طراحی بهینه ترانسفورماتورهای قدرت با کمک الگوریتم ابتکاری جدید جهت کمینه کردن هزینه و نیروهای الکترومغناطیسی وارد بر سیم‌پیچ

علی سلدوزی[۱]، عبدالرضا اسماعیلی[۲]، حمیدرضا اکبری*[۳]، سید ضیاء مظلوم[۴]

۱- استادیار، گروه برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران، ali.soldoozy@iauyazd.ac.ir
۲- استادیار پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، aesmaeli@aeoi.org.ir
*۳- استادیار ، گروه برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران، h.akbari@iauyazd.ac.ir
۴- استادیار ، گروه برق، واحد مهریز، دانشگاه آزاد اسلامی، مهریز، ایران، szmazloom@iaumehriz.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹

چکیده: طراحی ترانسفورماتور یک مسئله ترکیبی غیرخطی و پیچیده است. دقت در جواب‌های به‌دست‌آمده و سرعت رسیدن به جواب‌ها، دو معیار اساسی در فرآیند طراحی ترانسفورماتور می‌باشند. روش‌های مختلف بهینه‌سازی که تاکنون ارائه شده دارای مشکلاتی از قبیل نادیده گرفتن برخی از محدودیت‌های طراحی، رسیدن به پاسخ حداقل محلی، در نظر نگرفتن تمامی متغیرهایی که در بهینه‌سازی دخیل هستند و یا به دلیل خاصیت تصادفی بودن قادر به جستجوی تمام فضا نیستند. مطمئن‌ترین روش برای رسیدن به نقطه بهینه مطلق استفاده از الگوریتم‌های جستجوی تمام فضا می‌باشد. اما لازمه روش‌های جستجوی تمام فضا برای رسیدن به نقطه بهینه مطلق این است که فضای جستجو گسسته و محدود باشد و لذا کاربر هوشمند نیاز است. از آنجایی‌که مسئله بهینه‌سازی ترانسفورماتور قدرت دارای تعداد متغیرهای مستقل زیاد و فضای جستجوی گسترده می‌باشد لذا روش جستجوی تمام فضا با مشکل کمبود حافظه کامپیوتری و سرعت اجرای پایین برنامه مواجه خواهد شد. در این مقاله برای از بین بردن این نقطه‌ضعف و رسیدن به نقطه بهینه مطلق، با اصلاح فرآیند طراحی ترانسفورماتور قدرت و ارائه الگوریتم ابتکاری جدیدی به نام الگوریتم درخت هرس شده برای حل مسئله طراحی بهینه اقتصادی ترانسفورماتورهای قدرت و کاهش نیروهای الکترومغناطیسی، به سمت نقطه بهینه مطلق حرکت می‌کنیم. از نرم افزارهای JMAG-designer و ماکسول برای تحلیل روش المان محدود در این پژوهش استفاده گردیده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ابتکاری جدید، بهینه‌سازی، کاهش هزینه، کاهش نیروهای اتصال کوتاه، روش المان محدود.

۱- مقدمه

موضوع بهینه‌سازی مورد توجه علوم و فنون مختلف می‌باشد. وجود رقابت شدید بین صنایع و جهانی شدن اقتصاد نیز سبب تقویت اراده مسئولین واحدهای تولیدی سرا سر جهان در جهت تولید محصولات بهینه شده است. یک واحد تولیدی نه‌تنها نمی‌تواند بدون بهینه سازی خطوط تولیدی خود، به موفقیت‌های ارزنده‌ای دست یابد، بلکه با وجود برداشته شدن مرزهای اقتصادی و شرایط موجود در جهان، در صورتی که فعالیت‌های تحقیقاتی خود خصوصاً در زمینه بهینه سازی را به‌موقع شروع نکند، ممکن است حتی نتواند شرایط موجود خود را نیز حفظ کند و با کاهش روزافزون درآمد، قدرت رقابت در صحنه بین‌المللی را از دست داده و به سمت ورشکستگی پیش برود.

ترانسفورماتور یکی از پرکاربردترین تجهیزات در سیستم قدرت و گران‌قیمت‌ترین تجهیز در پست‌های فشارقوی می‌باشد، لذا طراحی بهینه آن نیز حائز اهمیت خواهد بود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

طراحی بهینه ترانسفورماتورهای قدرت به سه دلیل مشکل است [۳-۱]:

۱- تعداد متغیرهای طراحی بسیار زیاد است که شامل متغیرهای پیوسته و گسسته می‌باشد.

۲- این متغیرها هم به‌صورت خطی و هم غیرخطی در معادلات محدودیت‌ها ظاهر می‌شوند.

۳- این محدودیت‌ها بشدت به هم وابسته‌اند. بدین صورت که تغییر یک متغیر باعث تغییر در تعداد زیادی از محدودیت‌های دیگر می‌شود.

لذا طراحی ترانسفورماتور یک مسئله ترکیبی غیرخطی و پیچیده است. بر این اساس در تحقیقات مختلف بر بهینه سازی طراحی و روش‌های مختلفی که منجر به نتیجه مطلوب در طراحی می گردد پرداخته شده است.

شار نشتی و توزیع و دامنه نیروهای مکانیکی ناشی از آن بر روی سیم پیچهای ترانسفورماتور در شرایط اضافه جریان با بکارگیری مدلهای کامپیوتری دو بعدی و سه بعدی برای ترانس تک فاز واقعی ۱۰ مگاولت-آمپر ۶۶ به ۱۱ کیلوولتی در [۴] مورد ارزیابی قرار گرفته است. روش المان محدود دو و سه بعدی برای محاسبه دامنه شار نشتی و نیروهای الکترومغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت. تحقیق مشابهی برای تحلیل نیروی الکترومغناطیسی ناشی از اتصال کوتاه روی ترانس با بکارگیری تحلیل المان محدود در یک ترانسفورماتور ۵۰ کیلو ولت-آمپری در سال ۲۰۱۲ انجام پذیرفت[۵]. محاسبات نیروهای شعاعی و محوری دینامیکی و استاتیکی ناشی از جریانهای هجومی و اتصال کوتاهبر روی ترانسفورماتور قدرت با بکارگیری مدل دو بعدی روش المان محدود در [۶] مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش روش المان محدود سه بعدی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخصات فیزیکی و هندسی همه اجزای ترانسفورماتور، غیر خطی بودن مواد هسته و توزیع سیم پیچ های اولیه و ثانویه همه در نظر گرفته شده بودند. نتایج بکارگیری روش سه بعدی، روش دو بعدی المان محدود رو نیز تایید نمود.

در [۷] الگوریتمی برای محاسبات نیروهای اتصال کوتاه با بکارگیری روش تصاویر با استفاده از حل تحلیلی برای نیروهای الکترومغناطیسی بین دو جریان مجاور هادی های مستطیلی ارائه داده است. نتایج این روش با روش دو بعدی المان محدود مطابقت داشته ولی این روش خیلی سریعتر به جواب رسیده و در تکرار اول حل مساله خطای کمتر از۰/۲ درصد را نشان می دهد. این روش ۲۰ برابر سریعتر از روش دو بعدی المان محدود با توجه به نتایج این تحقیق بوده است.

طراحی بهینه ترانس قدرت مساله بهینه سازی چند هدفه پیچیده‌ای است که شامل متغیرهای طراحی زیادی می باشد که هدف طراحی ترانسفورماتور با حداقل هزینه در مواد تشکیل دهنده آن می باشد.اغلب بهینه سازی ها بر اساس کمینه سازی های محلی می باشد تا بعد جهانی آن در نظر گرفته شود. بکارگیری روشهای ابتکاری ترکیبی با روش المان محدود از روشهایی است که اخیرا مورد توجه قرار گرفته و در مراجع [۱۰-۸] به آن پرداخته شده است. در روشهای ارائه شئه در این مراجع مورد اشاره سعی شده است اغلب متغیرهای طراحی ترانسفورماتور در نظر گرفته شوند. قبل از ساخت ترانسفورماتور در این روشها الگوریتم بهینه سازی به چند الگوریتم کوچکتر تقسیم می گردد و چند زیرکروموزوم با تعداد ژن کمتر به عنوان بخشی از ترانس اصلی در نظر گرفته شده اند. همچنین سعی شده است نظرات مشتریان و مصرف کنندگان در کنار نظرات شرکت سازنده مد نظر قرار گیرد.

بکارگیری الگوریتم فراابتکاری با استفاده از فرایند هرس درختان در طبیعت در [۱۱] شکل گرفت. فضای جستجو الگوریتم در این روش از طریق بهره گیری از روش هرس کردن درختان، محدود گشته و امکان رسیدن به پاسخ سریعتر و راحت تر می گردد و موجب چابکی الگوریتم می گردد. در [۱۱]، روش ابتکاری جدیدی بنام درخت هرس شده، برای طراحی بهینه ترانسفورماتورها ارائه گردید. که در روش ارائه شده تمامی قیود طراحی اعم از قیود فنی و مقادیر گارانتی و محدودیت‌های ساخت تولیدی و همینطور تمامی متغیرهای طراحی که در بهینه سازی بخش فعال ترانسفورماتور دخیل هستند بعنوان یک ژن در کروموزوم سازنده ترانسفورماتور در نظر گرفته شده، بعنوان ابزارهایی جهت هرس کردن درخت و از بین بردن ژن‌های نامناسب استفاده شده است .که با مقایسه نتایج خروجی نرم افزار تهیه شده با الگوریتم درخت هرس شده TPA[1] نسبت به روش‌های دیگر نشان‌دهنده قدرت بالای الگوریتم فوق در طراحی بهینه ترانسفورماتور می‌باشد.

در تحقیقات این مقاله حل مسئله طراحی بهینه اقتصادی ترانسفورماتورهای قدرت و کاهش نیروهای الکترومغناطیسی، مورد بهینه سازی قرار کرفته است. طراحی یک ترانسفورماتور قدرت ۲۰۰ مگاولت آمپری با سطح ولتاژ ۱۵,۷۵ به ۴۰۰ کیلوولت به چهار روش مختلف بهینه سازی و با توابع هدف و قیود یکسان، بهینه می گردد که در ادامه الگوریتم پیشنهادی و روش کار آن ارائه می گردد. در این بهینه‌سازی روش الگوریتم درخت هرس شده نسبت به روش‌های MINLP, DE, PSO, GA مورد قیاس قرار خواهد گرفت و نقش آنان در کاهش تابع هزینه بیان می گردد. که موارد فوق در در سایر مراجع و همچنین مرجع [۱۱] بیان نگردید.

این مقاله در ادامه در ۴ بخش با عناوین الگوریتم پیشنهادی، شبیه سازی و اعتبار سنجی، تحلیل و بررسی نتایج و در پایان نتیجه گیری ارائه گردیده است.

[1] Tree Pruning Algorithm

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۲- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم ابتکاری و فرآیند طراحی ترانسفورماتور قدرت که در این مقاله ارائه می‌گردد به‌گونه‌ای طراحی شده است که: ۱) برخلاف بقیه الگوریتم‌های ارائه‌شده در این زمینه، همه متغیرهای طراحی که در بهینه‌سازی قسمت فعال ترانسفورماتورهای قدرت دخیل هستند به‌عنوان یک ژن در کروموزوم سازنده ترانسفورماتور وارد می‌شوند و همه این متغیرها از نوع گسسته می‌باشند. ۲) با تجزیه مسئله طراحی ترانسفورماتور به چند زیرمسئله قبل از تشکیل کروموزوم کامل سازنده ترانسفورماتور، شروع به تشکیل کروموزوم‌هایی با تعداد ژن کمتر به‌عنوان اجزای سازنده کروموزوم اصلی می‌کنیم. و در این مرحله با حذف ژن‌های نامناسب با توجه به محدودیت‌های موجود، فضای جست‌وجو بدون نیاز به کاربر هوشمند به‌طور خودکار محدود می شود [۱۱]. ۳) کلیه محدودیت‌های موجود در طراحی اعم از محدودیت‌های کارگاهی و محدودیت‌های گارانتی شده و محدودیت‌های موجود در استانداردها به‌عنوان قید طراحی لحاظ شده است. الگوریتم توسعه داده شده، با داشتن یک دیدگاه کاملاً نو به مبحث بهینه‌سازی، پیوندی جدید میان علوم کشاورزی و گیاه‌داری از یک سو و علوم فنی و ریاضی از سوی دیگر، برقرار می‌کند. ارتباط میان این دو شاخه از علم به گونه‌ای می‌باشد که غالباً ریاضیات به عنوان ابزاری قوی و دقیق در خدمت علوم کلی‌نگر قرار گرفته و به درک و تحلیل نتایج آن کمک می‌کند. الگوریتم TPA برخلاف بقیه الگوریتم های موجود، از یکی از روش های افزایش بهره‌وری در مورد درختان میوه الهام گرفته شده است و آن را به خدمت ریاضیات درآورده و از آن به عنوان ابزاری برای درک بهتر ریاضیات و حل بهتر مسائل ریاضی استفاده می‌کند. این روش در قالب یک نرم‌افزار بهینه سازی TDO[2] پیاده سازی و تهیه شد. در انتها روش فوق در طراحی ترانسفورماتور قدرت ۲۰۰ مگاولت آمپر بکار گرفته شده است. نتایج خروجی با نرم‌افزار المان محدود و نتایج ساخت ترانسفورماتور اعتبار سنجی شد و در مقایسه با سایر روش‌ها سودمندی و قابلیت الگوریتم ارائه شده در این مقاله مشاهده گردید.

۲-۱- طراحی ترانسفورماتورهای قدرت

طراحی بهینه ترانسفورماتورهای قدرت علاوه بر شناخت الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیازمند تسلط کافی بر دانش طراحی ترانسفورماتور در زمینه تحلیل‌های الکتریکی و مغناطیسی و انتقال حرارت است [۱-۱۴]. به‌گونه‌ای که بدون شناخت تأثیر هر یک از متغیرها در محدودیت‌ها و تابع هدف عملاً نمی‌توان الگوریتم مناسبی از نظر سرعت و دقت ارائه نمود. همچنین نیازمند تجربه لازم در زمینه ساخت و تولید ترانسفورماتور می‌باشد زیرا محدودیت‌های ساخت و کارگاهی بسیاری وجود دارد که در حین طراحی ترانسفورماتور بایستی به آن توجه کرد. لذا مسئله طراحی ترانسفورماتورها را به سه بخش طراحی عایقی، طراحی مغناطیسی و طراحی حرارتی تقسیم می‌کنیم.

۲-۲- مفهوم الگوریتم ارائه شده

در این بخش برای اینکه بتوان مفهوم الگوریتم ابتکاری درخت هرس شده را بهتر به مخاطب انتقال داد ابتدا تعریف هرس و فرآیند هرس کردن و مزایای آن در رشد و بهره‌وری درختان را مرور می‌شود. و سپس شروع به پیاده سازی الگوریتم با مفاهیم بیان شده می‌نماییم. سپس با انتخاب متغیرهای طراحی مناسب، انجام آنالیز حساسیت تابع هدف و محدودیت‌ها نسبت به متغیرهای طراحی، اصلاح فرآیند طراحی ترانسفورماتور و سرانجام ارائه الگوریتم ابتکاری درخت هرس شده که قابلیت جستجوی تمام فضا را داشته باشد به سمت نقطه بهینه مطلق در طراحی ترانسفورماتورهای قدرت حرکت می‌کنیم. در انتها از روش‌های تحلیل المان محدود در خروجی الگوریتم جهت اعتبار سنجی نتایج استفاده خواهد شد.

درختان، به‌ویژه درختان میوه اگر در طبیعت و در شرایط محیطی مناسب بدون دخالت انسان رشد کنند بعد از چند سال، یک حالت متراکم پر از شاخ و برگ به خود می‌گیرند و از نظر میزان کیفیت باروری نیز حالت نامطلوب می یابند. در این‌گونه درختان، رشد شاخه‌های مزاحم و پرپیچ‌وخم در داخل تاج درخت سبب تراکم و پربرگی شاخه‌ها و کاهش میزان نفوذ نور به داخل تاج درخت گشته، به‌تدریج شاخه‌ها خشک، باردهی درخت کاهش، میزان و کیفیت محصول پایین می‌آید.

الگوریتم هرس کردن درخت از یک فرآیند اصلاحی در رشد و نمو گیاهان الهام گرفته شده است. در این الگوریتم با توجه به اطلاعات و آنالیزهای حساسیت صورت گرفته شروع به هرس کردن شاخه‌های خشک و بی‌ثمر درخت می‌کند که سبب رشد و باروری بهتر سایر شاخه‌ها و درخت می‌گردد. با این کار نتایج و ثمره بهتری از گیاه که در اینجا همان فرآیند بهینه‌سازی است خواهیم برد.

۲-۳- نحوه پیاده‌سازی الگوریتم

ایده اصلی در این مقاله این است که با از بین بردن ژن‌های نامناسب از کروموزوم اصلی، ضمن جستجوی تمام فضا، سرعت همگرایی الگوریتم را مطابق انتظار افزایش دهیم. در این نوشتار یک الگوریتم جدید معرفی می‌شود که بر مبنای هدایت نحوه رشد و باروری گیاه پایه‌گذاری شده است.

با در نظر گرفتن الگوریتم‌های بهینه‌سازی مطرح‌شده، آنچه که قابل توجه است این است که اغلب روش‌های بهینه‌سازی عام مطرح شده، شبیه سازی کامپیوتری فرایندهای طبیعی هستند. شاید یک دلیل برای این کار، ملموس بودن و سادگی فرموله کردن و درک تکامل این فرایندها است. در نقطه مقابل، در ارائه‌ی الگوریتم‌های

[2] Transformer Design Optimization

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

بهینه سازی، علی‌رغم توجه به تکامل زیستی انسان و سایر موجودات (الگوریتم‌های ژنتیک و ...)، به تکامل اجتماعی و تاریخی او به عنوان پیچیده‌ترین و موفق‌ترین حالت تکامل، توجه شده است. در این مقاله، یک الگوریتم الهام گرفته از تکامل رشد و باروری گیاه، برای بهینه‌سازی، توسعه داده شده است. الگوریتم جدید معرفی شده با الهام‌گیری از یک فرایند مؤثر در پرورش گیاهان، نسبت به روش‌های مطرح‌شده دارای توانایی بالایی بوده و تا حد بسیار زیادی نیز سریع است.

الگوریتم توسعه داده شده، برخلاف سایر روش‌های بهینه‌سازی تکاملی، با تعدادی جمعیت اولیه شروع نمی‌شود. در این الگوریتم، همه متغیرهای مسئله که همان ژن‌های کروموزوم در الگوریتم ژنتیک می‌باشند از نوع گسسته انتخاب می‌شوند. و شروع به جستجوی تمام فضا می‌کند. اما از آنجایی که بررسی تمام حالات ممکن غیرممکن یا نشدنی است زیرا حافظه کامپیوتری و زمان بسیار زیادی لازم است لذا همانند فرآیند طبیعی در هرس کردن درخت که شامل هرس تابستانه و زمستانه می‌شود در این الگوریتم نیز در ۲ مرحله شروع به هرس کردن درخت الگوریتم می‌نماییم.

جواب‌های مجاز مسئله بهینه‌سازی نقش میوه‌های درخت را ایفا می‌کنند و شاخه‌های درخت نیز مسیرهای رسیدن به میوه‌ها می‌باشند. بنابراین مطابق فرآیند هرس کردن درختان که به‌صورت طبیعی، توسط باغبان در مورد درخت میوه اعمال می‌شود، الگوریتم شروع به هرس کردن و حذف شاخه‌های زاید و بدون میوه از فرآیند بهینه‌سازی می‌کند. با این کار سرعت جستجو افزایش یافته و در ضمن تمام فضای جستجو بررسی می‌شود. چنانچه ما بتوانیم تمامی میوه‌های روی درخت عریض و طویل را بیابیم در مرحله بعد می‌توانیم آنها را با توجه به کیفیت، اندازه و غیره (به عنوان تابع هدف) مرتب کنیم.

۴-۲- اطلاعات ورودی

اطلاعات ورودی جهت اجرای الگوریتم بهینه‌سازی شامل پارامترهای زیر می‌باشد:

- توان نامی ترانسفورماتور
- تعداد فاز و تعداد سیم‌پیچ (تعداد سطح ولتاژ)
- گروه برداری
- فرکانس شبکه و ولتاژهای نامی خط در هر سیم‌پیچ
- دمای محیط در محل نصب و ارتفاع محل نصب ترانسفورماتور
- مشخصات کلید تنظیم ولتاژ
- مقادیر گارانتی
- اطلاعات هسته شامل تعداد ساق‌های سیم‌پیچی شده و نشده، جنس ورق هسته و نحوه چینش ورق هسته
- تعیین نوع سیم و نوع سیم‌پیچ برای هر سیم‌پیچ
- فواصل عایقی مجاز اولیه
- متغیرهای طراحی

همانطور که بیان شد مطمئن‌ترین روش برای رسیدن به نقطه بهینه مطلق استفاده از الگوریتم‌های جستجوی تمام فضا می‌باشد. اما لازمه روش‌های جستجوی تمام فضا برای رسیدن به نقطه بهینه مطلق این است که فضای جستجو گسسته و محدود باشد. زیرا جستجوی تمام فضا در اکثر موارد به دلیل وجود فضای نامتناهی برای جستجو غیرممکن است. در این مقاله همه متغیرهای طراحی از نوع متغیرهای گسسته انتخاب شده‌اند تا جستجو تمام فضا مقدور باشد. سپس به کمک تکنیک‌های برنامه‌نویسی و آنالیز حساسیت شروع به حذف ژن‌های نامناسب و محدود کردن فضای جستجو می‌نماییم.

متغیرهای طراحی عبارتند از:

- تعداد دورهای سیم‌پیچ فشارضعیف
- تعداد دورهای سیم‌پیچ فشارقوی
- قطر هسته
- تعداد و محل‌های کانال هسته
- ارتفاع و پهنای سیم در هر سیم‌پیچ
- تعداد هادی‌های موازی در جهت شعاعی برای هر سیم‌پیچ
- تعداد هادی‌های موازی در جهت محوری برای هر سیم‌پیچ
- تعداد هادی‌های موازی در سیم‌های رشته‌ای برای هر سیم‌پیچ
- تعداد و محل کانال‌های هسته

۵-۲- محدودیت‌های طراحی

محدودیت‌های طراحی شامل محدودیت‌های فنی، محدودیت‌های گارانتی و محدودیت‌های تولید یا کارگاهی می‌شوند. که عبارتند از:

- محدودیت تعداد هادی‌های موازی در جهت شعاعی
- محدودیت تعداد هادی‌های موازی در جهت محوری
- محدودیت تعداد هادی‌های موازی در سیم رشته‌ای
- محدودیت بالا و پایین چگالی جریان در هر سیم‌پیچ
- محدودیت بالا و پایین چگالی شار هسته ترانسفورماتور
- محدودیت انتخاب ولت بر دور با توجه به در صد خطای نا شی از گرد کردن تعداد دورها در مدار ثانویه ترانسفورماتور
- تعداد کانال‌های هسته
- محل قرار گرفتن کانال‌های هسته
- محدودیت تعداد لایه‌ها برای سیم‌پیچ‌های لایه‌ای
- محدودیت تعداد دور در هر بشقاب برای سیم‌پیچ‌های بشقابی
- محدودیت نسبت تلفات ac به dc در هر سیم‌پیچ
- محدودیت طول، عرض و ارتفاع مخزن ترانسفورماتور
- محدودیت جهش حرارتی هسته نسبت به روغن
- محدودیت جهش حرارتی سیم‌پیچ نسبت به روغن در هر سیم‌پیچ
- محدودیت حد بالا و پایین امپدانس اتصال کوتاه
- محدودیت تلفات بار
- محدودیت تلفات بی‌باری

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

- محدودیت جریان بی‌باری
- محدودیت سطح صدا
- محدودیت حد بالا و حد پایین امپدانس اتصال کوتاه
- محدودیت حد بالا و پایین اختلاف پیشانی سیم‌پیچ‌ها
- محدودیت نیروهای شعاعی و محوری وارد بر سیم‌پیچ‌ها

۲-۶- تابع هدف

هدف اصلی در مسئله طراحی بهینه ترانسفورماتور، کمترین هزینه به‌شرط برآورده ساختن محدودیت‌های گارانتی و فنی و استانداردها می‌باشد. با این وجود توابع هدف مختلفی نظیر حداقل تلفات، کمترین هزینه، کمترین وزن، کمترین نیرو و یا ترکیبی از این موارد را می‌توان برای طراحی بهینه ترانسفورماتورها در نظر گرفت. در این مقاله تابع هدف به‌صورت رابطه زیر تعریف شده است.

$$\begin{aligned} &\text{تابع هدف } = \min \sum_{j=1}^{4} M_j f_j \\ &= M_{cu} \times f_{cu} + M_{fe} \times f_{fe} + M_{oil} \times f_{oil} \\ &+ M_{\tan k} \times f_{\tan k} + T \times f_T \end{aligned} \quad (۱)$$

که به ترتیب اوزان مس، ورق هسته، روغن، تانک و میزان تنش وارد بر سیم‌پیچ‌ها ضرب در هزینه هر یک می‌باشد. از طرفی چون الگوریتم به‌گونه‌ای طراحی شده است که تمام طرح‌های مجاز در خروجی نمایش داده می‌شود لذا کاربر قادر است بدون اجرای مجدد برنامه بهینه‌سازی، بر اساس هر یک از توابع هدف دلخواه طرح‌های خروجی را مرتب کند.

شکل (۱) فلوچارت الگوریتم ارائه شده را نشان می‌دهد.

۲-۷- مراحل الگوریتم ابتکاری ارائه شده

- تشکیل زیرکروموزوم ولت بر دور
- تشکیل زیرکروموزوم فشار ضعیف و فشار قوی و تنظیم ولتاژ
- آنالیز حساسیت امپدانس درصد جهت حذف ژن‌های معیوب و یا هرس زمستانه
- بررسی قیود و محدودیت‌های طراحی و حذف ژن‌های نامناسب یا هرس تابستانه
- مرتب کردن طرح‌های خروجی بر اساس تابع هدف

۲-۸- آنالیز حساسیت برای حذف ژن معیوب

امروزه برنامه‌های کامپیوتری پیشرفته برای محاسبه میدان مغناطیسی در ساختارهای پیچیده ترانسفورماتور موجود می‌باشند که از روش‌های عددی مانند اجزا محدود (FEM[3]) و یا مرز محدود (BEM[4]) استفاده می‌کنند. علی‌رغم روش های مدرن محاسباتی، روش های تحلیلی همچنان از اهمیت بالایی برخوردار بوده و سریع بودن، عدم نیاز به ورودی‌های زیاد و داشتن دقت کافی و قابلیت تحلیل با توجه به روابط حاکم بر آن از مهم‌ترین مزایای آنها محسوب می‌گردد. شکل (۲) تعادل آمپردور بین سیم‌پیچ فشارضعیف و فشارقوی را نشان می‌دهد.

برای رابطه اندوکتانس نشتی برای دو سیم‌پیچ با آمپر دور متعادل در روش انرژی داریم

اگر A پتانسیل برداری مغناطیسی باشد آنگاه $\nabla \times A = B$ و $\nabla \times H = J$ بنابراین انرژی ذخیره‌شده برابر است با:

$$W = \frac{1}{2}\iiint B.HdV = \frac{1}{2}\iiint (\nabla \times \mathrm{A}).HdV \quad (۲)$$

$$\nabla.(\mathrm{A} \times \mathrm{H}) = A.(\nabla \times \mathrm{H}) - \mathrm{H}.(\nabla \times \mathrm{A}) \quad (۳)$$

با توجه به روابط (۱) و (۲) خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2}\iiint (A.(\nabla \times \mathrm{H}) - \nabla.(\mathrm{A} \times \mathrm{H}))RdRd\varphi dZ \\ &= \frac{1}{2}\iiint (A.\mathrm{J})\,\mathrm{dV} \end{aligned} \quad (۴)$$

$$W = \frac{1}{2}\int IB.dS = \frac{I\phi}{2} = \frac{L_{leakage}I^2}{2} \quad (۵)$$

بنابراین با کمک روش انرژی ذخیره‌شده در سیستم اندوکتانس نشتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد:

$$W = \frac{1}{2}L_{leakage}I^2 \quad (۶)$$

$$W = \frac{\mu_0}{2}\int_V |H|^2 dV \quad (۷)$$

حجم v مربوط به کل فضای بی‌کران می‌باشد اما با توجه به شرایط مرزی و اینکه ضریب نفوذپذیری هسته بی‌نهایت می‌باشد لذا اندازه شدت میدان مغناطیسی ناشی از شارهای پراکندگی در داخل پنجره هسته ناچیز و انرژی آن قابل صرف‌نظر می‌باشد. بنابراین با داشتن اندازه شدت میدان مغناطیسی در داخل پنجره هسته می‌توانیم انرژی ذخیره شده را محاسبه کرد. برای محاسبه شدت میدان مغناطیسی از قانون آمپر استفاده می‌کنیم.

$$\oint_c H.dl = NI \quad (۸)$$

مطابق شکل (۲) در ناحیه سیم‌پیچ‌ها چون جریان به فرم خطی با افزایش پهنا افزایش می‌یابد داریم:

$$H_1 = N_1 I_1 \times \frac{x}{T_1 \times L_{eq}} \quad (۹)$$

اندازه شدت میدان مغناطیسی در کانال بین دو سیم‌پیچ ثابت و برابر با:

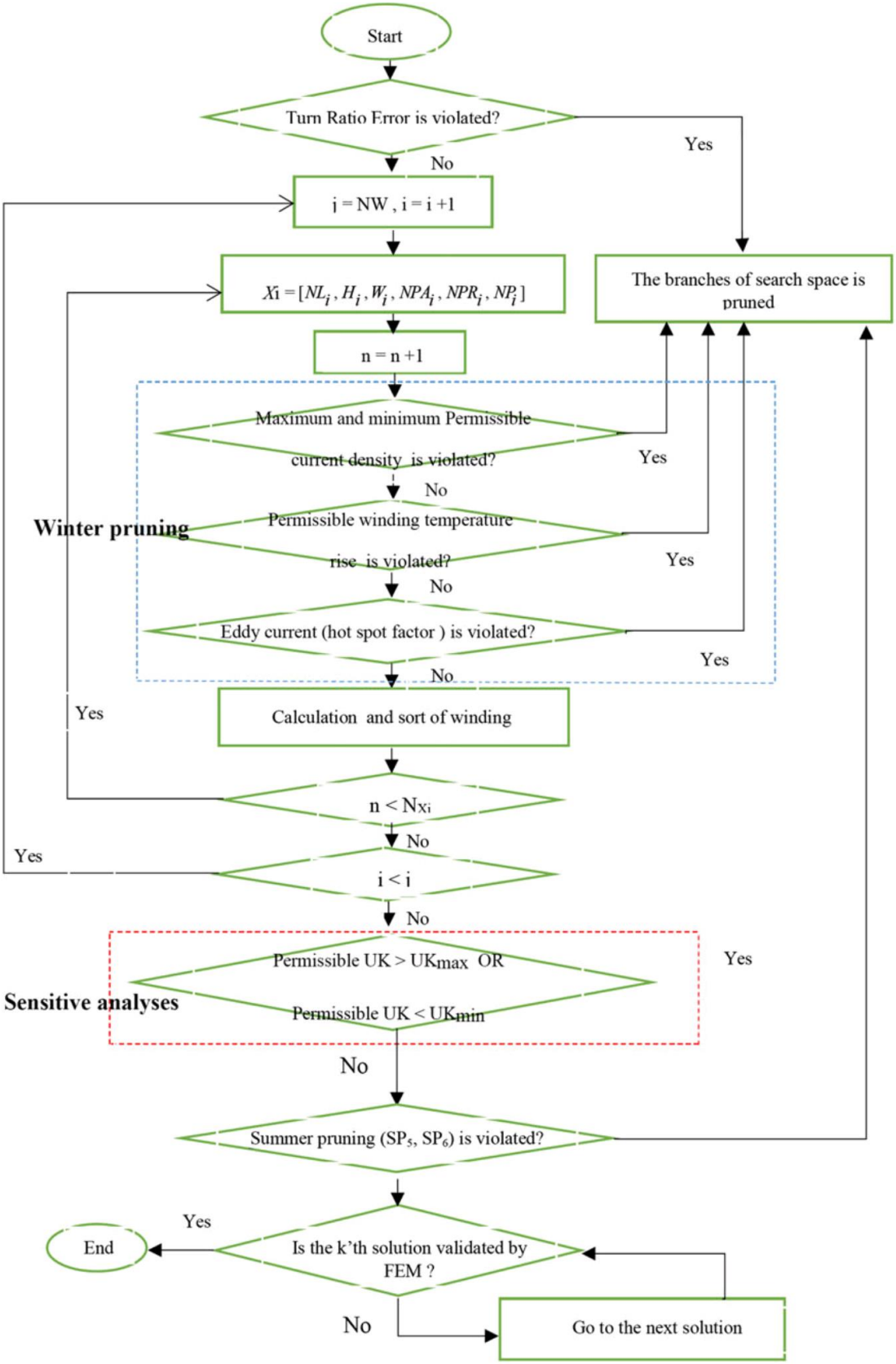
[3] Finite Element Method

[4] Boundary Element Method

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$H_{\Delta} = \frac{N_1 I_1}{L_{eq}} \qquad (۱۰)$$

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

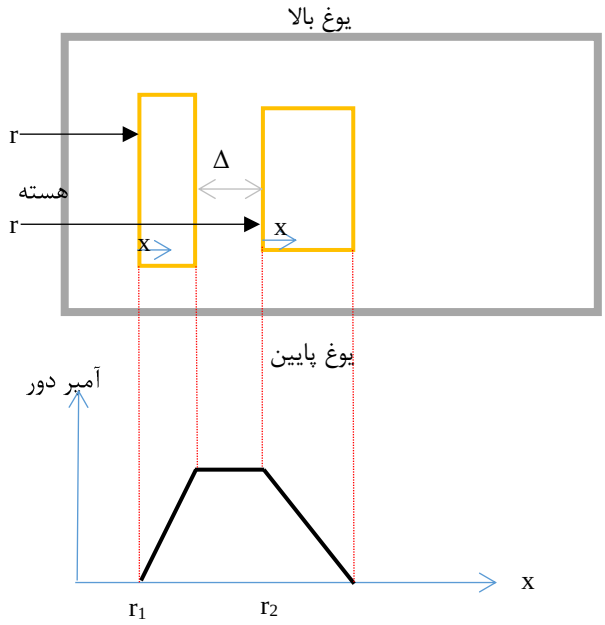


شکل (۱): فلوچارت الگوریتم ارائه شده [۱۱]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

در ناحیه سیم‌پیچ دوم نیز چون جریان به فرم خطی با افزایش پهنا افزایش می‌یابد داریم:

$$H_2 = \frac{N_1 I_1}{L_{eq}}\left(1-\frac{x'}{T_2}\right) \qquad (۱۱)$$



شکل (۲): تعادل آمپر دور بین سیم‌پیچ فشار ضعیف و فشار قوی

از آنجایی که قبل سیم‌پیچ اول و بعد سیم‌پیچ دوم برآیند آمپر دور صفر است لذا با کمک رابطه فوق داریم:

$$W = 0 + \int_{d_1}^{d_1+T_1} |H_1|^2 dV + \int_{d_1+T_1}^{d_2} |H_\Delta|^2 dV + \int_{d_2}^{d_2+T_2} |H_2|^2 dV + 0A \qquad (۱۲)$$

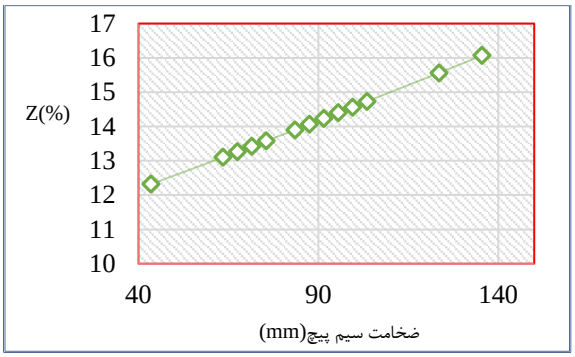
با معادلات فوق می‌توانیم اندوکتانس نشتی را محاسبه کنیم. بنابراین در فرکانس ۵۰ هرتز قسمت موهومی امپدانس برابر است با:

$$X_{leakage} = \frac{2\pi f \times L_{leakage}}{Z_{base}} \times 100$$
$$= \frac{0.124 \times S_{3\varphi} \times ((2r_1+T_1)\times\frac{T_1}{3} + (2r_2+T_2)\times\frac{T_2}{3})}{3\times VPT^2 \times L_{eq}} \qquad (۱۳)$$

پس از محاسبه L_{leak} و X_{leak} و از آنجا Z قابل محاسبه می‌باشد.

$$Z = \sqrt{(\frac{LL}{S})^2 + (L_{leak}\times 2\pi f)^2} \qquad (۱۴)$$

آنالیز حساسیت امپدانس اتصال کوتاه نشان می‌دهد در یک ولت بر دور مشخص با افزایش ارتفاع هر یک از سیم‌پیچ‌ها و ثابت ماندن بقیه مقادیر امپدانس اتصال کوتاه کاهش می‌یابد از طرفی با افزایش پهنای هر یک از سیم‌پیچ‌ها و ثابت ماندن بقیه ابعاد امپدانس اتصال کوتاه افزایش می‌یابد.



شکل (۳): تغییرات Z% برحسب تغییرات ضخامت سیم‌پیچ

۳- شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

یک نمونه ترانسفورماتور با مشخصات جدول (۱) به کمک الگوریتم درخت هرس شده، بهینه می‌شود و نتایج با سایر روش‌های بهینه‌سازی مقایسه می‌گردد. اعتبارسنجی ترانسفورماتور ۲۰۰ مگاولت‌آمپری به کمک نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی صورت می‌گیرد. که نشان‌دهنده دقت و صحت نتایج خروجی می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات ترانسفورماتور نمونه

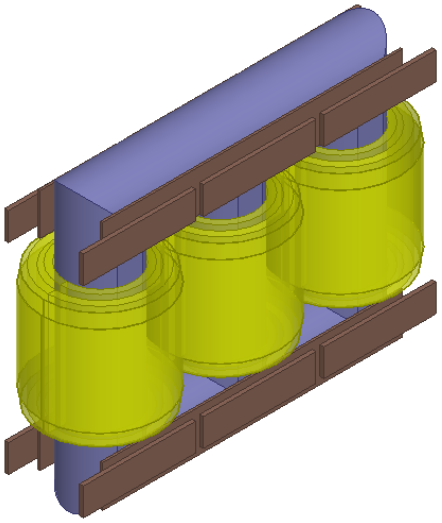
پارامتر	واحد	مقدار
توان ظاهری	MVA	۲۰۰
ولتاژ	KV	۷۵.۱۵/۱۴۵
نوع تپ‌چنجر	-	On load / reverse
نوع هسته	-	3/0
نوع مهار هسته	-	Winding set
امپدانس	%	Low ۹.۱۲ / Mid ۲.۱۳` / Up ۱۴
قطر هسته (D_S)	mm	۹۱۱
ارتفاع پنجره هسته (H_F)	mm	۲۱۲۰
فاصله مراکز ساق تا ساق (E_S)	mm	۱۶۰۲
ارتفاع مغناطیسی LV	mm	۱۸۸۸
فاصله LV تا یوغ پایین	mm	۸۶
فاصله LV تا یوغ بالا	mm	۱۴۶
نوع سیم‌پیچی LV	-	لایه‌ای
تعداد لایه‌ها	-	۲
ارتفاع مغناطیسی HV	mm	۱۸۶۲
فاصله HV تا یوغ پایین	mm	۹۹
فاصله HV تا یوغ بالا	mm	۱۵۹
نوع سیم‌پیچی HV	-	بشقابی
تعداد کانال آکسیال	-	۲
اختلاف ارتفاع مغناطیسی	mm	۲۶

تابع هدف انتخاب‌شده در این مسئله بهینه‌سازی، قیمت مواد مصرفی شامل مس، ورق هسته، روغن و تانک ترانسفورماتور می‌باشد. در ادامه نتایج خروجی این الگوریتم با روش های الگوریتم ژنتیک و روش انبوه ذرات و روش برنامه‌ریزی غیرخطی مقایسه شده است.

در این بخش نتایج حاصل از محاسبات نیروهای الکترومغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار JMAG-Designer V14 ارائه می‌شود. در بخش

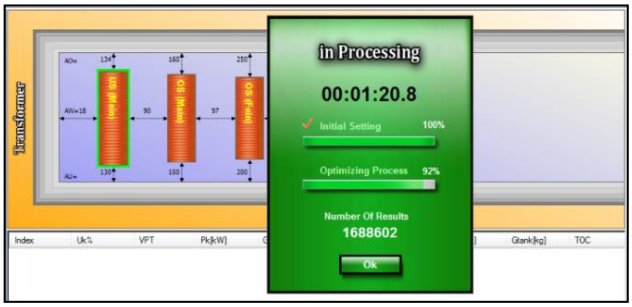
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

اول در تحلیل ۲ بعدی با یک‌پارچه گرفتن سیم‌پیچ ها نیرو های الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود. البته در هندسه این تحلیل کانال‌های خنک‌کنندگی محوری که نقش مؤثری در توزیع نیروها دارند در نظر گرفته می‌شود. در بخش دوم، هندسه تمامی سیم‌پیچ‌ها با جزئیات در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴): مدل سه بعدی در نظر گرفته شده

در بخش سوم با استفاده از تحلیل سه بعدی و سیم‌پیچ‌های یکپارچه با کانال محوری، نیروهای الکترومغناطیسی محاسبه می‌گردند. در انتها نیز تمامی جزئیات مدل شامل تانک، شانت‌ها، مهار هسته نیز در مدل در نظر گرفته می‌شود. بعد از وارد کردن اطلاعات ورودی در نرم‌افزار TDO و اجرای برنامه بهینه‌سازی، شکل (۵) ظاهر می‌شود که زمان اجرای برنامه، درصد پیشرفت و تعداد طرح‌های خروجی در هر لحظه را نشان می‌دهد.



شکل (۵): مدت زمان اجرای برنامه، درصد پیشرفت و تعداد طرح‌های خروجی در هر لحظه از زمان

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود در مدت زمان کمتر از ۱۰۴ ثانیه تعداد ۲۰۵۰۲۶۹ طرح برای ترانسفورماتور مورد نظر با توجه به قیود فنی، مقادیر گارانتی و قیود تولیدی یافت شده است.

پس از اجرای کامل برنامه، طرح‌های خروجی بر اساس مقدار تابع هدف به ترتیب مرتب می‌شوند. در این صفحه اطلاعات کلی ترانسفورماتورهای طراحی شده شامل تلفات بی‌باری، تلفات بار، امپدانس درصد، اوزان و مقدار تابع هدف مشاهده می‌شود. با دو بار کلیک بر روی هر یک از طرح‌ها، جزئیات طرح قابل مشاهده خواهد بود.



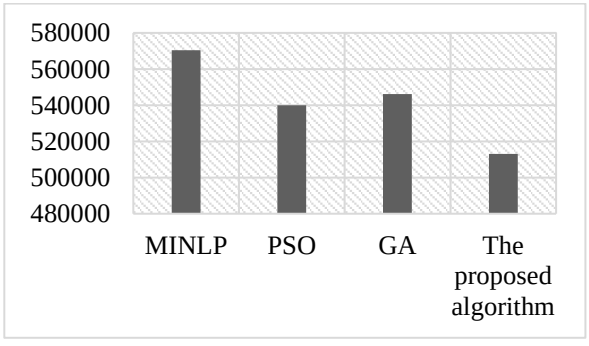
شکل (۶): مدت زمان اجرای برنامه، تعداد طرح‌های خروجی و ترتیب آنها با توجه به تابع هدف پس از اتمام کامل اجرای برنامه

جدول (۲): پارامترهای خروجی طراحی ترانسفورماتور ۲۰۰ مگاولت آمپری

پارامتر	بهترین جواب			
	MINLP	DE	GA	الگوریتم ارائه شده
ورق هسته (kg)	۹۰۲۹۰	۹۰۱۰۱	۸۲۱۱۴	۸۵۷۱۱
مس مصرفی (kg)	۲۲۶۹۵	۱۹۰۵۴	۲۱۸۲۰	۱۸۳۰۴
روغن (kg)	۷۵۸۲۷	۸۱۵۹۱	۷۴۴۹۴	۷۳۴۹۳
تانک ترانسفورماتور (kg)	۱۲۳۳۹	۱۲۸۵۳	۱۲۰۹۴	۱۲۱۳۲
تلفات بار (kw)	۴۳۳	۵۰۳	۴۸۱/۴	۴۹۹/۲
تلفات بی‌باری (kw)	۱۰۶/۵	۱۰۶	۹۷	۱۰۰/۳
هزینه مواد ($)	۵۷۰۴۲۵	۵۴۶۲۴۲	۵۴۰۰۴۶	۵۱۳۰۴۳

در شکل (۷) نتایج جدول (۲) به صورت گرافیکی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود تابع هدف در الگوریتم ارائه شده نسبت به روش‌های MINLP[۵][۱۲]، GA[۶][۱۳] و DE[۷] [۱۴-۱۵] به ترتیب ۹/۹، ۶/۵ و ۴/۶ درصد کاهش پیدا کرده است.

شکل (۷) به کمک نمودار ستونی مقایسه نتایج خروجی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نمودار ستونی مقایسه نتایج خروجی الگوریتم‌های GA, [۱۶]. MINLP, TPA PSO[۸] (نمودار بر اساس خروجی تابع هدف(هزینه) می باشد)

[5] Mixed Integer Nonlinear Programming

[6] Genetic Algorithm

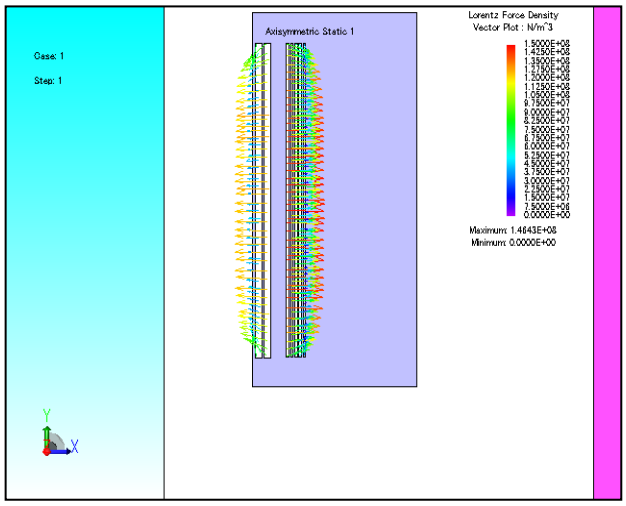
[7] Differential Evolution

[8] Particle Swarm Optimization

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

همان‌گونه که مشاهده می‌شود از آنجایی که قیمت مس بالاتر از ورق هسته می‌باشد الگوریتم بهینه‌سازی به سمت ولت بر دورهای بالاتر یا به عبارتی دور کمتر همگرا می‌شود. اما ولت بر دور با امپدانس اتصال کوتاه نسبت عکس دارد لذا ولت بر دورهای بسیار بالا باعث کاهش امپدانس اتصال کوتاه به مقادیر کمتر از مقدار گارانتی می‌گردد که باعث حذف آن ولت بردورها در پروسه بهینه‌سازی می‌گردد.

شکل (۸) مدل در نظر گرفته شده در دستگاه دوبعدی چرخان (استوانه‌ای) را نمایش می‌دهد. همانطور که در این شماتیک نمایش داده شده است، در این شبیه سازی اندازه مش اولیه سیم‌پیچ‌ها برابر ۱۰ mm و هسته مقدار ۳۵ mm در نظر گرفته شده است.



شکل (۸): مؤلفه‌های نیروی اتصال کوتاه وارد بر سیم‌پیچ

در این بخش نتایج مربوط به محاسبه نیروهای اتصال کوتاه شعاعی و محوری ترانسفورماتور مورد مطالعه با استفاده از مدل‌سازی ارائه شده بیان می‌گردد. با استفاده از الگوریتم جابجایی از طریق مدل سازی ارائه شده مقدار تنش روی سیم‌پیچ‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول نشان داده شده است که به ازای جابجایی مرکز مغناطیسی سیم‌پیچ فشار ضعیف به اندازه ۲/۱ میلی‌متر کمترین تنش آکسیال مجموع روی سیم‌پیچ‌ها حاصل می‌گردد. با توجه به این نتایج مشخص است که حداکثر نیروی فشاری روی کنده‌ها در شرایط جابجایی فوق برابر ۱۳۶ کیلونیوتون است در شرایطی که در شرایط بدون جابجایی این نیرو معادل با مقدار بسیار بزرگ ۳۳۶۲ کیلونیوتون خواهد بود. در این دو حالت امپدانس اتصال کوتاه نسبت به مقدار تعیین شده در گارانتی محصول که برابر ۱۲/۵٪ بوده، با خطایی کمتر از ۰/۰۱٪ مواجه بوده است. به‌هرحال علت اهمیت تثبیت امپدانس اتصال کوتاه در این شرایط اطمینان از حصول سلامت سیم‌پیچ‌ها و اکتیو پارت پس از خطا و یا در هنگام خطا می‌باشد. در شرایطی که در طرح اجرایی هدف تحمل تنش آکسیال در بروز خطا باشد، حجم کنده‌ها، اسپیسرها، میله‌های مهار، هسته فرومغناطیس به شدت افزایش خواهد یافت. این در شرایطی است که این نیروی نامتعارف سبب می شود میزان چگالی جریان سیم‌پیچ‌ها تو سط تنش آکسیال محدود گردد نه شرایط دمایی سیم‌پیچ. با توجه به مطالعات صورت گرفته اصلاح این نیرو حدود ۱۸/۲۵٪ در هزینه نهایی ترانسفورماتور قدرت صرفه‌جویی ایجاد می‌کند. البته تمامی این مباحث زمانی مطرح می‌گردد که هدف تولید ترانسفورماتور قدرت با قابلیت تحمل تنش‌های اتصال کوتاه و عدم تغییر امپدانس اتصال کوتاه پس از وقوع حادثه باشد.

جدول (۳): نتایج محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی در شرایط معمول و جابجایی با هدف کمینه‌سازی تنش آکسیال

مجموع	فشار ضعیف (LV)	فشار قوی (HV)	تنظیم ولتاژ	نوع نیرو (kN)
۱۳۶۰	۷۳۰	۲۱۰	۷۰	جابجایی بهینه
۳۳۶۲	-۶۱۷	۸۲۶	-۲۱۹	بدون جابجایی
-	-۳۹۸۰۷	۴۵۷۰۹	۱۵۲۱	شعاعی بدون جابجایی
-	-۳۹۸۰۲	۴۵۷۱۲	۱۵۳۱	شعاعی با جابجایی
-	۵۲۰	۹۴۸	۲۰۳	تجمعی (جابجایی)
-	۱۰۶۲	۱۷۴۱	۴۲۲	تجمعی

۴- تحلیل و بررسی نتایج

در این مقاله طراحی و بهینه‌سازی ترانسفورماتورهای قدرت به‌عنوان گران‌ترین و پرکاربردترین جز سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفت. روش ابتکاری جدیدی بنام درخت هرس شده برای طراحی بهینه ترانسفورماتورها ارائه گردید. در روش ارائه شده تمامی قیود طراحی اعم از قیود فنی و مقادیر گارانتی و محدودیت های کارگاهی به‌عنوان ابزارهایی جهت هرس کردن درخت و از بین بردن ژن‌های نامناسب استفاده شده است. انجام تحلیل‌های ریاضی درست و منطقی در زمینه‌های طراحی الکتریکی و مغناطیسی و حرارتی و آنالیز حساسیت تابع هدف و قیود نسبت به متغیرهای طراحی امکان حذف جواب‌های نشدنی و کوچکتر شدن فضای جستجو را برای ما فراهم ساخت. و درنهایت نتایج خروجی الگوریتم ارائه شده برای بهترین طرح از نظر تابع هدف با تحلیل المان محدود و نتایج ساخت یک نمونه از ترانسفورماتور، اعتبارسنجی شد. مشاهده شد که الگوریتم ارائه شده با توجه به فضای محدود شده به دلیل قطع شاخه‌های خشک و بدون میوه، از سرعت بالایی برخوردار است. و همچنین به علت جستجوی تمام فضای متغیرهای گسسته امکان رسیدن به نقطه بهینه مطلق فراهم شده است. طراحی ترانسفورماتورهای توزیع تو سط محققین به روش های مختلف انجام شده بود، در این مقاله این کار برای ترانسفورماتورهای قدرت نیروگاهی تا توان ۲۰۰ مگاولت آمپر و ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت انجام گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

در انتها طراحی یک ترانسفورماتور قدرت ۲۰۰ مگاولت آمپری با سطح ولتاژ ۱۵,۷۵ به ۴۰۰ کیلوولت به چهار روش مختلف بهینه‌سازی و با توابع هدف و قیود یکسان، بهینه شد. در این بهینه سازی روش PSA

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

نسبت سایر رو شها MINLP, PSO, GA مقایسه گردید که نتیجه نشان از کاهش نسبی تابع هزینه PSA نسبت به سایر روشها می باشد.

مراجع

[1] Franklin, Arthur Charles, and David Peter Franklin. *The J & P transformer book: a practical technology of the power transformer*. Elsevier, 2016.

[2] Kulkarni, Shrikrishna V., and S. A. Khaparde. Transformer engineering: design and practice. Vol. 25. CRC press, 2004.

[3] Del Vecchio, Robert M., et al. *Transformer design principles: with applications to core-form power transformers*. CRC press, 2017.

[4] A. Nazari, *"Leakage fluxes and mechanical forces calculation on the single phase shell-type transformer winding under over currents by 2-D and 3-D finite element methods"*, Journal of Electrical Engineering, January 2013.

[5] H. M. Ahn, Y. H. Oh, J. K. Kim, J. S. Song, S. C. Hahn, *"Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer"*, IEEE Trans. Magn., Vol. 48, No. 2, pp. 819-822, 2012.

[6] Faiz, Jawad, B. M. Ebrahimi, and Wejdan Abu-Elhaija. "Computation of static and dynamic axial and radial forces on power transformer windings due to inrush and short circuit currents." *2011 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*. IEEE, 2011.

[7] Moghaddami, Masood, Amir Moghadasi, and Arif I. Sarwat. "An algorithm for fast calculation of short circuit forces in high current busbars of electric arc furnace transformers based on method of images." *Electric Power Systems Research* 136: 173-180. 2016.

[8] Yadollahi, Milad, and Hamid Lesani. "Power transformer optimal design (PTOD) using an innovative heuristic method combined with FEM technique." *Electrical Engineering* 100.2 (2018): 823-838.

[9] Yadollahi, H. Lesani, *"Power transformer optimal design (PTOD) using an innovative heuristic algorithm combined with mix integer non-linear programming and FEM technique"*, IET Generation, Transmission & Distribution, 2017.

[10] Yadollahi M, Lesani H. Global transformer design optimization (GTDO) using harmony search and FEM technique. Global J Technol Optim. 2017;8:205.

[11] Soldoozy, A., Esmaeli, A., Akbari, H., & Mazloom, S. Z.. Implementation of tree pruning method for power transformer design optimization. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *29*(1), e2659. (2019)

[12] Amoiralis, Eleftherios I., et al. "Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation." IEEE transactions on magnetics 45.3 (2009): 1720-1723

[13] Khatri, Ajay, Hasmat Malik, and OP Rahi Member. "Optimal design of power transformer using genetic algorithm." 2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies. IEEE, 2012.

[14] Amoiralis, Eleftherios I., et al. "Global transformer design optimization using deterministic and nondeterministic algorithms." IEEE Transactions on Industry Applications 50.1 (2013): 383-394.

[15] dos Santos Coelho, Leandro, et al. "Novel gamma differential evolution approach for multiobjective transformer design optimization." IEEE transactions on magnetics 49.5 (2013): 2121-2124

[16] Khatri, Ajay, and O. P. Rahi. "Optimal design of transformer: a compressive bibliographical survey." International Journal of Scientific Engineering and Technology 1.2 (2012): 159-167

.

رزومه



علی سلدوزی در ارومیه متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی در مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای برق قدرت را به ترتیب در دانشگاه ازاد اسلامی واحد یزد(۱۳۸۸) ، واحد ساوه (۱۳۹۱) و واحد یزد(۱۳۹۹) گذرانده است.. زمینه‌های پژوهشی و علاقه مندی ایشان طراحی بهینه تجهیزات فشار قوی، طراحی و مدل سازی ماشین های الکتریکی، دینامیک و پایداری سیستم های قدرت و بهینه سازی سیستم های قدرت میباشد.



عبدالرضا اسماعیلی فارغ التحصیل مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق به ترتیب از دانشگاه علم و صنعت ایران(۱۳۷۴)، صنعتی امیرکبیر(۱۳۷۷) و انستیتو تکنولوژی هاربین-چین (۱۳۸۴) می-باشند. وی هم اکنون استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای می‌باشد. فعالیتهای پژوهشی و علاقمندی ایشان در زمینه الکترونیک قدرت، کنترل ماشین و سیستمهای توان پالسی است.



حمیدرضا اکبری تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت در دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکتری مهندسی برق-قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران سپری کرده است. وی هم اکنون استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد می باشد. فعالیتهای پژوهشی و علاقهمندی ایشان در زمینه ماشینهای الکتریکی و انرژی های تجدیدپذیر است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



سید ضیاء مظلوم در تهران متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی کارشناسی ارشد پیوسته فیزیک کاربردی از دانشگاه اوپسالا، سوئد سال ۱۳۸۴ و مقطع دکتری برق گرایش سیستم‌های الکتریکی از دانشگاه KTH استکهلم، سوئد سال ۱۳۸۸گذرانده است. زمینه های پژوهشی و علاقه مندی ایشان کنترل سیستم‌های قدرت، دینامیک و پایداری سیستم‌های قدرت میباشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021

Optimal Design of Power Transformers with the Help of a New Innovative Algorithm to Minimize the Cost and Electromagnetic Forces Applied to the Coil

Ali Soldoozy[1], Abdolreza Esmaeli[2], Hamidreza Akbari[3], Seyed Ziya Mazloom[4]

1- Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran, Ali.soldoozy@iau.ac.ir
2- Assistant professor, Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran, aesmaeli@aeoi.org.ir
3- Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran, hamid_r_akbari@yahoo.com
4- Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Mehriz Branch, Islamic Azad University, Mehriz, Iran, szmazloom@gmail.com

Abstract: Transformer design is an issue it is a non-linear and complex combination. Accuracy in the answers obtained and the speed of reaching the answers are the two basic criteria in the process of transformer design. The various optimization methods presented so far have had problems such as ignoring some design limitations, reaching a minimum local response, not considering all the variables involved in optimization, or being unable to search the entire space due to their random nature. The surest way to reach the absolute optimal point is to use search algorithms He is all space. But the requirement for all-space search methods to reach the absolute optimal point is that the search space is discrete and limited, and therefore a smart user is needed. Since the problem of optimizing the power transformer has a large number of independent variables and extensive search space, the full space search method will face the problem of lack of computer memory and low program execution speed. In this article, to eliminate this weakness and reach the absolute optimal point, by modifying the Power transformer design process and presenting a new innovative algorithm called pruned tree algorithm to solve the problem of optimal economic design of power transformers and reduce electromagnetic forces, to the optimal point we move absolutely. JMAG-Designer and Ansys Maxwell software is used for the finite element analysis in this research.

Keywords: New innovative algorithm, optimization, cost reduction, reduction of short circuit forces, finite element method.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.2.6.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No. 2- Summer 2021