

بهینه‌سازی شدت میدان الکتریکی در طراحی تجهیزات فشارقوی با استفاده از

شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک بر پایه روش اجزای محدود

با تکیه بر کلیدهای نوع خلاء

اسعد شمشادی^{۱*}، سید محمدتقی بطحائی^۲، اصغر اکبری^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲ و ۳- دانشیار مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت ۹۲/۵/۳۰، پذیرش ۹۲/۱۰/۴)

چکیده

در این مقاله، مسئله بهینه‌سازی شدت میدان الکتریکی داخلی در تجهیزات فشارقوی با تاکید بر ساختار داخلی یک کلید فشارقوی نوع خلاء به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته و تلاش شده است روشی نوین و جامع در این زمینه معرفی گردد. بر پایه این روش، مدل هندسی بهینه‌نشده اولیه کلید از لحاظ توزیع شدت میدان الکتریکی داخلی محفظه با استفاده از روش اجزای محدود مورد تحلیل اولیه قرار گرفته و مناطق با شدت بحرانی و کلیه پارامترهای دخیل در طراحی هندسی مرتبط با این مناطق بحرانی و حدود تغییرات آنها مشخص می‌گردد. در ادامه، جهت پارامترهای مرتبط با طراحی هندسی نواحی بحرانی مشخص شده، با استفاده از تابع تصادفی نرمال و حدود مجاز تغییرات این پارامترها و قيود موجود در مسئله، مجموعه بردارهای طراحی جدید تشکیل می‌یابد. مدل‌های هندسی متناظر با هر بردار طراحی با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل شده و از لحاظ الگوی توزیع حداکثر شدت میدان مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در ادامه، یک شبکه عصبی مناسب با درصد خطای قابل قبول جهت تشکیل الگویی از ارتباط حداکثر شدت میدان الکتریکی داخل محفظه و مجموعه کلی پارامترهای طراحی مربوطه آموزش می‌بیند. در ادامه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و استفاده از شبکه عصبی آموزش دیده در قالب یک تابع هدف، بردار مقادیر بهینه استخراج و مدل بهینه متناظر از لحاظ درصد کاهش شدت میدان الکتریکی داخلی بررسی و اعتبارسنجی می‌گردد. در انتها تاثیر کاهش شدت میدان الکتریکی داخلی بر چگالی جریان گسیل میدانی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی:

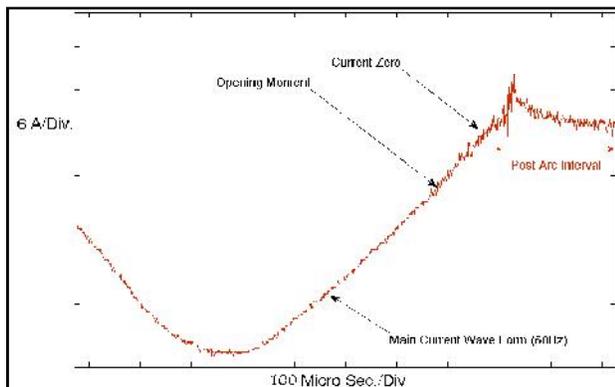
کلیدهای خلاء، شدت میدان الکتریکی، روش اجزای محدود، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

افزایش سطح ولتاژ قابل تحمل این کلیدها، سرعت پایین بازبازی عایقی آنها به دلیل عدم وجود گازهای خنک کننده و ماده جذب کننده یون‌های تولیدشده در طی فرآیند قوس الکتریکی می‌باشد [۶]. تنها راه غلبه بر این معضل، شناسایی دقیق عوامل دخیل در فرایند شکست الکتریکی در خلاء و تلاش در جهت کاهش اثرات آنها می‌باشد. با بررسی عوامل مذکور به نظر می‌رسد که به جز دمای سطحی کنتاکت‌ها، شدت میدان الکتریکی داخلی (به‌ویژه در ناحیه

با توجه به افزایش روزافزون سطح گازهای گلخانه‌ای و منع استفاده از این گازها در محصولات تولیدی کارخانجات و در جهت اجرای موافقتنامه کیوتو [۱ و ۲]، در سال‌های اخیر جایگزین نمودن کلیدهای SF6 با کلیدهای خلاء که عاری از هرگونه گاز بوده و ساختار نسبتاً ساده‌تری دارند، به‌عنوان یک اولویت در صنعت تولید کلیدهای فشارقوی در حال پیگیری می‌باشد [۳ و ۵] از مهم‌ترین چالش‌های پیش رو در جهت

آخرین C.S بالاترین احتمال قطع جریان توسط کلید وجود خواهد داشت و در صورتی که قدرت بازبایی عایقی در کلید، بالاتر از ولتاژ بازگشتی تولیدشده توسط حالت گذرای مدار خارجی متصل به کلید باشد، جریان مذکور با رسیدن به لحظه عبور از صفر مطابق با شکل (۲) قطع خواهد شد.



شکل ۲- قطع جریان در لحظه عبور از صفر توسط کلید خلاء

۳- تشریح روش جامع بهینه‌سازی

مراحل گام به گام روش پیشنه‌ی به شرح زیر خلاصه می‌گردد:

۱- مدل‌سازی طرح بهینه‌نشده اولیه با استفاده از روش اجزای محدود جهت استخراج الگوی توزیع شدت میدان داخلی کلید.

۲- مشخص نمودن مناطق بحرانی داخلی کلید از لحاظ شدت میدان الکتریکی داخلی که با توجه به مرحله قبل تعداد و نوع این پارامترها (طولی یا شعاعی) مشخص می‌گردد.

۳- با استفاده از تابع تصادفی نرمال و با توجه به گستره مجاز تغییرات هر پارامتر، یک جدول متشکل از تعدادی بردار طراحی تشکیل می‌گردد. نکته مهم در این مرحله، بررسی امکان تداخل چند پارامتر با یکدیگر و تشکیل جدول قیود مسئله می‌باشد.

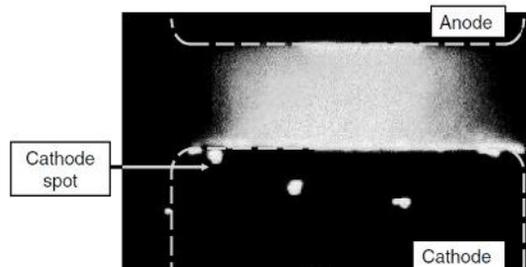
۴- متناظر با هر بردار طراحی در مرحله قبل، مدل اجزای محدود مربوطه تشکیل یافته و از لحاظ شدت میدان الکتریکی تحلیل می‌گردد.

۵- حداکثر شدت میدان الکتریکی داخلی جهت طراحی‌های مختلف در یک جدول مرتب می‌گردد.

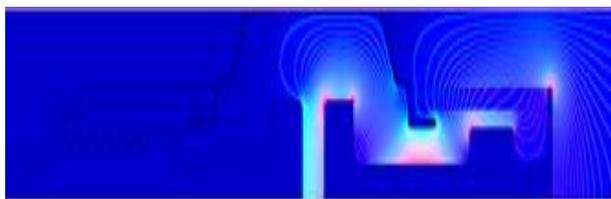
سطح کنتاکت‌ها) از مهم‌ترین دلایل شکست الکتریکی به‌ویژه در پدیده گسیل میدانی می‌باشد [۸ و ۶]. در سال‌های اخیر، جهت کاهش شدت میدان داخلی کلید خلاء، تحقیقات زیادی به‌ویژه در زمینه بهینه‌سازی ساختار هندسی درون محفظه کلید صورت پذیرفته است که در همگی آنها تمرکز بر یک ناحیه خاص از محفظه (با تعداد پارامترهای طراحی انگشت‌شمار و محدود) به‌خصوص سطوح کنتاکت‌ها بوده است [۹ و ۴]. همچنین روش غالب بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعات بر پایه استخراج منحنی تغییرات شدت میدان الکتریکی و یافتن نقطه مینیمم منحنی مذکور بنا نهاده شده است. [۹ و ۷]. با توجه به تعدد پارامترهای دخیل در طراحی و نیاز به بهینه‌سازی کلی محفظه، هیچ‌یک از این مطالعات نتوانسته‌اند تمامی نواحی بحرانی داخلی کلید را تحت پوشش قرار داده و روش جامعی جهت بهینه‌سازی ارائه نمایند [۱۲ و ۱۰]. در این مقاله تلاش شده است با استفاده از ابزارهای مدرن تخمین الگو و بهینه‌سازی تکاملی، روشی جامع و فراگیر جهت کنترل حداکثر شدت میدان الکتریکی در تجهیزات فشارقوی (با تاکید بر کلیدهای خلاء) و مرتفع ساختن مشکل مذکور ارائه گردد.

۲- کلیدهای خلاء

کلیدهای خلاء (شکل ۳) امروزه به‌عنوان پرکاربردترین تجهیزات قطع جریان در شبکه‌های قدرت و در سطوح ولتاژی زیر ۳۶ کیلوولت کاربرد یافته‌اند. محدوده مجاز فشار داخلی محفظه، 10^{-2} - 10^{-4} Pa و جنس کنتاکت‌ها از آلیاژ مس کروم و یا مس تنگستن بوده و بسته به کاربرد، متغیر می‌باشد. با توجه به اینکه در زمان باز شدن فک کلید، بخار فلزی از سطح یکی از کنتاکت‌ها (کاتد) و از طریق نقاط کوچکی به نام (C.S) Cathode Spot، به فضای بین کنتاکت‌ها تراوش می‌کند (شکل ۱)، در زمان عبور از صفر منحنی جریان با از بین رفتن



شکل ۱- تولید پلاسمای فلزی توسط C.S. در یک کلید خلاء [۶]

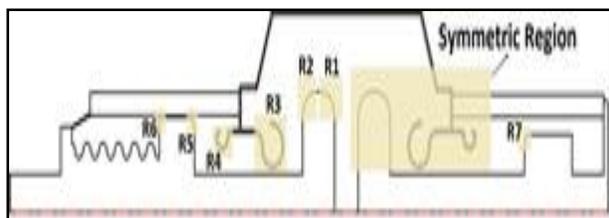


شکل ۴- نتایج توزیع شدت میدان الکتریکی داخلی جهت مدل اولیه

۵- تشخیص مناطق بحرانی میدان الکتریکی

داخلی

این مناطق با توجه به الگوی توزیع شدت میدان الکتریکی که در شکل (۴) آورده شده است مشخص می‌گردند. توضیح اینکه مناطق بحرانی معمولاً در نقاطی که خم‌ها واقع شده‌اند و یا در مجاورت خم‌ها واقع شده‌اند، اتفاق می‌افتند. این مناطق در شکل (۵) مشخص گردیده‌اند. لازم به توضیح است که با توجه به تقارن موجود در مسئله، از لحاظ نمودن نواحی بحرانی در ناحیه متقارن مشخص شده در شکل (۵) (که تکراری خواهد بود) اجتناب شده است.



شکل ۵- مشخص نمودن نواحی متناظر با حداکثر شدت میدان الکتریکی داخلی در مدل اولیه

مناطق مورد بحث، نواحی هستند که محل رخداد حداکثر شدت میدان الکتریکی در میان آنها واقع خواهد شد. در محفظه مورد بحث، تعداد این نواحی مطابق شکل (۵)، ۷ عدد می‌باشد.

۶- انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی

با توجه به هندسه دخیل در طراحی نواحی بحرانی مشخص شده در مرحله قبل، پارامترهای طراحی که باید طی فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گیرند مشخص می‌گردند که در کلید مورد تحلیل، متشکل از ۱۱ پارامتر شعاعی و ۷ پارامتر طولی، مطابق با شکل (۶) می‌باشد.

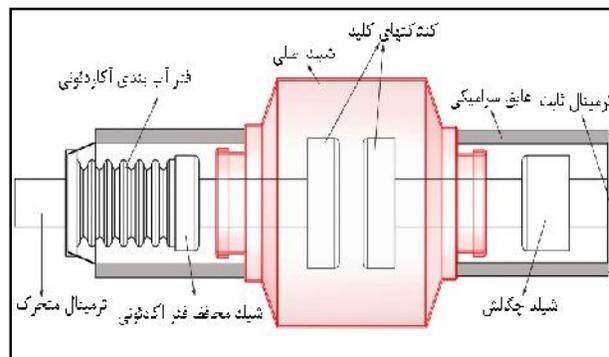
۶- یک شبکه عصبی Feed Forward جهت آموزش با استفاده از بردارهای طراحی و شدت میدان متناظر با هر بردار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۷- شبکه عصبی آموزش‌دیده به‌عنوان یک تابع هدف در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در انتها، اعتبارسنجی روش پیشنهادی با مقایسه شدت میدان‌ها در مدل اولیه و مدل استخراج‌شده از الگوریتم ژنتیک صورت خواهد گرفت.

۴- تحلیل مدل اولیه به روش اجزای محدود

مدل مورد استفاده در این مقاله، یکی از محفظه‌های تجاری موجود تولیدشده توسط یکی از شرکت‌های سازنده با کد 3AF6211C که در شکل (۳) آورده شده است می‌باشد. (ابعاد و مشخصات خم‌های داخلی از روی کاتالوگ شرکت سازنده استخراج گردیده‌اند). لازم به توضیح است که جهت ترسیم گرافیک مورد نیاز مسئله می‌توان از نرم‌افزارهای تخصصی مربوطه مانند Solid Works بهره جست.



شکل ۳- مدل اولیه در نظر گرفته‌شده جهت شروع فرایند بهینه‌سازی

در ادامه با توجه به شرایط مرزی و شرایط الکترواستاتیکی حاکم بر محیط و عدم وجود بارهای فضایی (در این صورت، معادله دیفرانسیلی در نظر گرفته‌شده باید پواسن باشد)، با حل معادله لاپلاس دوبعدی (معادله شماره ۱) و با فرض تقارن محوری محفظه، نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Comsol Multiphysics در شکل (۲) آورده شده است.

$$\nabla^2 V = 0$$

(۱)

۸- مدل سازی و استخراج مجموعه حداکثر

شدت میدان

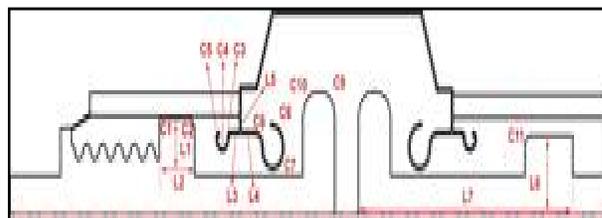
با توجه به هریک از بردارهای طراحی مشخص شده در جدول (۱)، یک مدل اجزای محدود تشکیل و جهت مشخص شدن دامنه حداکثر شدت میدان در نواحی بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد که این فرایند در انتها به نتایج ارائه شده در جدول (۲) منتهی می‌گردد (نتایج جهت ۱۳۰ بردار طراحی استخراج شده‌اند). لازم به ذکر است که ناحیه رخداد حداکثر شدت میدان جهت یک مدل ممکن است متفاوت با ناحیه حداکثر در مدل دیگر باشد. به هر حال، محل رخداد حداکثر شدت میدان در ادامه الگوریتم اهمیتی نداشته و صرفاً مقدار آن در نظر گرفته خواهد شد.

جدول ۲- نتایج بررسی حداکثر شدت میدان متناظر با بردارهای طراحی.

Data Index No.	E _{max} (V/m)
1	3356000
2	2738000
3	2257000
4	2471000
5	4967000
.	.
129	2640000
130	3220000

۹- آموزش شبکه عصبی FeedForward

شبکه‌های عصبی جهت یافتن نگاشت موجود بین مجموعه‌ای از ورودی‌ها و مجموعه‌ای از خروجی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. به شکل (۸) دقت کنید؛ در صورتی که رابطه ورودی‌ها و خروجی‌ها مطابق الگوی مذکور

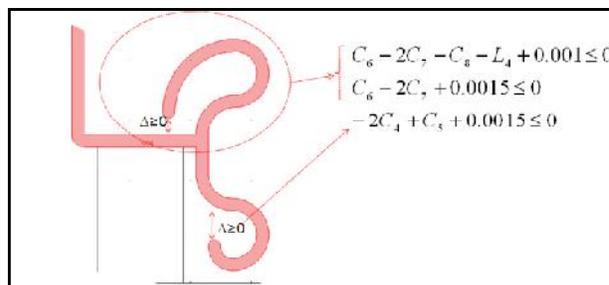


شکل ۶- مشخص نمودن ۱۸ پارامتر بهینه‌سازی متشکل از ۱۱ پارامتر شعاعی و ۷ پارامتر طولی

۷- تولید بردارهای طراحی جدید به روش

تصادفی نرمال

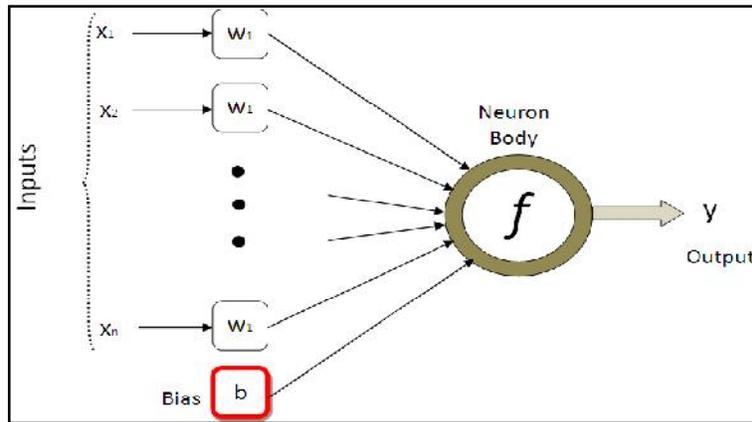
پس از مشخص شدن پارامترهای طراحی با در نظر گرفتن حد مجاز تغییرات جهت هر پارامتر و با استفاده از تابع تصادفی نرمال، ۱۳۰ بردار طراحی جدید که در جدول شماره (۱) نشان داده شده‌اند مشخص گردید. لازم به توضیح است در صورتی که دو یا چند پارامتر در طراحی یک ناحیه دخالت داشته باشند، حد مجاز تغییرات دو یا چند پارامتر به یکدیگر وابسته خواهد گردید و قیود جدیدی در مسئله به وجود خواهند آمد که باید در هنگام استخراج بردارهای طراحی و بهینه‌سازی لحاظ گردند (شکل ۷). استفاده از تابع تصادفی نرمال به دلیل فراهم آوردن امکان توزیع یکنواخت بردارهای طراحی در گستره تغییرات مجاز پارامترها می‌باشد.



شکل ۷- مشخص نمودن قیود طراحی موجود در مسئله

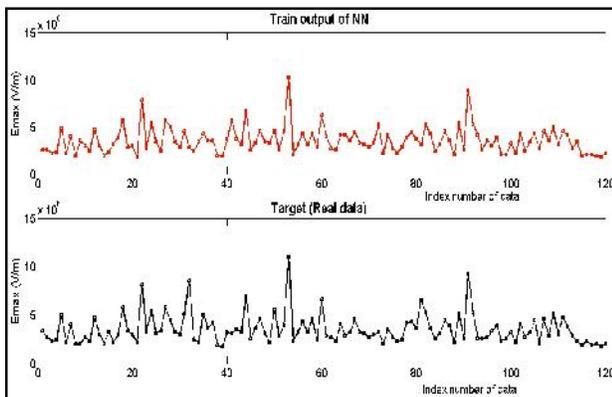
جدول ۱- بردارهای طراحی تولیدشده به روش تصادفی نرمال.

No.	C1	C2	C3	...	L5	L6	L7
1	0.00163	0.009	0.00727	...	0.02911	0.1246	0.00107
2	0.00141	0.0096	0.00388	...	0.02824	0.10957	0.00671
3	0.00115	0.004	0.00107	...	0.02657	0.12927	0.01025
4	0.00199	0.0068	0.00332	...	0.02772	0.1212	0.00417
5	0.00092	0.0103	0.00728	...	0.02785	0.12764	0.00535
.				...			
.				...			
129	0.00126	0.0053	0.00565	...	0.0296	0.11383	0.00697
130	0.00026	0.0059	0.00672	...	0.02641	0.12156	0.00232

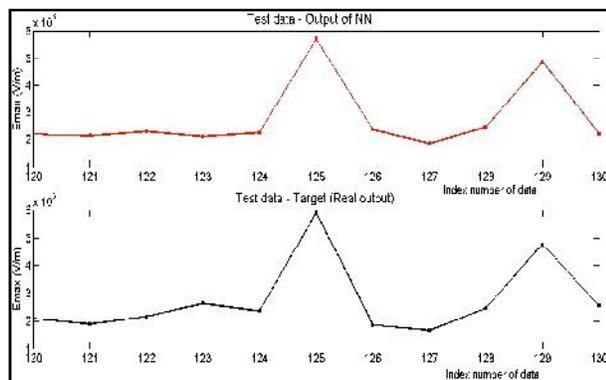


شکل ۸- شماتیک یک شبکه عصبی F.F تک لایه

سایر شبکه‌ها داشته باشد (در این مقاله، تعداد ۴۵۰ شبکه آموزش داده شده و انتخاب بهترین ساختار، از بین این مجموعه و به روش گفته‌شده صورت پذیرفته است). نتایج در شکل‌های (۹ و ۱۰) آورده شده است.



شکل ۹- مقایسه نتایج واقعی و خروجی شبکه عصبی پس از آموزش



شکل ۱۰- مقایسه نتایج واقعی و پیش‌بینی شبکه عصبی

۱۰- تابع هدف و الگوریتم ژنتیک

براساس الگوریتم تکاملی انتخاب طبیعی که در ۱۸۵۹

باشد در این صورت خروجی شبکه عصبی (y) مطابق رابطه (۲) خواهد بود.

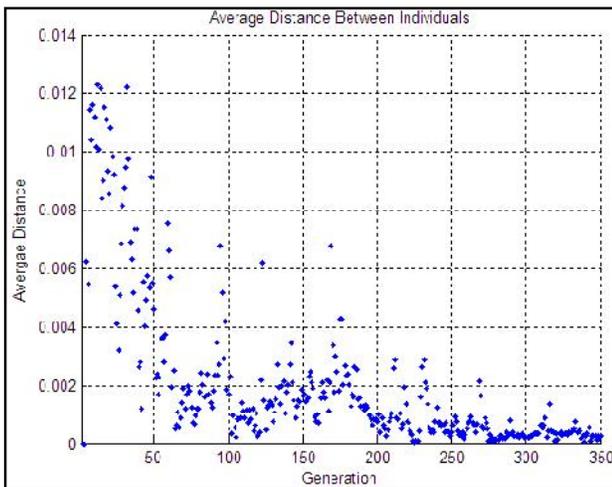
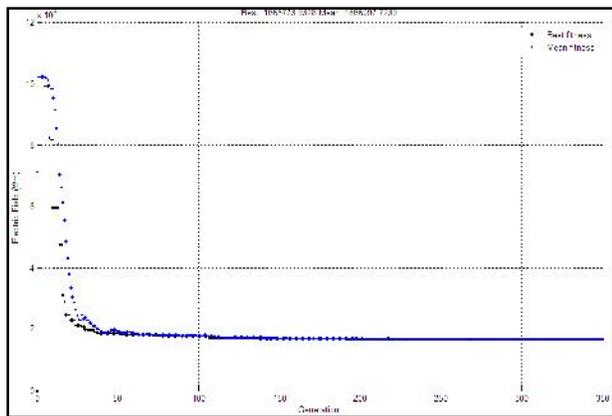
$$y = f \left(\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{bmatrix} + b \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، تابع عمل‌کننده نرون، f نامگذاری گردیده و Xها مجموعه ورودی‌های شبکه عصبی می‌باشند. در صورتی که از خروجی‌ها (یا دیگر لایه‌ها) اتصال برگشتی به ورودی‌ها یا لایه‌های دیگر موجود نباشد، شبکه حاصل، یک شبکه F.F خواهد بود.

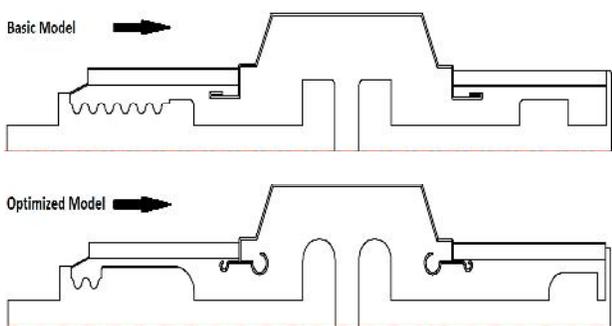
منظور از آموزش شبکه عصبی، تنظیم مقادیر اوزان (wها) به گونه‌ای می‌باشد که خروجی شبکه با خطای قابل قبولی برابر با مقدار خروجی مطلوب باشد.

دلیل استفاده از شبکه نوع F.F در روش پیشنهادی، سادگی ساختار آن می‌باشد که با توجه به مورد استفاده آن به عنوان تابع هدف در الگوریتم ژنتیک، باعث افزایش سرعت اجرای الگوریتم بهینه‌سازی مذکور می‌گردد.

جهت آموزش الگوی موجود بین پارامترهای ورودی و مجموعه حداکثر شدت میدان الکتریکی خروجی، از یک شبکه دولایه نوع F.F که به روش Levenberg-Marquardt آموزش دیده است، استفاده می‌گردد. روش یافتن شبکه مناسب به این گونه است که با استفاده از یک برنامه کامپیوتری، شبکه‌های متعددی آموزش داده شده و در نهایت، ساختار شبکه‌ای انتخاب می‌گردد که مجموع مربعات خطای کمتری را نسبت به



شکل ۱۱- همگرا شدن الگوریتم ژنتیک پس از ۳۵۰ نسل



شکل ۱۲- مقایسه دو مدل پایه (بالا) و مدل بهینه (پایین)

متناظر با مقادیر بهینه، تشکیل (شکل ۱۲) و به روش اجزای محدود مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۱۳).

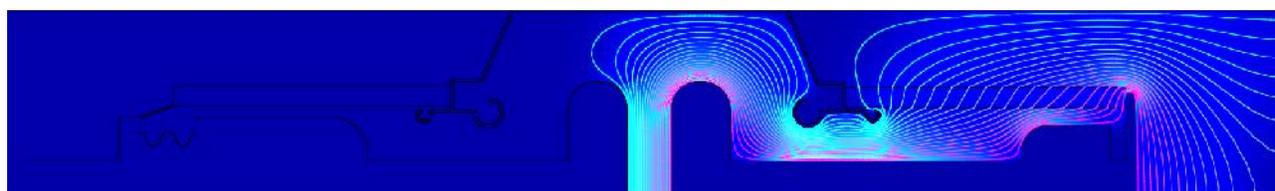
توسط چارلز داروین ارائه گردید، از فرزندان تولیدشده توسط والدین، آنهایی که تطابق بیشتری با شرایط محیطی دارند شانس بیشتری برای حیات و شروع زاد و ولد پیدا می‌کنند. (Fitness Function) در الگوریتم ارائه‌شده پس از آموزش شبکه عصبی، این شبکه طی یک برنامه‌نویسی، امکان به‌کارگیری در فرایند بهینه‌سازی ژنتیک را به‌عنوان یک تابع هدف پیدا می‌کند. پس از اجرای الگوریتم مذکور و لحاظ نمودن کلیه شرایط و حدود مجاز تغییر پارامترها، همچنین قیود مورد نیاز، الگوریتم مذکور پس از ۳۵۰ نسل چنانکه در شکل (۱۱) نشان داده شده است همگرا می‌گردد. لازم به‌ذکر است که الگوریتم مذکور، ۱۵ بار اجرا شد که نتایج مشابهی را جهت بردار مقادیر بهینه در پی داشت. همچنین شدت میدان الکتریکی، بیشینه پیش‌بینی شده توسط الگوریتم مقدار $1.665773E + 6(V/m)$ می‌باشد. مؤلفه‌های بردار بهینه استخراج‌شده توسط الگوریتم ژنتیک در جدول (۳) آورده شده‌اند.

جدول ۳- مؤلفه‌های بردار بهینه و مقادیر مؤلفه‌های اولیه

Parameter	Initial value	Optim. value	Parameter	Initial value	Optim. value
C1	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱۴۷۷	L1	۰.۰۲۴۰	۰.۰۲۶۷۶۵
C2	۰.۰۰۳	۰.۰۱۲۰۰۰	L2	۰.۰۱۵۰	۰.۰۵۸۰۵۹
C3	۰.۰۰۰	۰.۰۰۱۰۰۰	L3	۰.۰۱۷۵	۰.۰۰۶۱۸۰
C4	۰.۰۰۱	۰.۰۰۲۶۴۹	L4	۰.۰۰۰۰	۰.۰۰۷۰۲۶
C5	۰.۰۰۱	۰.۰۰۱۷۴۲	L5	۰.۰۰۵۰	۰.۰۰۱۰۵۱
C6	۰.۰۰۰	۰.۰۰۴۴۹۵	L6	۰.۰۲۴۰	۰.۰۲۴۰۸۲
C7	۰.۰۰۰	۰.۰۰۵۱۹۲	L7	۰.۱۰۷۵	۰.۱۲۶۲۶۷
C8	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰۰۳۱			
C9	۰.۰۰۳	۰.۰۰۸۸۷۲			
C10	۰.۰۰۰	۰.۰۰۹۵۰۰			
C11	۰.۰۰۳	۰.۰۰۸۴۵۱			

۱۱- ارزیابی نتایج

جهت ارزیابی صحت و کارآمدی الگوریتم پیشنهادی، مدل



شکل ۱۳- الگوی توزیع شدت میدان الکتریکی در مدل بهینه.

جدول ۴- مقایسه نتایج: A: شدت میدان الکتریکی در ۷ ناحیه بحرانی جهت مدل اولیه، B: جهت مدل بهینه‌سازی شده، C: درصد کاهش شدت میدان

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
A	1.66E+6	2.1E+6	1.67E+6	2.4E+6	1.92E+6	2.32E+6	1.49E+6
B	1.28E+6	1.47E+6	1.23E+6	7.94E+5	1.19E+6	1.11E+6	9.34E+5
C	22.89%	30%	26.34%	66.91%	38.02%	52.15%	37.31%

اولیه و مدل بهینه‌سازی بوده و کلیه شرایط دیگر ثابت بمانند، در این صورت معادله (۴) تشریح کننده درصد بالای کاهش گسیل میدانی در محفظه بهینه‌سازی شده خواهد بود (بیش از ۶۳ درصد کاهش).

$$j_2 = j_1 (0.6125)^2 e^{\frac{0.3875}{0.6125} \frac{8\pi \sqrt{2m} \phi^2}{3heE_1}} < 0.375 j_1 \quad (4)$$

در انتها لازم به یادآوری است که با هدف عدم تغییر در قابلیت عبور جریان کلید و تغییر مشخصات حرارتی محفظه، در طی فرآیند بهینه‌سازی، سطح تماس دو کنتاکت، ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۱۳- محدودیت‌ها

محدودیت‌های موجود در این روش، به شرح زیر می‌باشد:

مدل‌سازی محفظه با تقریب شناور بودن محفظه در فضای پیرامونی می‌باشد؛ که در صورت مشخص بودن این شرایط، امکان منظور نمودن آنها در ضمن فرآیند مدل‌سازی وجود دارد (مثلا مناطق زمین‌شده پیرامونی و یا فضای نصب محفظه درون نگهدارنده کلید قدرت).

در صورتی که به دلیل توپولوژی خاص مسئله در یکی از نواحی بحرانی، هیچ‌یک از بردارهای طراحی به حداکثر شدت موضعی میدان الکتریکی منجر نگردد، در این صورت شبکه عصبی مورد نظر آموزشی از لحاظ الگوی شدت میدان الکتریکی در آن ناحیه دریافت نخواهد شد و ناحیه مذکور باید از فرآیند بهینه‌سازی کنار گذاشته شود و بهینه‌سازی جهت آن ناحیه به صورت جداگانه و با قبول درصدی از خطا

نتایج به دست آمده، به صورت خلاصه در جدول (۴) آورده شده‌اند.

با دقت در نتایج به دست آمده مشخص می‌گردد که حداکثر شدت میدان الکتریکی از عدد $2.4E+6$ به عدد $1.47E+6$ یعنی معادل ۳۸٫۷۵٪ کاهش داشته است. همچنین با دقت به ردیف C در جدول شماره (۴) مشخص می‌گردد که شدت میدان‌ها در نواحی بحرانی به طور متوسط ۳۹٫۱٪ کاهش نشان می‌دهد.

۱۲- کاهش گسیل میدانی

منظور از گسیل میدانی - که از مهم‌ترین عوامل شکست الکتریکی در خلاء می‌باشد-، پرتاب الکترون از سطح خارجی فلزات بر اثر شدت میدان الکتریکی ایجاد شده بر سطح فلز می‌باشد. چگالی جریانی ناشی از این پدیده با توجه به معادله Fowler-Nordheim مشخص می‌گردد (معادله ۳). [۶،۷]

$$j = \frac{4\sqrt{\mu\phi} e^3 E^2}{(\mu + \phi)(8\pi h \phi)} e^{-\frac{8\pi\sqrt{2m}\phi^2}{3heE}} \quad (3)$$

در این معادله، E شدت میدان الکتریکی در سطح فلز، μ تراوایی مغناطیسی خلاء، e بار الکترون، h مقدار Tunneling Barrier فلز کنتاکت در زمانی که میدان الکتریکی صفر باشد (قابل استخراج از جداول)، ϕ تابع کار فلز کنتاکت و m جرم پایه الکترون می‌باشند.

هرگونه تلاش در جهت کاهش شدت میدان، باعث کاهش جریان گسیل میدانی - که از علل شکست الکتریکی در خلاء می‌باشد- می‌گردد. به عبارت دیگر، سطح ولتاژ شکست الکتریکی در محفظه بهینه‌سازی شده افزایش می‌یابد. بر اساس این معادله و نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی صورت گرفته اگر ۱ و ۲ به ترتیب جریان میدانی مربوط به مدل

۱۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روشی جامع جهت تحلیل الگوهای توزیع شدت میدان در درون تجهیزات فشارقوی با تاکید بر کلیدهای خلاء ارائه گردید. بر پایه این روش با استفاده از روش اجزای محدود، مدل اولیه کلید مورد تحلیل قرار گرفته و مناطق بحرانی مشخص گردیدند. سپس پارامترهای طراحی مرتبط با این نواحی استخراج و با استفاده از روش تصادفی نرمال، بردارهای طراحی جدید در محدوده مجاز تغییرات پارامترها و با لحاظ قیود مربوطه، در جدولی مرتب گردید. متناظر با هر بردار، مدل اجزای محدود مربوطه از لحاظ حداکثر شدت میدان مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، ماتریس کلی خروجی حداکثر شدت میدان به دست آمد که با طی یک فرایند آموزش شبکه عصبی، تابع هدف مناسب جهت استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی مشخص شد. در ادامه، از اجرای الگوریتم ژنتیک، بردار بهینه‌سازی استخراج و مورد بررسی دقیق و ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که الگوریتم پیشنهادی مذکور کارآمد بوده و کاهش برابر با ۳۸٫۷۵٪ جهت حداکثر شدت میدان الکتریکی داخلی کلید به دنبال داشته است. این تغییر در شدت میدان بر اساس معادله گسیل میدانی الکترون که از عوامل مهم شکست الکتریکی خلاء می‌باشد، منجر به کاهش بیش از ۶۳ درصدی در جریان گسیل میدانی در درون محفظه کلید خلاء خواهد گردید و سطح تحمل ولتاژی محفظه را علاوه بر کاهش تنش‌های الکتریکی وارد شده بر عایق کلید، افزایش خواهد داد.

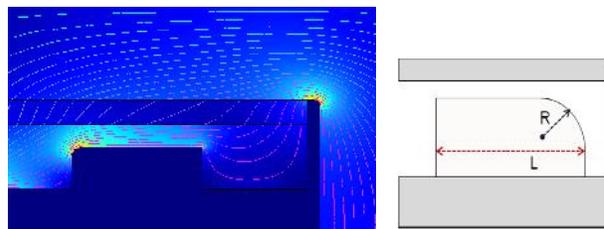
مراجع

- [1] Shemshadi A., Akbari A., S.M.T Bathaee, "A Novel Approach for Reduction of Electric Field Stress in Vacuum Interrupter Chamber Using Advanced Soft Computing Algorithms", IEEE Transactions on Dielectrics and Insulations. Oct. 2013.
- [2] Shemshadi, A., Akbari, A., Bathaee, S.M.T., "internal field optimization of a vacuum interrupter chamber in order to reduce insulation stress using NN, GA and FE approach", 18 th. Symposium on High Voltage Engineering, Aug. 2013.
- [3] Matsui, Y., Nagatake, K., Takeshita, M., et al., "Development and Technology of High Voltage VCBs; Brief History and State of Art", Proc. of ISDEIV 2006, vol. 1, pp. 253-256, 2006

انجام پذیرد. به منظور توضیحات بیشتر، بخش بعدی تحت عنوان مباحث تکمیلی بهینه‌سازی جهت استخراج مقادیر بهینه دو پارامتر طراحی اضافی ارائه می‌شود.

۱۴- مباحث تکمیلی

به شکل (۱۴) توجه کنید؛ به دلیل اینکه شدت میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده در این ناحیه همیشه کمتر از هفت ناحیه برگزیده اول می‌باشد- در صورت در نظر گرفتن آن همزمان با هفت ناحیه دیگر- اطلاعات آن همیشه حذف می‌گردد و الگویی از شدت میدان آن در آموزش شبکه عصبی دخالت نمی‌نماید. با توجه به این قضیه و در جهت بهینه‌سازی بیشتر و جلوگیری از رهاسازی این ناحیه پس از بهینه‌سازی کلی صورت گرفته، این ناحیه نیز به صورت مجزا بهینه‌سازی می‌گردد. روش مورد استفاده در بهینه‌سازی این ناحیه مانند الگوریتم مطرح شده در بهینه‌سازی اصلی است و فرآیند بهینه‌سازی مرتبط با آن، در صورت نیاز پس از مشخص شدن کلیه پارامترهای بهینه‌سازی اصلی آغاز می‌گردد.



شکل ۱۴- ناحیه جدید و دو پارامتر مرتبط در طراحی آن، که شدت میدان الکتریکی در آن همیشه کمتر از هفت ناحیه بحرانی قبل می‌باشد.

نتایج بهینه‌سازی جهت استخراج دو پارامتر طراحی مذکور، به شرح نشان داده شده در جدول (۵) می‌باشند.

جدول ۵- مؤلفه‌های بردار بهینه و شدت میدان الکتریکی بهینه (درصد کاهش ۹۳ درصد) جهت نواحی با شرایط خاص (مشمول بهینه‌سازی تکمیلی).

Parameter	Initial value	Optim. value	Einitial(V/m)	Eoptimized (V/m)
R	۰٫۰۰۰	۰٫۰۰۱۷۴	۱۲۶۰۰۰	۸۵۲۰۰
L	۰٫۰۳۰	۰٫۰۳۵۲۵	۹۳% Reduction	

- [19] M. Budde, M. Kurrat, "Dielectric investigations on micro discharge currents and conditioning behaviour of vacuum gaps", *Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, vol. 1, pp. 67-70, 2006
- [20] K. Kato, M. Hikita, N. Hayakawa, Y. Kito, H. Okubo, "Development of personal-computer-based high efficient technique for electric field optimization", *European Transactions on Electrical Power – Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 5, no. 6, pp. 401-407, 2007.
- [21] S. Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", IEEE Press, McMillan College Publishing Co., 1994.
- [22] A. J. Christlieb, "Grid-Free Plasma Simulation Techniques", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 34, No. 2, Apr. 2006.
- [23] T. Delachaux, O. Fritz, D., "Numerical Simulation of a Moving High-Current Vacuum Arc Driven by a Transverse Magnetic Field (TMF)", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 35, No. 4, Aug. 2007.
- [24] T. Delachaux, O. Fritz, D. Gentsch, E. Schade, "Simulation of a High Current Vacuum Arc in a Transverse Magnetic Field", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 37, NO. 8, Aug. 2009.
- [25] D. L. Shmelev and T. Delachaux, "Physical Modeling and Numerical Simulation of Constricted High-Current Vacuum Arcs Under the Influence of a Transverse Magnetic Field", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 37, NO. 8, Aug. 2009.
- [26] A.M.Chaly, A.A.Logatchev2, K.K.Zabello, S.M.Shkol'nik, "High-Current Vacuum Arc in a Strong Axial Magnetic Field", *XXIInd Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Matsue, 2006.
- [27] R. Rojas, "Neural Networks", Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [28] Ezra P. A. van Lanen, "Vacuum Circuit Breaker Postarc Current Modelling Based on the Theory of Langmuir Probes", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007.
- [29] R.P. Smeets, "Current-Zero Measurements of Vacuum Circuit Breakers Interrupting Short-Line Faults", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 31, No. 5, Oct. 2003.
- [30] T. Matsuo, H. Fujimori, S. Yanabu, "Insulation Recovery Characteristics after Current Interruption by Various Vacuum Interrupter Electrodes", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 13, No. 1; February 2006.
- [4] Kojima, H., Hitoshi, K.S., Okubo and K. Kato: "Electric Field Optimization of Floating Electrode Configuration in Vacuum Interrupter", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electr. Insulation*, Vol., pp. 36-39, 2010.
- [5] Joo,H.W., Ryu, J., and Tak, S.: "Optimal Design of Multi-Shield for Improvement of Insulation Performance of High Voltage Vacuum Interrupter", *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, pp. 613-615, 2011.
- [6] Slade, P.G., "The Vacuum Interrupter, Theory, Design, and Application", Boca Raton, FL, CRC press, 2008.
- [7] Boxman, R. L., et al., *Handbook of Vacuum Science and Technology*. Park Ridge, NJ: Noyes, 1995.
- [8] Jin , L., Zhou, F. , Yan, J., Peng, Q. , Chen, and, J., J. Wang, "Research on the Most Efficient Separation for 35 kV Vacuum Interrupters", *High Voltage Apparatus*, vol. 37, no. 3, pp.18 -20 1999.
- [9] Yasuoka, T., Kato, K., and Okubo, H., "Electrode conditioning characteristics based on discharge current in vacuum", *15th Intl. Symp. High Voltage Eng.*, pp. 137-141, 2007.
- [10] Kato, K., and Okubo, H., "Optimization of Electrode Contour for Improvement of Insulation Performance of High Voltage Vacuum Circuit Breaker", *Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, vol. 15, pp. 21-24, 2006.
- [11] Budde, M., Kurrat, M., "Dielectric investigations on micro discharge currents and conditioning behaviour of vacuum gaps", *Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, vol. 1, pp. 67-70, 2006.
- [12] Kato, K., Hikita, M., Hayakawa, N., Kito, Y., Okubo, "Development, H. of personal-computer-based high efficient technique for electric field optimization", *European Transactions on Electrical Power – Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 5, no. 6, pp. 401-407, 2007.
- [13] Haykin, S., "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", IEEE Press, McMillan College Publishing Co., 1994
- [14] Kojima, H., Hitoshi ,K.S. Okubo and Kato, ,K. "Electric Field Optimization of Floating Electrode Configuration in Vacuum Interrupter", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electr. Insulation*, Vol., pp. 36-39, 2010.
- [15] Joo, H.W., Ryu, J., and Tak, S.: "Optimal Design of Multi-Shield for Improvement of Insulation Performance of High Voltage Vacuum Interrupter", *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, pp. 613-615, 2011.
- [16] Jin ,L. , Zhou, ,F. , Yan, ,J. , Peng, Q., Chen, J., and Wang, J. , "Research on the Most Efficient Separation for 35 kV Vacuum Interrupters", *High Voltage Apparatus*, vol. 37, no. 3, pp.18 -20 1999.
- [17] Yasuoka, T., Kato, K., and Okubo, H., "Electrode conditioning characteristics based on discharge current in vacuum", *15th Intl. Symp. High Voltage Eng.*, pp. 137-141, 2007.
- [18] Kato, K., and Okubo, H., "Optimization of Electrode Contour for Improvement of Insulation Performance of High Voltage Vacuum Circuit Breaker", *Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, vol. 15, pp. 21-24, 2006.

Electric Field Intensity Optimization in High-Voltage Equipment Design Using Neural Networks and Genetic Algorithms Based on the Finite Element Method (FEM) with an Emphasis on Vacuum Switches

Asad Shemshadi^{*1}, Mohamad Maghi Bathaei², Asghar Akbari³

1- Ph.D. student in Electrical and Computer Engineering Department, KN Toosi University

2,3- Associate Professor of Electrical Engineering - Department of Electrical and Computer Engineering - University Kntoosi

Abstract

Regarding to In this this article, internal electric field optimization process inside a high-voltage equipment is discussed in detail with an emphasis on emphatically the internal structure of a high-voltage switch from vacuum type inside a typical vacuum interrupter chamber (VI), is discussed in details. Based on the proposed algorithm the understudy high voltage equipment is analyzed using finite element method (FEM) to obtain electric field distribution pattern. ToIn continue, local regions with critical electric field value and all of related geometric design parameters are characterized. With utilizingation of normal random function and limits and constraints on the variation of these parameters, a set of new designing vectors are specified and utilized used to construct new FEM models. The maximum electric field value for every model is obtained to form an output set. A feed forward type neural network (NN) is utilized to be trained regarding to all designing vectors and output derived values for maximum electric field. In continue this NN is used as an objective function during optimization process using genetic algorithm implement. The derived optimized designing vector is utilized to form a new FEM model for validation check of the proposed process. Finally the reduction of field emission current density regarding to; executed optimization process is discussed also.

Keywords: Index Terms - vacuum interrupters, Electric field, Finite element, Neural network, Genetic algorithm.