

تعیین مکان بهینه خنک‌کننده‌ها در برقگیرهای اکسیدفلزی به منظور افزایش پایداری حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

سیدمیثم سیدبرزگر^۱ و محمد میرزایی^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی بابل- بابل- ایران

s.seyyedbarzegar@stu.nit.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی بابل- بابل- ایران

mirzaie@nit.ac.ir

چکیده: در این مقاله، بهینه‌سازی مکان استقرار خنک‌کننده‌ها در ستون قرص‌های برقگیر با هدف کاهش سریع دما ناشی از تلفات الکتریکی اضافه ولتاژهای موجود در شبکه و افزایش پایداری حرارتی برقگیر بررسی شده است. شبیه‌سازی با استفاده از لینک نرم‌افزار اجزای محدود COMSOL در حالت گذرا و همچنین، نرم‌افزار MATLAB بر روی برقگیر مورد مطالعه انجام شده است. بر این اساس در هر مرحله از شبیه‌سازی ابتدا تحلیل الکتروحرارتی در بازه زمانی خاص مطابق با استاندارد IEC60099-4 بر روی جمعیت انتخاب شده انجام و نتایج مورد نیاز به الگوریتم بهینه‌سازی انتقال داده می‌شود. به منظور بهینه‌سازی مکان خنک‌کننده‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده تاثیر بسیار زیاد مکان خنک‌کننده در تغییرات دمایی برقگیر دارد. در نهایت، مدل بهینه شده در نرم‌افزار اجزای محدود به طور مستقل شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن با نمونه انتخابی مقایسه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: برقگیر، خنک‌کننده، پایداری حرارتی، الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

بهره‌برداری آن از جمله عواملی هستند که می‌توانند عملکرد مناسب و مورد انتظار این تجهیز را تحت شعاع قرار دهند. قسمت اصلی این نوع برقگیر را قرص‌های اکسیدروی تشکیل می‌دهد که به شکل یک و یا چند ستون در داخل محفظه برقگیر قرار دارند. هدایت الکتریکی قرص‌های اکسیدروی تابعی از دما و ولتاژ هستند. در جریان‌های بسیار زیاد نظیر صاعقه، هدایت الکتریکی مستقل از دماست. با وجود این، در جریان‌های پایین این شاخص وابستگی زیادی به دما نشان می‌دهد که موجب افزایش جریان عبوری از قرص‌های برقگیر و در نتیجه افزایش تلفات الکتریکی و حرارتی برقگیر می‌شود. بنابراین، اعمال ولتاژ نامی و یا ماکزیمم ولتاژ عملکرد برقگیر موجب افزایش دما در ناحیه جریان کم مشخصه ولتاژ-جریان برقگیر می‌شود. در نتیجه در صورتی که تلفات توان برقگیر از تلفات

* برقگیرهای اکسیدروی به منظور حفاظت شبکه‌های الکتریکی در برابر انواع اضافه ولتاژهایی که ممکن است به وقوع بپیوندد استفاده می‌شوند. اگرچه ممکن است برقگیر از زمان نصب در شبکه نصب دارای عملکرد بسیار مناسبی باشد، با وجود این، افزایش تعداد عملکرد برقگیر در برابر اضافه ولتاژها و تنش‌های وارده به آن در مدت زمان

* تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۱۱/۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۳/۳/۳

نام نویسنده مسئول : سید میثم سیدبرزگر

نشانی نویسنده مسئول : ایران- بابل- خیابان شریعتی- دانشگاه صنعتی بابل- دانشکده برق

حرارتی آن بیشتر شود، موجبات اختلال حرارتی فراهم می‌شود [۱].

به منظور تحلیل الکتروحرارتی برقیگرهای اکسیدروی، پژوهش‌های آزمایشگاهی زیادی بر روی مدل‌های مختصر شده آن انجام شده است [۶]. انجام چنین آزمایش‌هایی نشان می‌دهد که مدل مختصر شده برقیگر قابلیت شبیه‌سازی تلفات توان را دارد. با وجود این، در نظر نگرفتن انتقال حرارت در راستای محوری از نقاط ضعف این روش‌ها محسوب می‌شود.

برقیگرها معمولاً دارای بخش‌های فلزی بزرگی همچون ترمینال‌های فشار قوی، زمین و همچنین، خنک‌کننده‌ها هستند که نقش اصلی آن‌ها انتقال حرارت در راستای محوری است. چنین شرایطی موجب می‌شود تا انتقال حرارت در راستای محوری از اهمیت زیادی در تعادل حرارتی برقیگر برخوردار باشد [۷].

هدف از این مقاله، بهینه‌سازی مکان خنک‌کننده‌ها در راستای دستیابی به پایداری حرارتی مناسب برقیگر اکسید روی است. بر این اساس اثرات خنک‌کننده‌ها در ستون برقیگر با توجه به آزمایش استاندارد IEC [۸] مطرح شده است توسط نرم افزار مبتنی بر روش اجزای محدود COMSOL در شرایط الکتروحرارتی شبیه‌سازی و بررسی شده است. در این شبیه‌سازی، اثر انتقال دما به شکل هدایت، همرفت و تابش لحاظ شده است که در نتیجه آن امکان بررسی اثر مکان خنک‌کننده‌هایی با ابعاد متفاوت را در پایداری حرارتی برقیگر فراهم می‌نماید. به منظور انجام فرایند بهینه‌سازی مکان استقرار خنک‌کننده‌ها از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. لینک همزمان دو نرم‌افزار COMSOL و MATLAB این امکان را فراهم می‌کند تا تحلیل الکتروحرارتی برقیگر به روش اجزای محدود در شرایط وابسته به زمان بر روی جمعیت انتخاب شده در الگوریتم ژنتیک در هر تکرار انجام شده و بیشینه دمای نهایی برقیگر به عنوان خروجی به دست آید.

۲- معادلات حاکم بر تحلیل الکتروحرارتی

برقیگرهای اکسیدروی

به طور کلی، انتقال حرارت در برقیگر به دلیل جود

با توجه به مطالب یاد شده، به منظور دفع سریع حرارت ناشی از تلفات توان قرص‌ها و همچنین، دستیابی به ارتفاع مورد نیاز، در ستون قرص‌های برقیگر از لوله‌های آلومینیومی که به عنوان خنک‌کننده در نظر گرفته می‌شوند استفاده شده است. وجود لوله‌های فلزی علاوه بر تامین طول و ارتفاع مناسب برقیگر، نقش به سزایی نیز در خنک‌سازی برقیگر و پایداری حرارتی آن ایفا می‌نماید [۲].

وجود این لوله‌های فلزی در طول ستون قرص‌های برقیگر سه تاثیر مفید بر روی عملکرد برقیگر به همراه خواهد داشت که عبارتند از:

- در شرایط اضافه ولتاژ با دوره کوتاه، خنک‌کننده‌ها حرارت قرص را جذب نموده و در نتیجه به کاهش دمای قرص و کاهش تلفات توان منجر می‌شوند.

- در شرایط اضافه ولتاژ با دوره طولانی، حرارت به وجود آمده از تلفات توان از طریق خنک‌کننده‌ها سریع به گاز اطراف ستون برقیگر انتقال یافته که در نتیجه انتقال حرارت مابین قرص و گاز اطراف آن افزایش می‌یابد.

- از آنجا که بیشترین کاهش دما در قرص‌ها در نزدیکی سطح خنک‌کننده‌ها اتفاق می‌افتد، هدایت الکتریکی قرص اکسیدروی در این ناحیه در مقایسه با بخش داخلی کمتر خواهد شد. این امر به کاهش تلفات توان در همسایگی قرص و لوله‌های خنک‌کننده منجر می‌شود. در نتیجه این امر حرارت قرص‌ها به‌طور مناسب‌تری دفع خواهد شد.

با وجود اینکه خنک‌کننده‌ها از سالیان گذشته در برقیگرهای اکسید استفاده قرار می‌شدند، پژوهش بر روی اثر آن‌ها بسیار محدود بوده است. در مدل‌سازی‌های الکتروحرارتی که در این زمینه انجام شده است نیز تنها به مدل کردن روند تغییرات حرارتی قرص‌ها پرداخته شده و به اثر خنک‌کننده‌ها در این تغییرات توجه خاصی نشده است [۳-۵]. چنین شرایطی را می‌توان عدم اندازه‌گیری تلفات توان در راستای محوری و شعاعی که عامل اصلی تولید حرارت است، تلقی نمود. بر این اساس چنین پدیده‌ای تنها به روش محاسباتی و شبیه‌سازی می‌تواند تحلیل و بررسی

۳- شبیه‌سازی برقی اکسیدروی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL به روش اجزاء محدود

در این مقاله، از برقی‌های ۶۰ کیلوولت چینی که در شرکت برقی پارس تولید می‌شود، استفاده شده است. اطلاعات ساختاری این برقی به لحاظ ارتفاع و قطر بخش‌های مختلف بدنه و همچنین، ارتفاع، قطر قرص و خنک‌کننده‌های آن در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های ابعادی برقی ۶۰ کیلو ولت

مقدار	ویژگی‌ها	مقدار	ویژگی‌ها
۹۱	قطر داخلی برقی (mm)	۶۰	ولتاژ برقی (kV)
۲۰۰	کوچکترین قطر خارجی برقی (mm)	۹۵۰	ارتفاع کل برقی (mm)
۲۳۰	بزرگترین قطر خارجی برقی (mm)	۳۵	ارتفاع هر قرص (mm)
۸۸	قطر هر قرص برقی (mm)	۵۳۰	ارتفاع کل خنک‌کننده‌ها (mm)

برقی مورد نظر توسط نرم‌افزار COMSOL در محیط الکتروحرارتی و در حالت متقارن دو بعدی وابسته به زمان شبیه‌سازی شده است. COMSOL نرم‌افزاری قوی برای حل مسائل مهندسی بر اساس معادلات مشتقات جزئی است [۹]. این نرم‌افزار بر مبنای تحلیل اجزا محدود مش‌بندی نموده و با استفاده از تحلیل‌های عددی مساله را حل می‌کند. حل یک مساله در این نرم‌افزار شامل مراحل زیر است:

- ۱- کشیدن شکل مساله؛
- ۲- مشخص کردن شاخص‌های مدل؛
- ۳- تولید مش در اجزا محدود؛
- ۴- حل مساله.

جدول (۲) اطلاعات حرارتی مواد به کار رفته در این شبیه‌سازی را برای نرم‌افزار COMSOL نشان می‌دهد.

فاصله هوایی بین ستون قرص‌ها و بدنه هر سه دسته انتقال حرارت هدایتی، همرفتی و تابشی را در بر می‌گیرد. با توجه به متقارن بودن برقی در راستای شعاعی و محوری، تحلیل معادلات انتقال حرارت در دستگاه مختصات استوانه‌ای انجام می‌گیرد. به منظور ارباه معادلات حرارتی با توجه به تقارن محوری، معادلات انتقال حرارت از طریق هدایت در مختصات استوانه‌ای با رابطه (۱) ارباه شده است [۶].

$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$r > 0, t \geq 0$$

در این رابطه T دما، k هدایت حرارتی، q توان الکتریکی ورودی و ρ چگالی است.

انتقال حرارت همرفتی و تابشی در امتداد نواحی با فضای حلقوی مابین ستون قرص و بدنه چینی که با هوا و یا گازهای عایق پر شده است، وجود دارد. انتقال حرارت همرفت در بخش جامد مواد در دمای T_1 و در تماس با یک سیال در دمای T_2 در رابطه (۲) نشان داده شده است

$$Q_c = h_c A_c (T_1 - T_2) \quad (2)$$

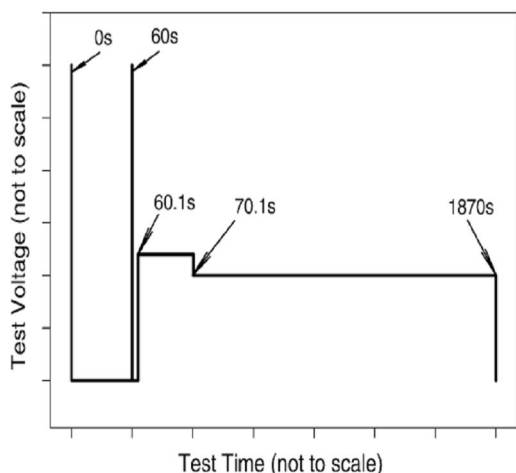
در این رابطه T سطح انتقال حرارت همرفت بوده و h_c ضریب هدایت حرارتی در این انتقال حرارت می‌باشد. این مقدار از داده‌های موجود برای انتقال حرارت همرفت بین دو بخش موازی عمودی بدست خواهد آمد. این جریان حرارتی به طور مشابه بین بدنه چینی و محیط نیز برقرار است. انتقال حرارت تابشی از سطح جامد با دمای T_1 به سطح جامد دیگر با دمای T_2 با رابطه (۳) نشان داده شده است. در صورتی که $(T_1 - T_2) \ll T_1$ باشد، بخش انتقال حرارت تابشی تقریباً مطابق با رابطه (۴) به دست خواهد آمد.

$$Q_r = F_\epsilon F_G \sigma h_r A_r (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

$$Q_r = 4F_\epsilon F_G \sigma A_r T_1^3 (T_1 - T_2) \quad (4)$$

۶۶ تعیین مکان بهینه خنک‌کننده‌ها در برقگیرهای اکسیدفلزی به منظور افزایش پایداری حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، چگالی اکسیدروی و چینی به صورت شاخصی بر حسب دما داده شده است.



شکل (۲): روند تغییرات آزمون IEC60099-4 به منظور

بررسی پایداری حرارتی برقگیر [۸]

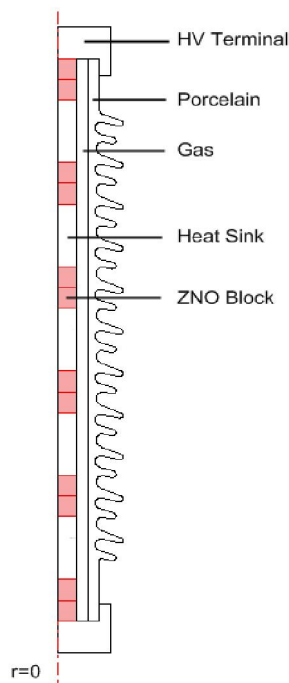
مطابق با شکل (۲)، در این آزمایش دو ضربه صاعقه $8/20\mu s - 10kA$ در فاصله زمانی یک دقیقه به برقگیر وارد شده و پس از آن به مدت ۱۰ ثانیه برقگیر تحت ولتاژ نامی قرار خواهد گرفت. سپس، ۳۰ دقیقه ماکزیمم ولتاژ عملکرد دائمی برقگیر به آن اعمال خواهد شد. بررسی آزمون IEC60099-4 با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد که اولین ضربه صاعقه موجب ایجاد گرمایش آدیاباتیک قرص‌های اکسیدروی خواهد شد. چنانچه برقگیر به لحاظ دمایی متعادل باشد، پس از وقوع صاعقه دمای تمامی قرص‌های برقگیر تقریباً به‌طور مشابهی افزایش خواهند یافت. به مدت ۱ دقیقه تا اعمال ضربه صاعقه دوم هیچ گونه تنش به برقگیر اعمال نخواهد شد که در نتیجه آن قرص‌ها و خنک‌کننده‌ها به تعادل حرارتی خواهند رسید. ضربه صاعقه دوم بعد از سپری شدن زمان ۱ دقیقه به برقگیر اعمال شده که به افزایش دما مشابه ضربه اول منجر می‌شود. یک دهم ثانیه پس از ضربه صاعقه دوم، دوباره ولتاژی در حدود $1/25$ ولتاژ نامی به برقگیر اعمال خواهد شد. در

جدول (۲): مقادیر شاخص‌های حرارتی برقگیر [۱۰]

چگالی (ρ) (kg/m ³)	ظرفیت حرارتی (C) (J/kg.k)	هدایت حرارتی (K) (W/m.k)	ماده
۴۸۷۰/۸۲T	۵۵۰۰	۵/۶۹	اکسیدروی
۶۰۸+۱/۳۳T	۲۶۰۰	۱	چینی
۸۸۳	۲۷۸۷	۱۶۴	آلومینیوم
۱/۲۰۲۴	۱۰۱۲	۰/۰۲۶	هوا

شکل (۱) نمایی از برقگیر شبیه‌سازی شده را در محیط

نرم‌افزار COMSOL نشان می‌دهد.



شکل (۱): مدل دو بعدی برقگیر ۶۰ کیلو ولت مورد مطالعه در

نرم‌افزار COMSOL

به منظور بررسی الکتروحرارتی برقگیر در مقابل اضافه ولتاژها، آزمون استاندارد IEC60099-4 مطابق مرجع [۸] در نرم‌افزار COMSOL شبیه‌سازی شده است. شکل (۲)

هر کروموزوم دارای ۲۷ ژن خواهد بود. با استفاده از روش کد کردن باینری، ژنهای صفر کروموزوم بیانگر خنک کننده‌ها و ژنهای یک کروموزوم بیانگر قرص‌ها هستند که در مجموع برای هر کروموزوم تعداد ۱۲ یک و ۱۵ صفر به وجود خواهد آمد. جدول ۳ روش کد کردن را در الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد.

جدول (۳): کد کردن کروموزوم‌ها

	G_1	G_2	G_3	...	G_{26}	G_{27}
Chromosome	1	0	1	...	1	0

الگوریتم به کار رفته در بهینه‌سازی مکان خنک کننده‌ها در ستون قرص‌های برقیگرمورد مطالعه مطابق شکل (۳) است. اصول کار الگوریتم به این شکل است که ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده و سپس، هر یک از کروموزوم‌های جمعیت اولیه، توسط نرم‌افزار COMSOL اجرا و نتیجه مورد نظر استخراج خواهد شد. در ادامه، بهترین جواب این جمعیت انتخاب و به منظور ارزیابی همگرایی بررسی خواهد شد. در صورتی که همگرایی مورد نظر حاصل شده باشد فرآیند بهینه‌سازی پایان خواهد یافت. در غیر این صورت نسل دوم تولید خواهد شد. انتخاب نسل دوم که بر اساس عملگرهای ژنتیکی جهش^۱ و تقاطع^۲ انجام می‌گیرد، به تولید نسل جدیدی از کروموزوم‌ها که با نسل قبلی متفاوت است می‌انجامد. به دلیل انتخاب بهترین کروموزوم‌ها برای تولید نسل جدید، استفاده از این عملگرها موجب افزایش میانگین برازندگی خواهد شد.

زمانی که اضافه ولتاژ به برقیگرمعمل می‌شود، توزیع دما در قرص‌ها غیریکنواخت شده و اختلاف دمای زیادی میان قرص و خنک کننده‌ها به وجود خواهد آمد. در این دوره، اندازه تلفات توان قابل توجه است که بر این اساس قرص‌های اکسید روی با خنک کننده‌های مجاور به تعادل حرارتی نخواهند رسید. پس از سپری شدن این اضافه ولتاژ، ولتاژ کار دایم به مدت ۳۰ دقیقه به برقیگرمعمل می‌شود. در این دوره تلفات توان کاهش یافته و در صورتی که تلفات حرارتی از تلفات توان بیشتر باشد قرص‌های برقیگرم به تعادل حرارتی خواهند رسید. در صورتی که حجم خنک کننده‌های داخلی برقیگرمافزایش یابد، انتقال حرارت محوری نیز بهبود خواهد یافت اما به دلیل محدود بودن ابعاد و فضای داخلی برقیگرماین امر امکان‌پذیر نیست.

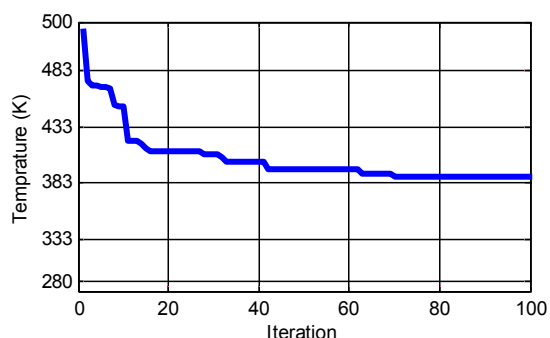
۳- پیاده سازی الگوریتم ژنتیک برای مکان‌یابی خنک کننده در ستون برقیگرم

الگوریتم ژنتیک روشی تکراری برای جستجوی جواب بهینه است که بر اساس تئوری تکاملی داروین و اصول احتمالاتی بنا شده است. فضای جستجو در این الگوریتم لزوماً جستجوی بی‌هدف نبوده و نتایج حاصل از آن نیز اتفاقی نخواهد بود. در این روش با استفاده از اطلاعات قبلی، نتایج جدیدی با عملکردی بهتر و با کیفیت‌تر از گذشته حاصل خواهد شد [۱۱].

در این الگوریتم هر یک از افراد جمعیت که کروموزوم نامیده می‌شود، یکی از جواب‌های مسأله بهینه‌سازی به شمار می‌آیند. هر کروموزوم از متغیرهایی به نام ژن تشکیل شده است که در این مقاله هر ژن در کروموزوم می‌تواند به قرص‌های اکسیدروی و یا خنک کننده‌ها اختصاص یابد. بر اساس اطلاعات به دست آمده از برقیگرممورد مطالعه،

۴- نتایج شبیه‌سازی

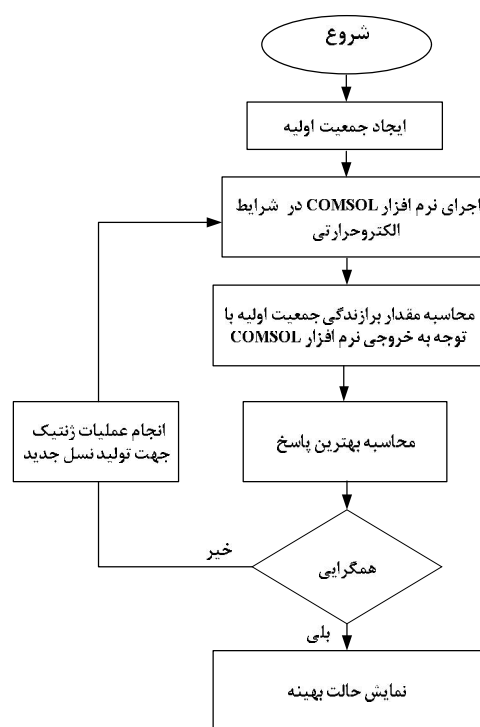
بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط لینک دو نرم‌افزار COMSOL و MATLAB، جایابی بهینه خنک‌کننده‌ها در ستون قرص‌های برقی‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. شکل (۴)، نمودار همگرایی تابع هدف را برحسب تعداد نسل‌های تولیدی نشان می‌دهد.



شکل ۴- نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک برای تابع هدف مورد نظر

روند تغییرات دما در نمودار (۴) نشان دهنده اهمیت مکان خنک‌کننده در برقی‌ها است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در صورت عدم دقت در آرایش خنک‌کننده‌ها، دماهای بالای حدود ۵۰۰ درجه کلوین نیز دور از انتظار نخواهد بود که به ایجاد اختلال حرارتی و معیوب شدن برقی‌ها منجر می‌شود.

به منظور بررسی روند تغییرات دمایی برقی‌ها بر اساس آرایش بهینه خنک‌کننده‌ها، مدل استخراج شده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار COMSOL مطابق شکل (۵) پیاده‌سازی شد. با توجه به ترمینال‌های فلزی در دو سر برقی‌ها، انتقال حرارت در این نقاط بیشتر بوده که به خنک شدن قرص‌های دو انتهای برقی‌ها نسبت به قرص‌های وسط آن منجر خواهد شد. در چنین شرایطی احتمال وقوع اختلال حرارتی در قرص‌های وسط برقی‌ها بیشتر از قرص‌های دو انتهای برقی‌ها است. بر این اساس می‌توان بیان کرد که در شرایط بهینه آرایش خنک‌کننده‌ها در برقی‌ها، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است حجم بزرگتری از خنک‌کننده‌ها باید



شکل (۳): الگوریتم بهینه‌سازی مکان خنک‌کننده

جدول (۴) عملگرهای ژنتیک به کار رفته و جمعیت اولیه را در این الگوریتم نشان می‌دهد.

جدول (۴): مقادیر عملگرهای الگوریتم ژنتیک

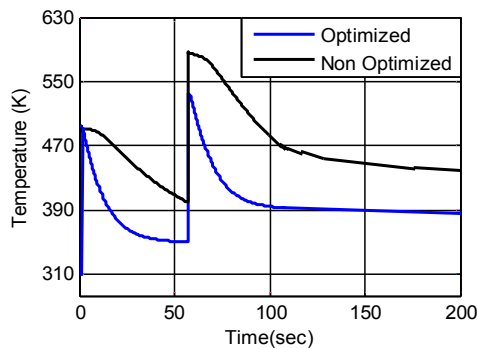
GA Operator	Fitness-based Process
Initial Population	35
Crossover	0.8
Mutation	0.11

در این مقاله، تابع هدف در بهینه‌سازی مکان خنک‌کننده‌ها در ستون قرص‌های برقی‌ها بر مبنای کمینه‌سازی بیشینه دمای نهایی قرص‌های برقی‌ها است که در رابطه (۵) تعریف شده است. بر این اساس بیشترین مقدار دمای قرص‌های برقی‌ها ۱۴۰ ثانیه بعد از اعمال ماکزیمم ولتاژ عملکرد دیم برقی‌ها اندازه‌گیری خواهد شد.

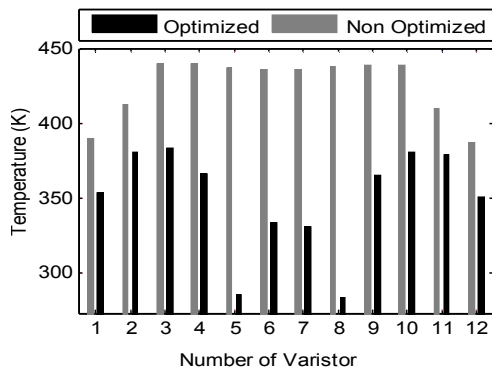
$$Objective\ function = \min \left\{ \max(T_{varistor\ i}) \right\} \quad (5)$$

$$i = 1 \dots 12$$

تغییرات حرارتی در این راستا بسیار بیشتر از حالت شعاعی خواهد بود. شکل (۷) مقایسه اثر مکان خنک‌کننده در توزیع حرارتی قرص‌های برقگیر را برای مدل بهینه شده و مدل ارزیابی شده در شکل (۱) نشان می‌دهد. آرایش مناسب خنک‌کننده‌ها در مقدار افزایش دما پس از وقوع صاعقه، روند خنک شدن برقگیر و همچنین، دمای نهایی برقگیر در طول دوره آزمون مطابق استاندارد IEC60099-4 بسیار مهم است.



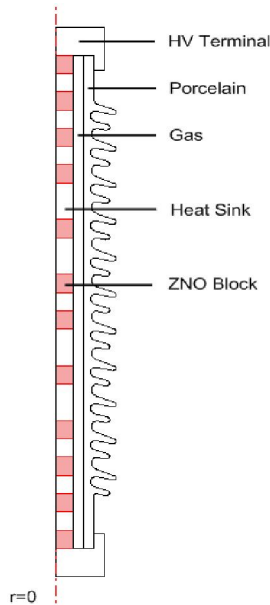
شکل (۷): تغییرات دما در طول دوره آزمون IEC برای دو برقگیر با آرایش متداول شکل ۱ و آرایش بهینه شکل ۵



شکل (۸): تغییرات دمای قرص‌های برقگیر از بالا (شماره ۱) به پایین (شماره ۱۲) برای دو برقگیر با آرایش متداول شکل ۱ و آرایش بهینه شکل ۵ در زمان ۲۰۰ ثانیه پس از سپری شدن آزمون استاندارد IEC60099-4

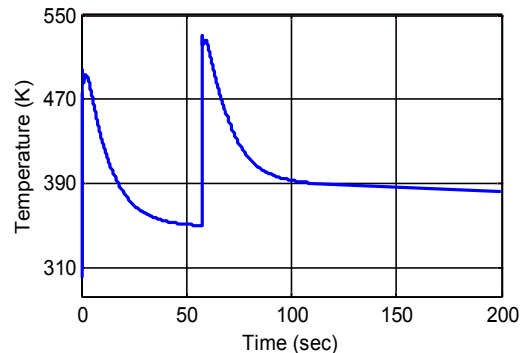
نمودار میله‌ای تغییرات دما در راستای طولی برقگیر در زمان ۲۰۰ ثانیه پس از سپری شدن آزمون استاندارد IEC برای قرص‌های شماره ۱ تا ۱۲ (از بالا به پایین برقگیر) در شکل (۸) نشان داده شده است. مطابق شکل، دمای تمامی

در بخش مرکزی ستون برقگیر قرار گیرند.



شکل ۵- مدل دوبعدی برقگیر بهینه‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL

در شکل ۶ روند تغییرات دمای گرم‌ترین قرص برقگیر بهینه شده را در مدت ۲۰۰ ثانیه پس از اعمال آزمون استاندارد IEC60099-4 نشان داده شده است.



شکل (۶): روند تغییرات دمای گرم‌ترین نقطه برقگیر بهینه‌سازی شده در طول دوره آزمون مطابق استاندارد IEC60099-4

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، تغییرات سریع دما پس از اعمال ضربه صاعقه و همچنین، روند نزولی آن در مدت زمان اعمال ماکزیمم ولتاژ عملکرد برقگیر نشان دهنده بالا بودن تلفات حرارتی برقگیر مورد مطالعه است. با توجه به اینکه خنک‌کننده‌ها موجب افزایش انتقال حرارت در راستای محوری می‌شوند، بنابراین،

- Fukano, T., "Effects of Heat Sinks in Metal-Oxide Surge Arresters on ZnO Element Power Dissipation and Temperature Distribution", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1402-1408, 2005.
- [3] Lat, M.V., "Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No. 7, pp. 2194-2202, 1983.
- [4] Bargigia, A., de Nigris, D., Pignini, A., Sironui, A., "Comparision of Different Test Method to Assess the Thermal Stresses of Metal Oxid Surge Arrester Under Pollution Condition", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 146-155, 1993.
- [5] Vitet, S., Stenstrbm, L., Lundquist, J., "Thermal Stress on Zno Surge Arresters in Polluted Conditions Part I: Laboratory Test Methods", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp. 2012-2022, 1992.
- [6] Guedes da Costa, E., Naidum, S.R., Guedes de Lima, A., "Electrothermal Model for Complete Metal-Oxide Surge Arrester", Generation, Transmission and Distribution journal, Vol. 148, No. 1, pp. 29-33, 2001.
- [7] Zheng, Z., Boggs, S.A., Imai, T., Nishiwaki, S., "Computation of Arrester Thermal Stability", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No.3, pp. 1526-1529, 2010.
- [8] International Standard of Surge Arrester IEC60099-4 Edition 2.1:2004 Consolidated With Amendment 1: 2006 Section 6.9 Operating Duty, Section 10 Test Requirement on Polymer-Housed Arresters and Annex B Test to Verify Thermal Equivalency Between Complete Arrester and Arrester Section, IEC60099-4, 2004.
- [9] FEMLAB CLS 3.5 documentation COMSOL.
- [10] He, J., Zeng, R., Chen, Sh., Tu, Y., "Thermal Characteristics of High Voltage Whole-Solid-Insulated Polymeric ZnO Surge Arrester", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 4, pp. 1221-1227, 2003.
- [11] Haupt, R.L., Haupt, S.E., "Practical Genetic Algorithms", Second Edition, Eds. Hoboken, New Jersey, USA, 2004.

نقاط برقگیر در حالت بهینه در مقابل حالت ارابه شده در شکل (۱) کاهش داشته است. همچنین، به علت قرار گرفتن خنک‌کننده‌ها در مکان مناسب، دمای قرص در نقاط میانی برای حالت بهینه کاهش زیادی یافته است. با توجه به اینکه احتمال وقوع اختلال حرارتی در بخش مرکزی برقگیر بیشتر از سایر نقاط آن است، کاهش چشمگیر دما در این قسمت اهمیت بهینه‌سازی مکان خنک‌کننده‌ها در ستون قرص‌های برقگیر را بیش از پیش نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مکان استقرار خنک‌کننده‌ها در ستون قرص‌های برقگیر به منظور افزایش پایداری حرارتی برقگیر در برابر اضافه‌ولتاژهایی که در شبکه قدرت با آن مواجه است بهینه‌سازی شده است. استفاده از لینک دو نرم‌افزار COMSOL و MATLAB فضای بسیار قدرتمندی را در تحلیل هم‌زمان روش‌های عددی و الگوریتم‌های تکاملی فراهم نموده است. نتایج به دست آمده از همگرایی تابع هدف نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک قابلیت بالایی را در بهینه‌سازی مکان خنک‌کننده‌ها داراست. حالت بهینه به دست آمده نشان دهنده این مطلب است که پخش شدن خنک‌کننده‌ها در بین قرص‌ها در ستون برقگیر به افزایش انتقال حرارت در راستای محوری منجر خواهد شد. در واقع اثر وجود خنک‌کننده‌ها در مواجهه با اضافه‌ولتاژهای گذرا نظیر صاعقه موجب شده است تا انتقال حرارت محوری بسیار بیشتر و با اهمیت‌تر از انتقال حرارت شعاعی پس اعمال ضربه صاعقه در خنک‌سازی و پایداری حرارتی برقگیر نقش آفرینی کند. با وجود این، نتایج به دست آمده از نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که آرایش نامناسبی از خنک‌کننده‌ها گاه می‌تواند دمای نهایی برقگیر را تا ۱۵۰ درجه بیشتر از حالت بهینه تغییر دهد.

مراجع

- [1] Mobedjina, M., Johnnerfelt, B., Stenstrom, L., "Design and Testing of Polymer-Housed Surge Arresters", 9th Symposium GCC CIGRE, Abu Dhabi, pp. 1-19, 1998.
- [2] Zheng, Z., Nishiwaki, S., Boggs, S.A.,

¹ Mutation

² Crossover