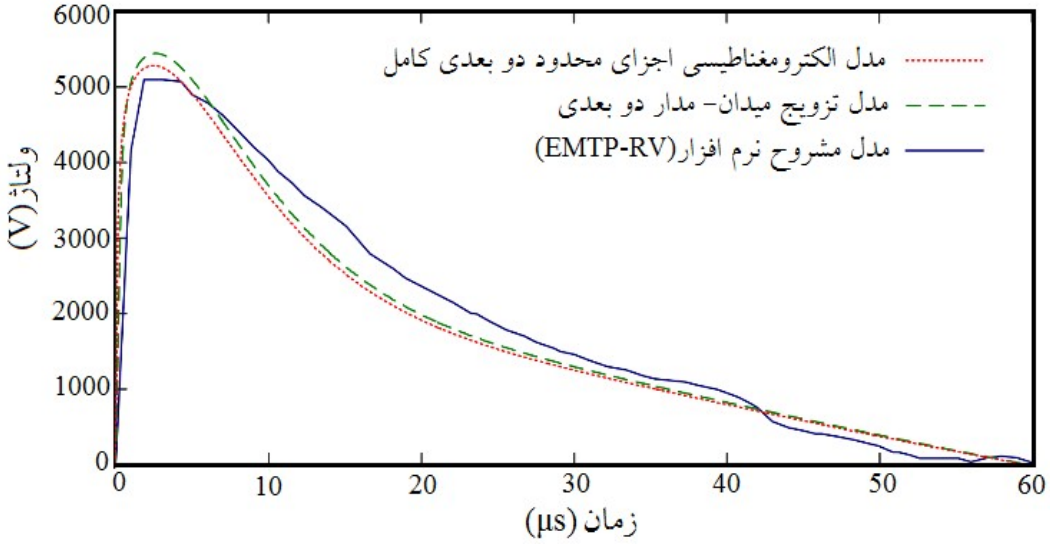
شکل۱۰. تحلیل فرکانس بالا، الف) شکل موج ضربهٔ استاندارد اعمالی به ترانسفورماتور، ب) نتایج خروجی حاصل از مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی

مقایسه‌ی نتایج در شکل های۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که منحنی‌های بدست آمده از مدل دوبعدی با دقت کافی بر منحنی‌های حاصل از مدل سه‌بعدی منطبق است. بنابراین می‌توان از مدل دوبعدی با هسته معادل برای مدل‌سازی ترانسفورماتور مورد مطالعه با ساختار کامل جهت بررسی حالت‌های گذرای فرکانس پایین و بالا استفاده کرد.

٤-۲- اعتبارسنجی مدل تزویج میدان-مدار ارائه شده

در بخش قبل برای تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی و مقایسهٔ نتایج تحلیل دو بعدی با آن، از ساختار ساده شده ترانسفورماتور کششی بهره برده شد. بااین‌حال برای دست آوردن نتایج دقیق‌تر در این بخش، از مدل اجزای محدود دو بعدی که در بخش قبل تأیید شد، استفاده شده است. لذا در این بخش تک‌تک لایه‌ها در سیم‌پیچ فشارضعیف و بشقاب‌ها در سیم‌پیچ فشارقوی مدل‌شده‌اند. با توجه به اینکه در مدل‌سازی اجزای محدود امکان مدل‌سازی تک‌تک هادی‌ها جهت مطالعهٔ دقیق‌تر رفتار اهمی سیم‌پیچ‌ها امکان‌پذیر نیست از اینرو، از هدایت الکتریکی واحدهای سیم‌پیچی صرف‌نظر شده و رفتار اهمی سیم‌پیچ‌ها با یک مقاومت خارجی مدل شده‌است.

در شکل ۱۱ نتایج حاصل از مدل تزویج میدان-مدار در محدودهٔ فرکانس بالا ارائه و با نتایج اجزای محدود خالص دوبعدی مقایسه شده است، همچنین برای نشان دادن کارایی بهتر مدل تزویج میدان-مدار برای مدل‌سازی فرکانس بالای ترانسفورماتور چند سیم پیچه کششی نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از مدل مشروح [۳۳] در شکل ۱۱ مقایسه شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که روش ارائه شده به خوبی توانسته است رفتار گذرای فرکانس بالای ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی را مدل نماید.



شکل ۱۱. نتایج مدل‌سازی حالت گذرای فرکانس بالای ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه کششی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار مدل‌سازی رفتار ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی در حالت‌های گذرای فرکانس بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمن ارائهٔ مدل‌های اجزای محدود، روش تزویج میدان- مدار جهت مدل‌سازی ترانسفورماتور چند

سیم‌پیچه کششی معرفی شده است. روش ارائه شده، از مدل‌های اجزای محدود دوبعدی به همراه تزویج آن با یک مدار خارجی جهت مدل‌سازی رفتار گذرای الکترومغناطیسی ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی استفاده می‌کند.

در ادامهٔ مقاله، ضمن مقایسه نتایج مدل‌های اجزای محدود دو و سه‌بعدی، نتایج حاصل از مدل تزویج میدان- مدار ارائه شده با نتایج بدست آمده از یک مدل اجزای محدود خالص و نیز مدل مشروح ترانسفورماتور کششی مقایسه و اعتبار روش ارائه شده تأیید شده است.

همان‌طور که نشان داده شد، مدل ارائه شده نه تنها ساده و سریع است، بلکه با دقت بالایی می‌تواند جهت مدل‌سازی رفتار گذرای فرکانس بالا در ترانسفورماتور کششی به کار گرفته شود. با توجه به قابلیت مدل و سرعت و دقت مطلوب آن، روش تزویج میدان – مدار ارائه شده می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در مطالعهٔ رفتار ترانسفورماتور کششی و تحلیل پاسخ فرکانسی آن مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] D. Azizian, “Windings Temperature Prediction in Split-Winding Traction Transformer”, Turkish Journal of Electrical engineering & Computer Sciences, vol. 24, no. 4, pp. 3011-3022, 2016.

[2] P. A. Abetti, “Transformer Models for the Determination of Transient Voltages”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol.72, No. 2, pp 468-480, 1953.

[3] T. J. Lewis, “The transient behavior of ladder networks of the type representing transformer and machine windings”, Proceedings of the IEEE - Part II: Power Engineering, vol. 101, no.2, pp. 541-553, 1954.

[4] Ebrahim Rahimpour, Jochen Christian, Kurt Feser, “Transfer Function Method to Diagnose Axial Displacement and Radial Deformation of Transformer Windings” IEEE Transactions on power delivery, Vol. 18, no. 2, pp.493_505, 2003.

[5] B. M. Dent, E. R. Hartill and J. G. Miles, “A method of analysis of transformer impulse voltage distribution using a digital computer”, Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, vol. 105, no. 23, pp. 445-459, 1958.

[6] M. Bigdeli, E. Rahimpor and M. Khatibi, “Transient-state modeling of distribution transformers”, International Review on Modelling and Simulations, vol. 4, no. 1, pp. 295-302, February 2011.

[7] M. Eslamian, B. Vahidi and S. H. Hosseinian, “Transient simulation of cast-resin dry-type transformers using FEM”, European Transactions on Electrical Power, vol. 21, no. 1, pp. 363-379, January 2011.

[8] M. Eslamian and B. Vahidi, “New Equivalent Circuit of Transformer Winding for the Calculation of Resonance Transients Considering Frequency-Dependent Losses”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1743-1751, August 2015.

[9] S. M. Hassan Hosseini, Peyman Rezaei Baravati, “New High Frequency Multi-conductor Transmission Line Detailed Model of Transformer Winding for PD Study”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 24, no. 1, Feb. 2017.

[10] M. Eslamian, B. Vahidi and S. H. Hosseinian, “Analytical calculation of detailed model parameters of cast resin dry-type transformers“, Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 7, pp. 2565-2574, July 2011.

[11] M. Eslamian, B. Vahidi and S. H. Hosseinian, “Combined analytical and FEM methods for parameters calculation of detailed model for dry-type transformer”, Simulation, Modeling Practice and Theory, vol. 18, no. 3, pp. 390-403, March 2010.

[12] M. Eslamian, B. Vahidi and “New Methods for Computation of the Inductance Matrix of Transformer Windings for Very Fast Transients Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery, vo. 27, no. 4, pp. 2326-2333, October 2012.

[13] M. Eslamian and B. Vahidi, “Computation of Self-impedance and Mutual Impedance of Transformer Winding Considering the Frequency-dependent Losses of the Iron Core”, Electric Power Components and Systems, May 2016.

[14] A. Wilk, J. Nieznanski, I. Moson, P. Dobrowolski, G. Kostro, “Nonlinear Equivalent Circuit Model of a Traction Transformer for Winding Internal Fault Diagnostic Purposes", International Conference on Electrical Machines, Portugal, 2008.

[15] M. Bigdeli and M. Valii, D. Azizian, "Applying Intelligent Optimization Algorithms for Evaluation of Transformer Black Box Model," 6th International Conference on Soft Computing Applications, At Timisoara, Romania, 2014.

[16] R. Aghmasheh, V. Rashtchi, and E. Rahimpour, "Gray Box Modeling of Power Transformer Windings for Transient Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 32, pp. 2350- 2359, 2017.

[17] M. Gunawardana, F. Fattal, B. Kordi, " Very Fast Transient Analysis of Transformer Winding Using Axial Multiconductor Transmission Line Theory and Finite Element Method", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 34, NO. 5 , pp. 1948- 1956, 2019.

[18] G. B. Kumbhar and S. V. Kulkarni, "A Directly Coupled Field-Circuit Model of a Transformer to Study Surge Phenomena and for Frequency Response Analysis", 18st National Power Systems Conference (NPSC), india, 2014.

[19] S. Liu, H. Li and F. Lin, "Diagnosis of Transformer Windig Faults based on Fem Simulation and On-site Experiments", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 6; pp.3752- 3760, December 2016.

[20] H. Wan, Q. Yang, Y. Li, J. Wang, D. Yuan, M. Hu, " Electromagnetic Characteristic Calculation of Several Parallel Coils for High Current Transformer Based on Field-Circuit Coupling Method", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol 29, No. 2, 2019.

[21] G.B. Kumbhar, S.V. Kulkarni, Analysis of short-circuit performance of split-winding transformer using coupled field-circuit approach, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 22, no. 2, pp. 936-943, 2007.

[22] G.B. Kumbhar, S.V. Kulkarni, Analysis of sympathetic inrush phenomena in transformers using coupled field-circuit approach, IEEE Power Engineering Society General Meeting, USA, 2007.

[23] G. Hu, X. Wu, F. Long and S. Wu, "A 3D-Coupled Field-Circuit Model for Analyzing the Internal Short-Circuit Faults of Power Transformer" 2st International Conference on Mechatronics and Automatic Control, Switzerland, 2015.

[24] D. Azizian, M. Vakilian, J. Faiz and M. Bigdeli, "Calculating Leakage Inductances of Split-Windings in Dry-Type Traction Transformers", ECTI Transaction EEC, vol. 10, no.1, pp.99-106, 2012.

[۲۵] د. عزیزیان و گ .قره‌پتیان، "محاسبه تلفات سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی با کمک یک روش شبه عددی"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، پذیرفته شده درخرداد ماه ۱۳۹۷.

[26] D. Azizian, M. Vakilian and J. Faiz, "New Multi-Winding Traction Transformer Equivalent Circuit for Short-Circuit Performance Analysis", Transaction on Electrical Energy Systems, vol. 24, no. 2, pp. 186-202, 2014.

[27] J. E. Hayek and T. J. Sobczyk, "Analytic one-dimensional design method for railways traction transformers", IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, vol. 3, pp. 1760-1765, USA, 2003.

[28] J. E. Hayek and T. J. Sobczyk, "Equivalent circuit of multi-windings traction transformers including magnetizing currents", Eighth International Conference on Electrical Machines and systems (ICEMS), vol. 3, pp. 1740-1745, China, 2005.

[29] D. Azizian, “Nonlinear Behavior Analysis of Split-Winding Dry-Type Transformer Using a New Star Model and a Coupled Field-Circuit Approach”, Archives of Electrical Engineering, 2016.

[30] J. Ahour, S. Seyedtabaie, G. B. Gharehpetian, “ Modified transformer winding ladder network model to assess non-dominant frequencies”, IET Electric Power Applications, Vol. 11 , Issue: 4 , 2017.

[31] A .Fouineau, M. Raulet, B .Lefebvre1, N .Burais and F. Sixdenier, “Semi-Analytical Methods for Calculation of Leakage Inductance and Frequency-Dependent Resistance of Windings in Transformers”, IEEE Transaction on Magnetics, PP(99):1-10, August 2018.

[۳۲] ح. محسنی، ‘‘مبانی مهندسی فشارقوی’’، صفحهٔ ۲۵-۶۱، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم ۱۳۸۹.

[۳۳] ج. خوئینی، ‘‘استخراج مدار معادل فرکانس بالا ترانسفورماتور چند سیم‌پیچه کششی’’، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد دامغان، زمستان ۱۳۹۵.