

概率统计在绝缘子污闪风险性评估中的应用

牛春节, 程养春

(华北电力大学电气工程学院, 北京 102206)

摘要: 笔者分析了灰密的概率密度分布,并推导出盐密与灰密的联合概率密度函数。在不考虑灰密和考虑灰密两种情况下,利用概率统计方法,推导出在恒定电压下,绝缘子的污闪概率计算方法,为评估线路可靠性、调度部门决策、绝缘子的维护以及新线路绝缘子的选型提供依据。

关键词: 概率统计; 概率密度; 污闪风险性; 灰密; 盐密

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0104-03

Application of Statistical Method in Evaluating Pollution Flashover Risk of Insulators

NIU Chun-jie, CHENG Yang-chun

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper analyzes the probability density distribution of the non-soluble deposit density, and hence deduces a combined probability density distribution function. An expression of pollution flashover probability under constant voltage is also deduced by means of statistical method with or without considering salt NSDD. This study can be applied to power line reliability evaluation, insulators maintenance, and insulators selection for new lines.

Key words: probability statistics; probability density; pollution flashover risk non-soluble deposit density(NSDD); ESDD

0 引言

提高电力系统可靠性的关键之一在于对输电线路合理调度,即根据线路实际运行状态,使其在故障最小的情况下输送尽可能多的能量。然而由于当前线路在线监测、故障诊断技术还不成熟,在这种情况下以可靠性划分线路运行状态,进行输电线路可靠性评估,并以此作为线路使用的依据,成为最有效的途径^[1,2]。随着工业化的发展,环境日益恶化。多年来,我国污闪事故不断,多次造成大面积电网停电。污闪事故已占到了整个电力系统事故的第2位,仅次于雷击故障,成为影响输电线路安全可靠运行的重要原因。因此要评估输电线路的可靠性,先要评估线路发生污闪的风险性。

污闪风险性评估为污秽环境下绝缘子选型提供依据^[3-5],也为线路合理使用以及维修策略安排提供依据。笔者以实际数据以及数据分布规律为依据,利用概率统计实现绝缘子污闪风险性评估。

1 方法介绍

绝缘子的污闪由两个因素决定,一是大气污染造成的绝缘子表面积污;二是能使积聚污秽物质充

分受潮的气象条件^[6]。笔者着眼于当一次气候条件(大雾或毛毛雨)满足时,分析计算已积污绝缘子在给定运行电压下发生污闪的概率。

绝缘子表面积污情况受运行时间、污秽环境、自然界雨水冲刷等众多因素的影响。研究表明,长期来看绝缘子污秽程度通常不存在积累效应^[7],而是一个随机概率值。绝缘子表面污秽程度用其概率密度函数 $f(\rho)$ 来表示。设绝缘子在某污秽程度下发生闪络的概率为 P_1 ,则运行绝缘子发生污闪的可能性 R_1 为污秽程度与在此污秽程度下闪络概率的乘积,既

$$R_1(\rho) = \int f(\rho)P_1(\rho)d\rho \quad (1)$$

下面将针对以下两种情况分别进行讨论:某地区污秽程度以盐密表示;某地区污秽程度以盐、灰密两参量表示。

2 以盐密表示某地区污秽程度污闪概率计算

2.1 仅考虑盐密时绝缘子积污规律分析

污秽在环境干燥条件下积累,当大雾或降雨时,污秽可能被冲刷,所以绝缘子污秽通常在大雾或降雨前最严重。然而实际中工作人员是定期检测绝缘子盐密,这样的检测值势必引起低估绝缘子污秽程度^[3]。鉴于此 Sforzini 等人经过长期观察意大利 20

收稿日期:2008-03-10; 修回日期:2008-09-23

作者简介:牛春节(1982-)女,满族人,河北张家口人,主要从事电力设备可靠性方面的研究。

个地区污秽情况,用绝缘子盐密极限值来近似其最大值,得到盐密最大值服从对数正态分布统计分布规律^[4],日本学者在横须贺经过长期实际观测绝缘子盐密得到相同分布规律,见图1。

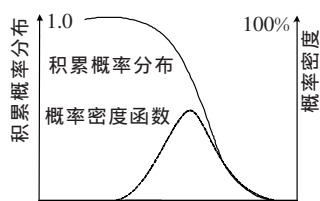


图1 典型的盐密分布函数

2.2 污闪概率与污秽程度之间的对应关系

在某一盐密下绝缘子闪络概率可以用 U_{50} 和标准偏差描述,见式(2)^[8]。

$$P_1(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-U_{50}}{\sigma}\right)^2\right] du \quad (2)$$

但大量试验数据表明,存在某一电压 U_0 , 低于这一电压时绝缘子放电的概率为零。这一特性可以用3参数的威布尔分布表示为^[9]

$$P_1(u) = 1 - e^{-\left[\frac{1}{\beta}\left(\frac{u}{U_0}-1\right)\right]^k} \quad (3)$$

式(3)中, β, U_0, k 为威布尔分布的3个参数,参数具体情况将在下文介绍。

大量试验及研究都表明污闪电压与盐密之间存在以下的对应关系^[10]

$$U_f = A\rho^{-\alpha} \quad (4)$$

式(4)中, U_f 为污闪电压, kV; A 为与绝缘子形状和污秽程度有关的系数; ρ 为等值附盐密度; α 为表征对污闪电压影响的特征指数。在上式中 50% 闪络电压 U_{50} 较为常用。

由(3)、(4)得到在某一电压 U_c 下, $P_1(u)$ 与盐密 ρ 之间的关系为^[3]

$$P_1(\rho) = 1 - e^{-\left[\frac{1}{\beta}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n - 1\right]\right]^k} \quad (5)$$

式(5)中, ρ_0 称为切断盐密, ρ_0 与 ρ_{50} 之间满足如下对应关系

$$\rho_0 = \rho_{50}(1 - nc)^{1/\alpha} \quad (6)$$

式(6)中, ρ_{50} 是指在某运行电压下绝缘子 50% 闪络概率对应的污秽程度。

$$\rho_{50} = \sqrt[\alpha]{\frac{A}{U_c}} \quad (7)$$

式(5)和式(6)中其余参数由以下各式获得^[3, 11]

$$U_0 = U_{50} - n\sigma; \quad k = \frac{1.38}{\ln[n/(n-1)]};$$

$$\beta = \frac{nc}{(1-nc)(\ln 2)^{1/k}}; \quad c = \sigma/U_{50}.$$

对于 n 的取值 IEC 推荐值为 $n=4$, 然而 Ivanov、V.V 等人通过比较 2 800 个人工污秽实验给出统计结果的 n 值为 2.5, 由于受到污秽不均匀分布的影

响, c 在计算 ρ_0 时取 0.08, 计算 β 时取 0.2^[3]。

2.3 污闪概率计算

通过以上分析,假设某地区一段时间内有 N 次不良气候(大雾或毛毛雨等),则该地区绝缘子在这段时间内发生污闪的概率为: $R_1 = N \int_0^{\infty} f(\rho) P_1(\rho) d\rho$, 污闪概率计算示意图见图2。在实际情况中往往是绝缘子并列运行,这样的运行方式增加了绝缘子污闪风险性。并列运行绝缘子污闪概率 P_n 与单串绝缘子污闪概率之间满足如下的关系。

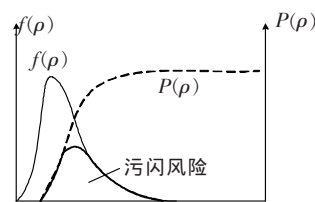


图2 考虑污秽的风险性评估

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^n = 1 - e^{-n\left[\frac{1}{\beta}\left[\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n - 1\right]\right]^k} \quad (8)$$

$$R = N \int_0^{\infty} f(\rho) P_n(\rho) d\rho \quad (9)$$

3 以盐密、灰密两参量表示某地区污秽程度的污闪概率计算

在影响绝缘子人工污秽闪络电压的诸多因素中,盐密作用最大,因此早期多未注意到不溶物及其附着密度(简称灰密,用 ρ_n 表示,区别于盐密 ρ_e)的影响,而将灰密取为一固定值。但许多研究表明, ρ_n 对污闪电压有一定的影响^[12]。因此,在计算污闪概率时仅考虑盐密是不够的,还应当考虑灰密的影响。

3.1 考虑灰密时绝缘子积污规律分析

盐密的积污规律如 2.1 所述,下面着重考虑灰密的积污规律。

中国电科院在总结大量试验数据后初步得出以下的结论^[13]:

(1)无论是同一串绝缘子各片间,还是同一地点或环境条件相似的地区,甚至不同的地域之间,所测得的绝缘子表面灰密对等值盐密之比都呈正态分布,通常测试数据足够多时(才具有统计意义),该比值分散性不大。

(2)不同种类的污染源使灰密对等值盐密的比值在 2~10 范围内变化;已有大量统计数据表明,除紧邻海岸、化工厂外的广大内陆地区,其年度灰密与等值盐密的比值可取其平均值 4.5。

根据上述统计规律,可以近似认为灰密的概率密度分布与盐密概率密度分布类似,即为对数正态分布规律。

由于同一污染源下引起灰盐比不同的主要原因

为降雨量^[14],污染源不同时,灰盐比由污染源和降雨量共同决定,即盐密变化与灰密变化互不影响。所以可以认为灰密与盐密为两个独立变量,二者联合概率密度函数可以表示为

$$f(\rho_n, \rho_e) = f(\rho_e)f(\rho_n) \tag{10}$$

3.2 考虑灰密时污闪概率与污秽程度之间的对应关系

在盐密与灰密共同作用下,污闪电压的表达式满足^[13, 15]

$$U_f = k_f \rho_e^{-i} \rho_n^{-j} \tag{11}$$

式(11)中, k_f 为与绝缘子型式有关的系数; i 为表征 ρ_e 对污闪电压影响的特征指数; j 为表征 ρ_n 对污闪电压影响的特征指数; i 和 j 均为试验数据。由式(3)、(11)得到当电压一定时绝缘子污闪概率在盐密与灰密共同影响下的表达式

$$P_1(\rho_n, \rho_e) = 1 - e^{-\left\{ \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{\rho_e}{\rho_{e0}} \right)^i \left(\frac{\rho_n}{\rho_{n0}} \right)^j - 1 \right] \right\}^k} \tag{12}$$

式(5)中, ρ_0 是指切断盐密,即绝缘子在恒定电压下运行,盐密小于某一数值时,污闪的概率为零^[16]。考虑灰密时,则存在某一污秽程度使绝缘子在某恒定电压下运行时发生污闪的概率为零。但这一污秽程度主要由 ρ_{e0} 决定,所以此时取 ρ_{e0} 为 $\rho_{e0} = \rho_0$ 。

由于灰密具有与盐密相同的分布规律,且灰密对绝缘子污闪电压影响也服从负指数幂的形式^[14],所以当 ρ_{e0} 确定后 ρ_{n0} 满足如下关系

$$\rho_{n0} = \rho_{n50} (1 - nc)^{1/j} \tag{13}$$

$$\rho_{n50} = \sqrt[j]{\frac{kf}{U_c \rho_{e0}^i}} \tag{14}$$

式(13)、(14)中, ρ_{n50} 是指当盐密值为 ρ_{e0} 且运行电压为 U_c 时,绝缘子50%闪络概率所对应的灰密程度, kf, i, j 由实验获得, n, c 均与2.2节中相同。

3.3 污闪概率计算

类似于不考虑灰密的情况,假设某地区一段时间内有 N 次不良气候(大雾或毛毛雨等),则该地区绝缘子在这段时间内发生污闪的概率为

$$R_1 = N \int_0^\infty \int_0^\infty f(\rho_e, \rho_n) P_1(\rho_e, \rho_n) d\rho_e d\rho_n$$

其中积分函数由式(10)和式(12)获得。

$$\text{同理 } P_n = 1 - (1 - P_1)^n = 1 - e^{-n \left\{ \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{\rho_e}{\rho_{e0}} \right)^i \left(\frac{\rho_n}{\rho_{n0}} \right)^j - 1 \right] \right\}^k}$$

$$\text{则 } R_n = N \int_0^\infty \int_0^\infty f(\rho_e, \rho_n) P_n(\rho_e, \rho_n) d\rho_e d\rho_n$$

原则上盐密和灰密值可以是大于零的任何整数,但实际上由于地区所处污秽等级不同,导致积分上、下限因地制宜。

4 结论

(1) 概率统计方法可以计算出某一地区、某段时间内绝缘子发生污闪的概率,为评估线路可靠性、调

度部门决策、绝缘子的维护以及新线路的选型提供依据。

(2) 在大量实测数据的基础上,近似认为灰密的概率密度分布为对数正态分布,利用二重积分实现考虑灰密对污闪电压影响的污闪概率计算,更接近实际运行情况。

参考文献:

- [1] 章剑光. 变电设备状态检修应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [2] 柳刚. 电力设备故障诊断及状态检修研究 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [3] ENGELBRECHT C S, HARTINGS R, LUNDQUIST J. Statistical Dimensioning of Insulators with Respect to Pollution Conditions [J]. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 2004, 151(3): 321-326.
- [4] BARRETT J S, GREEN M A. A Statistical Method for Evaluating Electrical Failures [J]. IEEE Trans. Power Del., 1994, 9(3): 1524-1530.
- [5] SFORZINI M, CORTINA R, MARRONE G. A Statistical Approach for Insulator Design in Polluted Areas [J]. IEEE Trans. Power Appar Syst., 1983(102): 3157-3166.
- [6] 关志成, 王绍武, 梁曦东, 等. 我国电力系统绝缘子污闪事故及其对策[J]. 高电压技术, 2002, 26(6): 37-39.
- [7] 王彪, 陈焕金, 陈伟. 复合绝缘子的积污规律初探[J]. 河北电力技术, 2003(5): 30-32.
- [8] NAITO K, MIZUNO Y, NAGANAWA W. A Study on Probabilistic Assessment of Contamination Flashover of High-voltage Insulator [J]. IEEE Trans. Power Deliv., 1995, 10(3): 1378-1384.
- [9] RIZK F A M. A Systematic Approach to High-voltage Insulator Selection for Polluted Environment [C]// Presented at CIGRE 2nd Regional Conf. in Arab Countries, Amman, Jordan, 1997: 12-14.
- [10] HOULGATE R G, LAMBETH P J, ROBERTS W J. The Performance of Insulators at Extra and Ultra High Voltage in a Coastal Environment [C]// 29th General Session of CIGRE, Paris, 1982: 133-138.
- [11] IEC 60071 -2. Insulation Co-ordination-Part 2: Application Guide[S]. 1996.
- [12] MATSUOKA R, KONDO K, NAITO K, et al. Influence of Nonsoluble Contaminants on the Flashover Voltage of Artificially Contaminated Insulators [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(1): 420-430.
- [13] 苑吉河, 蒋兴良, 舒立春, 等. 盐/灰密对不同型式绝缘子交流人工污秽闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 96-100.
- [14] 周军. 1000 kV 级交流输电变电工程绝缘子选型研究 [R]. 中国电力科学研究院技术报告, 2006.
- [15] 蒋兴良, 舒立春, 张永记, 等. 人工污秽下盐/灰密对普通悬式绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 24-28.
- [16] ENGELBRECHT C, GUTMAN I, HARTINGS R. A Practical Implementation of Statistical Principles to Dimension AC Line Insulators with Respect to Contaminated Conditions [J]. IEEE Trans. Power Del., 2007, 22(1): 667-673.