

بهبود مدل دینامیکی شکست الکتریکی مقره های آلوده فشار قوی

حسین محسنی

مجید صنایع پسند

علی نادریان

دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده:

هر چند تحقیقات گسترده ای بر روی شکست الکتریکی مقره ها و ارتباط آن با عوامل مختلف انجام شده است اما شکست الکتریکی مقره های آلوده از جمله مسائل مهمی است که در دهه های اخیر بدلیل مشکلات ناشی از آنها مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با مروری بر مدل های متداول شکست الکتریکی مقره آلوده، با ارائه روشی مدل دینامیکی شکست الکتریکی بهبود داده شده است. این روش بر اساس لحاظ تغییرات ضریب هدایت لایه آلودگی بر اثر عبور جریان خزشی و افزایش مقاومت به دلیل خشک شدن سطح مقره، ارائه شده است. نتایج شبیه سازی نشان میدهد که این مدل نسبت به مدل های دینامیکی متداول به نتایج آزمون نزدیکتر است.

واژه های کلیدی: مقره، آلودگی، شکست الکتریکی، مدل

۱- مقدمه

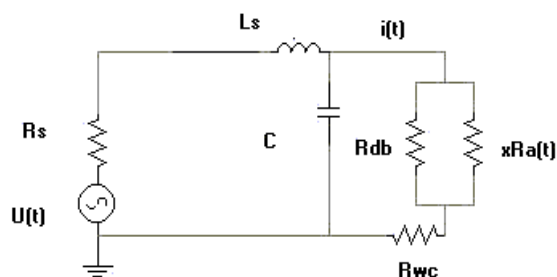
شرایط محیطی، پیرشدگی، اضافه ولتاژ و جریان نشتی انجام شده و آزمونهای مختلفی نیز جهت ارزیابی وضعیت مقره پیشنهاد شده است [۱-۱۵]. آلودگی مقره ها از جمله مسائل مهمی است که در دهه های اخیر بدلیل مشکلات ناشی از آن مورد توجه مضاعف قرار گرفته است و باعث شده به یکی از زمینه های تحقیقاتی مهم تبدیل شود [۱].

تحقیقات نشان داده است که آلودگی نشسته بر سطح مقره در صورت توام شدن با رطوبت ولتاژ شکست را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش میدهد.

دلیل اصلی کاهش استقامت الکتریکی در اثر آلودگی تشکیل یک لایه هادی بر روی سطح مقره ناشی از ترکیب آلودگی و رطوبت است. ولتاژ شکست در چنین حالتی بستگی به پارامترهای مختلفی از جمله نوع، میزان و ابعاد ذرات

در سیستمهای قدرت جداسازی مسیرهای فشار قوی توسط مقره ها انجام می گیرد. به عبارت دیگر وظیفه اصلی مقره ایزولاسیون شبکه است. این تجهیزات علیرغم قیمت کم آنها نسبت به دیگر تجهیزات مانند ژنراتور و ترانسفورماتور بدلیل نقش حساس آنها و تعداد زیادشان همواره مورد توجه بوده اند. گستره استفاده از مقره ها آنقدر زیاد است که هر جا بحث هادی و انتقال انرژی ولتاژ بالا مطرح می شود، مقره ها نیز بدنبال هادی خود را نشان می دهد.

تا کنون تحقیقات گسترده زیادی بر روی شکست الکتریکی مقره ها و ارتباط آن با عوامل مختلف از جمله آلودگی،



شکل ۲- مدل الکتریکی مفره آلوده با مقاومت نوار خشک

در شکل ۲ C خازن معادل مدار، R_{db} مقاومت نوار خشک مفره موازی با قوس، $R_a(t)$ مقاومت قوس در واحد طول و R_{wc} مقاومت لایه مرطوب مفره است. R_{db} و R_{wc} به طول و مقدار آلودگی سطحی مفره بستگی دارند و تغییرات آنها غیر خطی است. این مقاومتها با استفاده از ضرایب شکل گیری (Form Factor) بصورت زیر تعریف می شوند.

$$R_{db} = \frac{FF_{db}}{FF} R_{dry} \quad (1)$$

$$R_{wc} = \frac{FF_{wc}}{FF} R_{wet} \quad (2)$$

R_{dry} مقاومت پوشش آلودگی سطحی مفره در حالت خشک و R_{wet} مقاومت لایه مرطوب آلوده است. همچنین در روابط ۱ و ۲ ضرایب شکل گیری عبارتند از:

$$FF = \int_0^L \frac{dl}{\pi D(l)}, FF_{db} = \int_0^x \frac{dl}{\pi D(l)}, \quad (3)$$

$$FF_{wc} = \int_x^L \frac{dl}{\pi D(l)}$$

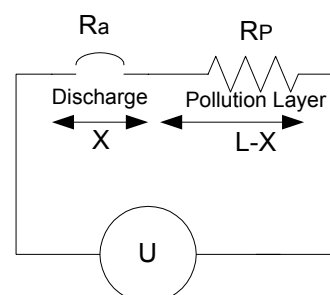
L طول خزشی مفره و $D(l)$ قطر مفره در فاصله l از ابتدای مفره است.

مدل قوس الکتریکی مورد استفاده در شکل ۲ مدل Mayr است که در رابطه ۴ ملاحظه میشود [۲].

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 [i_a(t)]^{n+1}}{\tau N} \quad (4)$$

R_{arc} مقاومت قوس در واحد طول، τ ثابت زمانی قوس است که معمولاً بین $50\mu s$ تا $250\mu s$ است.

آلودگی، رطوبت و یکنواختی آن، یکنواختی و عدم یکنواختی آلودگی، یکنواختی رطوبت، تشکیل شبنم و میزان آن، پروفیل و ابعاد هندسی مفره، فواصل زمانی شستشوی طبیعی و مصنوعی مفره، باد و عوامل جوی دیگر دارد [۴، ۵]. جهت شناسایی رفتار شکست الکتریکی بر روی سطح مفره مدلهایی ارائه شده است. اولین قدم جهت مدلسازی شکست الکتریکی مفره آلوده توسط Obenaus برداشته شد که مدل مربوطه در شکل ۱ نشان داده شده است [۱، ۲].



شکل ۱- مدل ساده شکست الکتریکی مفره آلوده

همانطور که در این شکل ملاحظه میشود قوس الکتریکی و لایه آلوده بصورت مقاومت‌های سری R_p و R_a مدل شده اند. کل فاصله خزشی مفره L است و فرض شده که قوس الکتریکی در طول X برقرار شود. بنابراین طول باقیمانده مفره $(L-X)$ که مربوط به لایه آلوده است نیز بسته به میزان رطوبت و نوع آلودگی یک مقاومت دارد (R_p).

هرچند این مدل توانست تا حد زیادی شکست الکتریکی مفره آلوده را مدل کند، اما بدلیل پیچیدگی ذات شکست الکتریکی، این مدل نیاز به تغییر داشت. پس از آن با توجه به ذات دینامیکی قوس الکتریکی، مدلهای کاملتری ارائه شد که در بخشهای بعدی به آنها اشاره کوتاهی خواهد شد [۲، ۴-۷، ۱۲، ۱۴].

در این مقاله با بررسی مدلهای موجود، یک مدل دینامیکی بهبود یافته بر اساس آخرین مدلهای الکتریکی شکست الکتریکی ارائه کرده است.

۲- مدل استاتیکی شکست الکتریکی

مدار معادل ساده شده شکست الکتریکی بر اساس مدل استاتیکی در شکل ۲ مشاهده میشود.

در حالت کلی معادلات ولتاژ و جریان مدار معادل عبارتست از:

$$V_{i-1}(t) - V_i(t) = R_i I_i(t) + L_i \frac{dI_i(t)}{dt} \quad (6)$$

$$I_i(t) = I_{i-1}(t) - C_{i-1} \frac{dV_{i-1}(t)}{dt} \quad (7)$$

فلوچارت مدل شکست الکتریکی و انتشار قوس در شکل ۴ ملاحظه میشود.

همانطور که در قسمت ۲ اشاره شد شرط شکست الکتریکی مفره آلوده، بیشتر بودن میدان الکتریکی لایه آلوده نسبت به میدان الکتریکی قوس است. با توجه به مساوی بودن جریانها، این نسبت در فلوچارت بصورت مقاومت ظاهر شده است و در صورتیکه مقاومت لایه آلوده از مقاومت کانال قوس بیشتر شد قوس انتشار می یابد. در صورت کوتاها تر بودن قوس از طول خزشی مفره، شکست الکتریکی رخ خواهد داد. مقادیر پارامترهای این مدار معادل از روابط زیر محاسبه می شوند [۵، ۱۰، ۱۱].

$$C_i = 4\pi\epsilon_0 r_i \sinh \alpha_i \sum_{n=1}^{\infty} [\sinh(n\alpha_i)]^{-1} \quad (8)$$

$$\cosh(\alpha_i) = \frac{L - x_i}{r_i} \quad (9)$$

در روابط فوق L طول مفره، x_i طول جزئی قوس است و r_i شعاع کانال قوس است که با استفاده از مدل Wilkins بدست می آید [۵]:

$$r_i = \sqrt{\frac{I_a(t)}{1.45\pi}} \quad (10)$$

Df فاصله شعاعی از کانال قوس است که در آن محل میدان الکتریکی تقریباً صفر می باشد.

مقاومت لایه آلوده با استفاده از ابعاد هندسی مفره از رابطه ۱۱ بدست می آید.

$$R_{pi} = \frac{1}{2\pi\sigma_i} \left[\frac{\pi(L-x)}{a} + \log \frac{a}{2\pi r_i} \right] \quad (12)$$

σ هدایت لایه آلوده و a عرض باند آلودگی است. در صورت یکنواخت بودن لایه آلودگی a از رابطه ۱۳ بدست می آید.

از طرف دیگر پارامترهای n و N در ارتباط با خاصیت استاتیکی شدت میدان الکتریکی قوس هستند که در رابطه ۵ ملاحظه میشود.

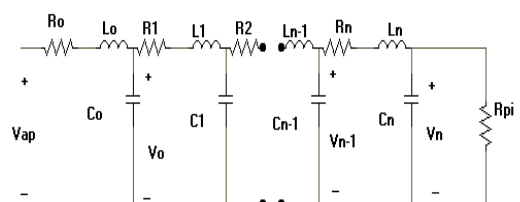
$$E_a = N[i_a(t)]^{-n} \quad (5)$$

E_a شدت میدان الکتریکی لازم جهت باقی ماندن قوس در فاصله خزشی x از ابتدای مفره است. ثابت N بین ۵۰ تا ۴۰۰ و ثابت n بین ۰/۳ تا ۱ است [۲، ۴، ۶، ۱۰].

نکته اساسی در شکست الکتریکی مفره آلوده آن است که زمانی قوس آغاز میگردد که شدت میدان الکتریکی ناحیه خشک مفره بیشتر از شدت میدان ناحیه مرطوب شود [۱-۱۰]. در حالتی چنین اتفاقی می افتد که توان تزریقی به قوس از طریق منبع بیشتر از توان تلفاتی قوس شود. در این حالت مقاومت قوس به شدت افت پیدا می کند و قوس پایدار می ماند و جریان قوس تنها توسط مقاومت لایه مرطوب محدود میشود. در صورتیکه توان منبع کاهش یابد مقاومت قوس افزایش می یابد و قوس خاموش میگردد.

۳- مدل دینامیکی انتشار قوس

مدل دینامیکی شکست الکتریکی مفره آلوده بر اساس مدل کردن کانال انتشار قوس استوانه ای توسط RLC های سری است که مدار معادل آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مدار معادل دینامیکی شکست الکتریکی

در این مدار معادل L_i, R_i, C_i به ترتیب مقاومت، سلف و خازن مدار معادل کانال قوس الکتریکی هستند. هر کدام از سلولهای RLC معادل یک قسمت از قوس هستند که در صورت کوچکتر بودن مقاومت آنها از مقاومت لایه آلوده انتشار می یابند. لایه آلودگی نیز با مقاومت R_p مدل شده است [۵، ۹-۱۱].

سلف مدار معادل الکتریکی کانال قوس عبارتست از:

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} [0.25 + \ln(\frac{D_f}{r_i})] \quad (11)$$

$$a = \pi(\frac{D}{2} + e_p) \quad (13)$$

D قطر مقره و e_p ضخامت آلودگی است.

شدت میدان الکتریکی قوس است. ایجاد کانالهای موضعی قوس الکتریکی و انتشار قوس که قبل از شکست الکتریکی رخ خواهد داد، به دلیل ایجاد حرارت باعث خشک شدن نسبی لایه آلودگی مرطوب و افزایش این مقاومت خواهد شد.

در حقیقت σ یعنی ضریب هدایت لایه آلودگی بستگی به شدت جریان عبوری خواهد داشت و در صورت انتشار قوس و خشک شدن سطح مقره، کاهش خواهد یافت. بنابراین مقاومت لایه آلوده علاوه بر پارامترهای هندسی وابسته به زمان است که تا کنون در مدل‌های دینامیکی مورد اشاره لحاظ نشده است.

تغییرات مقاومت مخصوص لایه آلوده را میتوان توسط رابطه ۱۴ مدل کرد.

$$\rho = \rho_0 (e^{\frac{W_{loss}}{k\Delta T}}) \quad (14)$$

ρ مقاومت مخصوص لایه آلوده در دمای T و ρ_0 مقاومت مخصوص لایه آلوده در دمای T_0 است.

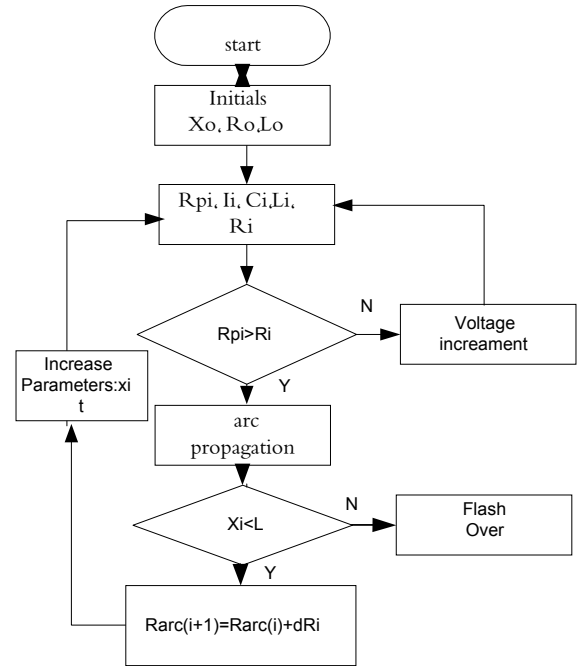
با توجه به ارتباط انرژی تلفاتی و مجذور جریان ضریب هدایت لایه آلوده عبارتست از:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\frac{kT^2 t}{K\Delta T}) \quad (15)$$

در رابطه فوق K ثابت بولتزمن، k' ضریب مقاومت است که ثابت فرض شده، ΔT افزایش درجه حرارت ناحیه آلوده بر اثر عبور جریان خزشی و I جریان خزشی مقره است که از رابطه ۱۶ محاسبه میشود.

$$I_{leak}(i+1) = [\frac{V(t) - V_a - V_c}{R_p(i) + R_{arc}(i+1)}] \quad (16)$$

با استفاده از جایگزینی رابطه ۱۵ در ۱۲ بدست می آید. در رابطه ۱۶ V_a و V_c به ترتیب افت ولتاژ آندی و کاتدی قوس الکتریکی و $V(t)$ ولتاژ اعمالی منبع است. با ترکیب روابط ۱۲، ۱۵ و ۱۶ تاثیر جریان خزشی در مقاومت ناحیه آلودگی خود را نشان میدهد و در مدل جدید، در هر قدم محاسبه در فلوجارت نشان داده شده در شکل ۵



شکل ۵- فلوجارت انتشار قوس و شکست الکتریکی

مدل انتشار قوس در فلوجارت شکل ۵ ملاحظه میشود. همانطور که ملاحظه میشود شرط انتشار قوس بزرگتر بودن مقاومت لایه آلوده نسبت به مقاومت قوس است. در این شکل X_0 و X_i به ترتیب طول اولیه و طول مرحله I ام خزشی قوس الکتریکی از ابتدای مقره است.

۴- بهبود مدل دینامیکی

مدلهای دینامیکی ارائه شده توسط محققین فرانسوی توانسته است ارتباط خوبی بین میزان آلودگی و ولتاژ شکست الکتریکی برقرار کند [۵، ۹، ۱۱] اما یکی از نکات اساسی در مدلسازی ارائه شده در قسمت ۳ مقاومت لایه آلوده است که توسط رابطه ۱۳ مشخص شده است.

همانطور که توضیح داده شد شرط شکست الکتریکی مقره بیشتر بودن شدت میدان الکتریکی ناحیه آلوده نسبت به

این تغییر لحاظ میشود. بنابراین مدل شکست الکتریکی مقره آلوده بهبود می یابد.

۵- شبیه سازی

جهت مشخص شدن نتیجه روش ارائه شده برای مدلسازی دینامیکی مقره آلوده بر روی دو نوع مقره با استفاده از نتایج مستخرج از تحقیقات قبلی ارتباط بین ولتاژ شکست و میزان آلودگی بدست آمده است.

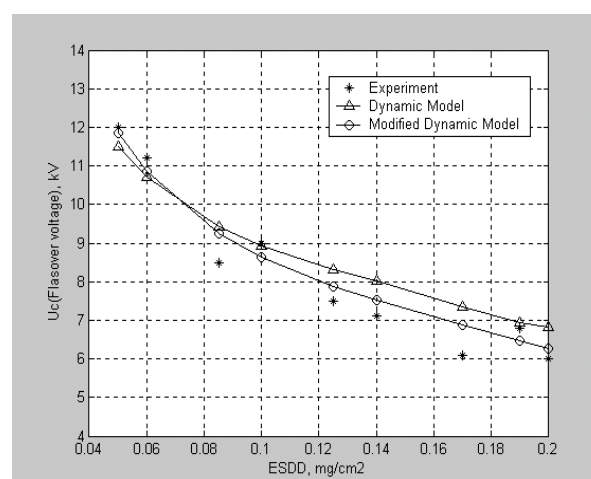
شکل ۶ و ۷ ارتباط بین شکست الکتریکی و میزان آلودگی از نتایج تجربی [۱۶] و یک مدل دینامیکی [۱۰] و همچنین مدل بهبود یافته را برای دو نوع مقره که مشخصات آنها در جدول ۱ ملاحظه میشود را نشان میدهند.

جدول ۱- مشخصات مقره های مورد استفاده

بر حسب mm [۱۰]

مقره	D_m	H	L
۱ (سرامیکی معمولی)	254	146	279
۲ (سرامیکی ضد مه)	229	166	432

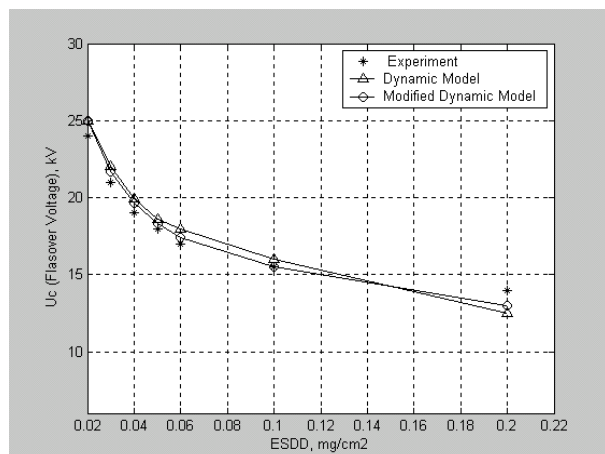
مدل بهبود یافته شکست الکتریکی با استفاده از فلوچارت شکل ۵، توسط نرم افزار Matlab پیاده سازی شد. همانطور که در شکل های ۶ و ۷ ملاحظه میشود، این مدل نسبت به مدل های دینامیکی متداول به نتایج آزمون نزدیکتر است.



شکل ۶- مقایسه تغییرات شکست الکتریکی بر حسب میزان آلودگی

مقره شماره ۱ جدول ۱

بنابراین میتوان نتیجه گرفت که در صورت لحاظ تغییرات مقاومت ناحیه آلوده (بر اثر حرارت و از دست دادن رطوبت) میتوان به نتایج واقعی تری در مدلسازی دینامیکی شکست الکتریکی مقره آلوده رسید.



شکل ۷- مقایسه تغییرات شکست الکتریکی بر حسب میزان

آلودگی مقره شماره ۲ جدول ۱

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی چند مدل عمده شکست الکتریکی مقره آلوده، روشی جهت بهبود مدل دینامیکی شکست الکتریکی ارائه شد.

با توجه به اینکه ضریب هدایت لایه آلودگی بستگی به شدت جریان عبوری خواهد داشت و در صورت انتشار قوس و خشک شدن سطح مقره، کاهش خواهد یافت، مدل پیشنهادی بر اساس لحاظ کردن اثر این پارامتر در مدل های قبلی می باشد.

بنابراین میتوان نتیجه گرفت که در صورت در نظر گرفتن تغییرات مقاومت ناحیه آلوده (بر اثر حرارت و از دست دادن رطوبت) میتوان به نتایج واقعی تری در مدلسازی دینامیکی شکست الکتریکی مقره آلوده رسید.

نتایج شبیه سازی انجام شده و مقایسه نتایج تجربی بدست آمده در مراجع قبلی تایید کننده این ادعاست.

۷- مراجع

- [1]- F.A.M. Rizk, "Mathematical Model for Pollution Flashover", Electra No. 78, 1979, pp. 71-103

- [14]- Y. Mizuno, H. Nakamura, K. Naito, "Dynamic Simulation of Risk of Flashover of Contaminated Ceramic Insulators", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997, pp. 1292-1298
- [15]- G. G. Karady, "Flashover Mechanism of Non-ceramic Insulators", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 6- No. 5, October 1999, pp. 718-723
- [16]- R. Sundarajan, N. R. Sadhureddy, R.S. Gorur, "Computer-aided Design of Porcelain Insulator under Polluted Conditions", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 1, 1995, pp. 121-127
- [2]- "Dynamic Model for Discharge Propagation on Discontinuous Pollution Layers Under AC Voltages and Experimental Validation", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectrics, 2002, pp. 331-334
- [3]- S. Jaafar, A.S. Ahmad, P.S. Ghosh and S.A.K. Aljunid, "A New Approach in Modeling AC Flashover Voltages for Polluted Insulator", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectrics, 2002, pp. 558-561
- [4]- R. Sundarajan, R.S. Gorur, "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under DC Voltage", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28- No. 2, April 1993, pp. 209-218
- [5]- N. Dhahabi, A. Beroual, "Dynamic Model of Discharge Propagation on Polluted Surfaces under Impulse Voltage", IEE Proc. G. T. D. , Vol. 147, No. 5, September 2000, pp. 279-284
- [6]- G. G. Karady, F. Amrah, R. Sundarajan, "Dynamic Modeling of AC Insulator Flashover Characteristics", IEE High Voltage Symposium, August 1999, No. 467, pp. 107-110
- [7]- J. P. Holthzhausen, W. L. Vosloo, "The Pollution Flashover of AC Energized Post Type Insulator", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, April 2001, pp. 191-194
- [8]- M. A. Salam, H. Ahmed, "Flashover Phenomena of Polluted Insulators Energized by AC Voltage", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectrics Phenomena, 1999, pp. 674-677
- [9]- N. Dhahi, A. Beroual, "Evaluation of Polluted Insulators Flashover Voltage for Different Waveforms Using an Equivalent Electrical Network Model", IEE High Voltage Symposium, August 1999, No. 467, pp. 377-380
- [10]- F. V. Topalis, I.F. Gonos, "Dielectric Behavior of Polluted Porcelain Insulators", IEE Proc. G. T. D. , Vol. 148, No. 4, September 2001, pp. 269-274
- [11]- N. Dhahi, A. Beroual, "Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators under AC Voltage ", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 7- No. 2, April 2000, pp. 283-287
- [12]- I. Fofana, M. Frzane, C. Tavakoli, "Dynamic Modeling of Flashover Process on Insulator under Atmospheric icing conditions", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectrics, 2001, pp. 605-608
- [13]- G. Zhicheng, Z. Renyu, "Calculation of Flashover Voltage of Polluted Insulators Under DC and AC Voltages", IEEE Conference, 1988, pp.229-232