

绝缘子直流污闪电压计算

蓝 磊, 张弓达, 文习山

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在现有污闪机理的基础上, 提出一种能反映直流污闪基本特点, 并计算绝缘子直流污闪电压的数学模型。这一模型以电弧的发展过程为主要研究对象, 关注和描述电弧发展的每一时刻的特征。通过编程计算, 用这一模型计算出各型绝缘子的直流污闪电压。和国内外研究者所作的人工污秽绝缘子直流闪络实验数据相比较, 计算数据与实验数据的相关性分析表明了模型的有效性。

关键词: 绝缘子; 直流; 污闪电压; 动态模型

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0020-04

Computation of DC Pollution Flashover Voltage of Outdoor Insulators

LAN Lei, ZHANG Gong-da, WEN Xi-shan

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A mathematical model is presented according to the mechanism of DC pollution flashover for computing DC pollution flashover voltage. This model can be used to describe transient characteristic of arcing process, and compute DC pollution flashover voltage of various insulators via programming. The analysis of correlation between computational data and the experimental one from literature indicate the validity of the model.

Key words: insulator; direct current; pollution flashover voltage; dynamic model

0 引言

绝缘子表面污秽物被湿润时, 其表面电导剧增, 在工作电压下绝缘子可能发生闪络, 影响电力系统的安全运行。为了绝缘子的配置和选型, 必须根据绝缘所面临的污秽程度对其进行放电特性的实验研究。然而, 在复杂环境中进行绝缘放电的实验研究需要花费很大人力和物力, 所能得到的实验数据也很不完善, 还需要采用一定的方法对实验数据进行分析 and 处理。现在很多致力于绝缘子污闪的研究倾向于建立一个模拟绝缘子污闪的模型, 并且计算和估测闪络电压, 方便于研究各种绝缘子在不同污秽条件下的闪络特性, 节省时间和人力物力资源。

奥本诺斯(Obenaus)于 20 世纪 50 年代首先提出污闪的物理模型^[1]。一段长度为 X 的局部电弧与由剩余污层构成的电阻 $R(X)$ 相串联。当施加电压为 U 时, 他提出的维持方程 U 为

$$U=AXI^n+IR(X) \tag{1}$$

式(1)中, X 为电弧弧长, cm; I 为流过表面的电流, A; $R(X)$ 为当弧长为 X 时的剩余污层的电阻, Ω ; A 和 n 为静态电弧特性常数。

式(1)右侧第一项 AXI^n 代表局部电弧压降; 第二项 $IR(X)$ 代表剩余污层上的压降。外施电压 U 为二者之和。

污闪的静态模型认为对某一电弧长度 X 必有一外施电压的最小值 U_{min} 。如外施电压小于 U_{min} , 则电弧不能维持; 大于 U_{min} , 则电弧可以维持并可能获得发展。当弧长小于某一临界弧长 X_c 时, 每增加弧长 ΔX , 则必须把外施电压相应增加 ΔU , 否则燃弧不能维持, 弧长仍必须退回到原处; 当弧长大于 X_c 时, 即使外施电压不增加, 电弧仍能自动延伸, 直至贯通两极。开始失去稳定时的电弧长度叫做临界长度^[2]。

动态模型更关注电弧发展过程。电弧自动发展的判据是电弧通道中的电位梯度 E_{arc} 不大于剩余污

收稿日期: 2009-09-05

作者简介: 蓝 磊(1969), 女, 博士, 副教授, 现从事过电压与绝缘方面的研究工作。

层中的电位梯度 E_p , 即 $E_{arc} \leq E_p$ 时, 电弧的延伸不需要靠提高电压来补偿^[3]。

电弧常数 A 、 n 的取值, 不同文献采用的 A 、 n 数值差别很大, 如文[2]采用空气中的电弧特性 $A=63$, $n=0.76$, 文[4]采用蒸汽中的电弧特性 $A=530$, $n=0.24$, 还有人提出别的数值。这是根据实验条件的不同采用的不同数值。

国内清华大学的学者指出, 实际上沿染污绝缘表面发展的电弧周围的介质情况既不同于纯空气, 又不同于纯蒸汽, 而周围介质的情况对电弧特性有很大的影响。因此在真实实验条件下, 实测的沿染污绝缘表面发展的电弧特性来分析计算污闪条件, 显然比用其他条件下的电弧特性合理。通过真实试验得到一系列的弧压降和电流之间的测量值, 并对实测数据作回归分析, 得沿染污绝缘表面发展的直流电弧伏安特性的回归方程, 得到一组 $A=138$, $n=0.69$ 的取值^[5]。

闪络是一个迅速发展变化的过程, 这就需要用一个动态的模型来描述。这种模型能表明电弧参数的即时变化, 比静态模型更能准确地反映真实过程^[6]。

在理解污秽闪络基本机理的基础上, 根据 R. Sundararajan 和 R.S.Gorur 提出的使用动态电弧研究方法计算闪络电压的思想, 经过必要简化后建立一数学模型。以前研究方法中的绝缘子形状系数 f 是通过动态积分计算得到, 测量取值和计算很繁杂, 不易取得, 笔者使用绝缘子整体 f 值, 可通过出厂参数取得。另外, 污闪实验中常以等值盐密来表示绝缘子污秽程度, 笔者将盐密和表面电导率联系起来, 使计算结果和实验数据方便比较。这种模型显著的特点是在每一时刻都能描述电弧发展的过程。而且使用计算机编程计算出给定绝缘子参数下的绝缘子闪络电压。最后, 比较模型计算结果与其他研究人员的实验数据结果, 来验证模型的有效性。由模型计算出的绝缘子污秽闪络电压, 与以往直流污闪实验的数据进行比较, 并分析误差, 计算相关性, 得出最终闪络电压值。

1 直流污闪模型的建立

首先提出一些简化假设: 只存在单个占主导地位的电弧, 均匀染污分布, 均匀湿润。另外, 模型没有考虑电弧和污层不断变化的热特性。电弧也假定只在绝缘子的表面运动。大部分这些假设都是有根据的。比如说, 虽然最初有多个电弧产生, 但只有一个发展成闪络。类似的, 为了实验室可重复再现的方便, 污层被假定是均匀分布。

计算闪络电压的步骤如下:

(1) 通过污层的泄漏电流 I 为

$$I = \frac{V_s - (V_c + V_a)}{R_{arc} L_{arc} + R_{po} \frac{(L - L_{arc})}{L}} \quad (2)$$

式(2)中, V_s 为外施电压, V_c 为阴极电压降, V_a 为阳极电压降, V ; R_{arc} 为单位长度电弧电阻, Ω/cm ; R_{po} 为污层电阻, Ω ; L_{arc} 为电弧长度, cm ; L 为泄漏距离, cm 。

通过给出的污层电导率和外施电压以及以下参数初值能计算出电流值。 $L_{arc} = \frac{1}{100} L$, $R_{arc} = 100 \Omega/cm$, $V_c = 700 V$, $V_a = 200 V$ ^[7]。

泄漏电流 I 是电压、气候、污秽等因素的综合反映和结果, 为动态参数。

R_{po} 通过式(3)计算出^[6]

$$R_{po} = \frac{1}{\sigma} f \quad (3)$$

式(3)中, σ 为污层表面电导率, S ; f 为形状系数, 可由式(4)计算出^[3]

$$f = \int_0^L \frac{dl}{2\pi r} \quad (4)$$

式(4)中, l 为泄漏距离变量; r 为泄漏距离 l 下的绝缘子半径, cm 。

形状系数没有量纲, 由其外形尺寸决定。当绝缘子表面均匀覆盖一层湿润污层后, 形状系数 f 值越大, 则表面污层的电阻也越大, 其耐污性能就越强, 一般认为直流绝缘子的 $f \approx 1$ 较合理^[8]。

表面污层电导率 σ 是反映绝缘子表面综合状态(污层的积污量和湿润程度)的一个参数。此表面综合状态决定了绝缘子的性能。国外有研究表明, 表面污层电导率和盐密存在一种近似的线性关系。假定污层均匀分布并且所有盐分均溶解, 能得到盐密 $ESDD$ 和表面电导率 C_s 的关系^[9]见式(5)

$$C_s \approx 1.5 \times 10^3 ESDD (mg/cm^2) \quad (5)$$

但随后又有研究者提出, 通过对各种绝缘子的试验结果分析得出, 实际测量的电导率值只有通过式(5)从盐密计算来的电导率值的 30%^[9]。

结合式(2)和式(5), 得出 R_{po} 为

$$R_{po} = \frac{f}{450 ESDD} \times 10^6 \quad (6)$$

(2) 在上一步骤计算出的电流下, 电弧平均电压梯度 E_{arc} 为^[9]

$$E_{arc} = A I^{-n} \quad (7)$$

(3) 污层平均电压梯度 E_p 为^[9]

$$E_p = A \frac{1}{n+1} R_p \frac{n}{n+1} \quad (8)$$

式(8)中, R_p 为均匀染污情况下的单位长度污层电阻, R_p 为

$$R_p = \frac{R_{po}}{L} \quad (9)$$

(4) 电弧发展判据的确定。如果污层电压梯度大于局部电弧电压梯度, 局部电弧就会向前发展, 这归结于电弧前端电离通道的作用, 并伴随着动态电流增大的现象。否则的话, 局部电弧将熄灭。因此, 局部电弧的发展判据为 $E_p > E_{arc}^{[10]}$ 。

如果 $E_{arc} \geq E_p$, 局部电弧将熄灭, 可增加外加电压进行重新计算。

(5) 重复以上各步, 并再次验证电弧发展判据。如果局部电弧长度小于泄漏距离 ($L_{arc} < L$), 并且满足电弧发展判据 ($E_p > E_{arc}$), 电弧向前发展。单位长度电弧电阻的动态变化可通过 Mayr 电弧模型^[11]进行描述, Mayr 方程变形后为

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{T} \left(1 - \frac{UI}{P} \right) \quad (10)$$

式(10)中, T 为电弧时间常数, s; U 为电弧压降, V; I 为电弧电流, A; P 为单位体积电弧耗散功率, VA。

单位体积电弧耗散功率 P 为^[12]

$$P = E_{arc} I \quad (11)$$

根据式(7)、(10)、(11), 电弧电阻的动态变化值为^[13]

$$dR_{arc} = \left(\frac{R_{arc}}{T} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{TA} \right) dt \quad (12)$$

式(12)中, T 取 $100 \mu s$ ^[13]。在已知电弧发展速率后, 能够计算出电弧发展长度。电弧发展速率 ν_{arc} 为

$$\nu_{arc} = \mu E_{arc} \quad (13)$$

式(13)中, ν_{arc} 为电弧发展速率, cm/s; μ 为电子迁移率, 取 $20 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

由式(13)可得发展后的电弧长度 L_{arc} 为

$$L_{arc}(\text{新}) = L_{arc}(\text{旧}) + \nu_{arc} dt \quad (14)$$

发展后的电弧电阻 R_{arc} 为

$$R_{arc}(\text{新}) = R_{arc}(\text{旧}) + dR_{arc} \quad (15)$$

知道了新的电弧电阻和电弧长度后, 新的电流也可计算出来。使用改变后的参量, 再次计算并验证电弧发展判据, 如果局部电弧长度约等于绝缘子泄漏距离时, 就可得出闪络电压值。

根据上述动态污闪模型描述, 可以编程计算绝缘子直流污闪电压值。计算机程序流程图图 1。

2 模型的完善和有效性分析

2.1 模型的初步计算

根据文[5], 由实测结果得出的一组 $A=138, n=0.69$ 取值。计算得到闪络电压估值。表 1 是重庆大学

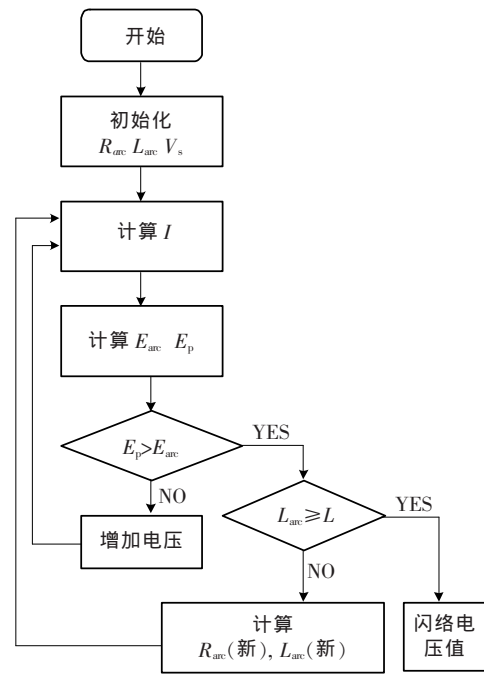


图 1 程序流程图

对 X-4.5 型绝缘子进行人工污秽直流闪络试验的数值^[8]。表 2 列出了部分 X-4.5 型绝缘子的计算估值。

表 1 X-4.5 型绝缘子直流污闪试验值

盐密/(mg·cm ⁻²)	0.03	0.05	0.10	0.20	0.40
闪络电压/kV	10.1	8.9	7.4	6.4	5.4

表 2 不同参数和盐密下的 X-4.5 型单片绝缘子闪络电压计算值

盐密/(mg·cm ⁻²)	0.03	0.05	0.10	0.20	0.40
A=138 n=0.69	12.85	10.60	8.21	6.41	5.05

分析相关性过程中使用到了 Microsoft Office Excel 软件中的 CHITEST 函数和统计学中的卡方检测方法。CHITEST 函数利用卡方检验计算得到检验相关性。CHITEST 函数的返回值越接近于 1, 就表明实际值与理论值越符合。

2.2 单片盘形悬式直流绝缘子

国内外对各种类型绝缘子在交、直流电压下的污秽实验结果表明, 交流耐污性能好的绝缘子在直流下未必也好, 绝缘子的造形对其直流耐污特性十分重要。所以, 专门用于直流线路的绝缘子即使几何尺寸和交流绝缘子相同, 也会因为具体形状结构的不同, 而呈现不同的直流污秽闪络特性。

图 2~图 4、表 3~表 5 是多个型号直流绝缘子实验值与计算值的比较分析结果。Exp 表示实验值, Model 表示计算值。其中实验值数据参见文[8]。

表3 DC-1-16型在不同盐密下的闪络电压

$S/(mg \cdot cm^{-2})$	0.03	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
Exp/kV	15.08	12.90	10.11	8.03	7.04	6.41
Model/kV	19.38	15.90	12.21	9.42	8.12	7.32
相关性	0.799 905 552					

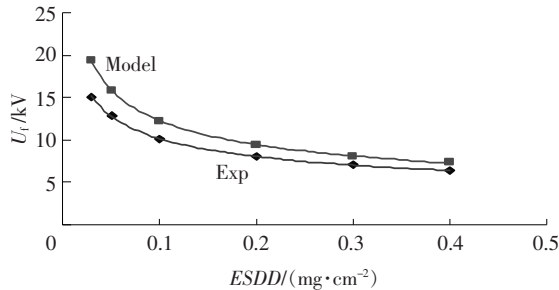


图2 DC-1-16型闪络电压实验值和计算值曲线

表4 DC-2-16型在不同盐密下的闪络电压

$S/(mg \cdot cm^{-2})$	0.03	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
Exp/kV	15.67	13.40	10.51	8.35	7.45	6.89
Model/kV	19.30	15.84	12.16	9.39	8.09	7.30
相关性	0.916 354 027					

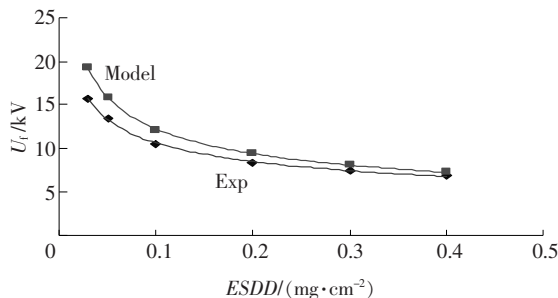


图3 DC-2-16型闪络电压实验值和计算值曲线

表5 DC-3-16型在不同盐密下的闪络电压

$S/(mg \cdot cm^{-2})$	0.03	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
Exp/kV	15.83	13.10	10.55	8.35	7.35	6.74
Model/kV	19.08	15.66	12.02	9.28	8.00	7.22
相关性	0.931 837 421					

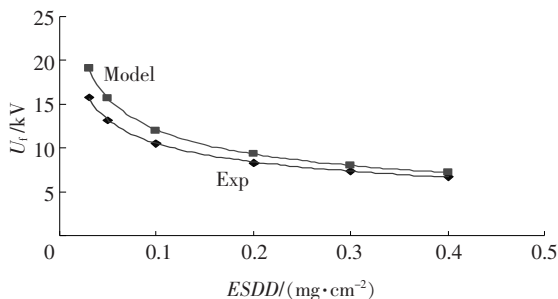


图4 DC-3-16型闪络电压实验值和计算值曲线

2.3 绝缘子串

直流污秽绝缘强度随串长的增加是否保持线性关系也是直流污闪研究中十分关心的问题。一般认为绝缘子串的污闪电压与串长之间呈线性关系,线性关系可确认到特高压范围。根据单片绝缘子的耐

受电压或闪络电压可以按比例地算出所需绝缘子串的片数,但也有的实验结果表明,绝缘子串的直流污闪电压每片平均值约低于单片污闪电压。

表6、表7和图5、图6是直流DC-2-160型3片串实验值^[8],XZP-210型16片串实验值^[14]与计算值的比较分析结果。Exp表示实验值,Model表示计算值。

表6 DC-2-160型3片串在不同盐密下的闪络电压

$S/(mg \cdot cm^{-2})$	0.05	0.10	0.20	0.30
Exp/kV	47.60	36.30	26.90	23.30
Model/kV	47.52	36.48	28.17	24.27
相关性	0.992 189 448			

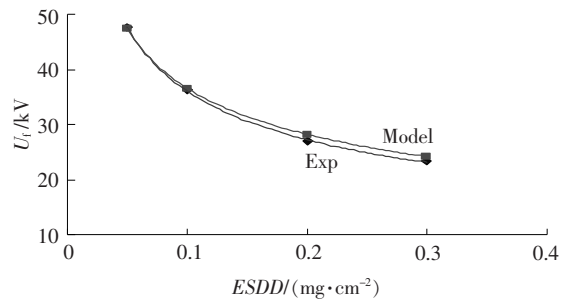


图5 DC-2-160型3片串闪络电压实验值和计算值曲线

表7 XZP-210型16片串在不同盐密下闪络电压

$S/(mg \cdot cm^{-2})$	0.03	0.05	0.10	0.20
Exp/kV	279.0	238.0	197.0	147.0
Model/kV	319.7	260.0	199.5	153.9
相关性	0.864 205 542			

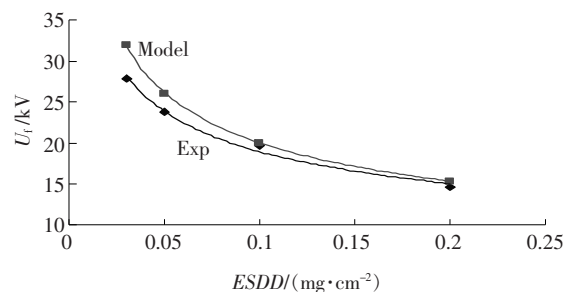


图6 XZP-210型16片串闪络电压实验值和计算值曲线

3 结论

在已有研究成果的基础上,提出了计算绝缘子直流污闪电压的动态模型。通过计算已知几何参数绝缘子的直流污秽闪络电压,研究了瓷绝缘子在多种污秽度情况下的直流闪络特性、电弧发展及闪络过程,并对绝缘子的污闪实验值进行了比较分析,得到以下结论:

(1)模型计算中需要使用的绝缘子外形参数容易取得,方便进行实际应用;等值盐密作为输入参数

(下转第27页)

大者淘汰。

(2) 并联电阻的选择: 根据经验, 取硅整流管反向内阻的 1%~10%^[1], 测硅整流管的反向内阻时应考虑到硅堆工作时的温升效应。另外, 对所选电阻应该进行老化测试。

(3) 并联电容的选择: 按照并联电容在工频下的容抗为硅整流管反向阻抗 1% 的原则^[1]选取并联电容, 由仿真及实验结果可知, 电容值越大, 均压效果越好, 因此在反向漏电流满足要求的原则下, 可适当选取较大电容值的电容。

6 结语

通过对 900 个硅整流管即 60 个子模块串联的仿真及耐压实验可知, 无任何均压措施时, 硅堆的电压利用率仅为 30%, 按照等值均压参数配置的方法进行强制均压后, 硅堆的电压利用率为 46.2%, 采用非等值均压参数配置方法对端部进行特别的均压处理后, 电压利用率为 59%。非等值均压参数配置的方法提高了硅堆的反向耐压值, 节约了硅整流管, 提高

了硅堆运行的稳定性, 并降低了硅堆的成本。笔者讨论的是硅堆的静态电压分布, 但这种模型和分析方法也适用于动态电压分布的分析, 必要时, 也可用于对动态电压分布的分析和均压设计。

参考文献:

- [1] 天津师范学院物理系. 高压硅堆技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977.
- [2] 傅宾兰, 李志麒. 1 000 kV 大容量高压直流发生器的设计特点[J]. 电网技术, 1985(4): 30-34.
- [3] 胡凤昌. 高压硅堆中电压分布规律的研究[J]. 高压电器, 1985, 21(2): 29-38.
- [4] 胡凤昌. 硅堆在交流高电位上工作时的电压利用率研究[J]. 高压电器, 1979, 15(6): 11-18.
- [5] PETER O. LAURITZEN. A Simple Diode Model with Reverse Recovery[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(2): 188-191.
- [6] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 66, 67.
- [7] 王泽忠, 全玉生, 卢斌先. 工程电磁场[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 190-195.

(上接第 23 页)

表示绝缘子污秽程度, 有利于输出结果和实验数据的比较。

(2) 动态直流污闪模型不仅适用于单片绝缘子, 也较适合棒形支柱绝缘子和绝缘子串等长泄漏距离绝缘体。

(3) 根据模型计算结果表明, 绝缘子直流污闪电压与实验值吻合较好。

参考文献

- [1] OBENAUS F. Fremdschichtüberschlag and Kriechweglänge[J]. Deutsche Elektrotechnik, 1958(4): 135-136.
- [2] ALSTON L L, ZOLEDZIOWSKI S. Growth of Discharges on Polluted Insulation[J]. Proc. IEE, 1963(110): 1 260-1 266.
- [3] 张仁豫. 绝缘污秽放电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [4] RAHAL A M, HURAUX C. Flashover Mechanism of High Voltage Insulators [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979(11): 2 223-2 231.
- [5] 关志成, 张仁豫. 染污绝缘子在直流电压下的污闪条件分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1986, 26(2): 59-68.
- [6] SUNDARARAJAN R, GORUR R S. Dynamic Arc Modeling of

Pollution Flashover of Insulators under DC Voltage[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(2): 209-218.

- [7] CHENG T C. Mechanisms of Flashover of Contaminated Insulators[D]. MIT: Department of Electrical Engineering, 1974.
- [8] 顾乐观, 孙才新. 电力系统的污秽绝缘[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1990.
- [9] RISK F A M. Mathematical Models for Pollution Flashover[J]. Electra, 1981, 78: 71-103.
- [10] Al-BAGHDADI A. The Mechanism of Flashover of Polluted Insulation [D]. Manchester: The Victoria University of Manchester, 1970.
- [11] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66.
- [12] 金向朝, 占亮, 邱毓昌. 污秽绝缘子闪络的动态模型探讨[J]. 电瓷避雷器, 2003(6): 6-8.
- [13] RISK F A M, NGUYEN D H. Digital Simulation of Source-Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests[J]. IEEE Trans. PWRD, 1988(3): 405-410.
- [14] 罗利云, 蒋兴良. 不同型式绝缘子长串的直流污闪特性比较[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(7): 42-45.