

文章编号: 1001-1609(2007)05-0343-03

绝缘子污闪电压蒙特卡罗法预测的基础研究

杨 圣, 刘维来, 李晓峰

(中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027)

Fundamental Research on Insulator Flashover Voltage Based on the Montecarlo Prediction

YANG Sheng, LIU Wei-lai, LI Xiao-feng

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

摘要: 提出了一种基于蒙特卡罗方法的绝缘子污闪电压预测新方法, 其实质是将现有污闪电压预测经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 的系数 K 和指数 P 作为随机变量看待, 预测的结果是污闪电压 U 的随机分布范围。实验结果证明, 蒙特卡罗法预测的污闪电压分布范围符合污闪电压的本质规律, 在电网污闪事故预防的实际工作中有很好的应用前景。

关键词: 污闪; 蒙特卡罗方法; ESDD; 绝缘子

中图分类号: TM855

文献标志码: A

Abstract: This paper proposed a new way for flashover voltage prediction based on the Montecarlo method. The main idea was to treat the coefficient K and P power in the empirical formula $U=KS_e^{-P}$ as the random variables. The predicted results were the random distribution ranges of the flashover voltage U . Our experiment results prove that the flashover voltage distribution ranges predicted by the Montecarlo method are consistent with the essential rules of the flashover voltage, which will have a prospective application in the practice of preventing flashover accident.

Key words: flashover; Montecarlo method; ESDD; insulator

0 引言

污秽闪络简称污闪, 是指正常工作电压下的绝缘子表面, 由于污秽物堆积, 在阴雨、大雾等恶劣天气的作用下所引发的闪络。污闪有 3 要素: 绝缘子表面积污、污层湿润和作用电压^[1]。近年来, 国内外的不少试验数据均证明气压对绝缘子污闪电压有不容忽视的影响, 并给出了经验公式 $U=U_0(\frac{P}{P_0})^n$, 式中 U_0 是在标准大气压 P_0 下的污闪电压, U 是在低气压 P 下的污闪电压, n 是由于低气压引起的污闪电压降低指数^[2]。污闪的预测、预防是国内外学者研究的热点问题, 同时又是一个尚未很好解决的老大难问题。时至今日, 污闪仍是电网安全运行的重大隐患之

一, 污闪事故也时有发生。

目前, 我国用等值附盐密度表示绝缘子污染的程度。所谓等值附盐密度, 有时也简称为等值盐密或盐密, 是用一定量的蒸馏水清洗绝缘子表面的污秽, 然后测量该清洗液的电导, 并以在相同水量中产生相同电导的氯化钠数量的多少作为该绝缘子的等值盐量 W , 最后除以被清洗的表面面积 A 即为等值附盐密度 S_e , 其表达式可写作 $S_e=W/A$ 。实验表明, 污闪(或耐受)电压 U 与等值附盐密度 S_e 具有幂函数的经验关系: $U=KS_e^{-P}$, 式中系数 K 和指数 P 随绝缘子的形式而异, 其具体数值由实验数据通过回归分析得到, 且 $P \in (0, 1)$, 通常在 0.3 上下波动^[3]。文[3]推导的污闪电压与等值附盐密度之间的理论关系式, 有助于了解各种因素对污闪电压的影响。

污闪预测、预防的实践经验表明, 由经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 计算得到的污闪电压与实际情况的吻合程度无规律可循。国外有很多学者尝试引入绝缘子形状参数和污染分布参数来减小污闪电压预测的误差, 因为污闪电压不只是取决于表面积污的等值附盐密度的数值大小, 还与其具体的分布情况有关^[4]。实际绝缘子的表面积污是随机性质的, 这一事实决定了污闪电压不可能是一个确定性的量。另外, 污闪电压还受空气击穿场强的制约, 而空气击穿场强又受温度、湿度和气压等多种不定因素的影响。经过深入细致的分析, 笔者认为有时经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 预测污闪, 用误差较大的根本原因是系数 K 和指数 P 都不是确定性的量, 而是随机变量。由实验数据通过回归分析得到的系数和指数只是对应随机变量的均值, 仅是其随机分布的一个统计参数, 是片面的信息, 导致污闪电压预测值的不稳定与不可靠是顺理成章的事。因此, 要使污闪电压的预测值更加符合实际, 就必须考虑系数 K 和指数 P 的随机性质, 并进

收稿日期: 2007-03-26; 修回日期: 2006-04-29

作者简介: 杨 圣(1962-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为仪器科学与技术。

一步摸清污闪电压 U 的随机分布情况。笔者的研究工作就是要将现有的基于经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 来确定预测问题重新回归其随机预测的本质, 采用蒙特卡罗 (Montecarlo) 方法来预测绝缘子的污闪电压分布。用污闪电压的实测数据验证蒙特卡罗预测方法的准确性与可靠性, 发现其中的新现象、新规律。

1 方法

Montecarlo 方法以随机模拟和统计试验为手段, 是一种从随机变量的概率分布中, 通过随机选择数字的方法产生一种符合该随机变量概率分布特性的随机数值序列, 作为输入变量序列进行特定的模拟试验、求解的方法^[5]。在应用 Montecarlo 法时, 要求产生的随机数序列应符合该随机变量特定的概率分布, 而产生各种特定的、不均匀的概率分布的随机序列, 可行的方法是先产生一种均匀分布的随机序列, 然后再设法转换成特定要求的概率分布的随机数序列, 以此作为数字模拟试验的输入变量序列进行模拟求解。基本步骤为: 建立概率模型, 即对所研究的问题构造一个符合其特点的概率模型 (随机事件, 随机变量等)。对确定性问题, 须把具体问题变为概率问题, 建立概率模型; 产生随机数据序列, 作为系统的抽样输入进行大量的数字模拟试验, 得到大量的模拟试验值; 对模拟试验结果进行统计处理 (计算频率、均值等特征值), 给出所求问题的解和解的精度估计。

对随机变量按正态分布模拟, 需要产生一组服从于正态分布的独立的随机变量 x , 即 $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。为此, 可以在计算机上使用随机函数 $RND(x)$ 产生一组均匀分布在 $(0, 1)$ 上的随机数, 再通过下列变换^[5]

$$R = \sqrt{-2 \ln r_1} \cos(2\pi r_2) \tag{1}$$

或

$$R = \sqrt{-2 \ln r_1} \sin(2\pi r_2) \tag{2}$$

得到一组相互独立的服从标准正态分布的随机变量 R , 即 $R \sim N(0, 1)$ 。其中 r_1 和 r_2 是两个独立的、均匀分布在 $(0, 1)$ 上的随机数。任意均值为 μ 方差为 σ^2 的正态分布随机变量 x 可通过下列变换得到^[5]

$$x = \mu + R \sigma \tag{3}$$

即 $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

为了将 Montecarlo 法用于绝缘子污闪电压的预测, 从经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 出发, 用经验统计数据构造两个随机变量 $K \sim N(\mu_k, \sigma_k^2)$ 和 $P \sim N(\mu_p, \sigma_p^2)$, 并用计算机仿真的方式求解出污闪电压 U 的随机分布范围。

等值附盐密度的测定采用文[6]介绍的方法。用 100 mL 蒸馏水清洗绝缘子表面的积污, 然后测量水溶液的电阻率, 见图 1。溶液测试管中装满待测试的水溶液, 在其两端加上 120 V 的直流电压, 记下电流

表指示的数值, 并计算出电阻率^[6]

$$\rho = \frac{RA_t}{L} = \frac{UA_t}{IL} \tag{4}$$

式中 ρ 为水溶液电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; I 为流过水溶液的电流, A ; U 为加在测试管两端的电压, V ; L 为测试管的长度, cm ; A_t 为测试管的横截面积, cm^2 。

等值附盐密度与水溶液电阻率之间的关系式为^[6]

$$S_e = 65650 \times \frac{1}{A}^{-1.0143} \tag{5}$$

式中 S_e 为等值附盐密度, mg/cm^2 ; A 为绝缘子被清洗的表面积, cm^2 。

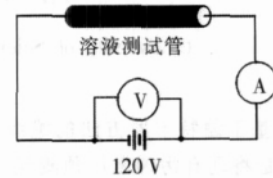


图1 水溶液电阻率测量

在实际工作中, 绝缘子污闪电压的 Montecarlo 法预测可按以下步骤进行: 事先用实验的方法对电网内不同形式绝缘子在不同等值附盐密度下的污闪电压进行测试, 利用 $U=KS_e^{-P}$ 分别计算出系数和指数的均值、方差 (μ_k, σ_k^2) 、 (μ_p, σ_p^2) 并存在数据文件中供计算机程序调用; 用 Montecarlo 法计算出污闪会发生、不会发生以及可能发生也可能不发生的 3 个区域; 用笔者所介绍的方法得到待预测绝缘子的等值附盐密度; 按照等值附盐密度值, 确定其位于污闪会发生、不会发生以及可能发生也可能不发生 3 个区域中的对应位置。从电网安全、可靠运行的角度看, 只有位于污闪不会发生区域才不需要采取措施, 位于另外两个区域均需要清洗绝缘子。

2 结果

污闪试验系统的构成见图 2。高压电源输出 30 kV 可调直流电压, 通过限流电阻 R_3 加到 XP-7 绝缘子的两端。 R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 构成的分压器将高压降低后作为 TDS220 数字存储示波器的输入信号。TDS220 能够实时监测高压的大小和污闪发生时信号波形的变化。

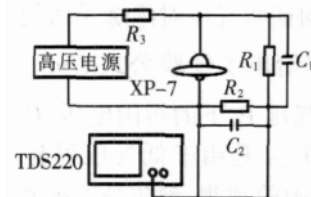


图2 污闪试验原理图

通过对 XP-7 绝缘子污闪电压 Montecarlo 法预测曲线、经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 预测曲线和实测曲线的对比研究, 得到了以下一些有价值的结果。

图 3 为经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 和 Montecarlo 法两种

方法对 XP-7 绝缘子污闪电压的预测曲线。图中 U 为由经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 得到的曲线，其对实践的指导作用是：若加在绝缘子两端的电压大于 U ，则绝缘子会发生污闪；若加在绝缘子两端的电压小于 U ，则绝缘子不会发生污闪。图中的另外两条曲线 U^+ 和 U^- 是由 Montecarlo 法得到的曲线， U^+ 为分布范围上限， U^- 为分布范围下限，其对实践的指导作用是：若加在绝缘子两端的电压大于 U^+ ，则绝缘子会发生污闪；若加在绝缘子两端的电压小于 U^- ，则绝缘子不会发生污闪；若加在绝缘子两端的电压介于 U^- 和 U^+ 之间，则绝缘子可能发生污闪，也可能不发生污闪。

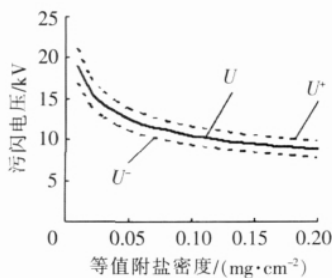


图3 XP-7 绝缘子污闪电压预测结果对比

图4给出了XP-7绝缘子污闪试验中发现的异常结果。按等值附盐密度排列是 $① < ② < ③$ ；按实测污闪电压排列也是 $① < ② < ③$ ，与经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 预测的结果完全相反。如果用 Montecarlo 法预测，则可以得到满意的解释。因为 $①$ 、 $②$ 和 $③$ 处在 U^- 和 U^+ 之间，都属于可能发生污闪，也可能不发生污闪的不确定状态。

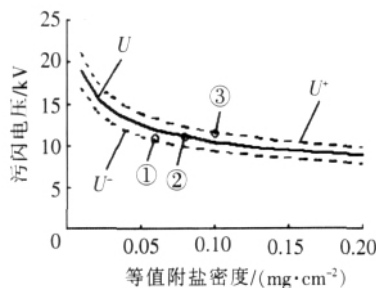


图4 XP-7 绝缘子污闪电压的异常结果

图5中， U 为由经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 得到的曲线； U_1^+ 为由 Montecarlo 法得到的分布范围上限， U_1^- 为蒙特卡罗法得到的分布范围下限； U_2^+ 为实测污闪电压

上限， U_2^- 为实测污闪电压下限。比较图中各曲线就会发现，当绝缘子表面轻度污染或重度污染时，污闪电压的实测数值与经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 的预测值能很好符合；当绝缘子表面中度污染时，污闪电压的实测分布与 Montecarlo 法预测分布接近。

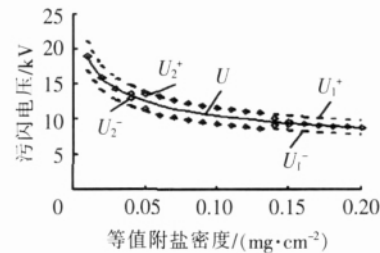


图5 XP-7 绝缘子污闪电压预测分布与实测分布

3 结语

笔者的研究表明，用 Montecarlo 法预测绝缘子污闪电压的分布范围是可行的，它将预测结果分为污闪会发生、污闪不会发生和污闪可能发生也可能不发生3种，比由经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 得到的会发生和不会发生两种结果更符合污闪电压的本质规律。总体的结论是：当绝缘子表面轻度污染或重度污染时，经验公式 $U=KS_e^{-P}$ 就能够得到较好的预测结果；当绝缘子表面中度污染时，也是对污闪事故预防最有价值的情况，Montecarlo 法预测要更胜一筹。

参考文献：

- [1] 姬铁兰, 周祁连, 王彩枝. 交流绝缘子表面积污分析及防污闪措施[J]. 有色设备, 2004(4): 38, 39.
- [2] 关志成, 张仁豫, 黄超峰. 低气压条件下绝缘子污闪特性的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1995, 35(1): 17-24.
- [3] 刘煜, 李清, 刘基勋. 污闪电压与等值盐密理论关系式的推导与应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 10, 11, 30.
- [4] JAAFAR S, AHMAD A S, GHOSH P S, et al. A new Approach in Modeling AC Flashover Voltage for Polluted Insulator [C]// Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), Annual Report, 2002: 558-561.
- [5] 黎锁平. 运用蒙特卡罗方法求解随机性问题 [J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(2): 95-97.
- [6] ABDUS SALAM, ZIA NADIR, MUHAMMAD AKBAR, et al. Study the Effects of Different Types of Contaminants on the Insulator Resistance [C]// Second International Conference on Electrical and Computer Engineering(ICECE), 2002: 240-242.

(上接第342页)

5 结语

利用自行研制的巨磁电阻传感器试验平台对三种巨磁电阻传感器的静、动态性能进行了测试与分析，各种分析与测试结果表明将巨磁电阻传感器应用于电力系统中交/直流大电流的测量是有可能的。

参考文献：

- [1] International Electro-technical Commission. IEC 60044-8

Electronic Current Transformers [S]. 2002.

- [2] BAIBICH M N, BROTO J M, FERT A, et al. Giant Magneto-resistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Super-lattices[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(21): 2472-2475.
- [3] 肖又专, 曾荣伟, 王林忠, 等. 巨磁电阻传感器的应用[J]. 磁性材料及器件, 2001, 32(2): 40-44.
- [4] 周勋, 梁冰清, 唐云俊, 等. 磁电阻效应的研究进展[J]. 物理实验, 2000, 20(9): 13-16.
- [5] 李董杰. 有源电子式电流互感器供电电路及校验仪的设计与实现 [D]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.