

شبیه‌سازی مدار تست ضربه ترانسفورماتور و بهینه‌سازی پارامترهای ژنراتور ضربه با الگوریتم ژنتیک

علی‌اصغر آقایی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ حسن رضا میرزایی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - a.ghaie@znu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران - hr.mirzaei@znu.ac.ir

چکیده: برخورد صاعقه به سیستم‌های قدرت موجب ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای با دامنه زیاد و مدت‌زمان بسیار کوتاه در آن‌ها می‌شود که به ولتاژ ضربه صاعقه موسوم هستند. در آزمایشگاه‌های کنترل کیفی کارخانجات سازنده ترانسفورماتور جهت اطمینان از کیفیت سیستم عایقی ترانسفورماتور در تحمل چنین ولتاژهایی، به کمک یک ژنراتور ضربه ولتاژی با شکل موج مشابه تولید کرده و به ترانسفورماتور اعمال می‌کنند. با توجه به نقش تعیین‌کننده پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور در شکل موج تولید شده توسط ژنراتور ضربه و همچنین متفاوت بودن پاسخ فرکانسی ترانسفورماتورهای با طراحی‌های مختلف، یکی از چالش‌های مهم، تولید شکل موج ضربه استاندارد مطابق با الزامات قید شده در استاندارد IEC60060-1 می‌باشد. در آزمایشگاه‌های فشارقوی معمولاً با تغییر تجربی مقادیر مقاومت‌های سری و موازی ژنراتور ضربه و دیگر پارامترهای آن، به شکل موج ضربه استاندارد دست می‌یابند. با این وجود در برخی از ترانسفورماتورهای خاص به کمک این رویه تجربی که همراه با سعی و خطا بوده و زمان‌بر است، شکل موج ضربه استاندارد بدست نمی‌آید. برای حل این مشکلات، در این مقاله یک روش مدل‌سازی دقیق برای مدار تست ضربه ترانسفورماتور ارائه شده و مقادیر بهینه مقاومت‌های ژنراتور ضربه توسط الگوریتم ژنتیک تعیین شده‌اند. سپس نتایج مدل‌سازی به کمک تست‌های تجربی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ولتاژ ضربه صاعقه، ژنراتور ضربه، ترانسفورماتور، شکل موج استاندارد، الگوریتم ژنتیک.

Simulation of Transformer Impulse Test Circuit and Optimization of Impulse Generator Setup Using Genetic Algorithm

Ali Asghar Aghaie¹, MSc Student; Hasan Reza Mirzaei², Assistant Professor

1- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: a.ghaie@znu.ac.ir
2- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: hr.mirzaei@znu.ac.ir

Abstract: The lightning strikes create fast and high amplitude transient over-voltages in power systems which are called lightning impulse voltages. To ensure the quality of the insulation system of the transformer to deal with such over-voltages, at quality control high voltage test fields of manufacturers, similar voltages are produced by an Impulse Generator and applied to the transformer. Since frequency response of the transformer has a decisive role in the generated voltage waveform and given that the frequency responses of transformers with different designs are different, a main challenge in this field is to produce an impulse waveform with specifications specified in IEC60060-1. In high voltage test fields using an empirical method, the parameters of the impulse generator such as series and parallel resistors are set to achieve a standard impulse wave shape. This try and error empirical method is time consuming and besides, the standard wave shape cannot be achieved in some special design transformers. To overcome these problems, a precise simulation method for transformer impulse test circuit is provided in this paper and the genetic algorithm is adopted to determine the optimum values of impulse generator resistors. Finally, the simulation results are validated using the experimental works.

Keywords: Lightning Impulse Voltage, Impulse Generator, Transformer, Standard waveform, Genetic Algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

نام نویسنده مسئول: حسن رضا میرزایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در محدوده‌ی فرکانسی مورد ارزیابی کافی نبوده و باید مدل مناسبی از امپدانس آن ارائه شود.

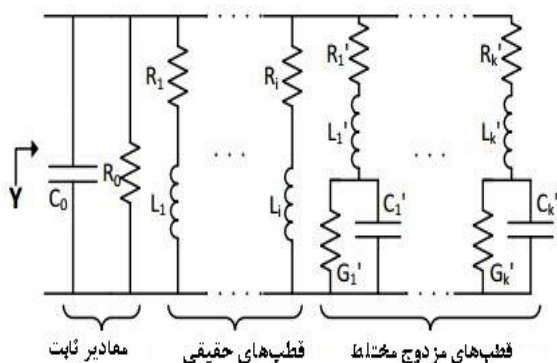
مطالعات زیادی برای مدل‌سازی ترانسفورماتور انجام شده است [۷]، [۸]. برای رفع این مشکل، می‌توان امپدانس دقیق ترانسفورماتور را در یک بازه فرکانسی وسیع‌تر تا حدود ۱ مگاهرتز با استفاده از روش‌های آنالیز پاسخ فرکانسی (FRA) [۹]، آنالیز المان محدود [۱۰] و روش‌های تحلیلی مبتنی بر ساختار فیزیکی [۱۱] محاسبه نمود. در مراجع [۱۲]، [۱۳] استخراج مدل مداری برای ترانسفورماتور جهت استفاده در برنامه‌های شبیه‌سازی گذرهای الکترومغناطیسی (EMTP) ارائه شده است. با توجه به کارکرد و بازه فرکانسی موردنظر، مدل‌ها و مدارهای معادل متنوعی را می‌توان برای ترانسفورماتور تعریف کرد [۱۴]، [۱۵]. به عنوان مثال در مراجع [۱۶-۱۸] پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور به صورت مدل فضای حالت ماتریس ادمیتانس مطابق با رابطه ۱ ارائه شده است:

$$Y(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + s e \quad (1)$$

با جایگذاری $s = j\omega$ در رابطه ۱ خواهیم داشت:

$$Y(j\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{j\omega - a_n} + d + j\omega e \quad (2)$$

به کمک این روابط، یک مدار معادل مطابق با شکل ۱ می‌توان برای ترانسفورماتور به دست آورد. مقادیر المان‌های این مدار معادل به کمک ضرایب رابطه ۲ قابل حصول است.



شکل ۱: ادمیتانس دیده‌شده از دو سر سیم‌پیچ ترانسفورماتور [۱۲]

در [۱۹] با کمک مدار معادل شکل ۱ و حل آن در نرم‌افزار SPICE اقدام به شبیه‌سازی مدار تست ضربه شده است. با توجه به پیچیدگی و زمان‌بر بودن این روش مدل‌سازی، در مقاله حاضر از روش مبتنی بر تابع تبدیل ترانسفورماتور در حوزه لاپلاس استفاده شده است. هدف اصلی از این مقاله، یافتن مقادیر مقاومت‌های ژنراتور ضربه جهت حصول شکل موج استاندارد به صورت اتوماتیک است. جهت نیل به این هدف اقدام به تعیین تابع تبدیل ترانسفورماتور در نرم‌افزار متلب و شبیه‌سازی مدار تست ضربه با استفاده از توابع برنامه‌نویسی و بدون نیاز به اجرا در محیط سیمولینک آن شده است.

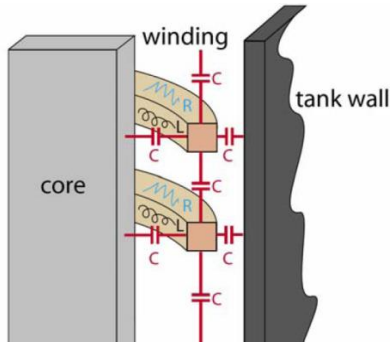
مطالعه‌ی اختلال‌های گذرا ناشی از صاعقه و کلیدزنی در سیستم انتقال نشان داده است که برخورد صاعقه با خطوط انتقال می‌تواند موجب ایجاد ولتاژهایی در رنج ۱۰۰۰ kV شده و جریان‌هایی به آن‌ها تزریق کند که بزرگی آن‌ها می‌تواند به ۱۰۰ kA برسد [۱]، [۲].

با توجه به ماهیت احتمالی وقوع صاعقه، تجهیزات سیستم قدرت همواره در معرض ولتاژهای ناگهانی با دامنه زیاد قرار دارند. این اضافه ولتاژها عامل شکست عایقی در اکثر تجهیزات الکتریکی سیستم قدرت هستند. لزوم پیوستگی در تأمین انرژی ایجاب می‌کند که مکانیزم عایقی تجهیزات الکتریکی دارای استقامت کافی در برابر اضافه ولتاژهای ناگهانی جهت جلوگیری از شکست عایقی نامتعارف باشند. به منظور تشخیص صحت طراحی و کیفیت ساختار عایقی تجهیزات الکتریکی، تست‌های عایقی به صورت روتین بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد [۲]. ولتاژ ضربه یکی از تست‌های مهم و شناخته‌شده در تست‌های عایقی روتین می‌باشد. هدف از انجام این تست تعیین استقامت عایقی تجهیز است که صاعقه به آن برخورد می‌کند [۳-۵].

طبق داده‌های ثبت‌شده از صاعقه‌های طبیعی، شکل موج ولتاژ ضربه صاعقه استاندارد از جمع دو شکل موج نمایی با زمان پیشانی موج ۱۲ μs و نیم‌زمان پشت موج ۵۰ μs تعریف شده است. در آزمایشگاه فشار قوی به کمک یک ژنراتور ضربه، شکل موج ولتاژ ضربه استاندارد را تولید و به تجهیز تحت تست (DUT) اعمال می‌کنند تا از تحمل عایقی آن در برابر ولتاژهای ضربه اطمینان حاصل نمایند. به‌طور معمول یک ژنراتور ضربه شامل چندین پله بوده و هر پله دارای دو مقاومت مختلف برای کنترل زمان پیشانی موج و نیم‌زمان پشت موج است. با انتخاب مقادیر بهینه برای این مقاومت‌ها، شکل موج ولتاژ ضربه مطلوب و منطبق بر الزامات استاندارد به دست می‌آید [۶]. در روش‌های موجود برای محاسبه مقادیر این مقاومت‌ها از روش‌های تحلیلی که برای مدل‌های ساده ژنراتور ضربه مناسب می‌باشند، استفاده شده است [۱].

امپدانس تجهیز فشارقوی تحت تست به‌عنوان بخشی از مدار تست ضربه یک پارامتر مهم محسوب می‌شود. امپدانس برخی از تجهیزات فشار قوی مثل بوشینگ‌ها را می‌توان به صورت یک امپدانس خازنی خالص مدل نمود و به کمک پل اندازه‌گیری مقدار ظرفیت خازنی آنها را اندازه‌گیری کرد. از این‌رو فرض می‌شود که ژنراتور ضربه به یک بار خازنی متصل است و با توجه به این موضوع و روابط شناخته‌شده موجود، مقدار مقاومت‌های ژنراتور ضربه محاسبه می‌شوند [۱]، [۲]. سپس با تنظیم مقادیر به دست آمده برای مقاومت‌های ژنراتور ضربه شکل موج ولتاژ ضربه استاندارد تولید خواهد شد. با این حال، اگر تجهیز تحت تست یک ترانسفورماتور باشد، با مدل‌سازی آن به صورت یک خازن خالص، تطبیق مناسبی بین شکل موج ولتاژ ضربه محاسبه شده و ولتاژ ضربه مطلوب حاصل نمی‌شود. این موضوع ناشی از آن است که تعریف امپدانس ترانسفورماتور همانند یک امپدانس خازنی خالص

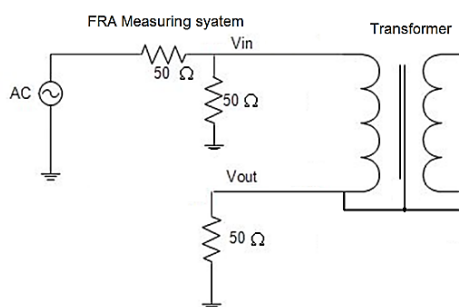
سیم‌پیچ خواهد شد [۲۰]. به‌عنوان مثال یک مدل الکتریکی فرکانس بالای سیم‌پیچ ترانسفورماتور در شکل ۳ نمایش داده شده است [۲۱].



شکل ۳: مدل الکتریکی فرکانس بالای سیم‌پیچ ترانسفورماتور [۲۱]

۳-۲- مدار تست اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی

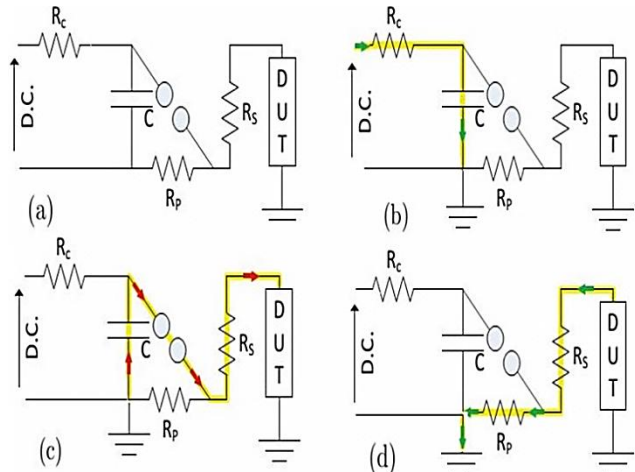
مدارها و اتصالات متفاوتی جهت انجام تست FRA و اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ ترانسفورماتور وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های متفاوت سیم‌پیچ یا هسته ترانسفورماتور را توصیف می‌کنند [۲۲-۲۴]. با توجه به اینکه هدف از اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور استفاده از آن در شبیه‌سازی مدار تست ضربه است، بایستی اتصالات ترانسفورماتور مشابه با اتصالات آن در تست ضربه باشد. طبق پیشنهاد استاندارد IEC60076-3، در تست ضربه به جز ترمینال تحت تست، همه ترمینال‌های دیگر آن اتصال کوتاه شده و به زمین وصل می‌شوند. لذا ولتاژ ضربه اعمالی به دو سر سیم‌پیچ متصل به ترمینال تحت تست اعمال می‌شود. از این رو در تست FRA طبق شکل ۴ از مدار پاسخ فرکانسی با اتصال ولتاژ انتها به انتهای اتصال کوتاه طبق [۲۴] استفاده شده است که در آن همه ترمینال‌ها به جز ترمینال تحت تست به یکدیگر وصل شده و تست FRA از دو سر سیم‌پیچ تحت تست انجام شده است. لازم به توضیح است که مطابق با شکل ۴، دستگاه اندازه‌گیری FRA، به کمک یک منبع ولتاژ AC با فرکانس متغیر سیم‌پیچ ترانسفورماتور را تحریک کرده و همزمان ولتاژ ترمینال‌های ورودی و خروجی آن را اندازه‌گیری می‌نماید. به منظور جبران‌سازی اثر کابل‌های دستگاه اندازه‌گیری FRA، از مقاومت‌های ۵۰ اهم در داخل این دستگاه استفاده شده است. با استفاده از ولتاژهای اندازه‌گیری شده ی ترمینال‌های ورودی و خروجی سیم‌پیچ، پاسخ فرکانسی به صورت روابط ۳ و ۴ به دست می‌آید.



شکل ۴: شماتیک مدار اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی

۲- ژنراتور ضربه

به کمک مدار شکل ۲-a می‌توان شکل موج ولتاژ ضربه صاعقه ایجاد کرد. این مدار، شامل یک خازن با ظرفیت بالا (C)، مقاومت شارژینگ با مقدار بزرگ (R_C)، مقاومت پیشانی موج (R_S)، مقاومت پشت موج (R_P)، یک جفت گوی فشار قوی و تجهیز تحت تست (Z_{DUT}) است.



شکل ۲: (a) مدار ژنراتور ضربه مارکس؛ (b) شارژ خازن از طریق مقاومت شارژ؛ (c) تخلیه بار الکتریکی ذخیره‌شده بر روی خازن بروی ظرفیت خازنی تجهیز تحت تست؛ (d) تخلیه بار الکتریکی خازن تجهیز تحت تست به زمین

اساس کار این ژنراتور بدین‌گونه است که ابتدا خازن C از طریق مقاومت R_C شارژ می‌شود (شکل ۲-b). با توجه به اینکه جفت گوی در ابتدا از یکدیگر عایق هستند، بار این خازن قادر به تخلیه در تجهیز تحت تست نمی‌باشد. سپس با ایجاد قوس در جفت گوی فشارقوی و برقراری اتصال الکتریکی بین آن‌ها، بار الکتریکی ذخیره‌شده در خازن C در امپدانس تجهیز تحت تست (Z_{DUT}) از طریق مقاومت پیشانی موج R_S تخلیه شده و قسمت پیشانی شکل موج ایجاد می‌شود (شکل ۲-c). سپس در مرحله دوم و پس از تکمیل شارژ ظرفیت خازنی موجود در امپدانس تجهیز تحت تست، بار الکتریکی موجود در این دو خازن به‌طور همزمان از طریق مقاومت پشت موج R_P تخلیه شده و قسمت پشت شکل موج تشکیل می‌شود (شکل ۲-d).

۳- مدل‌سازی ترانسفورماتور به عنوان تجهیز تحت تست

در این تحقیق، تجهیز تحت تست، یک ترانسفورماتور بوده و از تست FRA برای استخراج پاسخ فرکانسی سیم‌پیچ آن استفاده شده است.

۳-۱- مدار معادل سیم‌پیچ ترانسفورماتور

در ساختار سیم‌پیچ یک ترانسفورماتور، المان‌های مداری متفاوتی همانند سلف، خازن و مقاومت وجود دارند که به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل هستند. نحوه اتصال این المان‌ها و مقادیر آن‌ها موجب ایجاد رزونانس و آنتی‌رزونانس‌های متعددی در پاسخ فرکانسی

که در آن Z_{DUT} پاسخ فرکانسی امیدانس سیم‌پیچ ترانسفورماتور است. پاسخ فرکانسی این امیدانس را می‌توان با استفاده از پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده و رابطه ۶ استخراج نمود:

$$Z_{DUT} = \frac{V_{in}}{V_{out}} \cdot 50 - 50 \quad (7)$$

با تعریف:

$$|H| = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| \quad (8)$$

$$\angle H = \frac{\angle V_{out}}{\angle V_{in}} \quad (9)$$

$$H = |H| e^{j\angle H} \quad (10)$$

پاسخ فرکانسی امیدانس ترانسفورماتور به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$Z_{DUT} = 50 \left(\frac{1}{|H| e^{j\angle H}} - 1 \right) \quad (11)$$

۳-۲-۳- تخمین تابع تبدیل امیدانس در حوزه لاپلاس

در روش پیشنهادی برای تخمین تابع تبدیل امیدانس سیم‌پیچ ترانسفورماتور در حوزه لاپلاس با استفاده از پاسخ فرکانسی بدست آمده آن، از یک تابع گویا به صورت رابطه ۱۲ استفاده شده است که در آن $N(s)$ و $Q(s)$ دو چندجمله‌ای برحسب s می‌باشند. درجه چندجمله‌ای صورت و مخرج، به ترتیب بیانگر تعداد صفر و قطب در نظر گرفته شده برای تابع تبدیل است.

$$Z_{DUT}(s) = \frac{N(s)}{Q(s)} \quad (12)$$

ضرایب چندجمله‌ای صورت و مخرج تابع تبدیل سیم‌پیچ ترانسفورماتور با استفاده از الگوریتم تخمین گر محاسبه خواهند شد. الگوریتم تخمین گر استفاده شده جهت استخراج تابع تبدیل ترانسفورماتور در یک فرایند تکرار به گونه‌ای ضرایب چندجمله‌ای را تغییر داده و بهینه می‌کند که با قرار دادن $j\omega$ به جای s ، منحنی پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده و تابع تبدیل تخمینی سیم‌پیچ با کمترین خطا بر یکدیگر منطبق می‌شوند [۲۵]. این الگوریتم تخمین گر به صورت کد دستوری tfest در نرم‌افزار متلب گنجانده شده و قابل استفاده است.

به کمک نتایج FRA اندازه‌گیری شده (شکل ۵) و رابطه ۱۱ پاسخ فرکانسی امیدانس سیم‌پیچ در حوزه فرکانس محاسبه شده و پس از اعمال به تابع تخمین گر فوق، تابع تبدیل امیدانس سیم‌پیچ در حوزه لاپلاس تعیین گردید. در شکل ۶ پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده امیدانس سیم‌پیچ و تابع تبدیل تخمین زده شده آن در حوزه فرکانس رسم شده‌اند. مشاهده می‌گردد که الگوریتم تخمین گر توانسته است با دقت بسیار زیادی امیدانس ترانسفورماتور را مدل کند.

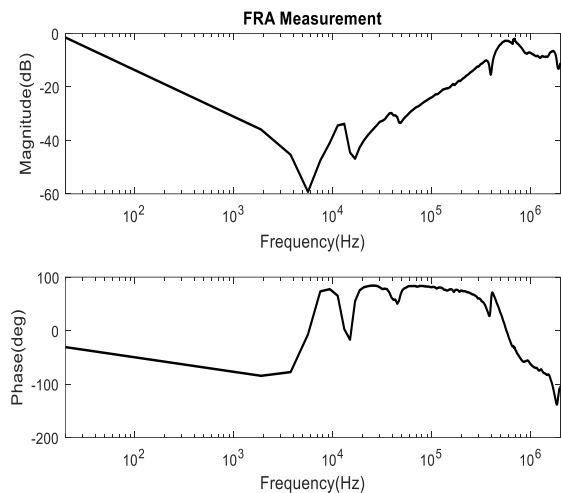
$$|FRA_{ee}|_{dB} = 20 \log \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| \quad (3)$$

$$\angle FRA_{ee} = \angle \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4)$$

در رابطه ۳، $|FRA_{ee}|_{dB}$ نشان‌دهنده‌ی اندازه نسبت ولتاژ خروجی به ورودی برحسب دسی‌بل و در رابطه ۴، $\angle FRA_{ee}$ نسبت فاز ولتاژ خروجی به ورودی را نشان می‌دهد.

۳-۳- تخمین تابع تبدیل ترانسفورماتور

در این بخش به بررسی نحوه تعیین و استخراج تابع تبدیل امیدانس سیم‌پیچ ترانسفورماتور در حوزه لاپلاس به کمک نتایج تست FRA پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا با انجام یک تست FRA در آزمایشگاه فشارقوی بر روی سیم‌پیچ فشارقوی یک ترانسفورماتور قدرت 100 MVA ، $230\text{ kV}/66\text{ kV}$ با آرایش مداری شکل ۴، داده‌های آن در بازه فرکانسی 20 Hz تا 2 MHz ثبت شده و از نتایج حاصل از آن برای تشریح بهتر مباحث مطرح شده استفاده می‌شود. شکل ۵ پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵: نتایج اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور قدرت 100 MVA ، $230\text{ kV}/66\text{ kV}$

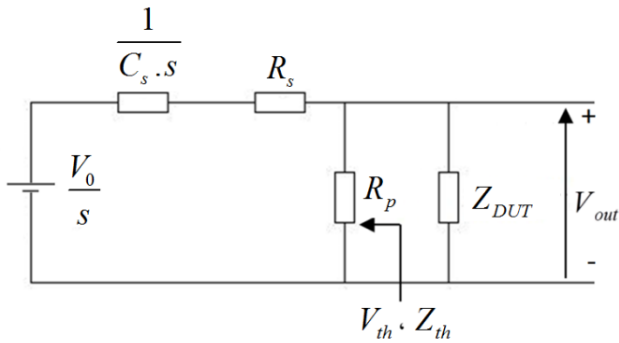
۳-۳-۱- تعیین پاسخ فرکانسی امیدانس سیم‌پیچ ترانسفورماتور

با استفاده از پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده (شکل ۵) و روابط ۳ و ۴ نسبت ولتاژ خروجی به ورودی محاسبه می‌شود:

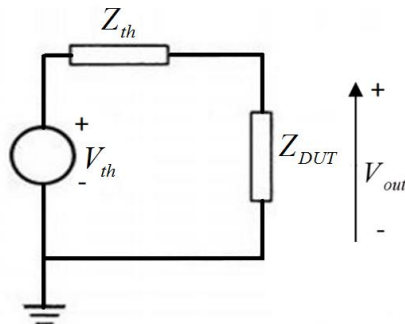
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 10^{\frac{|FRA_{ee}|}{20}} e^{j\angle FRA_{ee}} \quad (5)$$

از شکل ۴ این‌گونه استنباط می‌شود که:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{50}{50 + Z_{DUT}} \quad (6)$$



شکل ۸: شماتیک مدار تست ضربه در حوزه لاپلاس



شکل ۹: مدل مداری ساده شده شکل ۹

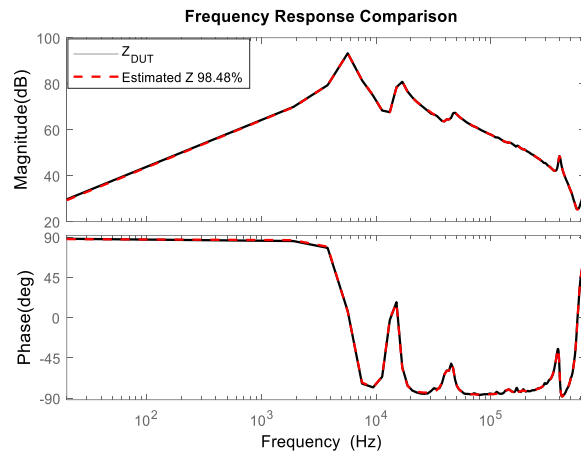
در مدار شکل ۹، ولتاژ خروجی ضربه مشاهده شده در دو سر سیم پیچ ترانسفورماتور از رابطه ۱۵ قابل محاسبه است.

$$V_{out} = \frac{Z_{DUT}}{Z_{th} + Z_{DUT}} \times V_{th} \quad (15)$$

۲-۴-۲- اعتبارسنجی روش پیشنهادی

۱-۲-۴-۱- انجام تست عملی

به منظور برآورد دقت روش شبیه‌سازی پیشنهادی در تخمین شکل موج ضربه ترانسفورماتور، دو تست تجربی در آزمایشگاه فشارقوی شرکت ایران ترانسفو انجام گردید. در این تست‌ها با اتصال یک ژنراتور ضربه تک پله ولتاژ پایین تجاری، مدل RIG-500، به یک ترانسفورماتور توزیع با مشخصات $33kV/400kV$ ، $750kVA$ ، Dyn، مداری مطابق با شکل ۷ تدارک دیده شده و شکل موج حاصل توسط یک اسیلوسکوپ دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری $100MSam/Sec$ ثبت شد. تصویری از نحوه انجام تست در شکل ۱۰ آورده شده است. در این تست عملی برای پایین نگه داشتن مقادیر خازن‌ها و اندوکتانس‌های پارازیت مدار تست، تجهیزات نزدیک به هم قرار داده شد تا طول سیم‌های اتصال تا حد امکان کوتاه گردد.



شکل ۶: پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده امیدانس سیم پیچ و تابع تبدیل تخمین زده شده آن

۴-۱- شبیه‌سازی کامل مدار تست ضربه

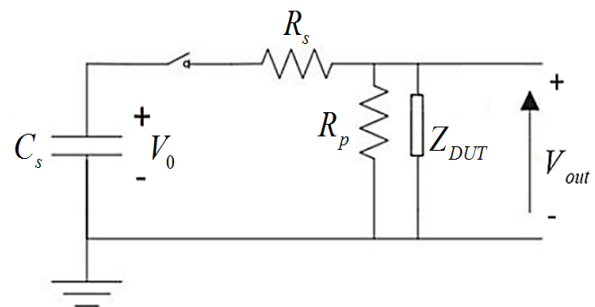
۱-۴-۱- استخراج روابط مداری

جهت انجام تست ضربه از یک ژنراتور ضربه تک پله طبق شکل ۷ استفاده شده است. در این شکل، V_0 ولتاژ شارژ اولیه خازن C_s ، Z_{DUT} امیدانس سیم پیچ و کلید، مدل کننده جفت گوی ژنراتور ضربه است. با رسم مجدد این مدار در حوزه لاپلاس و مدل کردن ترکیب کلید و شارژ اولیه خازن به صورت یک منبع ولتاژ پله با دامنه V_0 ، مدار شکل ۸ حاصل می‌شود.

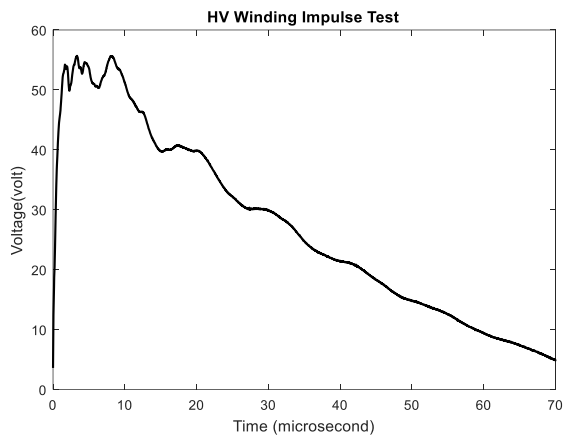
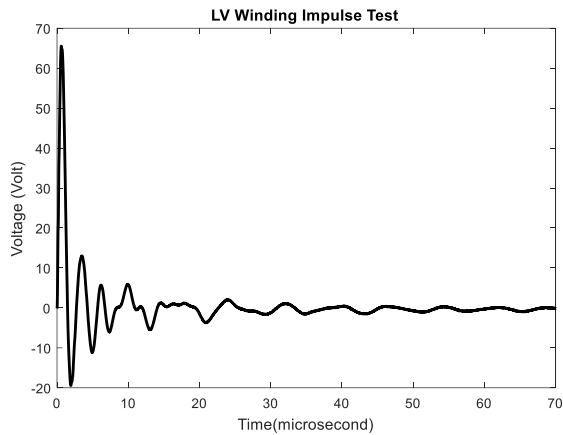
با تعیین مدار معادل تونن از سر امیدانس Z_{DUT} (طبق شکل ۸)، روابط ۱۳ و ۱۴ بدست آمده و مدار شکل ۸ به صورت مدار شکل ۹ ساده‌سازی می‌شود.

$$Z_{th} = R_p \parallel \left(R_s + \frac{1}{C_s \cdot s} \right) = \frac{R_p R_s C_s \cdot s + R_p}{(R_p + R_s) C_s \cdot s + 1} \quad (13)$$

$$V_{th} = \frac{R_p C_s}{(R_p + R_s) C_s \cdot s + 1} V_0 \quad (14)$$



شکل ۷: شماتیک مدار تست ضربه در حوزه زمان



شکل ۱۱: شکل موج ضربه خروجی حاصل از تست عملی بر روی سیم- پیچ فشار ضعیف (شکل بالا) و سیم‌پیچ فشارقوی (شکل پایین)



شکل ۱۰: انجام تست عملی بر روی یک ترانسفورماتور توزیع با استفاده از ژنراتور ضربه تک‌پله ولتاژ پایین

با تنظیم مقادیر پارامترهای ژنراتور ضربه طبق جدول ۱، سیم‌پیچ‌های فشار ضعیف و فشار قوی مورد تست قرار گرفت. شکل موج‌های ضربه خروجی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

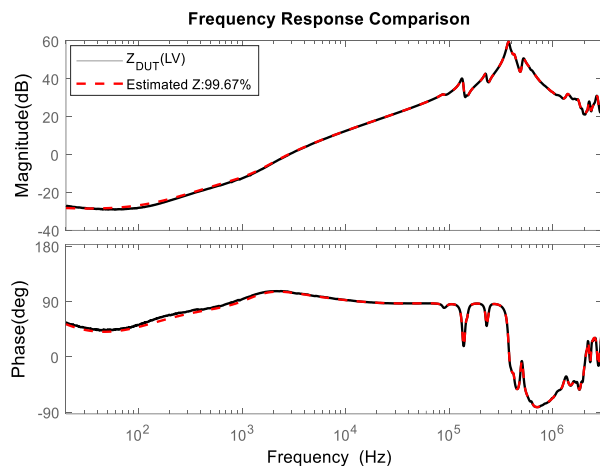
جدول ۱: تنظیم پارامترهای ژنراتور ضربه

مقدار عددی	نام پارامتر	سیم‌پیچ تحت تست
۳۳۰ Ω	R_s	فشار ضعیف
۱۰ kΩ	R_p	
۳۳۰ nF	C_s	
۱۰۰ Ω	R_s	فشار قوی
۱۵۰۰ Ω	R_p	
۱۰۰۰ nF	C_s	

۴-۲-۲-اعتبارسنجی روش پیشنهادی در تخمین شکل

موج ضربه خروجی

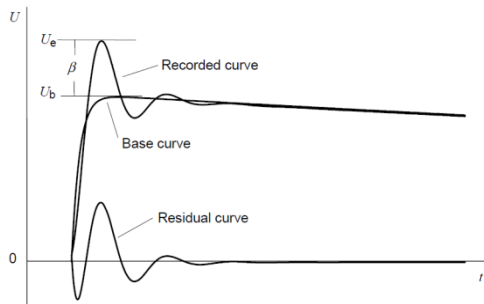
به منظور شبیه‌سازی شکل موج ضربه ترانسفورماتور ابتدا طبق روال ذکر شده در بخش ۳ و مداری مطابق شکل ۴، پاسخ فرکانسی امیدانس سیم‌پیچ‌های فشار قوی و فشار ضعیف به کمک تست FRA اندازه‌گیری و سپس به کمک نرم‌افزار متلب تابع تبدیل آنها در حوزه لاپلاس با دقت بالایی تخمین زده شد که نتایج آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. نهایتاً با اعمال روش ارائه شده در بخش استخراج روابط مداری، شکل موج ضربه خروجی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل در شکل ۱۴ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که این شکل موج‌ها با دقت بسیار بالایی بر شکل موج‌های اندازه‌گیری انطباق دارند. بدین ترتیب، با تطبیق نتایج عملی و شبیه‌سازی شده میزان اعتبار روش پیشنهادی به اثبات می‌رسد.



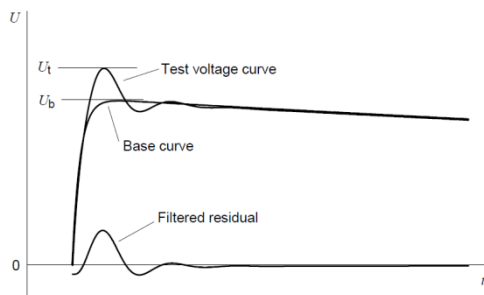
شکل ۱۲: مقایسه امیدانس تخمینی سیم‌پیچ فشار ضعیف ترانسفورماتور توزیع و امیدانس اندازه‌گیری شده

۵- استخراج مشخصه‌های شکل موج ولتاژ ضربه

طبق استاندارد IEC60060-1 و شکل ۱۵، برای استخراج پارامترهای شکل موج ضربه، ابتدا یک شکل موج دو‌نمایی^۶ بر شکل موج ضربه ضبط شده برازش می‌گردد که به منحنی پایه^۷ موسوم است. سپس این منحنی پایه از شکل موج ضربه ثبت شده کسر می‌شود تا منحنی باقیمانده^۸ حاصل گردد. نهایتاً با اعمال یک فیلتر دیجیتال پایین‌گذر به منحنی باقیمانده و بدست آوردن منحنی باقیمانده فیلتر شده^۹، این منحنی با منحنی پایه جمع می‌گردد تا منحنی ولتاژ تست^{۱۰} تعیین گردد (شکل ۱۶). تمامی مشخصه‌های مهم شکل موج ولتاژ ضربه از منحنی ولتاژ تست استخراج می‌گردد.



شکل ۱۵: منحنی ضبط شده، منحنی پایه محاسبه شده، منحنی باقیمانده و فراجش [۵]



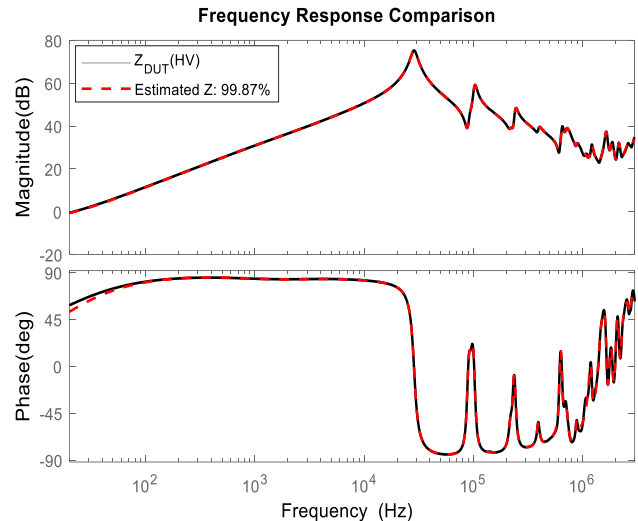
شکل ۱۶: منحنی ولتاژ تست (مجموع منحنی پایه و منحنی باقیمانده فیلتر شده) [۵]

۵-۱- زمان پیشانی موج (T_1)

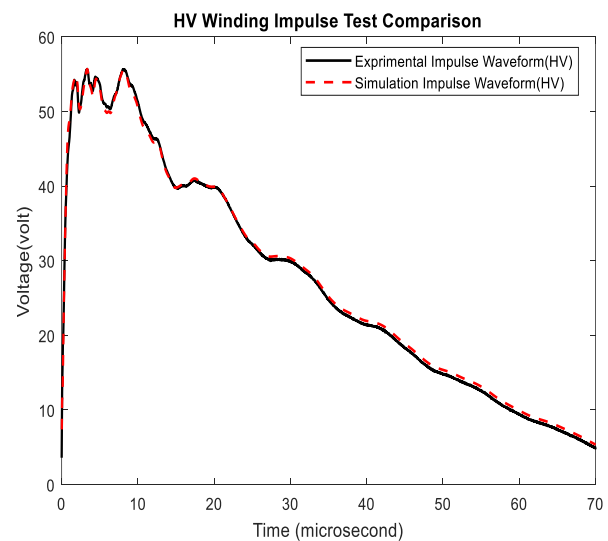
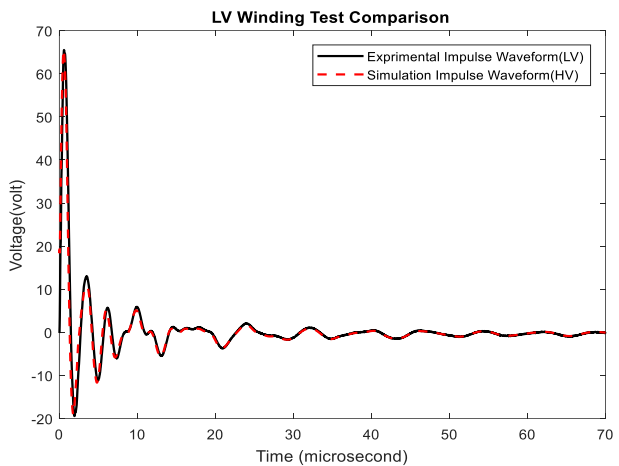
برای این منظور، ابتدا حداکثر مقدار شکل موج را تعیین کرده، سپس نقاط A، B، C را مشخص می‌نمایند. نقاط A و B بر روی پیشانی موج و به ترتیب در ارتفاع ۳۰٪ و ۹۰٪ از دامنه قرار گرفته‌اند. یک خط افقی مماس با حداکثر ولتاژ رسم می‌کنند. نقاط A و B را با یک خط راست به یکدیگر متصل کرده و ادامه می‌دهند تا خط ۰٪ (محور زمان) و خط ۱۰۰٪ (خط مماس بر حداکثر) را قطع کند. فاصله زمانی بین این دو نقطه تقاطع در شکل ۱۷ با T_1 نشان داده شده است.

۵-۲- نیم زمان پشت موج (T_2)

نقطه C بر روی پشت موج و در ارتفاع ۵۰٪ درصد از دامنه قرار دارد. در شکل ۱۷ نقطه تقاطع خط رابط ۳۰٪ و ۹۰٪ با محور زمان را مبدأ



شکل ۱۳: مقایسه امپدانس تخمینی سیم پیچ فشارقوی ترانسفورماتور توزیع و امپدانس اندازه‌گیری شده



شکل ۱۴: تطبیق شکل موج ضربه عملی با شکل موج ضربه شبیه‌سازی شده، سیم پیچ فشار ضعیف (شکل بالا) و سیم پیچ فشارقوی (شکل پایین)

۶- بهینه‌سازی پارامترهای ژنراتور ضربه

۶-۱- الگوریتم ژنتیک و پارامترهای آن

الگوریتم ژنتیک، الهام گرفته از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین است و بر اساس بقای برترین‌ها استوار است [۲۶]. معمولاً در آزمایشگاه فشارقوی مقدار C_s در ژنراتور ضربه ثابت بوده و مقادیر مقاومت‌های سری و موازی قابل تنظیم است. لذا در مسئله موجود با توجه به در دسترس بودن مدل تراژ سفورماتور و استفاده از ژنراتور ضربه تک پله، پارامترهای مجهولی که باید توسط این الگوریتم بهینه شوند، مقادیر مقاومت‌های ژنراتور ضربه هستند.

به این ترتیب هر کروموزوم دارای دو ژن، یکی مربوط به مقدار مقاومت سری و دیگری مربوط به مقدار مقاومت موازی خواهد بود. با توجه به اینکه متغیرهای این مسئله پیوسته و به صورت باینری نمی‌باشند، از جهش پیوسته در این الگوریتم استفاده شده است. در این نوع جهش با انتخاب یک متغیر به صورت تصادفی حول توزیع نرمال با انحراف معیار مشخص (نرخ جهش) عددی جدید جایگزین عدد قبلی در کروموزوم می‌شود.

در الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده، اندازه جمعیت اولیه برابر با ۵۰ کروموزوم، درصد جهش ۰/۲، نرخ فراجهش ۰/۰۵ بوده و شرط توقف بهینه‌سازی رسیدن به تکرار ۱۰۰ بار در نظر گرفته شده است.

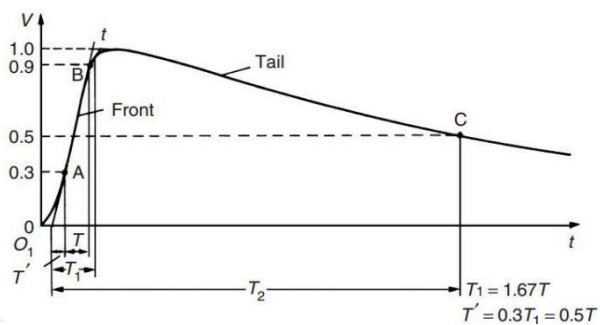
۶-۲- تابع هزینه

برای هر کروموزوم با توجه به مقادیر ژن‌های آن (مقاومت‌های سری و موازی) و همچنین تابع تبدیل تخمینی امپدانس سیم‌پیچ، می‌توان با استفاده از روش ارائه شده در بخش ۴، یک شکل موج ضربه متناظر با این مقاومت‌ها را شبیه‌سازی و تولید کرد. با استخراج مقادیر زمان پیشانی و نیم زمان پشت موج از این شکل موج‌ها به کمک تابع هزینه و رابطه ۱۶ میزان برازندگی هر کروموزوم سنجیده می‌شود. برای سنجش میزان برازندگی هر کروموزوم در تابع هزینه مقادیر زمان پیشانی و نیم زمان پشت موج با مقادیر تعریف شده در استاندارد مقایسه می‌شوند.

$$Cost = k_1 \left| \frac{T_{1s} - 1.2}{1.2} \right| + k_2 \left| \frac{T_{2s} - 50}{50} \right| + k_3 \beta' \quad (16)$$

که در آن، $Cost$ تابع هزینه، T_{1s} و T_{2s} به ترتیب زمان پیشانی و نیم‌زمان پشت موج شکل موج شبیه‌سازی شده بر حسب میکروثانیه بوده و ضرایب k_1 ، k_2 و k_3 به ترتیب ضرایب وزنی پارامترهای زمان پیشانی موج، نیم زمان پشت موج و فراجهش نسبی هستند. با توجه اهمیت یکسان این سه در استانداردهای مربوطه، بهتر است این ضرایب یکسان در نظر گرفته شوند. همچنین در رابطه ۱۶ از انحراف نرمالیزه شده زمان پیشانی و نیم‌زمان پشت موج نسبت به مقادیر استاندارد (به ترتیب $1/2 \mu s$ و $50 \mu s$) استفاده شده است.

زمان می‌گویند. با یافتن نقطه C در شکل ۱۷، فاصله زمانی بین مبدأ زمان و نقطه C را نیم زمان پشت موج (T_2) می‌نامند.



شکل ۱۷: محاسبه دامنه فراجهش با استفاده از شکل موج ثبت‌شده و پایه [۵]

۵-۳- دامنه فراجهش (β)

مقدار فراجهش برابر است با اختلاف بین مقدار حداکثر منحنی ثبت‌شده (U_e) و مقدار حداکثر منحنی پایه (U_b) که با β نشان داده شده است. همچنین نسبت بین دامنه فراجهش به مقدار حداکثر را فراجهش نسبی (β') گفته و معمولاً بر حسب درصد بیان می‌شود.

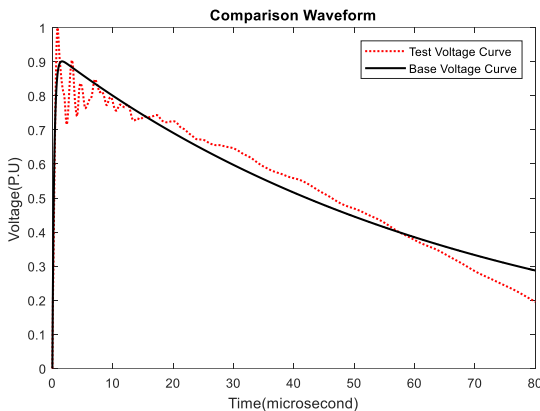
طبق تعریف استاندارد، شکل موج ضربه ولتاژ استاندارد دارای زمان پیشانی موج $1/2 \mu s$ و نیم زمان پشت موج $50 \mu s$ است. با توجه به محدودیت‌های عملی در حصول مقادیر دقیق برای زمان پیشانی موج و نیم زمان پشت موج، در استاندارد IEC60060-1 محدوده‌ی رواداری $\pm 30\%$ برای زمان پیشانی موج، $\pm 20\%$ برای نیم زمان پشت موج و 10% برای فراجهش تعریف شده است. در جدول ۲ مقادیر بدست آمده T_1 و T_2 برای شکل موج‌های ضربه عملی بر روی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصه‌های شکل موج ضربه ولتاژ عملی

درصد انحراف از استاندارد	مقدار عددی (μs)	نام پارامتر	سیم‌پیچ تحت تست
۵۵/۸۳٪	۰/۵۳	T_1	فشارضعیف
	۱/۱۵	T_2	
۵۲/۵٪	۱/۸۳	T_1	فشارقوی
	۳۳/۱۳	T_2	

با توجه به جدول ۲ ملاحظه می‌شود که تست ضربه انجام شده دارای مشخصه‌های مطابق با تعریف استاندارد نیست. بنابراین باید پارامترهای تأثیرگذار در تولید شکل موج ضربه شناسایی شده و با تغییر در مقادیر آن‌ها شکل موج ضربه مطابق با استاندارد تولید کرد. معمولاً این تغییرات در کارخانه‌های سازنده با سعی و خطا انجام می‌شود که این روند زمان‌بر است. در بخش بعد با معرفی روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و ارائه یک روش نرم‌افزاری سریع و دقیق، مقادیر بهینه برای پارامترهای مؤثر در تولید شکل موج ضربه محاسبه خواهد شد.

و همچنین مقایسه مقادیر جدول ۳ و جدول ۲ نتیجه می‌گردد که الگوریتم بهینه‌سازی موفق عمل کرده است.



شکل ۱۹: شکل موج ضربه شبیه سازی (نرمالیزه شده) با مقادیر مقاومت‌های ارائه شده در جدول ۳ (منحنی خط چین) و منحنی پایه آن (منحنی توپر)

۶-۳-۲-سیم‌پیچ فشار ضعیف

با اجرای الگوریتم ژنتیک برای سیم‌پیچ فشار ضعیف، نتایج بهینه برای مقادیر مقاومت‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود با وجود بهبود در مقادیر پارامترهای ژنراتور ضربه نسبت به مقادیر ارائه شده در جدول ۲، الزامات استاندارد برای این سیم‌پیچ برآورده نمی‌شود. از این رو می‌توان گفت که با آرایش ذکر شده معمول برای ترمینال‌های ترانسفورماتور، امکان حصول شکل موج استاندارد ضربه برای سیم‌پیچ فشار ضعیف وجود ندارد.

۷- نتیجه‌گیری

انجام تست ضربه بر روی ترانسفورماتور به جهت نقش حیاتی و کلیدی آن در سیستم قدرت امری ضروری است. با توجه به ماهیت آزمایش تست ضربه، این تست با مشکلاتی همراه است. لذا شبیه‌سازی مدار تست ضربه کاری مفید و کارآمد می‌باشد. در این مقاله ابتدا با انجام تست اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و سپس تخمین امپدانس آن مدل مناسبی برای ترانسفورماتور حاصل شد. با مقایسه نتایج امپدانس تخمینی و امپدانس اندازه‌گیری شده، دقت و درستی روش محقق گردید. در ادامه با مدل‌سازی ژنراتور ضربه و اتصال آن به مدل ترانسفورماتور، تست ضربه بر روی آن اعمال و شکل موج تخمینی حاصل از شبیه‌سازی با شکل موج حاصل از تست عملی مقایسه شد. با توجه به نتایج حاصله کارآمدی روش پیشنهادی با دقت مطلوب به اثبات رسید. با استخراج زمان پیشانی و نیم زمان پشت موج از شکل موج ضربه حاصل ملاحظه گردید که مقادیر در خارج از محدوده مجاز تعریف شده توسط استاندارد IEC60060-1 هستند. برای حصول مقادیر مقاومت ژنراتور ضربه از تست‌های مبتنی بر روش سعی و خطا استفاده می‌شود این عمل به دلیل زمان‌بر بودن آن توصیه نمی‌شود. با راهبرد ارائه شده در این مقاله، می‌توان در مدت‌زمان کوتاه و با انجام

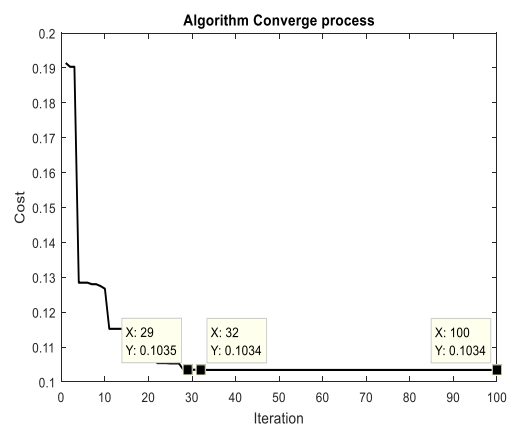
مینیمم‌سازی این تابع هزینه با نزدیک شدن مقادیر T_{1s} به مقدار $1/2 \mu s$ ، T_{2s} به مقدار $50 \mu s$ و مقدار β' کمتر از ۱۰٪ حاصل می‌شود.

۶-۳-۱-نتایج حاصل از بهینه‌سازی

با اجرای الگوریتم ژنتیک، جدول ۳ مقادیر بهینه‌شده مقاومت‌های ژنراتور ضربه و زمان پیشانی و نیم زمان پشت موج متناظر با این مقادیر را برای تست ضربه سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور نشان می‌دهد. در شکل ۱۸ همگرایی الگوریتم ژنتیک به جواب بهینه آورده شده است. با دقت در شکل همگرایی الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به جواب بهینه، مشاهده می‌شود که تابع هزینه از تکرار ۳۲ و بعد از آن تغییرات قابل توجهی نداشته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت الگوریتم استفاده شده دارای سرعت و دقت بالا در همگرایی به جواب بهینه می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر پارامترهای حاصل از بهینه‌سازی

درصد انحراف از استاندارد	مقدار عددی	نام پارامتر	سیم‌پیچ تحت تست
-	$3851 (\Omega)$	R_s	فشار ضعیف
-	$3759 (\Omega)$	R_p	
۳۳/۳۳٪	$0.18 (\mu s)$	T_1	
۹۷/۱۴٪	$1/43 (\mu s)$	T_2	
-	$24 (\Omega)$	R_s	فشار قوی
-	$3000 (\Omega)$	R_p	
۱۳/۳۳٪	$1/04 (\mu s)$	T_1	
۵٪	$47/5 (\mu s)$	T_2	



شکل ۱۸: تعداد تکرارهای حل مسئله برای همگرایی شدن تابع هزینه

۶-۳-۱-سیم‌پیچ فشار قوی

در شکل ۱۹ شکل موج ضربه حاصل از تنظیم مقادیر R_s و R_p ارائه شده در جدول ۳، نشان داده شده است. مقدار خطای بهترین آرایش ژنراتور در برآورد زمان پیشانی ۱۳/۳۳٪ و نیم زمان پشت موج ۵٪ است که در محدوده‌ی مجاز رواداری تعریف شده در استاندارد قرار دارد. با مقایسه شکل موج ضربه سیم‌پیچ فشار قوی در شکل ۱۴ با شکل ۱۹

- [11] Dalessandro, Luca, Fabiana da Silveira Cavalcante, and Johann W. Kolar. "Self-capacitance of high-voltage transformers," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 5, pp. 2081-2092, 2007.
- [12] Alharbi, Hosam Salem. *Power transformer transient modeling using frequency response analysis*, University of Manitoba (Canada), 2014.
- [13] Martinez, Juan A., and Bruce A. Mork. "Transformer modeling for low-and mid-frequency transients-a review," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1625-1632, 2005.
- [14] Gustavsen, Bjorn, and Christoph Heitz. "Rational modeling of multiport systems by modal vector fitting," IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects, SPI, 2007.
- [15] DeJean, Gerald R., and Manos M. Tentzeris. "The application of lumped element equivalent circuits approach to the design of single-port microstrip antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 55, no. 9, pp. 2468-2472, 2007.
- [16] Gustavsen, Bjorn. "Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 2278-2285, 2008.
- [17] Ramirez, Abner. "Vector fitting-based calculation of frequency-dependent network equivalents by frequency partitioning and model-order reduction," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 1, pp. 410-415, 2009.
- [18] Antonini, Giulio. "SPICE equivalent circuits of frequency-domain responses," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, no. 3, pp.502-512, 2003.
- [19] Kasun Samarawickrama, Nathan D. Jacob, Aniruddha M. cole, and Behzad Kordi, "Impulse Generator Optimum Setup for Transient Testing of Transformers Using Frequency-Response Analysis and Genetic Algorithm", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1949-1957, 2015,
- [20] Sofian, Dahlina M., Z. D. Wang, and P. Jarman. "Interpretation of transformer FRA measurement results using winding equivalent circuit modelling technique," IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2005.
- [21] A. KRAETGE, et al. "Aspects of the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers," Cigre 6th Southern Africa Regional Conference, 2009.
- [22] Jayasinghe, J. A. S. B., et al. "Winding movement in power transformers: a comparison of FRA measurement connection methods," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 6, 2006.
- [23] Donald, F. "Frequency Response analysis (FRA) for diagnosis of power transformers," IEEE International Conference on Electrical Engineering Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010.
- [24] Standard, IEC 60076-18. *Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response*, 2018.
- [25] Drmac, Zlatko, Serkan Gugercin, and C. Beattie. "Quadrature-based vector fitting for discretized H_2 approximation," SIAM Journal on Scientific Computing, vol. 37, no. 2, pp. A625-A652, 2015.
- [26] Haupt, Randy L., and Sue Ellen Haupt. *Practical genetic algorithms*, John Wiley & Sons, 2004.

شیبه‌سازی نرم‌افزاری مقادیر مقاومت‌های ژنراتور ضربه را جهت حصول الزامات استاندارد به صورت نرم‌افزاری به دست آورد. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی GA استفاده شد. با تعریف تابع هزینه مناسب مقادیر مقاومت‌های ژنراتور ضربه محاسبه و با تنظیم این مقادیر بر روی ژنراتور ضربه و استخراج زمان پیشانی و نیم زمان پشت موج متناظر با آن کارآمدی روش پیشنهادی به اثبات رسید.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از شرکت ایران ترانسفو به جهت در اختیار گذاشتن تجهیزات تحقیقاتی در انجام این پژوهش و همچنین جناب آقای مهندس کریم میرعلیخانی مدیریت محترم کیفیت این شرکت به دلیل پشتیبانی فنی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] Kuffel, John, and Peter Kuffel. *High voltage engineering fundamentals*, Newnes, 2000.
- [2] Lucas, J. Rohan. *High voltage engineering, Sry Lanka* (2001).
- [3] IEEE Standard C57.12.90. *Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 2015.
- [4] Standard, IEC 60076-3. *Power transformers - Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*, 2013.
- [5] Standard, IEC 60060-1. *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, 2010.
- [6] Okabe, Shigemitsu, et al. "Discussion on standard waveform in the lightning impulse voltage test," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, no. 1, pp. 147-156, 2013.
- [7] سجاد باقری، زهرا مروج، گئورگ قره‌پتیان، "تمایز میان عیوب مکانیکی سیم‌پیچ، خطاهای الکتریکی داخلی و خارجی و جریان‌های هجومی در ترانسفورماتورها با استفاده از روش ترکیبی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۴، جلد ۴۷، در حال انتشار، ایران، ۱۳۹۶.
- [8] بهرام نوشاد، مرتضی رزاز، قدرت‌اله سیف‌السادات، "تعیین یک مدل دقیق ترانسفورماتور جریان برای آنالیز حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی در طی خطاهای الکتریکی"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، شماره ۲، جلد ۴۱، صفحه ۷۷-۸۷، ایران، ۱۳۹۰.
- [9] Pramanik, Saurav, and L. Satish. "Estimation of series capacitance of a transformer winding based on frequency-response data: An indirect measurement approach," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 4, pp. 2870-2878, 2011.
- [10] Li, Yan, et al. "Calculation of capacitance and inductance parameters based on FEM in high-voltage transformer winding," IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011.

زیرنویس‌ها

⁷ Base curve

⁸ Residual curve

⁹ Filtered residual curve

¹⁰ Test voltage curve

¹¹ Tolerance

¹ Device Under Test

² Frequency Response Analysis

³ Electromagnetic Transients Program

⁴ Resonance and Anti-resonance

⁵ End-to-End Voltage Ratio Measurement

⁶ Double exponential