

# 750 kV 单回和同杆双回输电线路反击耐雷性能

刘渝根, 苏玉萍, 刘敏

(重庆大学电气工程学院高压系, 重庆 400044)

**摘要:** 利用 ATP-EMTP 仿真程序对单回和同杆双回 750 kV 输电线路典型杆塔的反击耐雷性能及其影响因素进行了仿真计算研究。研究中杆塔采用了多波阻抗模型, 考虑了雷电波在杆塔中的传播速度、杆塔呼称高度及杆塔接地电阻等因素的影响, 采用统计法确定 750 kV 超高压线路的反击耐雷性能。研究表明: 杆塔中的传播速度影响不可忽略; 随着杆塔高度的降低, 冲击接地电阻的减小, 线路反击性能增强; 导线排列方式和档距的变化, 对线路反击性能影响很小; 对于 ZB329 和 ZGU315 型杆塔, 仅其单回反击跳闸率都会高于预期雷击跳闸率, 因此在建设 750 kV 输电线路时, 需要认真计算研究输电线路的反击耐雷性能。  
**关键词:** 输电线路; 杆塔模型; 耐雷性能; 反击; 超高压

中图分类号: TM863

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0096-04

## Lightning Protection of Back Striking for 750 kV Single Circuit and Double Circuit Transmission Line

LIU Yu-gen, SU Yu-ping, LIU Min

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper calculates and researches on lightning protection performance of back striking and influence factors for typical towers of 750 kV single circuit and double circuit transmission lines by ATP-EMTP. With towers using multi-wave impedance model and considering factors such as propagation velocity of the lightning wave through the tower, height of tower and grounding resistance etc, a statistical method determines lightning protection performance of back striking for 750 kV superhigh voltage transmission line. Research results show that the effect of propagation velocity of the lightning wave through the tower shouldn't be neglected; along with the reduction of both tower height and surge grounding resistance, the back striking withstand performance enhances; the effect of the arrangement manner of line and lines distance on the back striking withstand performance is very little; only trip-out rate of back flashover of single circuit of the tower of ZB329 and ZGU315 exceeds anticipation lightning trip-out rate, so it is necessary to seriously calculate and research on lightning protection performance of back striking for transmission line when 750 kV transmission lines be constructed.

**Key words:** transmission line; tower model; lightning protection performance; back striking; superhigh voltage

### 0 引言

国内外的运行经验表明, 雷击是造成输电线路跳闸的主要原因。对于我国 500 kV 超高压电网, 由雷击引起的线路跳闸事故占线路总跳闸事故的 40%~70%; 在日本 50% 以上的电力系统事故是由雷击引起的; 美国、前苏联等 12 国的 275~500 kV 总长  $3.27 \times 10^4$  km 输电线路的连续 3 年运行资料表明, 雷害事故占总事故的 60%<sup>[1-6]</sup>。750 kV 将成为西北电网的主网架, 在网架形成初期, 电网结构尚不健全, 其输电线路若遭受雷害事故, 将会造成巨大的损

失。750 kV 线路杆塔相对于 500 kV 线路杆塔较高, 西北电网即将建设穿越秦岭的输电线路途经的地区有着复杂的地形、地貌, 气候条件复杂, 雷电活动较频繁。因此, 有必要对穿越秦岭的 750 kV 单回和同杆双回输电线路的反击耐雷性能进行认真研究。

杆塔模型的选择对进行反击耐雷性能分析十分重要。750 kV 输电线路杆塔采用多波阻抗模型<sup>[7]</sup>。目前, 国外一些学者在试验基础上提出了超高压线路杆塔的多波阻抗模型<sup>[8-11]</sup>, 该模型虽然考虑了波在杆塔上的传播过程, 并根据这一特点, 将杆塔分割成几个部分来模拟, 建立了更精确的模型, 但仍未考虑杆塔不同部位波速的变化。模型采用的是基于杆

收稿日期: 2009-03-16

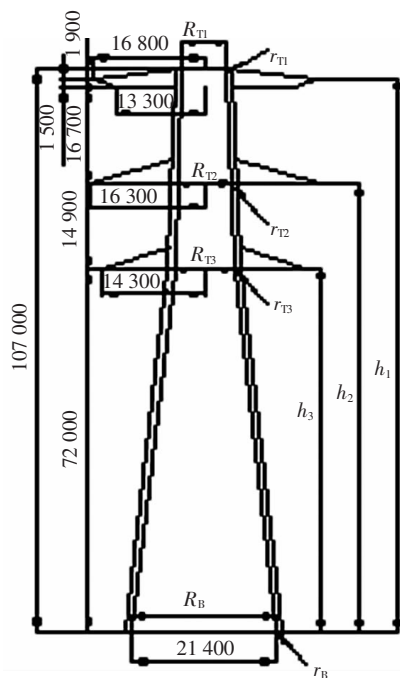
作者简介: 刘渝根(1963), 男, 硕士生导师, 从事电力系统过电压研究。

塔多波阻抗模型, 杆塔不同位置采用不同视在波速的杆塔模型。

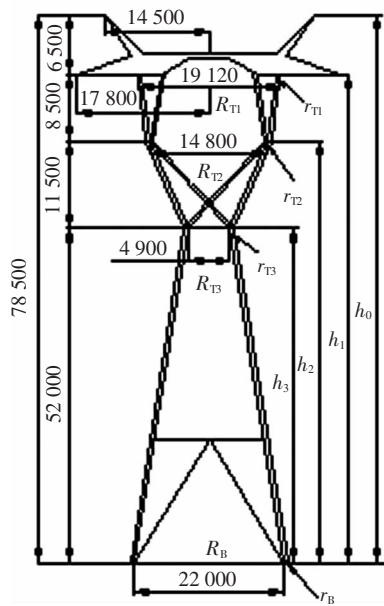
### 1 线路参数和计算模型

#### 1.1 线路参数

系统额定电压 750 kV, 最高运行电压 800 kV; 架空地线一根为 OPGW, 另一根为镀锌钢绞线; 导线型号为 6×LGJ-400/50, 子导线分裂间距 400 mm; 年雷电日 40; 绝缘子采用 35 片 FC-210P; 每片高度为 170 mm。杆塔 ZGU315 型和 ZB329 型的尺寸见图 1。



(a) ZGU315



(b) ZB329

图 1 杆塔尺寸

#### 1.2 计算模型

利用杆塔不同位置用不同视在波速的杆塔多波阻抗模型理论, 建立 ZGU315 和 ZB329 型杆塔模型。图 1 杆塔为 4 导体系统, 并按几何结构分为 3 段, 每一段都分为主体和支架部分, 并假定每一部分分布均匀, 根据各部分几何尺寸可计算出波阻抗。

(1) 主体部分波阻抗<sup>[9]</sup>采用式(1)计算。

$$Z_{Tk} = 60 \ln \frac{2\sqrt{2} h_k}{r_{ek}} - 2 \quad (k=1, 2, 3) \quad (1)$$

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

式(1)、(2)中,  $r_{ek}$  为多导体系统的等效半径;  $h_k$  ( $k=1, 2, 3$ );  $r_{Tk}$  ( $k=1, 2, 3$ );  $R_{Tk}$  ( $k=1, 2, 3$ );  $r_B, R_B$  为图 1 中对应部分长度。

(2) 实测得到在有支架情况下, 波阻抗值通常比无支架情况下的波阻抗约小 10%, 各段支架部分波阻抗为对应主体部分的 9 倍<sup>[8]</sup>, 即

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

同时, 实测也表明, 电磁波通过含有支架的多导体系统时需要更长时间, 模型支架部分的长度是主架对应部分长度的 1.5 倍<sup>[8]</sup>。

(3) 横担波阻抗<sup>[9]</sup>采用式(4)计算。

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

式(4)中,  $h_k$  和  $r_{Mk}$  分别为第  $k$  部分横担所对应的对地高度和等效半径,  $r_{Mk}$  可取为杆塔主体节点处横担宽度的 1/4。

(4) 杆塔每部分的视在波速

由于横担的存在, 增加了杆塔的对地总电容, 杆塔中的视在波速  $v < c$  (光速)。国内外实测到的杆塔  $v$  一般在  $(0.7 \sim 1.0)c$ , 横担越长,  $v$  越低, 据实测,  $v$  可估算为<sup>[12]</sup>

$$v = ch_1 / (h_1 + l_h) \quad (5)$$

式(5)中,  $h_1$  为杆塔高度;  $l_h$  为避雷线横担长度。

根据以上公式计算建立的 ZGU315 和 ZB329 型杆塔多波阻抗 ATP-EMTP 仿真模型见图 2。

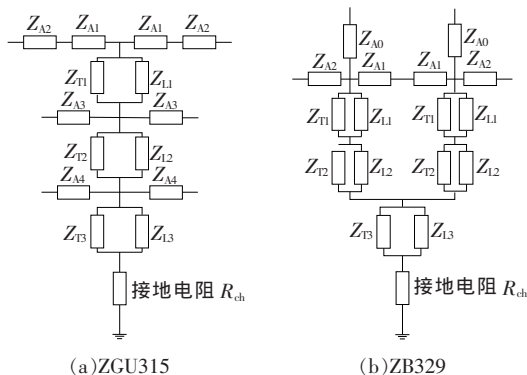


图 2 ZGU315 型和 ZB329 型 ATP-EMTP 仿真计算中的多波阻抗模型

为了避免波从雷击点传到两侧线路的末端后所产生的反射波影响该处过电压的计算值,采用在线路末端分别连接一条与所研究线路具有相同特性的长线路的方法来消除此影响<sup>[13]</sup>。采用相交法<sup>[14]</sup>(即过电压波  $U_0(t)$  和绝缘冲击放电伏秒特性  $U_i-t$  曲线是否相交)闪络判据判断绝缘是否发生闪络。

参考武高所的 35 片 FC-210P 绝缘子串正极性放电的伏秒特性  $V_e$ ,用指数函数拟合

$$V_e = (2\ 270 + 1\ 315e^{-t/5} + 2\ 500e^{-t/0.9} + 1\ 900e^{-t/0.6}) \times 1.207\ \text{kV} \quad (6)$$

在仿真中运用 ATP 的 TACS 子程序构造绝缘子闪络的伏秒特性曲线。

## 2 耐雷计算方法

雷电流波形采用 2.6/50  $\mu\text{s}$  的双指数波;雷击塔顶时,在同塔双回线路 6(2×3)相绝缘子串两端产生的电压会有不同,当一回线路某一相绝缘子串两端电压最先达到其正极性 50%雷电冲击放电电压时,其最小雷电流记为  $I_1$ ;如果此相闪络后杆塔中雷电流继续上升,当另一回线路某一相绝缘子串两端电压最先达到其正极性 50%雷电冲击放电电压时,其最小雷电流记为  $I_2$ 。利用 ATP-EMTP 仿真计算,可不断改变雷电流的大小,计算出一次雷击塔顶的  $I_1$  和  $I_2$ 。实际计算中发现,求出  $I_1$  后继续增大雷电流,可能会在先闪络的一回线路上出现另一相闪络的情况。此时计算出的不是  $I_2$ ,而应继续增大雷电流,直至求出使另一回线路绝缘子闪络的雷电流  $I_2$ 。

由于 750 kV 交流线路工作电压已经相当高,反击时,它在绝缘子串两端电压中占相当大的比率。又因为导线上工频电压瞬时值的随机性,为全面分析线路的雷电性能,需对线路耐雷水平进行统计计算,即需考虑工频电压相角对  $I_1$  和  $I_2$  的影响。现假定,雷击出现于交流 1 个周期的任一角度区间的概率相等,笔者把交流一周等分为 12 个区间,计算出每一个区间的耐雷水平,于是可依式(7)确定线路统计耐雷水平( $I_{Pl}$ )概率,该式同样适用于  $I_{P2}$ 。

$$P(I_{Pl}) = \left( \sum_{n=1}^{12} P_{Ln} \right) / 12 \quad (7)$$

$$\lg P_{Ln} = -I/88 \quad (8)$$

式(7)、(8)中, $P(I_{Pl})$ 为使一回线路雷击闪络的统计耐雷水平概率; $P_{Ln}$ 为使一回线路在交流一周期内的各角度区间内雷击闪络的耐雷水平 ( $I_1$ ) 概率。

由式(7)可分别计算同杆双回输电线路的单回反击跳闸率和双回反击跳闸率

$$N = N_s \eta g P(I_{Pi}) \quad (i=1, 2) \quad (9)$$

式中, $N_s$ 为每 100 km 线路年落雷次数; $\eta$ 为建弧率; $g$ 为击杆率; $P(I_{Pi})$ 为  $I_1$  或  $I_2$  雷电流超过耐雷水平的统计概率。单回线路的反击跳闸率跟同塔双回线路的单回反击跳闸率计算方法相似。

## 3 反击耐雷性能的研究

750 kV 线路的预期雷击跳闸率应低于 500 kV 线路的雷击跳闸率,可按照 500 kV 线路的 85%左右考虑,即约 0.12 次/(100 km·a),以此为评价反击跳闸率大小的依据<sup>[15]</sup>。研究以下各种因素对反击耐雷性能的影响时,以统计法确定线路的反击耐雷性能。

### 3.1 杆塔中的传播波速对反击耐雷性能的影响

采用不同的波速计算 ZB329 型杆塔不同杆塔呼称高  $h_1$  下输电线路的单回反击跳闸率,其结果见图 3。可以看出,杆塔中的传播波速采用式(5)计算的波速计算结果比采用 0.7 倍光速的低,且随着杆塔高度的增加,两种不同波速下计算的结果差别更大,由于杆塔中的传播速度影响不可忽略,计算时采用视在波速来确定线路的反击跳闸率。

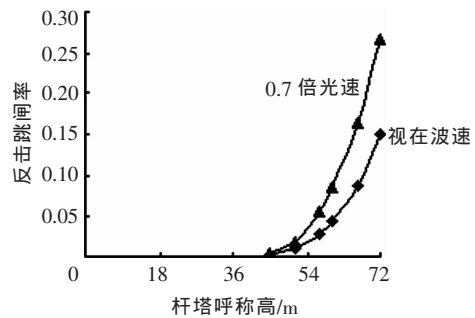


图 3 不同波速下 ZB329 型杆塔单回反击跳闸率

### 3.2 杆塔高度对反击耐雷性能的影响

杆塔越高,引雷面积增大,落雷次数增加,雷电波沿杆塔传播到接地装置时引起的负反射波返回到塔顶或横担所需的时间增长,致使塔顶或横担电位增高,易造成反击,使雷击跳闸率增加。图 4 为  $R_{ch}$  取 10  $\Omega$ , 档距为 400 m 时,ZB329 型杆塔不同杆塔呼称高  $h_1$  和 ZGU315 型杆塔不同杆塔呼称高  $h_3$  下输电线路的反击耐雷性能。

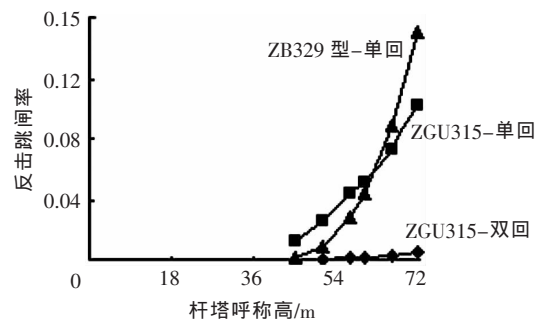


图 4 杆塔呼称高与反击跳闸率的关系

由图4知,对于ZGU315型杆塔,双回跳闸率均不大于0.0054次/(100 km·a),它仅占预期雷击跳闸率的4.5%,不是引起雷击跳闸的主要原因;ZB329型和ZGU315型杆塔的单回反击跳闸率都随呼称高增大而增大,当呼称高为72 m时,ZB329型杆塔的单回反击跳闸率都超过了预期雷击跳闸率0.12次/(100 km·a),再加上相应的绕击跳闸率,ZB329型杆塔的单回跳闸率会更大。

### 3.3 杆塔冲击接地电阻对反击耐雷性能的影响

冲击接地电阻是输电线路设计时一个重要参数。在高压/超高压输电线路的防雷设计中,降低杆塔冲击接地电阻是提高反击耐雷水平的主要措施之一。图5为档距为400 m,不同接地电阻下ZB329和ZGU315型杆塔输电线路的反击耐雷性能。

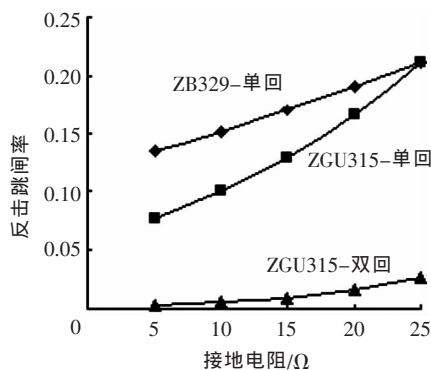


图5 接地电阻与反击跳闸率的关系

由图5知,ZGU315型杆塔的双回反击跳闸率很小,当接地电阻为5 Ω时,ZB329杆塔单回跳闸率已大于预期跳闸率,如果再考虑相应的绕击跳闸率,其耐雷性能更差,而当接地电阻 $\geq 15 \Omega$ 时,ZGU315型杆塔单回跳闸率大于预期跳闸率,同样,再考虑相应的绕击跳闸率,其耐雷性能也更差。

### 3.4 不同档距对反击耐雷性能的影响

对于750 kV单回和同杆双回输电线路,采用不同档距,单回线路的单回反击跳闸率和同杆双回线路的单回和双回反击跳闸率基本无变化。表1的计算结果表明,档距的变化对ZB329和ZGU315型杆塔反击跳闸率都影响不大。

表1 不同档距下同杆双回线路的反击跳闸率 次/(100 km·a)

塔型	档距/m	反击跳闸率			
		400	600	800	1000
ZB329	单回跳闸率	0.1507	0.1506	0.1507	0.1507
	双回跳闸率	0.0054	0.0053	0.0054	0.0054
ZGU315	单回跳闸率	0.1012	0.1010	0.1010	0.1011
	双回跳闸率	0.0054	0.0053	0.0054	0.0054

### 3.5 同塔双回导线不同排列方式对反击耐雷性能的影响

对750 kV同杆双回输电线路,不同的排列方

式,其反击跳闸率有所不同。对ZGU315型杆塔呼称高分别为60 m和72 m时导线正相序或逆相序排列方式的反击闪络率进行了仿真计算,档距为400 m,接地电阻为10 Ω,计算结果见表2。计算结果表明:杆塔呼称高为60 m或72 m,无论导线正相序排列还是逆相序排列,同杆双回线路的单回反击跳闸率和双回反击跳闸率差别不大。

表2 不同的排列方式下同杆双回线路的反击跳闸率 次/(100 km·a)

排列方式	呼称高/m	反击跳闸率	
		单回跳闸率	双回跳闸率
正相序排列	72	0.1069	0.0058
	60	0.0443	0.0016
逆相序排列	72	0.1012	0.0054
	60	0.0515	0.0023

## 4 结语

对750 kV单回和同杆双回输电线路的反击耐雷性能进行了研究,在建立了杆塔多波阻抗模型基础上,还考虑了杆塔不同位置采用不同的视在波速;在分析各种因素对反击耐雷性能影响时,利用统计法来确定线路的反击耐雷性能。计算结果表明:

(1)用数值仿真计算反击跳闸率时,杆塔中的传播速度影响不可忽略;杆塔呼称高对线路反击耐雷性能的影响十分明显;对ZB329型杆塔,当呼称高为72 m、接地电阻为10 Ω时,单回反击跳闸率为0.1507次/(100 km·a),大于预期雷击跳闸率0.12次/(100 km·a),加上相应的绕击跳闸率,单回跳闸率会更大;

(2)接地电阻对线路反击耐雷性能的影响明显,如图5中随着接地电阻的增加,ZB329型单回线路和ZGU315型同杆双回线路的单回反击跳闸率增加趋势明显;对于ZB329型单回线路,接地电阻即使为5 Ω,仅单回反击跳闸率为0.1341次/(100 km·a),大于预期雷击跳闸率;

(3)档距的变化,对线路反击性能影响很小;排列方式对同杆双回输电线路的反击影响不大;因此在建设750 kV输电线路时,需要认真计算研究输电线路的反击耐雷性能。

## 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分析[J].高压电技术,1998,24(2):76-79.
- [2] 钱冠军.500 kV线路直击雷典型事故调查研究[J].高压电技术,1997,23(2):73-75.
- [3] ERIKSSON A J.The Incidence of Lightning Strikes to Power Line[J].IEEE Trans. on Power Delivery,1987,2(3):871-886.

(下转第103页)

从优化结果及电场强度分布图可知,优化后的结果满足设计要求,耐电压性能得以提高,产品运行的可靠性得到保证。

目前,该隔离开关已经在山东泰开高压开关有限公司内部完成了全部的绝缘试验(1 min 740 kV工频耐压,1 675 kV的雷电冲击和1 300的操作冲击试验),绝缘水平完全达到国家标准。

## 5 结论

利用有限元方法,首先计算了550 kV GIS隔离开关中的电场分布。进一步引进了响应表面方法,实现了响应表面方法与有限元的结合,完成了550 kV GIS隔离开关中的电场优化设计。

优化结果表明,550 kV GIS隔离开关中的电场经过优化后,分布更加均匀,符合设计要求。同时提高了产品运行的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 清华大学高压教研室.高压断路器[M].北京:清华大学出版社.
- [2] 张节容.高压电器原理及应用[M].北京:清华大学出版社,1989.

- [3] 张国瑞.有限元法[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [4] 盛剑霓.工程电磁场数值分析[M].西安:西安交通大学出版社,1991.
- [5] EGIZIANO L,TUCCI V,PETRARCA C,et al.A Galerkin Model to Study the Field Distribution in Electrical Components Employing Nonlinear Stress Grading Materials[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(6):765-773.
- [6] KUANG Jin-bo,LAVERS J D,STEVEN BOGGS.Program for Transient Nonlinear Finite Element Analysis with Applications to Coupled Field Programs [C]//10th International Symposium on High Voltage Engineering. Montreal Quebec Canada,1997:25-29.
- [7] 冯康.数值计算方法[M].北京:国防工业出版社,1978.
- [8] 汪蕙.电子电路的计算机辅助分析与设计方法[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [9] 施天谟.计算传热学[M].北京:科学出版社,1987.
- [10] 马西奎.电磁场理论及应用[M].西安:西安交通大学出版社,2000.
- [11] 黎斌.SF<sub>6</sub>高压电器[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [12] 宫瑞磊.基于响应表面法的含非线性应力管的电缆终端的材料与结构的参数优化[D].西安:西安交通大学,2005.

(上接第99页)

- [4] IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines[J].IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1985,104(4):919-932.
- [5] 陈维江,孙昭英,王献丽,等.35 kV 架空送电线路防雷雷并间隙研究[J].电网技术,2007,31(2):65-69.
- [6] 叶会生,何俊佳,李化,等.雷击高压直流线路杆塔时的过电压和闪络仿真研究[J].电网技术,2005,29(21):35-39.
- [7] 陈梁金,金祖山,高亚栋.750 kV 输电线路模型研究[C]//中国电机工程学会高压专业委员会过电压及绝缘配合学组2006年学术年会论文集,2006:25-30.
- [8] YAMADA T,MOCHIZUKI A,SAWADA J,et al.Experimental Evaluation of a UHV Tower Model for Lightning Surge Analysis[J].IEEE Trans on Power Delivery,1995,10(1):393-402.
- [9] HARA T,YAMAMOTO O.Modeling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis [J].IEEE Proceedings-generation, Transmission and Distribution,1996,143(3):283-289.
- [10] MARTINEZ J A,CASTRO-ARANDA F.Tower Modeling for Lightning Analysis of Overhead Transmission Lines[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting,Toronto,2005(2):1 345-1 350.
- [11] 张颖,高亚栋,杜斌,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):365-368.
- [12] 梁义明,葛栋.同塔多回路线路防雷计算中的杆塔模型[J].高压技术,2006,32(1):76-77.
- [13] 贾磊,张桂红,舒亮,等.计算输电线路绕击跳闸率的新模型[J].西安交通大学学报,2007,41(2):223-227.
- [14] 陈国庆,张志劲,孙才新,等.输电线路耐雷性能计算方法的研究现状分析[J].重庆大学学报,2003,26(5):137-142.
- [15] 戴敏,周沛洪.750 kV 同塔双回交流输电工程防雷保护研究[J].输配电技术,2007(10):1-5.