1000kV 杆塔防雷研究

欧阳仁乐

（西华大学，成都 610039）

摘要 国内外特高压输电线路运行经验表明：导致特高压输电线路跳闸事故的主要原因是雷击，并且随着电压等级提高，雷击导致跳闸的概率逐渐增大。本文以 1000kV 输电线路为研究对象，分别仿真并且分析了 4 种不同经典单回杆塔的绕击跳闸率.并且采用电磁暂态计算程序 ATP-EMTP，对雷电波反击进行仿真，研究分析 4 种杆塔对雷电波在线路中传播的影响。

关键词：特高压；输电线路；雷击；杆塔；ATP-EMTP

Research of Lightning Protection of 1000kV Tower

Ouyang Renle

(School of Electrical and Information Enginerring, Xihua University, Chengdu 610039)

Abstract Ultrahigh-voltage transmission lines operating experience at home and abroad show that the main cause of the uhv transmission line tripping accidents is struck by lightning, with the higher voltage class, the probability of tripping accidents caused by lightning strike increased. This paper based on the 1000kV transmission line as the research object, simulate and analyze detour lightning trip-out rate of four different classic Single tower back. Besides, Through the use of the electromagnetic transient calculation program ATP-EMTP and simulating of back striking, this paper Research and analysis ray propagation in a circuit of four towers.

Key words：ultrahigh-voltage; transmission line; lightning strike; tower; ATP-EMTP

我国电力工程顾问集团公司在 2005 年 3 月提出的特高压交流线路工程草案中阐述了 4 种经典特高压单回输电杆塔，分别为 3M 型水平排列、3M 型三角排列、3V 型水平排列、3V 型三角排列。为了最大程度限制雷害的发生，分析不同杆塔在相同条件下发生雷害的概率以及严重程度在特高压防雷计算中应该占据重要地位。本文主要采用多波阻抗模型分析研究以上四种杆塔发生雷害的概率以及对雷电波在线路中传播的影响。

1 不同杆塔绕击分析

1.1 电气几何模型

以前，在评估输电线路避雷线屏蔽性能 的时候，主要是根据保护角的大小来判断，并且仅仅考虑了避雷线保护角，后来又引入了杆塔高度因素。自 1968 年后，E.R.Withehead 等提出了研究避雷线屏蔽性能的电气几何模型（EGM）。它是将雷电放电特点同线路的结构尺寸联系起来而建立的一种集合分析计算模型，它将击距与雷电流关联起来，使雷电屏蔽技术走上了几何参数与电气参数联合的研究轨道。它的基本原理为：当雷云的先导放电通道头部达到被击中物体（击距）之前，击中点是不确定的，先达到哪个物体相应的击距时，就向该物体放电[2]。

图 1 显示了雷电绕击线路的电气几何模型。若雷电先导落入 *AB* 弧段，则雷电将直击避雷线；若

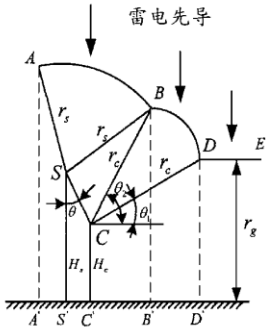


图 1 电气几何模型

雷电先导落入 *BD* 弧段，则绕击导线，所以 *BD* 段成为暴露弧；若雷电先导击中落入 *DE* 平面，则击中大地。

1.2 绕击闪络率计算

随着雷电流幅值增大，*BD* 段将逐渐减小，当雷电流幅值增大到 $I_{\max}$ 时，*BD* 段缩小为 0，不再发生绕击。

并非所有绕击都会引起绝缘闪络，只有当雷电流幅值大于线路耐雷水平 $I_{\min}$ 时才会发生闪络。耐雷水平可由以下公式确定

$$I_{\min}=\left(U_{-50\%}+\frac{2Z_0}{2Z_0+Z_c}U_{ph}\right)\frac{2Z_0+Z_c}{Z_0Z_c}$$

式中，Z_c 为导线波阻抗；Z_0 为闪电通道波阻抗；U_{ph} 为导线工作电压；$U_{-50\%}$ 为绝缘子 50%闪络电压绝对值。

根据前苏联观测计算出的雷电流波阻抗和雷电流关系曲线求得 $Z_0=1.6I^{1.345}+21120/I-148.4$

雷电流 *I* 下绕击概率 $X(I)$ 可由下式决定

$$X(I)\equiv\frac{\overline{B'D'}}{\overline{A'D'}}=\frac{r_c(\cos\theta_1-\cos\theta_2)}{r_c\cos\theta_1+\overline{A'C'}}$$

绕击闪络率 P_1 可由下式计算

$$P_1=\int_{I_{\min}}^{I_{\max}}X(I)F(I)\mathrm{d}I$$

式中，$F(I)$为雷电流概率密度，$F(I)=0.026166\times10^{-I/88}$。

根据计算得出四种杆塔的绕击闪络率见表 1。

表 1 绕击闪络率

塔形-导线排列	保护角/°	绕击闪络率/%
M 型水平	9.23	0.051
M 型三角	5.92	0.011
3V 型水平	9.72	0.219
3V 型三角	6.62	0.121

由表 1 可看出，M 型与 3V 型比较，在相近的保护角下 M 型的绕击闪络率较低，而水平排列的导线较三角排列的导线保护角更大，绕击闪络率也较大。相比之下，M 型三角排列的导线防绕击闪络能力更强。

2 不同杆塔反击分析

2.1 仿真模型的建立

1）杆塔模型

在防雷计算中，杆塔的冲击响应是非常重要的，塔顶点位的计算结果将受到直接影响。输电线路耐雷水平和跳闸率的计算准确与否也被直接影响，目前采用的杆塔模型主要有以下几种[4]：

集中电感模型：该模型往往是针对低电压等级的线路进行理论研究，忽略了杆塔上的波过程，在高电压等级的研究中集中电感模型远远不能达到防雷设计要求[4]。

单一波阻抗模型：该模型仅用单一波阻抗来模拟杆塔，把杆塔视作均匀参数，忽略了杆塔结构的不同，这在研究特高压雷电波过程的时候会带来一定的误差[4]。

多波阻抗模型：该模型是根据垂直导体不同高度波阻抗不同的原理而建，相比单一波阻抗模型，多波阻抗模型更好地考虑了波在杆塔中的传播过程，有较高的精度，并且能广泛应用于各种电压等级仿真模型中[4]。

本文使用多波阻抗多层传输塔模型来建立M型水平排列、3M 型三角排列、3V 型水平排列、3V 型三角排列这四种杆塔的线路仿真模型。具体杆塔模型如图 2 至图 5 所示。

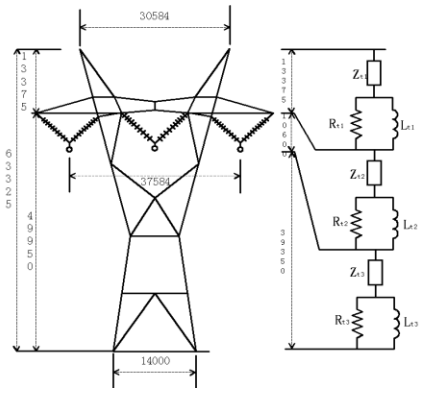


图 2 3V 型水平排列

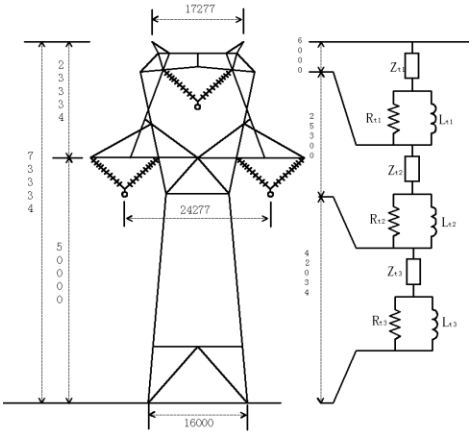


图 3 3V 型三角排列

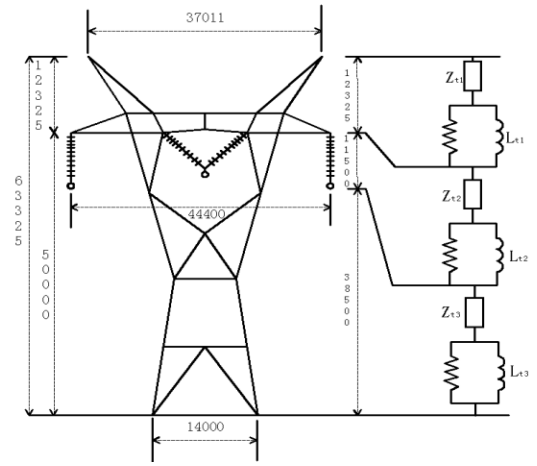


图 4　M 型水平排列

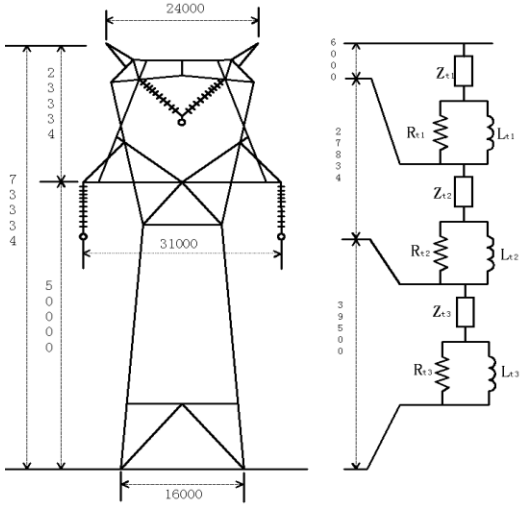


图 5　M 型三角排列

上图中 L 和 R 是用来模拟在杆塔中传播的行波的变形和衰减，其方程为

$$R_i = \frac{-2Z_{ti}\ln\sqrt{\gamma}}{h_1+h_2+h_3}h_i\,(i=1,2)$$

$$R_3 = -2Z_{ti}\ln\sqrt{\gamma}$$

$$L_i = \alpha R_i\frac{2H}{V_t}(i=1,2,3)$$

式中，Z_{ti} 为杆塔波阻抗，$Z_{t1}=Z_{t2}=220\Omega$，$Z_{t3}=150\Omega$；衰减系数 $\gamma=0.7$，阻尼系数 $\alpha=1$，波速 V_t 取光速。

计算结果见表 2 至表 5。

表 2　3V 型水平排列

	1	2	3
Z_{ti}/Ω	220	220	150
R_i/Ω	16.573	13.135	53.501
$L_i/\mu H$	7.00×10^{-6}	5.55×10^{-6}	2.26×10^{-5}

表 3　3V 型三角排列

	1	2	3
Z_{ti}/Ω	220	220	150
R_i/Ω	6.42	27.07	53.501
$L_i/\mu H$	3.14×10^{-6}	1.32×10^{-5}	2.62×10^{-5}

表 4　M 型水平排列

	1	2	3
Z_{ti}/Ω	220	220	150
R_i/Ω	15.517	14.479	53.501
$L_i/\mu H$	6.45×10^{-6}	6.02×10^{-6}	2.22×10^{-5}

表 5　M 型三角排列

	1	2	3
Z_{ti}/Ω	220	220	150
R_i/Ω	6.42	29.78	53.501
$L_i/\mu H$	3.14×10^{-6}	1.46×10^{-5}	2.62×10^{-5}

2）雷电流模型

雷电流波形主要有斜角波，双指数波和 heidler 三种模型。电力系统中目前广泛采用的是双指数波，其表达式为

$$i_L(t) = AI_m(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})$$

仿真雷电流幅值取 250kA，通过计算得 $\alpha=15000,\beta=1860000,A=1.058$。

3）输电线路模型

输电线路模型有贝杰龙模型、Pi 型等效模型、RL 耦合模型、JMarti 模型、Semlyen 模型、Noda 模型等。目前，架空输电线路一般采用 JMarti 模型来仿真，这种模型已经考虑了集肤效应还有避雷线与导线的耦合系数，在仿真雷电波反击时有比较高的运算精度，因此在本文中利用 LCC 的 JMarti 模型，将输电线路看做是包括，避雷线的不换位多导线系统来处理。

4）绝缘子闪络模型

绝缘子闪络模型主要有三种，规程法、相交法和先导法。规程法是按照标准推荐的 50%闪络电压来判断是否闪络；相交法根据绝缘死伏秒特性和电压波形的交点来判断闪络。以上这两种方法目前也在我国输电线路防雷中广泛应用，不过规程法在研究超、特高压耐雷水平的时候会忽略工作电压作用，得到的耐雷水平不准确，而且其本身精度也不够高；相交法相比规程法更为合理，它考虑了雷电过电压的随时间变化，但是它没有考虑到作用在绝缘子两端的过电压并不是标准波，而是短尾波，实验表明，

在短尾波的作用下，以上两种模型都会导致耐雷水平偏低，误差较大。先导法是基于间隙先导发展的计算闪络的方法，它结合空寂长间隙放电的物理过程来判断绝缘子闪络。它将气体放电的物理过程引入闪络模型，更加直观，更加合理，更加精确，为了在特高压防雷计算中使计算结果更加符合实际，因此本文采用先导法来判断绝缘子闪络。

2.2 仿真计算

当所有模型条件给定，运用 ATP-EMTP 可以画出雷电波反击线路的仿真电路图，如图 6 所示，由于篇幅原因，本文只截取雷击杆塔附近线路。

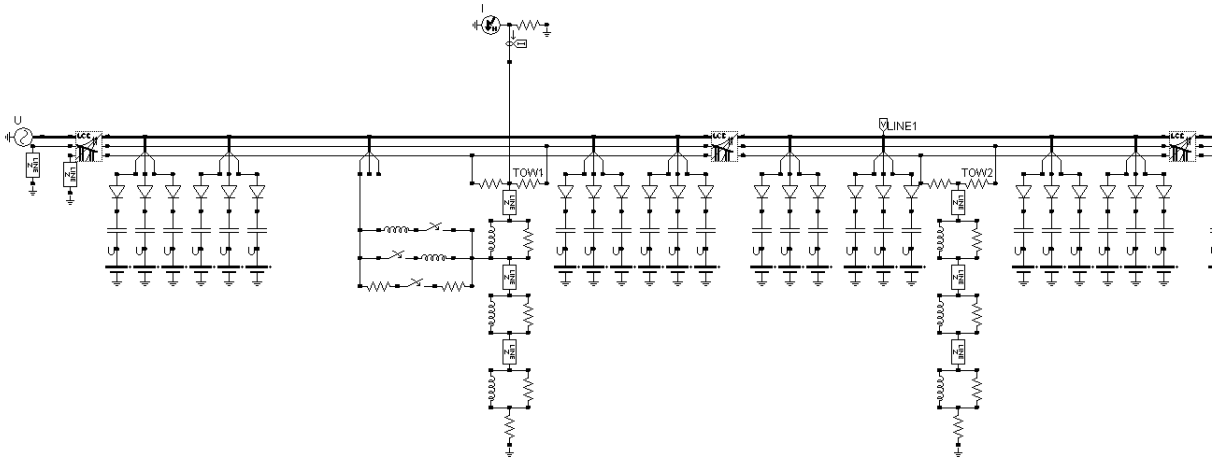


图 6　仿真接线图

图 7 为不同类型杆塔雷击 1#塔 B 相闪络时线路 1 的反击过电压波形图。

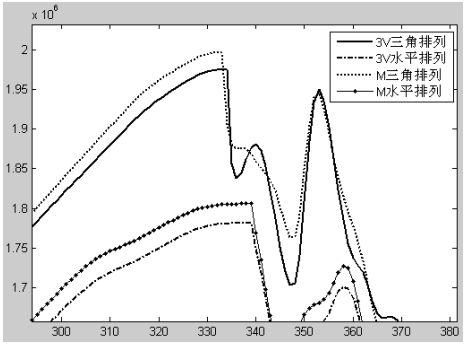


图 7　不同杆塔线路 1 反击过电压波形

表 6　不同杆塔排列反击过电压幅值

	3V 水平	3V 三角	M 水平	M 三角
过电压幅值 /MV	1.78	1.97	1.81	2.00
故障相工作电压 /MV	0.408	0.408	0.408	0.408
波峰出现时间 /μs	3.88	3.33	3.88	3.32

由图 7 和表 6 可看出，当杆塔同为水平排列或者是三角排列时，雷击相雷电过电压幅值和波峰出现时间都很接近，而三角排列的过电压幅值比水平排列过电压幅值更大，提高了 1900kV，波峰出现时间也更早。

3　结论

通过利用电气几何模型，将雷电放电特性同线路的结构尺寸联系起来，计算比较了四种经典杆塔在相同情况下的绕击闪络率，计算结果表明，3V 三角杆塔的绕击闪络率最高，M 三角杆塔绕击闪络率最低。

利用 ATP-EMTP 仿真，分别为四种经典杆塔建立了线路模型，仿真结果表明三角排列的反击过电压幅值较水平排列更大，波峰出现时间更早，其中 M 三角排列杆塔过电压幅值最高，3V 水平杆塔过电压幅值最低。

综合绕击闪络率以及雷反击幅值，在四种经典杆塔中 M 水平杆塔是综合耐雷性能最好的 1000kV 线路杆塔。

参考文献

[1] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京：中国电力出版社，2007.

[2] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京：中国经济出版社，2005.

[3] 维列夏金，吴维韩. 俄罗斯超高压和特高压输电线

路防雷运行经验分析[J]. 高电压技术, 1998(2): 1-4.
[4] 樊争亮, 常美生. 杆塔模型对 1000kV 特高压同塔双回线路反击过电压的影响[J]. 电力学报, 2013(4): 1-4.
[5] 敬海兵. 1000kV 特高压交流输电线路防雷问题研究[D]. 西华大学, 2012.
[6] 崔涛. 输电线路防雷计算中绝缘子串闪络判据研究[D]. 华中科技大学, 2009.
[7] 张永记, 司马文霞, 张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术, 2006(7): 1-5.
[8] 敬海兵, 张彼德. 冲击电晕对 1000kV 交流输电线路耐雷水平的影响分析[J]. 水电能源科学, 2012(2): 1-5.
[9] 敬海兵, 张彼得. 1000kV 特高压交流输电线路防雷电绕击技术[J]. 广东电力, 2011(9): 1-5.
[10] 杨利彬. 考虑冲击电晕的输电线路耐雷性能研究[D]. 重庆大学, 2009.

作者简介

欧阳仁乐（1989-），男，四川省成都市人，硕士研究生，主要从事输电线路防雷方面的研究。

（上接第 3 页）

络相结合的二次聚类算法，实现并且改善了对负荷曲线的分类效果，提取出日负荷特征曲线；利用负荷曲线的相似性和平滑性，根据正态分布理论设定相似性对比阈值和平滑性对比阈值，采用双向对比的方法实现对待检测日负荷曲线的异常数据辨识。算例分析结果表明，本文所采用的方法能够有效辨识出异常负荷数据，且辨识效果较好，具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 莫维仁, 张伯明, 孙宏斌, 等. 扩展短期负荷预测方法的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 6-9.
[2] 康重庆, 夏清, 相年德. 灰色系统参数估计与不良数据辨识[J]. 清华大学学报（自然科学版）, 1997, 37(4): 72-75.
[3] 蒋雯倩, 李欣然, 钱军. 改进 FCM 算法及其在电力负荷坏数据处理的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 1-5.
[4] 刘辉舟, 周开乐, 胡小建. 基于模糊负荷聚类的不良负荷数据辨识与修正[J]. 中国电力, 2013, 46(10): 29-34.
[5] 刘莉, 翟登辉, 姜新丽. 电力系统不良数据检测与辨识方法的现状与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 143-147, 152.
[6] 吴俊. 基于神经网络的电力负荷数据清洗模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
[7] 曾博, 张建华, 丁蓝, 等. 改进自适应模糊 C 均值算法在负荷特性分类的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 42-46.
[8] 朱文婕. 模糊聚类有效性指标研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
[9] 刘莉, 王刚, 翟登辉. k-means 聚类算法在负荷曲线分类中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 65-68, 73.

作者简介

王 珂（1989-），女，江苏淮安人，硕士研究生，研究方向为负荷建模分析、电力系统数据处理。

（上接第 12 页）

[10] LIN L.Influence of soil and conducter of ground grid on satey of the grounding system. IEEE 2000.
[11] American National Standards Institute.IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System. 1983.
[12] 钱金忠.220kV 接地网改造的技术问题研究[D]. 南京: 东南大学工程硕士学术论文, 2006.
[13] 甘艳, 阮江军, 陈允平. 短路故障下接地网电位分布的讨论[J]. 华北电力, 2003(12): 7-10.

作者简介

秦大海（1987-），男，四川省南充市，西华大学，硕士研究生，研究方向为电力系统接地技术。