مدل‌سازی مقره‌های سرامیکی آلوده با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مرتضی قایدی

استادیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند، m.ghayedi@birjand.ac.ir

چکیده

پدیده جرقه‌زنی در مقره‌های آلوده هنوز به طور دقیق از طریق یک مدل ریاضی شرح داده نشده است. مشکل اصلی در تعریف ثابت‌های جرقه نهفته است، که در باندهای خشک زمانی که ولتاژ از مقدار بحرانی خود فراتر می‌رود، تشکیل می‌شود. این مقاله یک روش بهینه‌سازی پیچیده مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک را برای تعیین ثابت‌های جرقه، با استفاده از نتایج تجربی مقره‌های آلوده مصنوعی ارائه می‌کند. مدل معروف اول اوبینهاوس برای بارهای الکتریکی استفاده شده است. این مدل منجر به سیستمی از معادلات می‌شود که با روش‌های معمولی محاسباتی قابل حل نیستند. استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک تعریف ثابت‌های جرقه را امکان‌پذیر می‌سازد ،همچنین منجر به محاسبه شرایط بحرانی در ابتدای مکانیسم جرقه‌زنی آلودگی می‌شود. به این ترتیب یک مدل ریاضی محقق می‌شود، که به طور دقیق می‌تواند نتایج تجربی را شبیه‌سازی کند.

واژه های کلیدی

الگوریتم ژنتیک، آلودگی، جرقه‌زنی، مقره سرامیکی.

مقدمه

در سال های اخیر علاقه زیادی در مکانیسم توسعه جرقه‌زنی الکتریکی در مقره‌های آلوده بوده است. مقره‌های آلوده می‌توانند تحت شرایط خاص، باعث توسعه جرقه‌زنی الکتریکی که عواقب جدی در عملکرد صحیح شبکه‌ها می‌تواند داشته باشد. به این پدیده جرقه‌زنی آلودگی می‌گویند و هنوز کاملا مشخص نیست. تعداد زیادی پروژه در مورد این پدیده انجام شده و مطالعات زیادی در سراسر جهان منتشر شده است. علیرغم این تلاش‌ها مشخص شده است که هیچ توضیح قابل قبولی در مورد مکانیسم جرقه‌زنی آلودگی وجود ندارد و بنابراین هیچ روش کلی و کارآمدی برای برخورد با مشکل وجود ندارد.

سطح مقره‌ها توسط آلاینده‌های موجود در هوا ناشی از آلودگی های طبیعی یا صنعتی یا حتی مخلوط پوشیده شده است. وقتی سطح مقره‌ها به دلیل باران، مه یا شبنم مرطوب می‌شوند، لایه آلودگی به دلیل وجود مواد جامد یونی رسانا می‌شود. یک جریان نشتی ازطریق لایه سطح رسانا جریان می‌یابد. جریان نشتی از لایه نازک رسانا جریان می‌یابد و گرمایی ایجاد می‌کند که تمایل دارد دمای سطح نازک رسانا را با بیشترین سرعت در نقاطی که چگالی جریان بالاتر است، یعنی در بخش‌های باریک مقره، مانند ناحیه اطراف پین (ترمینال‌ها)، افزایش دهد. درنهایت دما در این مناطق به نقطه جوش نزدیک می‌شود و تبخیر سریع رطوبت باعث ایجاد باند خشک می‌شود. از طریق آزمایش نیز می‌توان تایید نمود که پیشروی باندهای خشک مستقل از نوع مقره می‌باشد، زیرا قطر بدنه مقره‌ها نسبت به هم تفاوت بسیار کمی دارد.

مقاومت باند خشک بسیار بیشتر از باند مرطوب است. درنتیجه افت ولتاژ در باند خشک بیشتر است و ولتاژ خط تقریباً به طور کامل روی این مناطق اعمال می شود. قوس‌هایی که می‌توانند باند خشک را پل بزنند باعث شروع اولیه می‌شود. اگر ترکیبی از رسانایی و تنش الکتریکی کافی باشد تا به یک قوس اجازه دهد تا جریان کافی داشته باشد تا در هنگام انتشار خود پایدار بماند، جرقه‌زنی اتفاق می‌افتد.

مدل‌سازی جرقه‌زنی موضوع مورد علاقه بسیاری از محققین بوده است [۴-۱]. یک مشکل اصلی در تمام این تحقیقات تعریف مقدار ثابت‌های جرقه است که بر فرآیند صاعقه تاثیر می‌گذارند [۵ و۶]. متأسفانه مقادیر ثابت‌های تعیین شده از چندین تحقیق به طور قابل توجهی متفاوت است. این تحقیق محاسبه دقیق پارامترهای مقدار جرقه را با استفاده از نتایج تجربی مرتبط و شبیه‌سازی دقیق رفتار مقره در شرایط آلوده با استفاده از یک مدل ریاضی مناسب هدف قرار می‌دهد. آزمایش‌های تجربی بر روی مقره‌های آلوده مصنوعی طبق استانداردهای بین‌المللی انجام می‌شود. ضخامت لایه آلودگی روی سطح مقره از مقادیر کم تا مقادیر بالاتر که مربوط به سایت‌های صنعتی به شدت آلوده است، متفاوت می‌باشد.

از جمله پارامترهای اندازه‌گیری شده فرآیند، مقدار بحرانی ولتاژ تنش یک مرحله قبل از جرقه‌زنی می‌باشد. تعریف ثابت‌ها با استفاده از

مقـادیر اندازه‌گیری شـــده ولتاژ بحرانی برای جرقه‌زنی تحت چندین چگالی آلاینده انجام می‌شود.

مدل‌سازی فرآیند جرقه‌زنی الکتریکی

فرآیند تخلیه الکتریکی روی مقره‌های آلوده توســط چندین محقق به طور کامل بررسـی شـده اسـت. ساده‌ترین مدلی که توسط اوبینهاوس [۱] ایجاد شـده اسـت شـامل یک تخلیه جزئی است که باند خشک و مقاومت باند مرطوب آلوده را به صـورت سـری پل می‌کند، بنابراین ، ولتاژ در سراسر مقره خواهد بود:

$$U = xAI^{-n} + (L - x)R_pI \quad (۱)$$

که در آن xAI^{-n} افت ولتاژ در قوس و $(L - x)R_pI$ افت ولتاژ در لایه آلودگی اسـت. x طول جرقه، L مسـیر نشتی عایق، R_p مقاومت در واحد طول لایه آلودگی، I جریان نشـــتی و A و n ثابت‌های جرقه می‌باشند.

اندازه گیری مقاومت R_p باند مرطوب بسیار پیچیده است. بنابراین می‌توان آن را با هدایت σ لایه آلودگی جایگزین کرد:

$$\sigma_p = \frac{I}{R_p}F_i \quad (۲)$$

F_i ضریب شکل مقره است که به صورت زیر آورده شده است:

$$F_i = \int_0^L \frac{I}{\pi D(l)}dl \quad (۳)$$

که در آن $D(l)$ قطر مقره است که در طول نشتی متفاوت است.

برای انتشـــار قوس در امتـداد ســـطح مقره برای ایجاد جرقه‌زنی شرایط بحرانی باید برقرار باشد [۷]:

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (۴)$$

ولتاژ تحت این شرایط بحرانی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_c = x_cAI_c^{-n} + (L\text{-}x_c)KR_pI_c \quad (۵)$$

در لحظه بحرانی تخلیه الکتریکی ضـریب K برای تایید اعتبار در مقدار یک اضـافه شـد. ویلکینز این ضریب را به منظور اصلاح مقاومت R_p لایه آلودگی با توجه به غلظت فعلی در نقطه شـــروع جرقه معرفی کرد [۴]. یک فرمول ســـاده شـــده برای محاســـبه K برای مقره‌های کلاهک و پین (بشقابی) بصورت زیر معرفی شد [۸]:

$$K = 1 + \frac{L}{2\pi F_i(L - x_c)} ln \frac{L}{2\pi F_i\sqrt{\frac{l_c}{1.45\pi}}} \quad (۶)$$

مقدار طول جرقه را در شرایط بحرانی می‌گیرد [۴]:

$$x_c = \frac{1}{n+1}L \quad (۷)$$

تجزیه و تحلیل بیشـــتر از معادلات ســـیســـتم در لحظه جرقه‌زنی جریان بحرانی را بصورت زیر حاصل می‌دهد [۹]:

$$I_c = (\pi D_r \sigma_p A)^{1/n+1} \quad (۸)$$

و برای ولتاژ بحرانی:

$$U_c = \frac{A}{n+1}(L + \pi D_r F_i Kn)(\pi D_r \sigma_p A)^{-n/(n+1)} \quad (۹)$$

که در آن D_r قطر مقره اســت که معادله (۹) مقدار بحرانی ولتاژ را در لحظـه جرقـه‌زنی الکتریکی در برابر ابعـاد مقره (D_r و L) ارائـه می‌کنـد، ثابت های قوس A، n و آلودگی σ_p، F_i و K نیز تابعی از ابعاد مقره هستند.

بدیهی اسـت که ولتاژ بحرانی را می‌توان پس از محاسبه ثابت‌های جرقه محاسبه کرد. اینها پارامترهای مجهول مدل هستند.

آزمایش

این مقاله از نتایج تجربی بر روی ســه نوع مختلف عایق کلاهک و پین اسـتفاده می‌کند. دو نوع اول توسـط نویســندگان در [۹] و نوع ســوم توسط محققین دیگر در [۱۰] آزمایش شده است. مشخصات فنی این مقره‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ابعاد مقره‌های مورد مطالعه

پارامترها	مقره ۱	مقره ۲	مقره ۳
حداکثر D_r (mm)	۲۵۴	۲۵۴	۲۵۴
ارتفاع محوری (mm)	۱۴۶	۱۴۶	۱۴۶
فاصله خزشی (mm)	۳۰۵	۴۳۱	۲۷۹
F_i (mm)	۰/۶۹۶	۰/۹۱۶	۰/۶۸۴

نوع اول که توسـط نویسندگان آزمایش شد مقره آویزی کلاهک و پین و دومی عایق از نوع مه می‌باشـد. آزمایش‌ها روی این دو مقره به روش مه لایه جامد سـرد طبق اسـتانداردهای بین المللی انجام شـده اسـت. رسـانایی سطحی لایه آلودگی از ۷/۸ تا ۹/ ۱۱۰ $\mu\Omega^{-1}$ متغیر است. مقادیر بالاتر مربوط به آلودگی صنعتی در مناطق به شدت آلوده است. مقدار مهمتر در فرآیند آزمایشی، ولتاژ بحرانی است یعنی مقدار ولتاژ اعمالی در زمان درست قبل از وقوع جرقه‌زنی الکتریکی.

مقادیر ولتاژ بحرانی برای هر ســه مقره به ازای رسـانایی سـطحی لایه آلودگی همراه با نتایج محاسبه شده در بخش ۵ ارائه شده است.

اعمال الگوریتم ژنتیک در مدل پیشنهادی

داده‌های تجربی U_c در برابر σ_p و ویژگی‌های هندســی D_r ، L، F_i مقره‌های جدول ۱ در رابطه (۹) اعمال می‌شوند، بنابراین مجموع‌های از ۲۸۴ معادله همزمان با دو مجهول، ثابت‌های قوس A و n را نتیجه می‌دهد:

$$F_g = \sum_{i=1}^{284} |U_{ci} - f_i(A,n)| \quad (۹)$$

این مجموعه معادلات باید بیش از A و n به حداقل برسد. به همین دلیل است که A و n به سیستم دوتایی تبدیل می شوند و به عنوان بخشی از یک کروموزوم بزرگ در نظر گرفته می شوند. جست‌وجو با جمعیتی از کروموزوم‌ها که به‌طور تصادفی تولید می‌شوند آغاز می‌شود. هر ثابت (A, n) به یک عدد باینری تبدیل می شود. محدوده ثابت‌ها به‌صورت 0<n<1 و 0<A<500 می‌باشند. داده های موجود در مقاله‌های انجام شده نشان می‌دهد که مقادیر ثابت n و A برای لایه های نازک آلودگی به ترتیب در محدوده ۰/۳-۱ و ۴۰۰-۵۰ می‌باشند (A=131.5, n=0.374 [۹] و A=63, n=0.76 [۳] و A=270-461, n=0.42-0.66 [۶]).

نتایج

استفاده از الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه‌ای با ۲۰ کروموزوم به طور تصادفی ایجاد می‌شود. ۲۰ مقدار تصادفی برای ثابت قوس A (0<A<500) و ۲۰ مقدار تصادفی برای ثابت قوس n (0<n<1) ایجاد می‌کند. هر ثابت، A یا n، به یک عدد باینری ۱۶ بیتی تبدیل می‌شود. ۳۲ بیت برای کروموزوم مورد نیاز است. هر جفت والدین با عمل تقاطع چهار فرزند تولید می‌کنند. تقاطع زمانی شروع می‌شود که هر کروموزوم هر والدین به شش قسمت تقسیم شود و جفت والدین مواد ژنتیکی خود را با هم عوض کنند. پس از تقاطع ، احتمال جهش ۱٪ وجود می‌باشد. این روش پس از ۵۰۰ تولید خاتمه می‌یابد. پارامترهای فوق الگوریتم در جدول ۲ خلاصه شده است که P_s تعداد جمعیت اولیه، t تعداد عدد باینری(بیت)، N_c تعداد فرزندان، P_m احتمال جهش، N_p قسمتی از ماده ژنتیکی والدین برای تولید مثل و N_{max} تعداد ماکسیمم تکرار می‌باشند. این برنامه منجر به جفت مقادیر (A, n) می شود که در نهایت به مقادیر بهینه A = 124.8، n = 0.409 با افزایش تعداد تکرارها همگرا می‌شوند، که در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲: پارامترهای الگوریتم ژنتیک

N_{max}	N_p	P_m	N_c	t	P_s
۵۰۰	۶	٪۱	۴	۱۶	۲۰

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

یکی از مهم ترین مشکلاتی که امروزه محققان در استفاده از مدل‌های ریاضی کاملاً قابل اعتماد از رفتار دی‌الکتریک مقره‌های آلوده با آن مواجه هستند، تعریف پارامترهای قوس می‌باشند. مقادیر کاملاً متفاوتی که در مقالات یافت می‌شود یا به دلیل روش‌های تجربی مختلف یا به دلیل راه‌حل‌های پیچیده ریاضی است.

این مطالعه یک روش بهینه‌سازی حسابی پیچیده را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک پیشنهاد می‌کند که منجر به نتایج دقیق‌تری در مقایسه با روش‌های ریاضی مرسوم می‌شود. استفاده از مدل فقط به ویژگی‌های هندسی مقره، رسانایی آلودگی و ثابت‌های قوس نیاز دارد. بنابراین تعیین ثابت‌های قوس امکان محاسبه شرایط بحرانی برای جرقه‌زنی الکتریکی را فراهم می‌کند.

با این رویکرد یک مدل ریاضی جدید ایجاد شده است. این مدل نتایج تجربی را کاملاً دقیق شبیه‌سازی می‌کند و به کاربردهای آن اعتماد می‌کند. علاوه بر این، مقایسه بین روش‌های شبیه‌سازی به طور گسترده تایید شده منجر به درک بهتر پدیده‌های گذرا در مقره‌های آلوده می‌شود. به این ترتیب، امید است که آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر که برای بررسی رفتار دی‌الکتریک مقره‌های آلوده و هماهنگی عایق خطوط انتقال الکتریکی مورد نیاز است، به حداقل برسد.

جدول ۳: پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تعداد تکرار	A	n
۱	۱۲۰/۷۰۷	۰/۴۴۲۷
۲۰	۱۲۲/۲۵۹	۰/۴۱۸۸
۴۰	۱۲۴/۲۳۹	۰/۴۲۱۳
۶۰	۱۲۴/۲۸۸	۰/۴۱۵۲
۸۰	۱۲۴/۸۰۲	۰/۴۱۰۴
۱۰۰	۱۲۴/۷۳۸	۰/۴۱۰۴
۱۲۰	۱۲۴/۸۱۸	۰/۴۰۸۶
۱۴۰	۱۲۴/۸۰۲	۰/۴۰۹۱
۱۵۰	۱۲۴/۸۰۲	۰/۴۰۹۱
۲۰۰	۱۲۴/۸۰۲	۰/۴۰۹۱

مراجع و منابع

[1] Obenhaus, F.: ‘Fremdschichtueberschlag und Kriechweglaenge,’ Deutsche Elektrotechnik, 1958, H. 4, pp. 135-137.
[2] Alston, L.L., and Zoledziowski, S.: ‘Growth of discharges on polluted insulation’, Proc. IEE, 1963, 110, (7), pp. 1260-1266.
[3] Rizk, F.A.M.: ‘Mathematical models for oollution flashover.’ Electru, October, 1981, 78, pp, 71-103.
[4] Wilkins, R.: ‘Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films’, Proc. IEE, 1969, 116, (3), pp. 457-465.
[5] Chaurasia, D.C.: ‘Scintillation modelling for insulator strings under polluted conditions’. Paper

No. 4.224.P2., 1 lth Int. Symp. On High Voltage Engineering, London, 1999, Vol. 4, pp. 1-2.

[6] Ghosh, P.S., and Chatterjee, N.: 'Polluted insulators flashover model for AC voltage', IEEE Truns. Dieiectr. Electr. Insul., 1995, 2, (l), pp. 128-136.

[7] Renyu, Z., Deheng, Z., and Zhicheng, G.: 'A study on the relation between the flashover voltage and the leakage current of naturally or artificially polluted insulators'. Paper No. 46.01., 4th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Athens, Greece, 1983.

[8] Gonos, I.F., Topalis, F.V., and Stathopulos, LA.: 'A model for the determination of the dielectric streneth of non-uniforinlv polluted insulators'. Int. Conf. on Power and EZGgy Systems: Lis Vegas, USA, 8-10 Nov. 1999, pp. 472-476.

[9] Topalis, F.V., Gonos, I.F., and Stathopulos, LA.: 'Dielectric behaviour of polluted insulators', IEE Proc,, Gener., Trrwwn. Distrib., 2001, 148, (4), pp. 269-274.

[10] Zhicheng, G., and Renyu, Z.: 'Calculation of DC and AC flashover voltage of polluted insulators', IEEE Truns. Electr. Insul., 1990, 25, (4), pp. 723-729.