

## طراحی بهینه ترانسفورماتور به کمک الگوریتم ژنتیک

سید هادی حسینی\*

دانشجوی دکتری بخش برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

حسین سیفی\*\*

استاد بخش برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۹/۹/۲۶، تاریخ تصویب ۸۱/۳/۴)

### چکیده

انتقال انرژی الکتریکی در مسافتهای طولانی به همراه لزوم کاهش تلفات و افت ولتاژ شبکه باعث استفاده از ترانسفورماتور در شبکه در سطوح ولتاژی مختلف آن می شود. نقش این عنصر در شبکه به همراه قیمت بالای آن که به سبب استفاده از مواد گرانبه در ساخت آن ناشی می شود، لزوم طراحی بهینه آن را آشکارتر می سازد. در این مقاله با کمک گیری از مفهوم روش مدرن بهینه سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک، روشی متفاوت با روشهای بهینه سازی پیشین برای طراحی بهینه ترانسفورماتور ارائه شده است. بر اساس روش فوق، نرم افزاری جهت طراحی بهینه ترانسفورماتور پیاده سازی شده است و نتایج طراحی بوسیله این نرم افزار برای یک نمونه ترانسفورماتور توزیع آورده شده است.

واژه های کلیدی: طراحی بهینه، ترانسفورماتور، الگوریتم ژنتیک.

مقدمه

\*[siedhadi@hotmail.com](mailto:siedhadi@hotmail.com)

\*\*[cifi\\_ho@modares.ac.ir](mailto:cifi_ho@modares.ac.ir)

طراحی ترانسفورماتور در مراجع [۲] و [۳] آورده شده است.

مرجع [۴] مدل جدیدی را جهت محاسبات گرمایی برای ترانسفورماتور معرفی کرده است. در مرجع [۵] روش جدیدی جهت محاسبه تلفات هسته معرفی شده است. همچنین مرجع [۶] مایع جدیدی را با خصوصیات عایقی، الکتریکی و گرمایی بهتر جهت استفاده در ترانسفورماتور بجای روغنهای معدنی یا سیلیکونی مورد مصرف کنونی معرفی کرده است.

علاوه بر استفاده از فن‌آوریهای جدید، پیشرفتهای انجام شده در ساخت رایانه‌ها، باعث گردیده طراحان ترانسفورماتور از این ابزار نیز جهت طراحی مطلوب‌تر ترانسفورماتور استفاده کنند، که این امر در نهایت باعث سریع‌تر شدن فرآیند طراحی ترانسفورماتور گشته است. در مراجع [۷، ۸ و ۹] نمونه‌هایی از استفاده از رایانه برای طراحی برخی قسمت‌ها یا قسمت‌های مختلف ترانسفورماتور آورده شده است.

در کنار تمامی پیشرفتهای فوق مراجع گوناگونی نیز با کمک‌گیری از تکنیکهای

ترانسفورماتور به عنوان ماشینی الکتریکی که واسطه انتقال انرژی بین دو قسمت از شبکه برق با سطوح ولتاژ معمول متفاوت می‌باشد، نقش مهمی را در کاهش تلفات و افت ولتاژ شبکه ایفا می‌کند. در مرجع شماره [۱] بطور مفصل تاریخچه ترانسفورماتور از ابتدای اختراع آن بهمراه پیشرفتهای انجام شده در مورد طراحی و ساخت آن و رویکرد آینده در فن‌آوری ترانسفورماتور ذکر شده است. لزوم کاهش تلفات بی‌باری و بار ترانسفورماتور در شبکه‌های برق بهمراه رفتارهای خاص الکتریکی ترانسفورماتور (نظیر رفتار عایقی) موجب پیشرفتهای چشمگیری در مواد اولیه مورد نیاز در ساخت ترانسفورماتور گردید که در این میان می‌توان به ظهور ورق‌های آمورف جهت ساخت هسته و ابرهادیهای گرم جهت ساخت بوبینها اشاره کرد. از طرفی ظهور روشهای عددی برای محاسبه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی بهمراه پیشرفتهای حاصله در علوم نظیر الکترومغناطیس، ترمودینامیک و مکانیک باعث متحول شدن نحوه طراحی ترانسفورماتور گردیده است. نمونه‌هایی از استفاده از روش‌های محدود برای

عبارت دیگر بهینه کردن ترکیب عایقی تحت قید تحمل ترانسفورماتور در مقابل ولتاژهای اعمالی به آن، هدف اصلی این تحقیق بوده است.

در مراجع شماره [۱۱] و [۱۲] از تکنیکهای سعی و خطا و طراحیهای مکرر جهت بهینه‌سازی تنها با تابع هدف حداقل سازی قیمت مواد مصرفی تحت قید پوشاندن خصوصیات خواسته شده استفاده شده است.

در مرجع شماره [۱۳] از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه شکل بوبینهای ترانسفورماتور به منظور کاهش نیروهای اتصال کوتاه کمک گرفته شده است.

در بین مقاله‌هایی که ارائه شده است مرجع شماره [۱۴] تنها مقاله‌ای است که تابع هدف را حداقل سازی قیمت تمام شده ساخت ترانسفورماتور بعلاوه هزینه انرژی تلف شده ناشی از تلفات بار و بی‌باری در نظر گرفته است. در این مرجع تکنیکهای مختلف بهینه‌سازی نظیر روشهای سعی و خطا، روشهای مبتنی بر تکنیک مونت کارلو مدلسازی چند جمله‌ای تابع هدف مورد مقایسه و بحث قرار گرفته و در نهایت از مدلسازی تابع هدف بصورت یک چند

مختلف بهینه‌سازی، روشهایی را جهت طراحی بهینه ترانسفورماتور معرفی کرده‌اند. در این مقاله در ابتدا بطور خلاصه مروری بر کارهای انجام شده در مورد طراحی بهینه ترانسفورماتور آورده می‌شود و در ادامه پس از معرفی مختصر الگوریتم ژنتیکی به نحوه پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیکی در فرآیند طراحی ترانسفورماتور پرداخته می‌شود. در نهایت اعمال موفق روش بر روی یک ترانسفورماتور توزیع ارائه شده است. بخش پایانی نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از بحث می‌پردازد.

## مروری بر کارهای گذشته و مبنای پیشنهاد روش جدید

همچنانکه گفته شد، با کمک‌گیری از تکنیکهای مختلف بهینه‌سازی، مراجع گوناگون، روشهایی را جهت طراحی بهینه ترانسفورماتور معرفی کرده‌اند. در اینگونه تحقیقات علاوه بر تکنیکهای متفاوت استفاده شده، توابع هدف متفاوت بهینه‌سازی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. بطور مثال در مرجع شماره [۱۰] نویسنده از روش المانهای محدود برای طراحی بهینه عایقی ترانسفورماتور استفاده کرده است. به

هستند را نیز فراهم می‌سازد. بطور خلاصه مزیت استفاده از این الگوریتم در مقایسه روشها، فرار از بهینه محلی (در مقایسه با روشهایی نظیر روش سعی و خطا)، عدم نیاز به تقریب تابع هدف به یک چند جمله‌ای وابسته به متغیرهای طراحی (نظیر روش مرجع [۱۰]) و عدم وابستگی به نقطه شروع (همانند الگوریتم مبتنی بر تکنیک مونت کارلو) است.

### پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک در فرآیند طراحی ترانسفورماتور

اساس کار الگوریتم ژنتیک کار بر روی کروموزومها و تصحیح طراحی و متغیرها (ژنها) در هر مرحله بر اساس تابع هدف محاسبه شده متناظر با هر کروموزوم می‌باشد. بدین معنا که متغیر و پارامترهای اساسی تاثیر گذار بر طراحی که هر کدام ژن نامیده می‌شوند در کنار هم مجموعه‌ای را تشکیل می‌دهند که کروموزوم نامیده می‌شود. خصوصیت اصلی یک کروموزوم این است که بطور مثال بین ترانسفورماتورهای طراحی شده و کروموزومها یک رابطه یک به یک برقرار است یعنی هر ترانسفورماتور تنها یک

جمله‌ای وابسته به متغیرهای مستقل طراحی ترانسفورماتور برای بهینه‌سازی استفاده شده است.

همچنانکه در این مقاله ذکر شده است نقص روشهای مبتنی بر تکنیک سعی و خطا در رسیدن به نقطه بهینه محلی بجای بهینه مطلق و نقص روش مبتنی بر تکنیک مونت کارلو وابستگی نتایج به نقطه شروع می‌باشد، علاوه بر این میزان انحراف جواب از بهینه واقعی که در اثر تقریب تابع هدف به یک چند جمله‌ای پدید می‌آید (نظیر روش مرجع [۱۴])، قابل تشخیص نیست. در این مقاله روشی نوین بر مبنای الگوریتم ژنتیکی [۱۵] برای طراحی بهینه ترانسفورماتور پیشنهاد و پیاده‌سازی می‌شود که علاوه بر در نظر گرفتن کلیه پارامترهای موثر بر طراحی، ساخت و بهره‌برداری، امکان رسیدن به نقطه بهینه مطلق واقعی را افزایش می‌دهد، بدین صورت مشکلات تحقیقات گذشته در خصوص چگونگی رسیدن به پاسخ بهینه [۱۴، ۱۲، ۱۱] را مرتفع می‌سازد. ویژگی دیگر مطلوب الگوریتم ژنتیکی در آن است که رسیدن پاسخ به نقطه بهینه را در شرایطی که اکثر پارامترهای طراحی به صورت گسسته

باشد و مجموعه بیتها در کنار هم شکل کدبندی شده پارامتر متناظر می باشد.

نکته ای که در اختصاص تعداد بیت به هر ژن و کدبندی آن باید در نظر گرفت و در واقع مزیت دیگر آلوگوریتم ژنتیک نسبت به سایر روشهای بهینه سازی نیز می باشد این است که می توان قیود مساله را با انتخاب تعداد بیت و کدبندی مناسب بدون نیاز به وارد کردن نامساویهای ناشی شده از قیود در قسمتهای مختلف طراحی در کل مساله و طراحی اعمال کرد.

اولین قدم در پیاده سازی آلوگوریتم ژنتیک در فرایند طراحی ترانسفورماتور، تشکیل کروموزوم و مشخص کردن ژنها می باشد. مراحل بعدی را بصورت زیر می توان بیان کرد:

۱ - انتخاب دو کروموزوم از جمعیت کروموزومهای موجود بصورت تصادفی با توجه به تابع هدف محاسبه شده متناظر با آنها.

۲ - تولید کروموزوم فرزند از دو کروموزوم انتخابی با اعمال عملگرهای جابجایی و جهش [۱۵].

۳ - انجام فرایند طراحی برای کروموزوم جدید.

کروموزوم متناظر داشته و هر کروموزوم تنها و تنها به یک ترانسفورماتور مشخص دلالت می کند.

چون متناظر با هر کروموزوم یک ترانسفورماتور وجود دارد بنابراین به هر کروموزوم عددی را نیز می توان نسبت داد که همان تابع هدف محاسبه شده برای ترانسفورماتور طراحی شده متناظر می باشد. نکته دیگر در مورد ژنها این است که هر ژن در کروموزوم بصورت کد شده ظاهر می شود یعنی پارامترها یا متغیرها بر اساس روشی خاص کدبندی شده و در کروموزوم قرار می گیرند. بطور مثال جنس سیم بوبین فشار ضعیف که یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر طراحی ترانسفورماتور می باشد می تواند مس یا آلومینیوم در نظر گرفته شود. از اینرو به این پارامتر در کروموزوم یک بیت اختصاص داده می شود و در صورتیکه عدد متناظر با این بیت صفر باشد به مفهوم مسی بودن سیم بوبین فشار ضعیف و یک بودن آن به معنای آلومینیومی بودن آن است. بنابراین با توجه به این مثال هر ژن نیز متشکل از تعدادی بیت کنار هم می باشد که هر بیت صفر یا یک می تواند

که اجزای تابع هدف را بصورت زیر می‌توان بسط داد:

$$= \text{هزینه تلفات در طول عمر ترانسفورماتور} \\ + \text{تلفات بار ترانسفورماتور} * \text{قیمت واحد} \\ + \text{تلفات بی‌باری} * \text{قیمت واحد تلفات} \\ + \text{بی‌باری} \quad (۲)$$

$$= \text{قیمت مواد مصرفی} \\ + \text{قیمت واحد وزن مواد مصرفی} * \text{وزن مواد} \\ + \text{مصرفی} \quad (۳)$$

$$= \text{هزینه کارگر و تجهیزات} \\ + \text{زمان مورد نیاز جهت فرآوری و ساخت} \\ + \text{قیمت هر ساعت کار کارگر یا تجهیز} \quad (۴)$$

مواد مصرفی مورد استفاده در ساخت ترانسفورماتور، مس، ورق‌هسته، روغن، ورق‌آهن و مواد عایقی جامد دیگر نظیر کاغذها و غیره می‌باشند. مقدار وزن مورد استفاده این مواد در ترانسفورماتور بعد از اتمام فرایند طراحی برای هر کروموزوم بدست می‌آید، قیمت واحد وزن این مواد نیز در کشورها و نقاط مختلف می‌تواند متفاوت باشد. مقدار زمان

۴ - محاسبه تابع هدف برای ترانسفورماتور طراحی شده، متناظر با کروموزوم جدید.

۵ - مقایسه تابع هدف و کنترل معیار رسیدن به نقطه بهینه و در صورت نرسیدن به نقطه بهینه، ضبط این کروموزوم در جمعیت اولیه و تکرار از مرحله ۱.

۶ - پایان

خروجی طراحی بهینه ترانسفورماتور به این روش یک کروموزوم می‌باشد که تحت ژنهای آن می‌توان به نقطه بهینه تابع هدف دست یافت.

### تابع هدف

تابع هدف مورد نظر جهت بهینه‌سازی به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$= \text{تابع هدف} \\ + \text{قیمت مواد مورد استفاده در ساخت} \\ + \text{هزینه کارگر و تجهیزات مورد نیاز جهت فرآوری و ساخت} \\ + \text{هزینه تلفات در طول عمر ترانسفورماتور} \\ - \text{قیمت ضایعات در سال پایانی عمر} \\ + \text{ترانسفورماتور} \quad (۱)$$

مورد نیاز جهت ساخت یا نفر ساعت صرف شده برای ساخت ترانسفورماتور نیز در اینجا با تفکیک مراحل مختلف تولید از همدیگر و تشخیص پارامترهای موثر بر مدت زمان صرف شده در هر مرحله و شبیه سازی این ارتباط و جمع بندی نهایی محاسبه می شود. بطور مثال نمونه ای از این شبیه سازی که نفر ساعت مورد نیاز جهت برش هسته را در ارتباط با وزن و تعداد پاکتهای هسته بیان می کند در شکل (۱) آورده شده است. (منحنی مورد نظر بر اساس اطلاعات اخذ شده از واحد حسابداری صنعتی شرکت ایران ترانسفو (تنها شرکت تولید کننده ترانسفورماتورهای توزیع و قدرت در ایران) رسم شده است.)

### شکل ۱ : نفر ساعت مورد نیاز جهت برش هسته متناسب با وزن و تعداد پاکتهای آن.

تلفات بار و بی باری ترانسفورماتور نیز مشابه وزن مواد مصرفی بعد از اتمام فرایند طراحی ترانسفورماتور بدست می آیند. قیمت واحد تلفات بی باری را نیز می توان بر اساس روابط زیر محاسبه کرد:

= قیمت انرژی تلف شده به سبب تلفات بی باری

$$P_0 * T * R$$

(۵)

که  $R$  قیمت واحد انرژی (ریال بر کیلو وات ساعت)،  $P_0$  تلفات بی باری ترانسفورماتور (کیلووات) و  $T$  مدت زمان کار یا عمر مفید ترانسفورماتور می باشد (بر حسب ساعت) (تلفات بی باری در تمام مدت برقرار بودن ترانسفورماتور بطور ثابت و مستقل از بار ترانسفورماتور وجود خواهد داشت).

مهمترین مسائل حاکم بر طراحی ترانسفورماتور که باعث پیچیده شدن این فرایند می شود را می توان در مسائل حرارتی و عایقی دانست. بعبارت دیگر از یک طرف ایجاد حرارت ناشی از تلفات بار و بی باری در ترانسفورماتور و ازدیاد دمای نقاط درونی به همراه محدودیت تحمل دمایی عایقهای ترانسفورماتور و از طرف دیگر توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی در ترانسفورماتور به همراه محدودیت تحمل عایقی عایقهای ترانسفورماتور و به همراه توزیع خاص و غیرخطی ولتاژهایی نظیر ولتاژ ضربه بویینهای اولیه و ثانویه بعلت ظهور خازنهای بین نقاط مختلف آن در فرکانسهای بالا (در حد KHz) از جمله مواردی هستند که در طراحی ترانسفورماتور باید مورد توجه واقع شوند. در ترانسفورماتور ابتدا با توجه به خصوصیات گرمایی مواد مختلف ترانسفورماتور، میزان جهش دمایی نقاط مختلف آن نسبت به محیط در حالیکه ترانسفورماتور بار نامی خود را تغذیه می کند محاسبه می شود و سپس با توجه به دما و سایر خصوصیات محیط، تجهیزات خنک کنندگی ترانسفورماتور به گونه ای

در مورد قیمت واحد تلفات بار نیز می توان نوشت:

= قیمت انرژی تلف شده به سبب تلفات بار

$$R * \int_0^T P'k . dt \quad (6)$$

که  $P'k$  تلفات بار متناسب با بار متصله به ترانسفورماتور می باشد که:

$$P'k = Pk * (Pl / Pn)^2 \quad (7)$$

$Pl$  بار متصله به ترانسفورماتور،  $Pn$  بار نامی ترانسفورماتور و  $Pk$  تلفات بار ترانسفورماتور در بار نامی (توانها و تلفات بر حسب کیلو وات) در نتیجه می توان نوشت:

$$\text{قیمت} = \frac{R}{Pn^2} * \int_0^T Pl . dt \quad (8)$$

واحد تلفات بار

قیمت ضایعات در سال پایانی عمر ترانسفورماتور را نیز می توان با توجه به وزن مواد مصرفی و قیمت واحد وزن ضایعات آن محاسبه کرد.

فرایند طراحی



ابعاد بوبین فشار ضعیف، محاسبه جهش حرارتی بوبین فشار ضعیف (توضیح داده شده در بالا) با توجه به تلفات محاسبه شده آن، خصوصیات حرارتی مواد مختلف و تعداد سطوح خنک‌کنندگی بوبین فشار ضعیف (سطوحی که با مایع خنک‌کننده (روغن) در تماس می‌باشند).

ج- محاسبه مشخصات بوبین فشارقوی مطابق بوبین فشار ضعیف با در نظر گرفتن فواصل عایقی مورد نیاز (اشاره شده در بالا).

د- محاسبه امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور با توجه به نتایج تلفات و ابعاد بدست آمده از قسمتهای پیشین بر اساس روابط الکترومغناطیسی.

ه- محاسبه ابعاد نهایی قسمت فعال ترانسفورماتور (قسمت فعال به مجموعه هسته و نگهدارنده‌های آن و بوبینها اطلاق می‌شود) به‌مراه محاسبه میزان تلفات دفع شوندگی (تلفات دفع شوندگی توانی است که ترانسفورماتور باید به محیط بیرون انتقال دهد تا مواد عایقی بتوانند در محدوده دمایی مجاز خود کار کنند).

طراحی می‌شوند که این مواد در محدوده دمایی مجاز خود قرار بگیرند. برای در نظر گرفتن مسائل عایقی نیز با توجه به ولتاژ فشارقوی و ولتاژهای اعمالی به ترانسفورماتور که توسط استانداردها مشخص می‌شوند، ترکیب مواد عایقی در نقاط مختلف ترانسفورماتور مشخص می‌گردد. بر اساس مطالب فوق فرایند طراحی ترانسفورماتور بصورت زیر در نظر گرفته شده است [۱۶]:

الف- محاسبه قطر، سطح مقطع و ابعاد پاکتهای هسته با

توجه به رابطه ولتاژ، سطح مقطع، فرکانس و چگالی شار هسته و تعداد دور بوبین (برای رسیدن به سطح مقطع دایروی شکل در هسته از دسته ورقهای مختلف با عرضهای متفاوت با هم که هر کدام از دسته‌ها از ورقهای با عرض یکسان تشکیل شده‌اند، استفاده می‌شود به هر کدام از این دسته‌ها پاکت هسته اطلاق می‌شود).

ب- محاسبه ابعاد ارتفاعی و شعاعی بوبین فشار ضعیف با توجه به تعداد دور سیم فشار ضعیف، محاسبه تلفات مقاومتی و گردابی در بوبین فشار ضعیف با توجه به روابط موجود بر اساس چگالی جریان و

اینکار انجام شده است (برخی از این محدودیتها در جدول (۱) آمده است). قسمت دوم محدودیتهایی نظیر امپدانس اتصال کوتاه ترانسفورماتور قابلیت تحمل دمایی و ولتاژی عایقها می باشند که در مورد این محدودیتها بطور مثال ترانسفورماتوری در میان جمعیتها قرار گرفته و مورد مقایسه قرار می گیرد که امپدانس اتصال کوتاه مطلوبی در نزدیکی مقدار خواسته شده داشته باشد و یا فرآیند طراحی طوری انجام می شود که عایقها در معرض شرایط دمایی و ولتاژی بیش از حد مجاز خود واقع نشوند.

### پیاده سازی روش پیشنهادی برای طراحی

#### بهینه ترانسفورماتور توزیع

روش گفته شده فوق برای ترانسفورماتورهای توزیع (ترانسفورماتورهای با قدرت پایین تر از ۲MVA و ولتاژ فشار قوی پایین تر از ۳۳KV برای کار در فرکانس ۵۰Hz) بصورت بسته نرم افزاری آماده گردیده است.

و - طراحی مکانیکی ترانسفورماتور با توجه به حداقل فواصل عایقی مورد نیاز) از بدنه فلزی زمین شده تا بوبینهای ولتاژدار)، ابعاد و وزن قسمتهای مختلف بدست آمده و میزان تلفات دفع شوندگی (این توان با توجه به نوع خنک کنندگی ترانسفورماتور در اثر تماس مستقیم بدنه ترانسفورماتور یا رادیاتورها با محیط بیرون یا در اثر کار آنها و غیره به آن منتقل می شود).

### محدودیتها و قیود طراحی

محدودیتهای این مساله را می توان به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول از محدودیتهای ساخت ناشی می شوند که می توان آنها را محدودیتهای فن آوری نامید بطور مثال در فن آوری موجود که بحث بهینه سازی در مورد آن انجام می شود در طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور بیش از هشت سیم نمی توان باهم موازی کرد یا تنها ابعاد بخصوصی از سیمها موجود می باشد. این محدودیتها را می توان به راحتی در اختصاص بیتها به هر ژن یا نحوه کدبندی در نظر گرفت که

جدول ۱ : اطلاعات مربوط به ژنها .

توضیحات	تعداد بیت اختصاصی به ژن	ژن متناظر با پارامتر
مدلی برای ولت بر دور اعشاری	۸	تعداد دور بوبین فشار ضعیف
حداکثر ۱۶ پکت	۴	تعداد پکت هسته
حداکثر ۴ لایه	۲	تعداد لایه بوبین فشار ضعیف
از بین سیمهای تخت موجود	۸	سیم فشار ضعیف
از طرف طولی سیم یا عرضی آن	۱	نحوه پیچش سیم فشار ضعیف
حداکثر ۸ سیم موازی	۳	تعداد سیم موازی فشار ضعیف
حداکثر ۲ سیم موازی	۱	تعداد سیم موازی در جهت شعاع فشار ضعیف
مس یا آلومینیوم	۱	جنس سیم فشار ضعیف
لایه‌ای با سیم گرد یا تخت، بشقابی یا لایه‌ای سری	۲	نوع بوبین فشار قوی
از بین سیمهای گرد و تخت موجود	۸	سیم فشار قوی
در صورت تخت بودن سیم	۱	نحوه پیچش سیم فشار قوی
حداکثر ۲ سیم موازی	۱	تعداد سیم موازی فشار قوی
مس یا آلومینیوم	۱	جنس سیم فشار قوی
-	۱	وجود یا عدم وجود کانال خنک‌کنندگی در بوبین فشار

		ضعیف
-	۱	وجود یا عدم وجود کانال خنک‌کنندگی در بوبین فشار قوی
Hi-B یا M5	۱	جنس ورق هسته
با توجه به نوع ورق انتخابی	۸	چگالی شار ماکزیمم هسته
برای سیمهای تخت	۱	ضخامت عایق سیم فشارضعیف
برای سیمهای تخت	۱	ضخامت عایق سیم فشار قوی
حداکثر ۱۶ میلیمتر	۴	اختلاف ارتفاع مغناطیسی دو بوبین
-	۲	مشخصه خاص بوبین فشار قوی
حداکثر دو کانال	۱	تعداد کانال خنک‌کنندگی بوبین فشار قوی

نوع از ترانسفورماتورها اجرا گردید.

### کروموزوم ترانسفورماتور توزیع

کروموزوم در نظر گرفته شده برای ترانسفورماتور توزیع مشتمل بر ۲۲ ژن بصورت جدول (۱) می‌باشد (تعداد بیتهای اختصاصی به ژنها و توضیحات

با توجه به روندی که در قسمت‌های پیشین توضیح داده شد روش پیشنهادی برای طراحی بهینه کلیه ترانسفورماتورها قابل پیاده‌سازی است. در اینجا بخاطر مقایسه نتایج و بخاطر آنکه از نظر برخی مسائل عایقی و حرارتی، ترانسفورماتورهای توزیع نسبت به ترانسفورماتورهای قدرت ساده‌ترند، روش فوق برای این

جدول ۲: نتایج طراحی ترانسفورماتور نمونه.

موضوع مورد مقایسه	نمونه موجود	نتیجه طراحی برای نسبت
-------------------	-------------	-----------------------

قیمت تلفات بار به بی باری ۱:۱		
۵۸۳۹۹۸۲	۴۹۶۸۵۹۵	قیمت کل مواد [ریال]
۵۷۲۰۲۲	۵۲۴۹۴۲	قیمت تجهیزات و کارگر مورد نیاز [ریال]
۱۰۹۴۲۹۹۲	۹۲۸۷۳۵۲	قیمت تلفات بی باری [ریال]
۳۶۲۵۰۶۳۲	۴۹۹۰۵۷۲۰	قیمت تلفات بار [ریال]
۲/۲۹۹	۳/۱۶۵	تلفات بار [KW]
M5	M5	ورق هسته
۰/۶۹۴	۰/۵۸۵	تلفات بی باری [KW]
۱/۶۸۵	۱/۷۶۵	چگالی شار ماکزیمم هسته [T]
۳۴۱	۲۸۷	وزن هسته [Kg]
۱۸۵	۱۴۴	وزن مس [Kg]
۲۵۰	۲۴۰	وزن روغن [Kg]
۱۶۲۵	۱۶۶۸	ارتفاع کل [mm]
۱۳۸۴	۱۲۸۶	طول کل [mm]
۷۲۲	۶۹۹	عرض کل [mm]
۵۳۶۰۱۶۲۸	۶۴۶۸۶۶۰۹	کل قیمت تمام شده [ریال]
۱۷	-	درصد کاهش قیمت [%]

در نتیجه قیود مساله می باشند)). این نرم افزار قادر است با گرفتن اطلاعات اولیه مورد نیاز شامل توان نامی، ولتاژ نامی،

داده شده در مورد ژنرها با توجه به فن آوری تولید این ترانسفورماتورها در ایران می باشد (که در واقع همان محدودیتهای ساخت و

درجه سانتیگراد و گروه اتصال Zn5 است.

همچنانکه گفته شد، نمونه بهینه شده در اینجا با هدف کاهش کل مجموعه هزینه ساخت، مواد و تلفات بدست آمده است و ضرایب تابع هدف نیز با توجه به شرایط ایران محاسبه شده‌اند، لذا در برخی موارد همچنانکه دیده می‌شود علیرغم کاهش کل مجموع تابع هدف، برخی از اجزای آن نظیر قیمت مواد افزایش یافته است.

طراحی مشابهی برای تعداد دیگری از ترانسفورماتورهای توزیع صورت گرفته که جهت اطلاعات بیشتر به مرجع شماره [۱۷] مراجعه شود.

### نتیجه گیری

روشهای موجود طراحی بهینه ترانسفورماتور، معایبی همچون گیر افتادن در نقطه بهینه محلی، خطای ناشی از تقریب تابع هدف و وابستگی به نقطه شروع دارند. در این مقاله، روشی نوین بر مبنای الگوریتم ژنتیکی پیشنهاد گردید که تا حدود زیادی قادر است مشکلات روشهای قبلی را مرتفع نماید. ایده این روش بر روی یک ترانسفورماتور نمونه توزیع پیاده‌سازی گردید. مولفین مقاله، پیاده‌سازی

تعداد و درصد تپها، گروه اتصال، ارتفاع نصب، دمای محیط نصب و امپدانس اتصال کوتاه، ترانسفورماتور بهینه متناظر را طراحی کند. زمان اجرای برنامه با استفاده از یک کامپیوتر ۲۳۳ MHz تقریباً حدود نیم ساعت می‌باشد.

### نمونه طراحی شده

با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده برای یک نمونه ترانسفورماتور، طراحی صورت گرفت. در جدول (۲) نتایج برنامه به‌مراه مقایسه تابع هدف با ترانسفورماتور موجودی که بر اساس استاندارد DIN طراحی شده، آمده است (اجزای تابع هدف و ضرایب آن با توجه به فن آوری تولید ترانسفورماتور در ایران و مشخصات بار آن محاسبه شده است، که برخی از این ضرایب در ضمیمه آورده شده‌اند).

مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه ۲۰۰ کیلو ولت آمپر، ۲۰ کیلو ولت به ۴۰۰ ولت (با تپ ۲/۵ درصدی) امپدانس اتصال کوتاه ۴ درصد، ارتفاع نصب ۱۰۰۰ متر از سطح دریا، ماکزیمم درجه حرارت محیط ۴۰

مانند هزینه‌ای که از بابت حمل و نقل یا زمین اختصاصی به ترانسفورماتور در پست صرف می‌شود.

ب - استفاده از تکنیکهای تحلیل میدان و یافتن ترکیب عایقی مناسب در فرایند طراحی بجای استفاده از ترکیبهای عایقی آماده .

روش را در خصوص ترانسفورماتورهای قدرت در دست انجام دارند. بعلاوه گامهای بعدی که در جهت تکمیل روش ارائه شده می‌توان برداشت ( که در حال حاضر در دست انجام می‌باشند) را بصورت زیر می‌توان بیان کرد :

الف - تکمیل و رفع نواقص تابع هدف مثل افزودن برخی از عوامل دیده نشده

#### مراجع

- 1 - Allan, D. J. (1991). "Power transformers – the second century." *Power Engineering Journal*, Vol. 51, PP. 5-14.
- 2 - Allcock, R., McClelland, R., Holland, S. A. and Roue, A. (1995). "Transformer design and analysis using finite element methods." *IEE Colloquium on Computation in Electrostatics*, PP. 8/1-8/3.
- 3 - Holland, S. A., Haydock, L. and Oconnell, G. P. (1991). "Power transformer design with finite elements a company experince." *International Conference on Computationin Electromagnetics*, PP. 315-318
- 4 - Pierce, L. W. and Holifield, T. (1999). "A thermal model for optimized distribution and small power transformer design." *Trasmission and Distribution Conference, IEEE*, Vol. 2, PP. 925-929.

- 5 - Basak, A., Chi-hang, Yu. and Lioyd, G. (1994). "Efficient transformer design by computing core loss using a novel approach." *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 3052, PP. 3725-3728.
- 6 - Gonzalez, D. A., Gauger, G., Yerges, A. and Goelde, G. (1997). "Distribution transformer for the 21th century." *IEE Conference*, Publ. No. 438, Vol. 1, PP. 25/1-25/5.
- 7 - Goethe, P. K. and Goethe, W. D. (1993). "Transformer design using windows." *Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1993, Proceeding Chicago93, EEIC/ICWA Exposition*, PP. 57-63.
- 8 - Patekar, S. A., Bhole, A. H. and Kulkarni, S. K. (1992). "Computer aided transformer design – an exposure to undergraduates." *Modeling, Measurment & Control*, Vol. 47, Iss: 2, PP. 53-64.
- 9 - Nelson, D. (1988). "Computer – aided design for transformer manufacturing." *Electrical Manufacturing*, Vol. 2, Iss: 6, PP. 31-32.
- 10 - Darrey, V. (1992). "The use of finite element techniques to optimise the insulation design of power transformers." *Sixth International Conference on Dielectric Materials, Measurment and Application, Conf.*, Pub. L, No. 363, PP. 174-7.
- 11 - Rubbai, A. (1994). "Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class." *IEEE Transaction on Power System, IEEE*, Vol. 93, PP. 1174-1181.
- 12 - Shahzad, F. and Shwehdi, M. H. (1997). "Human – computer interaction of single/three phase transformer design and



- performance.” *Industrial and Commercial Power System Technical Conference, IEEE*, PP. 193-196.
- 13 - Di. Barba, P., Kladas, A., Neittaanmaki, P., Radnicki, M. and Savini, A. (1994). “Application of global optimization strategies to the shape design of a transformer winding.” *Advances in Engineering Software*, Vol 19, Iss: 2, PP. 121-5.
- 14 - Saravolac, M. P. (1998). “Use of advanced software techniques in transformer design.” *IEE Collquium on Design Technology of T&D Plant*, PP. 9/1-9/11.
- 15 - Davice, L. (1991). *Handbook of Genetic Algoritm*, RainHold .
- 16 - Franklin, A. C. And Franklin, D. P. (1998). *The J&P Transformer Book*, Twelfth Edition, Butterworths, Britania.
- ۱۷ - حسینی، س. ه. "طراحی بهینه ترانسفورمر توزیع." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۷۹).

### ضمیمه

#### برخی از ضرایب تابع هدف

- ۱ - قیمت واحد تلفات بی باری : با احتساب مدت عمر مفید ۳۰ سال برای ترانسفورماتورها و قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی ۶۰ ریال، با توجه به فرمول ارائه شده در متن مقاله قیمت واحد تلفات بی باری برای شرایط ایران برابر ۱۵۷۶۸۰۰۰ ریال می شود.
- ۲ - قیمت واحد تلفات بار : مطابق آنچه گفته شد متناسب با مشخصات خاص بار این مقدار متفاوت خواهد بود. در جدول شماره ۳ مقدار این کمیت برای برخی از بارها آورده شده است.

۳- قیمت واحد وزن برخی از مواد : برای مس ۱۲۰۰۰ ریال، هسته M۵ ۶۶۴۲ ریال، هسته Hi-B ۷۳۱۲ ریال. روغن ترانسفورماتور ۲۴۰۰ ریال و آهن ۱۵۰۰ ریال به ازای هر کیلوگرم از این مواد می باشد.

۴- قیمت هر نفر ساعت کار کارگر برابر ۵۸۸۵ ریال.

جدول ۳ : قیمت واحد تلفات بار برای برخی از بارهای نمونه.

نوع بار	صنعتی نوع ۱	صنعتی نوع ۲	کشاورزی	تجاری	خانگی گرمسیر	خانگی سردسیر	تلفیق خانگی و تجاری
قیمت واحد تلفات بار [kw] [ریال]	۱۵۷۶۸۰	۶۰۱۱۵۵	۶۶۹۶۰۰	۱۴۶۴۶۴	۳۴۲۳۴۴	۵۲۲۵۳۱	۶۳۰۷۲۰
نسبت قیمت تلفات بار به بی باری	۱:۱	۲/۶:۱	۲/۴:۱	۱۰/۷:۱	۴/۶:۱	۳:۱	۲/۵:۱