

计算输电线路绕击跳闸率的新模型

贾磊, 张桂红, 舒亮, 温定筠, 施围
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了能够更精确地计算输电线路的绕击跳闸率, 将电磁暂态程序 EMTP 与蒙特卡罗法相结合, 提出了一种新的计算输电线路绕击跳闸率的模型. 该模型既能充分计及影响输电线路绕击跳闸的各种随机因素, 又具有电磁暂态程序对过电压计算准确的优点, 从而提高了计算绕击跳闸率的准确性. 仿真计算结果表明, 利用该模型所得到的绕击跳闸率与实际值的相对误差在 10% 以内. 因此, 该模型较规程法能更好地反映输电线路绕击跳闸的实际情况.

关键词: 绕击跳闸率; 蒙特卡罗法; 规程法; 电磁暂态程序

中图分类号: TM863 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0223-05

New Model for Calculating the Shielding Failure Trip-Out Rate of Transmission Line

Jia Lei, Zhang Guihong, Shu Liang, Wen Dingjun, Shi Wei
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To evaluate the shielding failure trip-out rate of the transmission lines accurately, a new model combining electromagnetic transient program (EMTP) simulation with Monte Carlo method is presented, where all random factors are taken into account and the higher accuracy for electromagnetic transient analysis of EMTP is kept. The simulated result shows that the relative error between the calculated result and the on site value gets within 10% to describe the trip-out more actually.

Keywords: shielding failure trip-out rate; Monte Carlo method; regular method; electromagnetic transient program

国内外运行经验表明, 在超高压电网中, 输电线路的雷害主要是由雷电绕击导线引起的^[1-2], 因此在超高压以及特高压输电线路路上, 绕击跳闸率的精确计算就显得特别重要.

目前, 我国绕击跳闸率的计算还是以规程法为主, 该方法并没有考虑雷电流对绕击率的影响, 对地面倾角的影响只以平原和山区来区分, 同时也没有考虑线路运行电压、雷电流波头时间以及绝缘子串闪络电压的分散性等随机因素对绕击跳闸率的影响. 因此, 在电压等级比较高的线路中, 用规程法算出的绕击跳闸率与实际情况相差很远^[3].

本文利用电磁暂态计算程序 ATP 中的 MODELS 模块, 将 ATP-EMTP 与蒙特卡罗法相结合, 利

用蒙特卡罗法研究随机问题能够不受随机向量维数限制, 同时 ATP 能够精确模拟电力系统各种电磁暂态现象的特点, 采用改进的电气几何模型作为绕击判据, 提出了一种适用于 EMTP 的计算输电线路绕击跳闸率的模型, 并通过计算一条 500 kV 输电线路的绕击跳闸率来验证该模型的正确性.

1 蒙特卡罗法计算绕击跳闸率的原理

利用蒙特卡罗法来计算输电线路的绕击跳闸率, 需要考虑的随机变量主要包括雷电流幅值 I 、雷电流波头时间 t_f 、线路运行电压 U_0 、绝缘子串 50% 放电电压 $U_{50\%}$ 等. 此外, 本文采用电气几何模型作为绕击判据. 在确定的雷电幅值情况下, 雷绕击导线

与否还取决于雷电先导在空间的位置 d , 因此 d 也是绕击跳闸率所依赖的一个随机变量。

取随机向量 $\mathbf{X}=(I, t_f, \phi, U_{50\%}, d)$, 可知各随机变量是相互独立的, 并且认为它们的概率分布是已知的。当雷电流幅值为 I 、波头时间为 t_f 且运行电压相位角为 ϕ 时, 令 $U(I, t_f, \phi)$ 表示线路绝缘子串两端的最大电压。定义 $L(I, d)$ 和 $C(I, t_f, U_{50\%}, \phi)$ 如下

$$L(I, d) = \begin{cases} 1 & \text{当雷电绕击导线时} \\ 0 & \text{当雷电没有绕击导线时} \end{cases}$$

$$C(I, t_f, U_{50\%}, \phi) = \begin{cases} 1 & U(I, t_f, \phi) \geq U_{50\%} \\ 0 & U(I, t_f, \phi) < U_{50\%} \end{cases}$$

取统计量为

$$g(\mathbf{X}) = L(I, d)C(I, t_f, U_{50\%}, \phi) \quad (1)$$

则 $g(\mathbf{X})$ 的数学期望

$$E(g) = \int g(\mathbf{X}) dF(\mathbf{X}) \quad (2)$$

即是输电线路的绕击闪络率 P_S , 其中 $F(\mathbf{X})$ 是随机向量的概率分布, 然后产生随机向量 $\mathbf{X}$ 的简单子样 $x_1, x_2, \dots, x_N$, 用相应的统计量 $g(x_1), g(x_2), \dots, g(x_N)$ 的算术平均值

$$\hat{P}_S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i) \quad (3)$$

作为 P_S 的近似估计值。根据大数定理, 当统计量 $g(x)$ 的子样数 N 充分大时, 其均值以概率 1 收敛于其期望值, 即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \hat{P}_S = P_S \quad (4)$$

当计算出绕击闪络率 $\hat{P}_S$ 后, 由文[4]可知绕击跳闸率计算公式如下

$$N_S = N_L \eta \hat{P}_S \quad (5)$$

式中: N_S 为每 100 km 线路上每年由于绕击而造成的跳闸次数; N_L 为每 100 km 线路上每年的落雷次数; η 为建弧率。

2 模型的建立

2.1 绕击判据模型

本文利用电气几何模型作为绕击判据, 对电气几何模型做出以下假设。

(1) 雷电先导对避雷线和导线的击距相等, 可采用 IEEE 标准[5]推荐的公式进行计算

$$r_s = 10I^{0.65} \quad (6)$$

(2) 研究表明, 对于超特高压线路, 由于杆塔高度较高, 先导对大地的击距与其对避雷线和导线的击距是不相等的。因此, 本文取对地面的击距

$r_{sg} = \beta r_s$, 其中 β 称为击距系数, 其取值可采用 IEEE 推荐的公式求得[5]

$$\beta = \begin{cases} 0.36 + 0.17 \ln(43 - h_c) & h_c < 40 \text{ m} \\ 0.55 & h_c \geq 40 \text{ m} \end{cases} \quad (7)$$

式中: h_c 为导线的平均高度, 单位 m。

(3) 认为先导始终是垂直下落的, 其出现的位置 d 在空间服从均匀分布。

根据以上几点假设, 可编制基于电气几何模型的判断线路是否发生绕击的程序。

2.2 主电路模型的建立

2.2.1 输电线路 仿真时, 输电线路长度取自雷击点分别向两边各延伸 2~3 个档距的距离, 每个档距的长度取为 400~500 m。在 ATP 中, 输电线路用不消去地线的非平衡分布参数线路模型来模拟, 同时用 JMARTI 线路模型来模拟线路参数随频率变化的特性, 所计算的频率范围为 0.005 ~ 500 kHz。

2.2.2 线路终端的模拟 由于所研究的线路长度比较短, 为了防止在所研究的时间范围内, 波从雷击点传到两侧线路的末端后所产生的反射波再返回雷击点, 影响该处过电压的计算值, 本文采用在线路末端分别连接一条相对比较长的与所研究线路具有相同特性的线路的方法来消除此影响, 所加的这部分线路称为线路终端。

2.2.3 杆塔的模拟 目前, 关于杆塔模型通常有集中电感模型、单波阻抗模型、多波阻抗模型[6], 后两种适用于杆塔比较高的情况。杆塔的模拟主要影响的是反击跳闸率的计算结果, 而对本文所研究的绕击跳闸率的计算结果几乎没有影响, 因此本文采用规程法中计算雷击跳闸率所用的集中电感模型, 各种杆塔单位长度的电感值都可在文[4]中查到。

2.2.4 冲击接地电阻的模拟 根据文[7]可知, 杆塔的冲击接地电阻是一个随接地电流变化的非线性电阻, 并且其值具有一定的随机性。与杆塔模型一样, 接地电阻对反击跳闸率的计算结果影响较大, 对绕击跳闸率来说其影响可以忽略, 本文将冲击接地电阻看成是一个常量, 取为 7 Ω 。

2.2.5 绝缘子串的模拟 绝缘子串的准确模拟无论是对反击跳闸率还是对绕击跳闸率的计算都是至关重要的。本文采用绝缘子串的 50% 冲击放电电压作为绝缘子串的闪络判据, 将其模拟成一个电压控制开关, 当两端的电压达到其 50% 放电电压时该开关即导通, 意味着绝缘子串放电。此外, 在已知绝缘

3 计算实例

某 500 kV 输电线路长为 130.309 km, 导线型号为 4×LJG-400/50, 地线为钢芯铝绞线, 型号为 JLB1A-80, 取年雷电日为 60 d, 绝缘子片数为 28 片, 杆塔接地电阻取为 7 Ω, 平均档距为 480 m, 杆塔尺寸如图 3 所示, 杆塔所在地形为山区, 地面倾角为 32°. 下面, 利用本文所提出的模型计算该线路的绕击跳闸率.

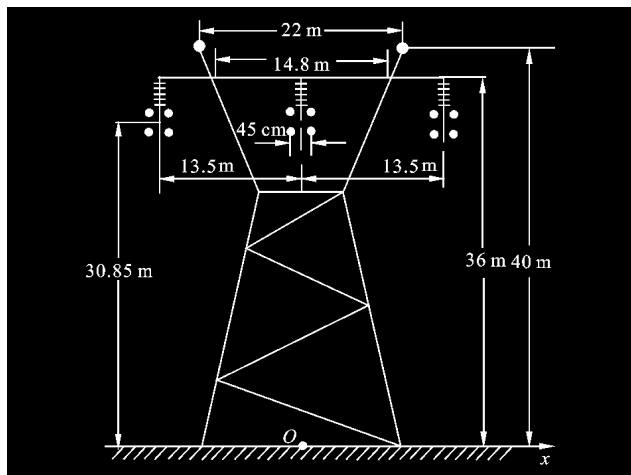


图3 500 kV 线路杆塔结构图

3.1 计算参数选取

(1) 雷电流幅值 I 的分布. 根据文[4]可知, 雷电流幅值 I 的概率分布取为

$$\lg P_I = -I/88 \quad (8)$$

式中: P_I 为雷电流幅值超过 I 的概率.

(2) 雷电流波头时间 t_f 服从对数正态分布^[7], $t_m = 2 \mu s$, $\sigma = 0.4943 \mu s$.

(3) 绝缘子串 50% 放电电压服从正态分布, $U_m = 2450 \text{ kV}$, $\sigma = 122 \text{ kV}$.

(4) 雷击时刻运行电压的相位角 ϕ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间服从均匀分布, 其幅值取为系统标称电压的 0.8165 倍.

(5) 雷电先导出现位置 d 为 $-W/2 \sim W/2$, 服从均匀分布, W 为线路的等值引雷宽度.

3.2 等值引雷宽度的确定

当先导出现的位置距线路的距离超过某一临界值时, 雷击将全部击于大地, 对线路没有任何影响, 此临界距离称为线路的半引雷宽度. 利用半引雷宽度来界定先导出现的范围可以提高计算收敛的速度, 节省 CPU 时间. 利用电气几何模型计算线路半引雷宽度的过程如下: 产生服从某种概率分布的雷

电流幅值 I 的大量样本值, 设样本数量为 N_1 , 计算在不同先导位置 d 下击于地面的次数 N_2 , 如果 N_1 与 N_2 恰好相等或者两者非常接近时, 则可认为此 d 值的 2 倍为线路的引雷宽度 W . 对于本文所研究的杆塔, 取雷电流幅值 I 的抽样数为 40 000, 可得雷击地面次数与先导出现位置的关系曲线如图 4 所示.

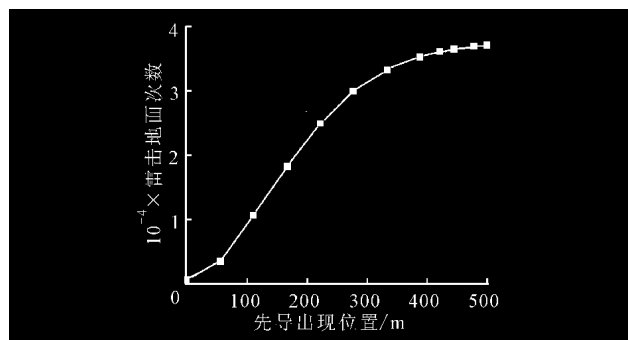


图4 雷击地面次数随先导出现位置的关系曲线

从图 4 可以看出, 当先导出现位置在 450 m 时, 40 000 次雷击中地面的雷击次数为 39 426, 可认为线路引雷宽度 W 为 900 m.

3.3 计算结果收敛性的判断

由大数定理可知, 当样本数 N 充分大时, 蒙特卡罗法的计算结果以概率 1 收敛于其真值. 下面, 将采用 500 kV 线路绕击闪络率的计算值随样本数的变化曲线(图 5 所示)来讨论本文所研究的问题中 N 的取值.

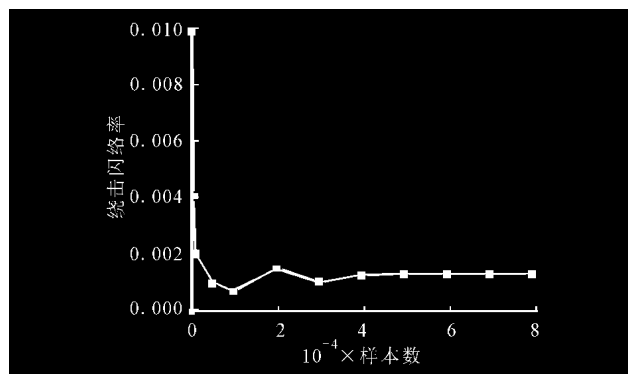


图5 绕击闪络率随样本数的关系曲线

从图 5 可以看出, 当样本数大于 40 000 时, 绕击闪络率的计算值将趋于稳定. 对于其他线路来说, 要视具体情况选取样本数, 在一般情况下, 样本数大于 50 000 时所得的计算结果变化将不会很大, 可认为其趋于收敛. 本文取样本数为 50 000 时的绕击闪络率 0.0013 作为该线路的绕击闪络率.

3.4 绕击跳闸率的计算

绕击跳闸率的计算公式如下

$$N_s = 100\gamma WT\eta P_s \quad (9)$$

式中: T 为每年雷电日数,对于本例所研究线路 $T=60$ d; η 为建弧率,对于 500 kV 线路 $\eta=1$; P_s 为绕击闪络率,由前面计算可得其值为 0.001 3; W 为线路等值引雷宽度,单位为 km,由前面计算可得 $W=0.9$ km; γ 为每雷电日每 km^2 的平均落雷次数,其值随各地的雷电日数不同而不同,我国标准采用国际大电网会议(CIGRE)1980 年提出的以下关系式进行计算^[3]

$$\gamma = 0.023T^{0.3} \quad (10)$$

当年雷电日为 40 d 时, $\gamma=0.07$; 当年雷电日为 60 d 时, $\gamma=0.079$.

3.5 计算结果及分析

由式(9)计算可得该线路的绕击跳闸率为 $N_s=0.554\ 58$ 次,由规程法计算所得绕击跳闸率 $N'_s=0.038\ 72$. 由文[8]可知,该线路投入运行 3 年以来,已经发生了 2 次绕击事故,可以看出用规程法计算所得的结果与实际情况相差很远,而本文模型计算所得到的绕击跳闸率与实际情况较为接近.

此外,陕西电力科学研究院对陕西电网 330 kV 架空输电线路的雷击跳闸率进行了统计,得出从 1990 年到 2004 年这 15 年间的雷击跳闸率的平均值为 0.234 次. 由于 330 kV 线路的耐雷水平在 139 kA 以上,而实测表明幅值高于 100 kA 的雷电流在陕西省并不多见,因此雷击跳闸多为绕击造成. 利用本文所提出的模型结合典型的 330 kV 杆塔尺寸,计算出线路的绕击跳闸率为 0.177 次,而用规程法计算所得绕击跳闸率为 0.04 次,可见本文所提出的模型较规程法更接近实际.

4 结 论

由于雷电是一个小概率事件,目前我国对雷电的观测手段还不够完善,所得到的观测数据还不充分,关于雷电的参数分布也不一定准确,加上不同地区雷电参数的分布也有差异^[9],因此采用本文模型计算所得的绕击跳闸率可能与实际值有差别,但随着上述问题的解决,准确计算绕击跳闸率成为可能.

(1) 本文以电气几何模型作为绕击判据,将电磁暂态程序 ATP-EMTP 与蒙特卡罗法相结合,建立了一个计算输电线路绕击跳闸率的新模型. 该模型能够充分计及各种随机因素对绕击跳闸率的影响,可以使计算结果更为精确.

(2) 利用本文建立的模型实际计算了一条

500 kV 线路的绕击跳闸率,并与规程法的计算结果进行了对比. 结果表明,本文所提出的模型较规程法更能反映输电线路绕击跳闸的实际情况.

(3) 本文所提出的模型可以很方便地推广到对输电线路反击跳闸率的计算中.

参考文献:

- [1] 钱冠军. 500 kV 线路直击雷典型事故调查研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 73-75.
Qian Guanjun. Investigation of typical direct lightning strike incidents on 500 kV lines[J]. High Voltage Engineering, 1997, 23(2): 73-75.
- [2] Eriksson A J. The incidence of lightning strikes to power line[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1987, 2(3): 871-886.
- [3] 张纬铨, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [4] 中华人民共和国电力工业部. DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [5] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines[M]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1997.
- [6] 张颖, 高亚栋, 杜宾, 等. 输电线路防雷计算中的新杆塔模型 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(4): 365-372.
Zhang Ying, Gao Yadong, Du Bin, et al. New tower model in calculation of lightning protection on transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(4): 365-372.
- [7] Martinez J A, Castro-Aranda F. Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2200-2210.
- [8] 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良, 等. 超/特高压输电线路雷电绕击防护性能研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1-6.
Zhang Zhijin, Sima Wenxia, Jiang Xingliang. Study on the lightning protection performance of shielding failure for UHV&EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-6.
- [9] Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee. Parameters of lightning strokes: a review [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 346-358.

(编辑 杜秀杰)