

基于LPTL的220 kV交流同塔双回输电线路反击性能研究

为了对220 kV同塔双回线路反击耐雷性能主要影响因素进行更为深入的分析,指导输电线路防雷改造,采用输变电设备防雷计算工具LPTL,建立了适合同塔双回线路的反击仿真模型,其中采用多导体常参数分布波阻抗模型等效杆塔,和采用先导法作为绝缘子闪络判据模型来判断绝缘子串的闪络,分析了杆塔高度、接地电阻和土壤电阻率对杆塔反击防雷性能的影响,分别计算了反击耐雷水平和反击跳闸率。最后运用LPTL对某雷击跳闸进行了实例分析。计算结果表明,上述因素对杆塔防雷性能有较大的影响。

马 勇 刘 洋 陈 光 谢天喜 周志成 陶风波/江苏省电力公司电力科学研究院(国家电网公司实验室)



马 勇/工程师

关键词/Keywords

同塔双回·
防雷性能·
LPTL·
仿真模型·

架空输电线路是我国电力系统的重要组成部分,其运行状态决定了电力系统能否安全、可靠和稳定地运行。据我国高压输电线路运行事故统计表明,由雷击引起线路跳闸事故约占线路总跳闸事故的40%~70%^[1-3]。雷击引起的事故已经成为输电线路的主要故障之一。在一些雷电活动较为频繁的地区,线路遭受雷击而发生事故的更大。因此,准确评估线路的防雷性能对线路的设计和施工,特别是对提高电力系统运行的稳定性具有重要意义。

由于220 kV线路是输电网的主干线路之一,因此保证220 kV线路的安全稳定运行是摆在电力工作者面前的一大难题。目前220 kV输电线路多为同塔双回,引雷面积大,极易遭受雷击,且绕击和反击故障均较为突出^[4-5]。因此,准确评估220 kV同塔双回输电线路的防雷性能对于确保电网安全稳定运行显得至关重要。

本文基于江苏省电力公司输变电设

备防雷计算工具(以下简称“LPTL”)建立了同塔双回输电线路反击仿真模型,在此基础上研究了220 kV同塔双回输电线路反击跳闸影响因素灵敏度。

LPTL建模计算

1. LPTL简介

LPTL是一款用于输电线路防雷性能计算和分析的软件。LPTL能让用户创建输电线路及其杆塔,对线路走廊沿线的雷电活动时空分布规律进行统计,查看并获取线路各基杆塔的地形地貌,通过选用合适的计算模型和判据,建立防雷分析任务,对输电线路某基典型杆塔、多基杆塔或整条线路进行绕击防雷性能和反击防雷性能分析及评价,帮助和指导用户开展防雷工作。

LPTL软件具有以下功能:

- 1) 管理某个电网的输电线路和杆塔。
- 2) 统计、掌握某个区域的雷电活动时空分布规律和地闪频次规律。
- 3) 统计、掌握输电线路沿线走廊的雷电活动时空分布规律。
- 4) 获取高分辨率的区域和线路的地闪密度分布图,指导电网防雷工作开展。
- 5) 查询、获取线路各基杆塔地形地貌,方便线路巡线和故障查找。
- 6) 采用规程法、电气几何模型法和先导法进行输电线路绕击防雷性能研究和分析。
- 7) 采用规程法、电磁暂态分析法进行输电线路反击防雷性能研究和分析。

LPTL软件界面如图1所示。

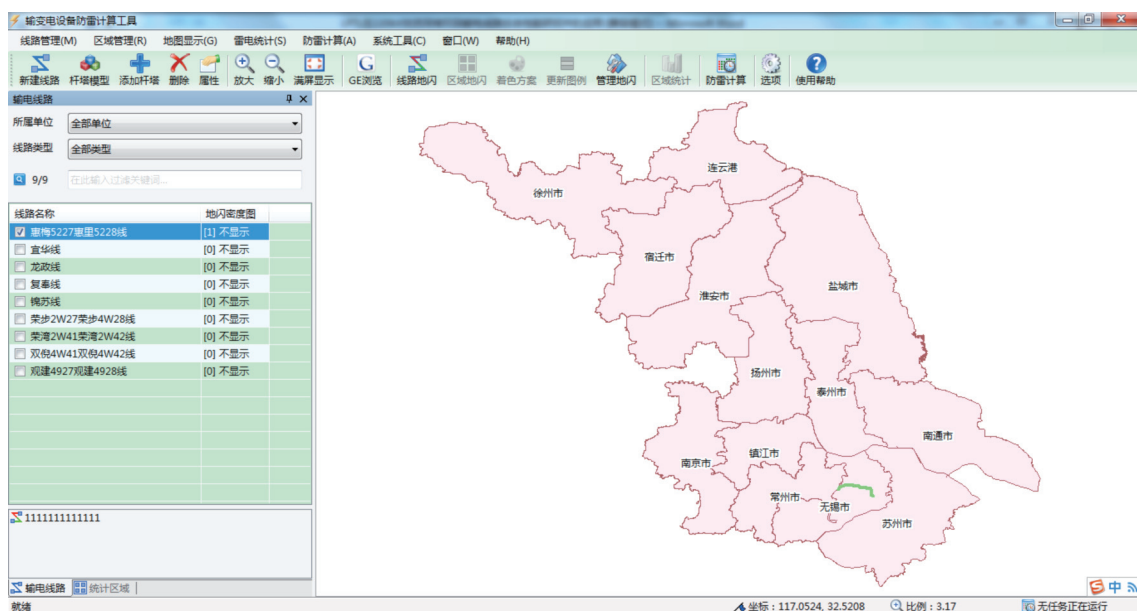


图1 LPTL软件界面

2. LPTL中反击计算模型

在LPTL中输入线路和杆塔的基本信息，完成线路及杆塔的创作。LPTL中计算杆塔反击耐雷性能的方法主要有规程法和电磁暂态分析法。后者是将ATP/EMTP集成简化，在建模时直接选择雷电流模型、通道阻抗、线路模型、杆塔模型、闪络判据、感应电压和接地电阻等模型参数，大大减少了系统建模的工作量。LPTL模型参数设置界面如图2所示。

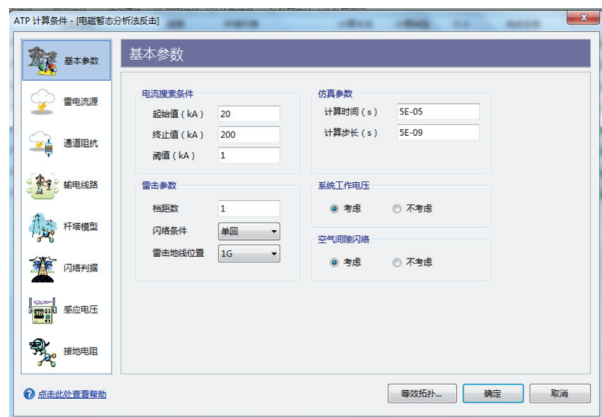


图2 LPTL模型参数设置页面

(1) 雷电流波形和雷电通道波阻抗

雷电流波形参数包括：雷电流幅值、波头和

波尾时间。统计结果表明，雷电流波头长度大多在 $1.0 \sim 5.0 \mu\text{s}$ 的范围内，平均约为 $2.0 \sim 2.5 \mu\text{s}$ ^[6]。本文仿真选取 $2.6/50.0 \mu\text{s}$ 双指数波作为仿真雷电流源。对于反击仿真计算，雷电通道波阻抗取 400Ω 。

(2) 输电线路模型

在雷电波的冲击下，线路的电气参数与工频下的参数相比将发生很大的变化。在本文仿真中输电线路采用频率相关（基于相域变换）模型，该模型可通过输入线路结构参数计算获取随频率变化的线路阻抗，对应EMTP中的JMarti输电线路模型。

(3) 杆塔模型

波阻抗法是在雷击杆塔后，注入电流波近似看作平面波，用集中波阻抗来描述注入电流波在杆塔中的传播过程，进而求取塔顶电位和绝缘子串两端电压的注入分量。多波阻抗是在波阻抗理论的基础上，根据不同杆塔结构特征，将杆塔分解为多个波阻抗段，使得电流波在塔身内的折反射过程与实际情况更为一致^[7]。杆塔多波阻抗等效模型如图3所示。

图3中 h_k 为横担高度，m； r_{Tk} 为单根导体顶部等效半径，m； R_{Tk} 为多导体系统顶部相邻导体间距，m； R_B 为多导体系统底部相邻导体间距，m；

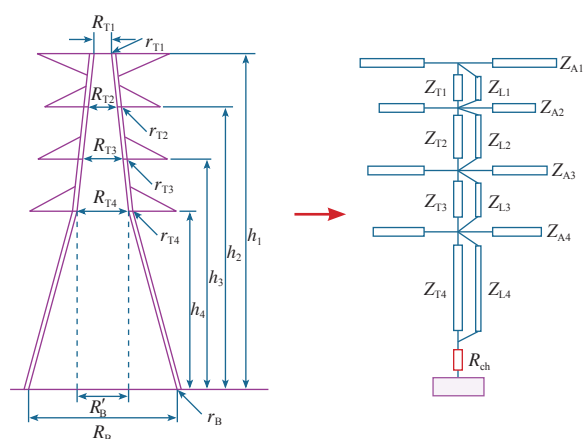


图3 杆塔多波阻抗等效模型

r_B 为单根导体底部半径, m。 Z_{Ak} 为横担波阻抗, Ω ;
 Z_{Tk} 为主干波阻抗, Ω ; Z_{Lk} 为支架部分波阻抗, Ω 。

杆塔主干波阻抗计算公式为

$$Z_{Tk} = 60 \left(\ln \frac{2\sqrt{2}h_k}{r_{ek}} - 2 \right) \quad (1)$$

式中, r_{ek} 为杆塔主干的等效半径。

$$r_{ek} = 2^{1/8} \left(r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3} \right)^{1/4} \left(R_{Tk}^{1/3} R_B^{2/3} \right)^{3/4} \quad (2)$$

杆塔支架波阻抗计算公式为

$$Z_{Lk} = 9Z_{Tk} \quad (3)$$

Hara杆塔模型中, 表示支架部分波阻抗的传输线长度取主干部分的1.5倍。

杆塔横担波阻抗计算公式为

$$Z_{Ak} = 60 \ln \frac{2h_k}{r_{Ak}} \quad (4)$$

式中, r_A 为横担的等效半径, 计算中可以取杆塔主节点连接处横担宽度的1/4作为等效半径。

(4) 绝缘子串闪络判据

绝缘子串闪络可通过先导的发展长度是否贯穿间隙进行判断, CIGRE WG33.01推荐的先导发展的速率公式为

$$\frac{dL}{dt} = ku(t) \left[\frac{u(t)}{D-L} - E_0 \right] \quad (5)$$

式中, $L(t)$ 为先导发展长度, m; $u(t)$ 为绝缘子串上的电压, kV; D 为间隙长度, m; E_0 为先导起始场强, kV/m; k 为实验结果拟合所得的经验系数, 与绝缘子类型、外施电压极性等有关, $m^2/(s \cdot kV^2)$ 。

本文仿真中采用 $k = 1.1$, $E_0 = 500.0$ kV/m。

(5) 接地电阻模型

接地体的冲击阻抗受流过其电流幅值及频率影响, 表现出较强的非线性特性。本文采用IEC推荐的式(6)来计算有冲击电流流过时接地体的冲击阻抗值^[9]

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (6)$$

式中, R_0 为低频低电流幅值下的冲击阻抗值, Ω ;
 I 为流过接地体的冲击电流幅值, kA; I_g 为使土壤发生最小电离的电流, kA, 可表示为

$$I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2} \quad (7)$$

式中, ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot m$; E_0 为土壤电离时的场强, kV/m。

(6) 感应电压计算模型

本文采用国网电力科学研究院推荐的感应电压计算公式^[10]

$$U_i = 1.33(1.771 + 1.754h_c - 0.01088h_c^2 + 1.935 \times 10^{-5}h_c^3)I^{0.1706h_c^{0.232}}(1 - k_0) \quad (8)$$

式中, h_c 为导线对地平均高度, m; I 为雷电流幅值, kA。

反击影响分析

以图4所示的典型杆塔为分析对象, 基于LPTL中模型研究220 kV同塔双回输电线路反击跳闸影响。

1. 杆塔呼高对反击防雷性能的影响

本文按照图4所示杆塔的典型尺寸, 当土壤电阻率为100 $\Omega \cdot m$ 和接地电阻取10 Ω 时, 分别计算呼称高度为24 m、30 m、36 m、42 m和48 m的反击耐雷水平和反击跳闸率。由表1和图5可以看出,

表1 杆塔高度对反击耐雷水平的影响

呼称高度/m	24	30	36	42	48
反击耐雷水平/kA	91	86	81	76	72
反击跳闸率(%)	35.6	44.7	55.2	67.1	77.8

注: 接地电阻10 Ω 。

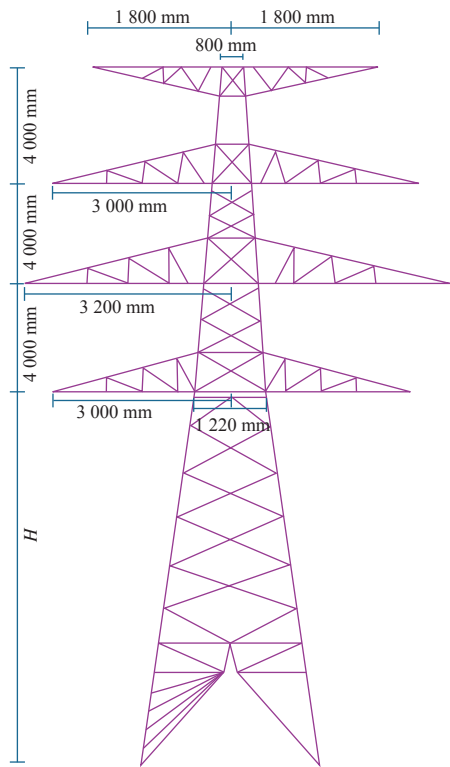


图4 杆塔示意图

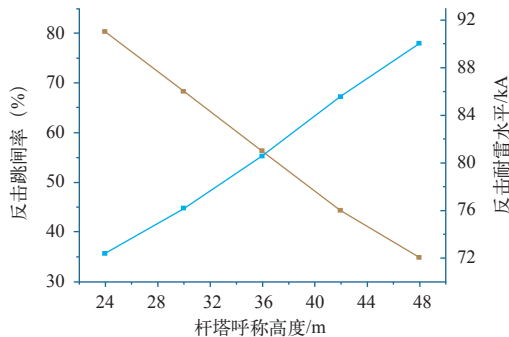


图5 反击耐雷水平和反击跳闸率随杆塔高度变化曲线

杆塔高度对输电线路的反击耐雷水平影响十分明显，如杆塔呼称高度由24 m增加到42 m时，线路的反击耐雷水平显著降低。

2. 接地电阻对反击防雷性能的影响

对典型杆塔进行接地电阻敏感性分析，分析结果如表2和图6所示。同一呼称高度下，随着接地电阻的增大，反击耐雷水平降低，反击跳闸率呈上升趋势。由此可见，接地电阻对杆塔的耐雷水平影响较大，减小杆塔接地电阻是提高该输电线路耐雷水平和降低其反击跳闸率的有效措施。

表2 接地电阻对反击跳闸率的影响

接地电阻/ Ω	5	10	15	20	25
反击耐雷水平/kA	100	81	73	69	66
反击跳闸率 (%)	39.9	48.6	60.8	72.8	86.1

注：杆塔高度为45 m。

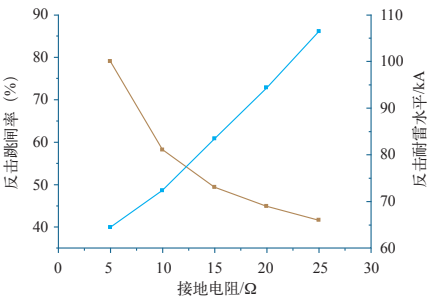


图6 反击耐雷水平和反击跳闸率随接地电阻变化曲线

3. 土壤电阻率对反击防雷性能的影响

对典型杆塔进行土壤电阻率敏感性分析，分析结果如表3和图7所示。同一呼称高度下，随着土壤电阻率的增大，反击耐雷水平降低，反击跳闸率呈上升趋势。由此可见，土壤电阻率对杆塔的耐雷水平有影响，减小杆塔处土壤电阻率是提高该输电线路耐雷水平和降低其反击跳闸率的可 行措施。

表3 土壤电阻率对反击跳闸率的影响

土壤电阻率	100	300	500	1 000	2 000
反击耐雷水平/kA	81	75	74	73	71
反击跳闸率 (%)	45.6	56.7	58.7	60.8	62.3

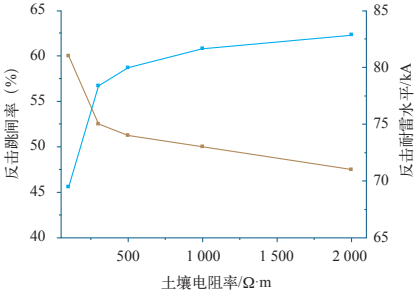


图7 反击耐雷水平和反击跳闸率随土壤电阻率变化曲线

实例应用

江苏某地220 kV同塔双回线路B相零序过电流 I 段动作，重合闸成功。根据雷电定位系统查询，该时刻线路50#杆塔处有落雷，雷电流幅值为262 A；现场巡线发现50#B相绝缘子及均压环有明

显烧伤痕迹。综合以上信息初步断定该处为故障点。

应用LPTL对该杆塔进行计算分析,该杆塔B相反击耐雷水平为100.51 kA,反击跳闸率为39.95%。通过LPTL与Google Earth连接,查看该杆塔地形地貌,结果如表4和图8所示。结果显示,该杆塔所在地地形平坦,所处位置为农田,相距不远处有河流,土壤电阻率较低。根据LPTL中所获取信息,结合雷电定位和现场巡线结果,初步判定为反击造成的雷击跳闸。

表4 杆塔所在地地形地貌信息

杆塔号	海拔/m	左倾角(°)	右倾角(°)
50	3.006 194	0.154 539	-0.309 186

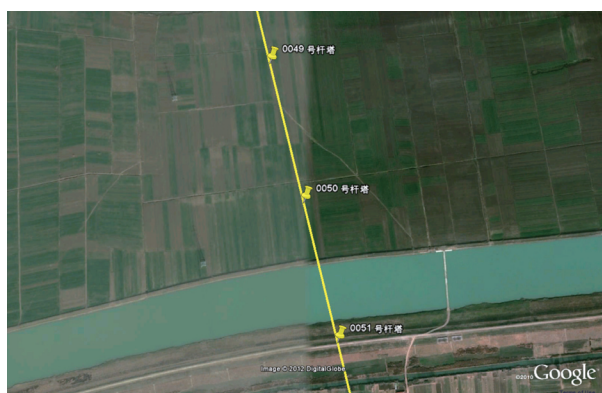


图8 杆塔所在地地形地貌图

结束语

本文利用LPTL软件建立220 kV同塔双回输电线路的反击仿真模型,并在此基础上对影响反击耐雷性能的各项因素包括杆塔呼高、接地电阻和土壤电阻率等进行了分析。得到如下结论:

1) 反击防雷性能随着杆塔呼称高度的升高呈减弱的趋势,且呼称高度越高反击跳闸率增加的幅度也越大。

2) 冲击接地电阻对线路的反击防雷性能影响较大,冲击接地电阻越大,反击跳闸率越大。

3) 随着土壤电阻率的增大,反击耐雷水平降低,反击跳闸率呈上升趋势。

4) LPTL软件在输电线路防雷计算分析中可进行建模计算,并可直观获取杆塔处地形地貌,简化了建模步骤,方便了输变电设备防雷计算分析

工作的开展。

参考文献

- [1] 维列夏金, 吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验 [J]. 高电压技术, 1998, 24 (2): 76-79.
- [2] 黄伟超, 何俊佳, 陆家政, 等. 实际雷电活动分布下的线路雷击跳闸率计算 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (7): 1368-1373.
- [3] 李长旭, 袁忠君, 张海龙. 基于EGM的500 kV同杆双回线路绕击跳闸率研究 [J]. 电力建设, 2008 (2).
- [4] 高嵩, 周志成, 陶风波. 江苏电网220 kV及以上输电线路雷击跳闸分析 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33 (4): 17-20.
- [5] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Line. A simplified methods on estimating lightning performance of transmission line [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1985, 104 (4): 919-931.
- [6] Ametani A, Kawamura T. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP [J]. IEEE Trans. Power Del, 2005, 20 (2): 897-908.
- [7] Hara T, Yamamoto O. Modeling of a transmission tower for lightning surge analysis [J]. Proc. Inst. Elect. Eng, Gen. Transm. Distrib, 1996, 143 (3): 283-289.
- [8] 黄炜纲, 周东平. 三峡500 kV双回同塔线路防雷计算特性计算分析-先导发展模型绝缘闪络判据及一回增强的不平衡绝缘方案 [J]. 电力设备, 2002, 3 (2): 7-15.
- [9] Juan A, Martinez, Ferley Castro-Aranda. Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP [J]. IEEE Trans. Power Del, 2005, 20 (3): 2200-2210.
- [10] 聂定珍, 周沛洪, 戴敏, 等. ± 500 kV同杆双回直流线路雷电性能的研究 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 148-154.

(收稿日期: 2014-02-10) EA