

典型 500 kV 双回路直线转角塔雷击故障分析与思考

路永玲¹, 周志成¹, 刘 洋¹, 陶风波¹, 周 立¹, 赵贤根², 何俊佳²

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要:文中通过计算和试验对实际发生的典型 500 kV 双回路直线转角塔雷击故障进行详细分析。对故障塔结构及绝缘配置参数进行调研分析,推导避雷线保护角、绝缘子坐标与绝缘子偏角之间的关系,建立雷电绕击计算模型并计算验证故障塔跳闸原因为雷电绕击故障杆塔转角内侧中相,结合实际地闪密度开展雷击跳闸风险评估;同时根据故障塔实际尺寸开展直线转角塔雷电绕击模拟试验,模拟比例为 35:1,统计不同相导线绕击次数和放电路径;总结得出直线转偏角对雷击跳闸率及风险等级的变化规律,提出在转角内侧中相加装线路避雷器、开展绝缘子偏角校核等运维改造建议。

关键词:直线转角塔;模拟试验;故障分析;绕击

Analysis on Typical Lightning Failure of 500 kV Double-circuit Straight Angle Tower

LU Yongling¹, ZHOU Zhicheng¹, LIU Yang¹, TAO Fengbo¹,
ZHOU Li¹, ZHAO Xiangen², HE Junjia²

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Calculation and test were conducted to analyze typical lightning failure of 500 kV double-circuit straight angle tower. The structure and insulation parameters of a struck tower were analyzed to derive the relationship of insulator declination angle with lightning protection angle and insulator's coordinates, and a computational model of shielding failure was built. Calculation with the model proved that the tripping of the tower was due to lightning strike on the middle phase in the inside corner of the tower. Actual lightning ground flash density was considered in the risk assessment of lightning trip. Furthermore, a test platform was built to carry out the test of shielding failure of the double-circuit straight angle tower with a simulation proportion of 1:35 of the actual tower size, and the numbers of shielding failures and discharge paths on different phase conductors were obtained. Hence, the variations of lightning trip rate and risk level with insulator declination angle were summarized. It is suggested that lightning arrester be installed on the middle phase of the inside corner and the insulator declination angle be calibrated.

Key words: straight angle tower; simulation test; failure analysis; shielding failure

0 引言

在高电压等级线路中因线路走廊受地理空间限制,有一定数量双回路直线转角塔投入运行,与直线塔相比,该类塔型结构呈不对称性,具有一定水平转角度数^[1-4],投运后绝缘子与竖直方向具有一定夹

角。随着投运地区雷电活动不断增强,直线转角塔结构特征对其耐雷特性影响不断凸显,雷击跳闸故障时有发生,给线路运行带来较大困扰。文中对典型 500 kV 双回路直线转角塔雷击故障进行全面分析,提出改进措施和建议,提高线路耐雷水平。

1 故障概况

收稿日期:2016-03-19; 修回日期:2016-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51407026)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51407026).

2011 年 07 月 18 日 17 时 50 分,江苏某 500 kV

线路B相跳闸,线路所在地区当时为雷暴雨天气;跳闸时该线路56号塔(直线转角塔)发生巨响,绝缘子(转角内侧中相)周围伴有火花放电;杆塔处于农田之中,地形开阔,接地完好未见放电痕迹;登杆巡视发现56号塔B相绝缘子(长棒瓷)招弧角有明显放电痕迹,绝缘子瓷质部分外观良好,判定该次跳闸原因为雷击。杆塔全景和招弧角放电痕迹见图1。



(a)故障塔全景 (b)绝缘子招弧角放电痕迹

图1 直线转角塔雷击故障情况

Fig. 1 Lightning failure scene of straight angle tower

故障塔所在地区属江苏南部,雷电活动较为强烈^[5-7],据历史故障数据统计,该直线转角塔在2007年7月8日、2009年3月21日、2010年7月22日均发生了雷击跳闸故障,且故障相别与该次故

障相别一致,因此56号双回路直线转角塔为典型雷电易击塔。

2 故障杆塔防雷特性分析

2.1 杆塔及绝缘子参数

故障杆塔结构及绝缘子参数见表1,杆塔型号为SZJ2-33,呈左右不对称,其水平转角度数为 16° ,杆塔绝缘子为长棒瓷绝缘子,型号为 $3 \times LP75/19+18/1\ 500$,接地电阻为 $2.5\ \Omega$ 。

2.2 计算分析

2.2.1 绕击分析

直线转角塔中绝缘子串向一侧倾斜,直接影响了线路的保护角发生变化。保护角最终值与导线距避雷线的水平距离、垂直距离和绝缘子串长、绝缘子串倾斜角度有关,见图2。图2中: l_g 为地线悬挂点距杆塔中心距离; l_c 为绝缘子串悬挂点距杆塔中心距离; h 为绝缘子串悬挂点距地线高度; L 和 γ 分别为绝缘子串长及倾斜角(绝缘子串朝外侧倾斜为正、内侧倾斜为负),则从几何关系得出保护角 α 计算式为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l_g - l_c + L \sin \gamma}{h + L \cos \gamma}\right) \quad (1)$$

表1 杆塔结构及绝缘子参数

Table 1 Parameters of tower structure and insulator

杆塔型号	呼高/m	A相导线高度/m	B相导线高度/m	C相导线高度/m	避雷线高度/m	绝缘子串长/mm	绝缘子干弧距离/mm
SZJ2-33	33.000	55.285	40.985	27.685	65.600	5 177.000	14 001.000

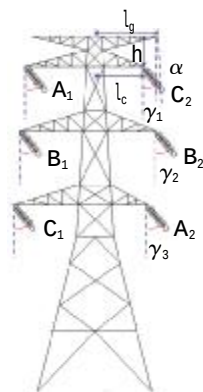


图2 故障直线转角塔结构

Fig. 2 Structure diagram of failure straight angle tower

绝缘子串倾斜后,导线的坐标将随绝缘子串长 L 及倾斜角 γ 发生变化。记绝缘子串悬挂点坐标为 (x_s, y_s) ,推导得出杆塔转角内侧相导线的跳闸率时,其坐标由式(2)得出;推导得出杆塔转角外侧相导线的跳闸率时,其坐标由式(3)得出。

$$\begin{cases} x_c = x_s + L \sin \gamma \\ y_c = y_s - L \cos \gamma \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_c = x_s - L \sin \gamma \\ y_c = y_s + L \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

计算临界击距和暴露距离依赖于导线和地线的位置关系,采用电气几何模型(EGM)进行雷电绕击计算时须考虑以上推导关系,击距公式选取IEEE—1997推荐、击距系数取0.8,按Japan学者推荐的入射角分布考虑雷电入射角^[8-11],计算结果见表2。计算结果表明,56号杆塔 B_2 相绕击率高,最易遭受雷电绕击,与实际运行经验相符。

表2 故障塔绕击分析结果

Table 2 Calculation results of shielding failure on failure tower

相别	最大绕击雷电流/kA	绕击率/%
A_1	16.25	0.673
B_1	17.73	13.162
C_1	6.95	0.079
A_2	16.98	1.814
B_2	18.04	13.192
C_2	6.91	0.076

2.2.2 反击分析

反击计算采用电磁暂态仿真分析法^[12-13],计算条件为:雷电流波为 $2.6/50\ \mu s$ 双指数波,雷电通道

波阻抗取 $400\ \Omega$, 杆塔模型采用固定波阻抗(横担 $300\ \Omega$, 塔身 $150\ \Omega$), 输电线路采用 Jmarti 模型, 闪络判据采用相交法、采用试验数据拟合的公式计算感应电压。计算得到的 56 号杆塔各相绝缘子串两端过电压见图 3。图 3 中: A_1 、 B_1 、 C_1 分为位于 56 号杆塔转角外侧的上、中、下横担; A_2 、 B_2 、 C_2 分为位于 56 号杆塔内侧的上、中、下横担。

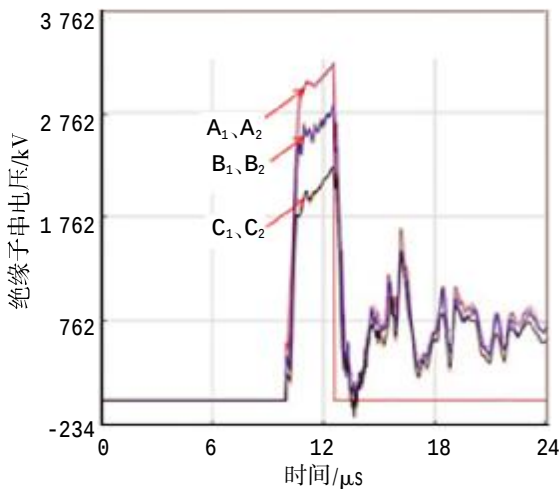


图 3 故障塔绝缘子串过电压波形

Fig. 3 Over-voltage waveform on insulator strings of failure straight angle tower

计算结果表明: 雷击杆塔时, 上横担绝缘子串过电压最高, 若为反击故障, 则故障相为 A_1 相和 A_2 相, 而实际查巡结果为 B_2 相闪络跳闸, 结合绕击计算结果判断 56 号直线转角塔的雷击跳闸事件由雷电绕击 B_2 (转角内侧中相)引起。

2.3 试验分析

2.3.1 试验平台搭建

文中基于雷电放电物理基础和电气几何模型, 参照国内采用较多的输电线路杆塔绕击模拟试验方法^[14-16], 对实际故障直线转角塔展开模拟试验研究。综合考虑试验场地和试验设备参数, 按照 35:1 的比例将故障塔 SZJ2-33 及前后两基直线塔 SZT2-42 按 35:1 的比例缩小, 高度分别为 1.82、1.91、1.91 m, 调整基塔 3 的固定位置, 使直线转角塔导线走向与实际水平转角相近。

避雷线采用直径为 1.0 mm 裸铜丝模拟, 导线采用直径为 2.0 mm 裸铜丝模拟; 绝缘子串采用环氧棒加工, 且其偏角可调; 放电电极采用长度为 2.0 m, 直径为 18.0 mm 的不锈钢棒, 与水平面倾斜 30° 布置; 放电过程采用 FASTCAM SA-X2 型高速摄影仪, 拍摄速度为 100 000 fps。试验平台示意图见图 4。

2.3.2 试验方法

1) 该试验将电极布置在该塔转角内侧来模拟雷



图 4 模拟试验平台搭建

Fig. 4 Building of simulation test platform

击下行先导, 见图 5。空间位置零点定在直线转角塔(模型杆塔 2)的塔底中心, 电极位置在直线 $(0, 1.6, z)$ 上移动。

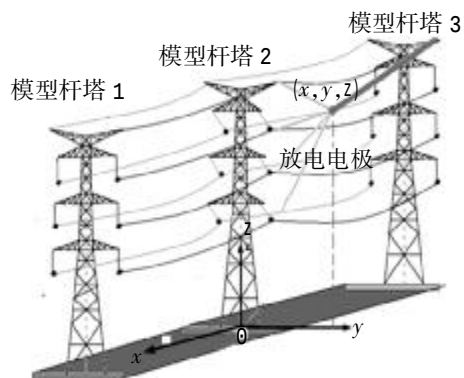


图 5 试验方法示意图

Fig. 5 Test method schematic diagram

2) 对电极尖端的每个位置均施加冲击电压进行放电试验, 放电次数均为 50 次, 对击中避雷线、导线相别(分上、中、下相)及地面的次数进行记录。当 48-50 次放电均击中避雷线及大地时, 电极尖端位置为绕击最大和最小高度。

2.3.3 试验结果

试验波形选择选取波头时间为 $250\ \mu\text{s}$ 、波尾时间为 $2\ 500\ \mu\text{s}$ 的标准操作波冲击电压^[17-19], 其幅值约为每次试验的空间 90%~100%击穿电压; 在 1 m 到 2 m 范围内改变电极高度 (1 m 和 2 m 为试验得出的绕击概率为 0 的位置) 进行绕击概率试验, 分别记录击中上相、中相、下相、避雷线和地面的次数, 统计记录结果见表 3, 可以看出在中相导线绕击次数最多, 与历史数据记录吻合, 表明该试验平台试验结果较为可靠; 试验过程中击中不同位置的电弧放电路径见图 6。

3 故障杆塔雷击风险评估

3.1 雷击闪络风险评估等级划分

江苏地区地闪密度的平均值为 $2.843\ \text{次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 国网公司规程要求计算 500 kV 线路的杆塔对应的

表 3 不同电极高度下击中位置及次数

Table 3 Hitting positions and time sunder different electrode heights

击中位置	电极高/m																				
	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00
避雷线	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	7	10	19	19	24	23	38	45	49
上相	0	0	0	0	0	0	1	5	5	11	18	17	14	23	14	21	22	23	10	5	1
中相	0	3	7	15	19	21	35	37	39	37	32	29	28	17	17	10	3	4	1	0	0
下相	0	2	1	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
地面	50	45	42	33	31	28	12	8	6	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

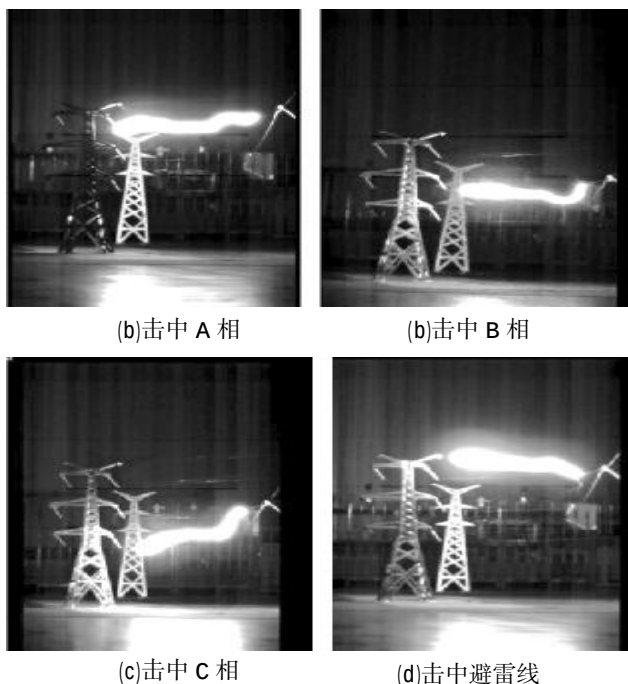


图 6 击中不同位置时的放电路径

Fig. 6 Discharge path of striking different positions

雷击跳闸率考核指标值为 0.143 次/($100 \text{ km} \cdot \text{a}$)。综合考虑 500 kV 线路历年雷击跳闸特征、运行经验和参数特征,确定 500 kV 线路的杆塔雷击跳闸率中绕反击比例为 $9:1$, 因此将 500 kV 线路的绕击跳闸率指标值定为 0.128 次/($100 \text{ km} \cdot \text{a}$), 雷击闪络风险评估等级划分^[20]见表 4。

表 4 江苏 500 kV 线路绕击风险评估等级划分指标Table 4 Risk assessment classification index of shielding failure on Jiangsu 500 kV line

绕击跳闸率/(次· $100^{-1} \text{ km}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	$P_i < 0.064$	$0.064 \leq P_i < 0.128$	$0.128 \leq P_i < 0.192$	$P_i \geq 0.192$
等级	A	B	C	D

3.2 故障杆塔风险评估

改变 SZJ2 型杆塔的呼高和绝缘子串偏角进行绕击风险评估,评估结果见图 7。从图 7 中可以看出, SZJ2 型杆塔的绕击风险等级在 $27 \sim 42 \text{ m}$ 呼高和 $20^\circ \sim 60^\circ$ 绝缘子串偏角的范围内变化不一,从等级 A 到

等级 D 均有,因此,在线路防雷方案设计时,应根据杆塔实际情况,选择降低绕击风险等级的防雷措施。

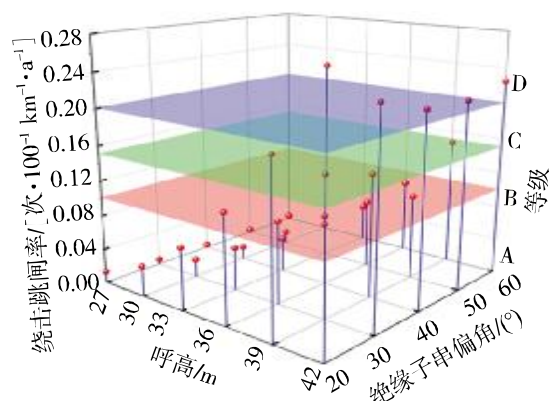


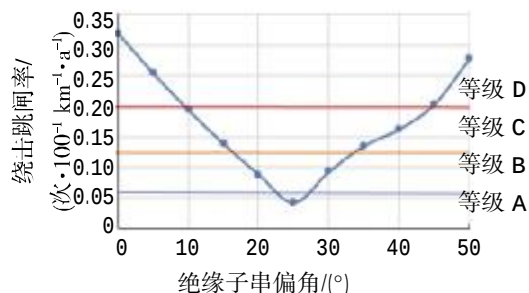
图 7 SZJ2 型杆塔绕击风险评估结果

Fig. 7 Risk assessment results of shielding failure on SZJ2 tower

3.3 绝缘子串偏角对雷击风险等级的影响

考虑到直线转角塔绕击风险和绝缘子串偏角 γ 密切相关,该节将 γ 每隔 5° 作为一个计算点,计算范围为 $0^\circ \sim 50^\circ$, 计算对象为典型双回路直线转角塔 SZJ2-33。

故障塔绕击跳闸率及风险等级随 γ 变化曲线见图 8。从图 8 可以看出,随着绝缘子串偏角从 $0^\circ \sim 50^\circ$ 变化,风险等级先变小后变大,即存在某一临界偏角,使得直线转角塔雷击跳闸风险达到最低,雷击跳闸率与绝缘子串偏角之间具有“U”型曲线变化规律。当绝缘子串偏角不断增大,雷击风险等级可达到 C 或 D 级,需采取一定的防雷措施。

图 8 故障塔绕击跳闸率及风险等级随 γ 变化曲线Fig. 8 Variation of lightning trip rate and risk level with γ

4 结论

1) 双回路直线转角塔中绝缘子串向一侧倾斜, 倾斜角的大小与避雷线的保护角直接紧密相关; 在运行施工过程中绝缘子串偏角的变化, 导致线路存在雷击跳闸隐患。

2) 对于 500 kV 双回路直线转角塔, 其水平转角的内侧中相导线暴露弧最大, 下相导线暴露弧最小, 建议杆塔运维时在中相加装线路避雷器, 提高杆塔耐雷水平。

3) 随着绝缘子偏角变化, 双回路直线转角塔风险等级先变小后变大, 雷击跳闸率与绝缘子偏角之间呈“U”型曲线变化规律, 在设计改造过程中应校核绝缘子偏角的大小, 选取合理的防雷改造措施。

参考文献:

- [1] 赵全江, 李翔, 宋志强, 等. 500 kV 紧凑型直线小转角塔的设计研究[J]. 电力建设, 2005, 26(9): 22-25.
ZHAO Quanjian, LI Xiang, SONG Zhiqiang, et al. Design and study on 500 kV compact-type suspension small angle towers[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(9): 22-25.
- [2] 张瑚, 黄欲成, 马凌, 等. 500 kV 双回路直线小转角塔设计[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 92-96.
ZHANG Hu, HUANG Yucheng, MA Ling, et al. Design on 500 kV double circuits small-angle suspension tower[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 92-96.
- [3] 梁浩. 小转角直线杆塔在上海电网中的应用[J]. 上海电力, 2008(1): 51-54.
LIANG Hao. Application of small-angle suspension Shanghai power grid[J]. Shanghai Electric Power, 2008(1): 51-54.
- [4] 杨立. 送电线路直线杆塔增加小转角的探讨[J]. 贵州电力技术, 2003(53): 11-15.
YANG Li. Discussion on the application of small-angle suspension tower in transmission line[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2003(53): 11-15.
- [5] 路永玲, 刘洋, 高嵩, 等. 江苏电网 2005 至 2013 年架空输电线路雷击跳闸分析及防护[J]. 电瓷避雷器, 2015(1): 49-53.
LU Yongling, LIU Yang, GAO Song, et al. Analysis of lightning trip and protection measures of overhead transmission lines in Jiangsu power grid from 2005 to 2013[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(1): 49-53.
- [6] 刘贞瑶, 顾林, 叶辉. 江苏电网 2004—2006 年架空输电线路雷击跳闸分析[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(2): 42-45.
LIU Zhenyao, GU Lin, YE Hui. Analysis of lightning flashover for overhead transmission lines from 2004 to 2006 in Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(2): 42-45.
- [7] 徐鸣一, 王振会, 樊荣, 等. 江苏省地闪密度及雷电流幅值分布[J]. 南京信息工程大学学报, 2010, 2(6): 557-561.
XU Mingyi, WANG Zhenhui, FAN Rong, et al. Distribution of lightning density and lightning current amplitude in Jiangsu province[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2010, 2(6): 557-561.
- [8] 许飞, 王建国, 周文俊, 等. 改进电气几何模型对输电线路绕击率的计算及典型故障分析[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 205-207.
XU Fei, WANG Jianguo, ZHOU Wenjun, et al. Calculation of shielding failure rate on transmission line based [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 205-207.
- [9] 朱时阳, 邓雨荣. 基于改进电气几何模型的输电线雷电屏蔽性能的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 56-58.
ZHU Shiyang, DENG Yurong. Research on shielding lightning performance of electric transmission line with the improved EGM[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 56-58.
- [10] 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, et al. Study on the lightning protection performance of shielding failure for UHV & EHV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 1-6.
- [11] 刘家芳, 许飞. 超高压输电线路雷击跳闸典型故障分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 114-115.
LIU Jiafang, XU Fei. Analysis on typical accident of EHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 114-115.
- [12] 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(自然科学版), 2003, 26(5): 137-142.
CHEN Guoqing, ZHANG Zhijin, SUN Caixin, et al. Analyze the present status in the calculation methods of lightning protection performance for transmission line [J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2003, 26(5): 137-142.
- [13] DOMMEL H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.
DOMMEL H W. Power system electromagnetic transient calculation theory[M]. LI Yongzhuang, LIN Jiming, CENG Zhaohua, Translation. Beijing: China Water Power Press, 1991.
- [14] 王羽, 文习山, 蓝磊, 等. 输电线路杆塔塔头引雷能力模拟试验研究[J]. 高压电器, 2012, 18(6): 56-60.
WANG Yu, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Study on simulation test for triggered lightning ability of transmission line tower head[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 18(6): 56-60.
- [15] 钱冠军, 王晓瑜, 徐先芝, 等. 输电线路绕击分散性的试验研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(3): 17-20.

(下转第 189 页)

- ZHAO Jianzhou, YAO Hengzhi, YUAN Aoqi, et al. Stability analysis and study on bottom shielding loss test of current transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(4):46-50.
- [14] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 42-46.
- ZHANG Chaoyang, ZHANG Chunxi, WANG Xiaoxiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30):42-46.
- [15] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.
- LI Yingming, ZHENG Tuofu, ZHOU Shuibin, et al. A realization solution of key links for merging unit in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11):93-98.
- [16] 张晓华, 牛元立, 何刚, 等. 电子式互感器采样系统固有延时测试研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(7):42-45.
- ZHANG Xiaohua, NIU Yuanli, HE Gang, et al. Study on inherent delay test of electronic transformers sampling system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(7):42-45.
- [17] 周斌, 鲁国刚, 黄国方, 等. 基于线性 Lagrange 插值法的变电站 IED 采样值接口方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3):86-90.
- ZHOU Bin, LU Guogang, HUANG Guofang, et al. A sampled values interface method for substation IED based on the linear Lagrange interpolation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3):86-90.
- [18] 闫志辉, 胡彦民, 周丽娟, 等. 重采样移相技术在过程层 IED 中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6):64-66.
- YAN Zhihui, HU Yanmin, ZHOU Lijuan, et al. The application of resample phase shifter technique in process layer IED[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 64-66.
- [19] 徐广辉, 李友军, 王文龙, 等. 数字化变电站 IED 采样数据同步插值的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4):49-52.
- XU Guanghui, LI Youjun, WANG Wenlong, et al. Design of a synchronization and interpolation algorithm of sampled values for digital substation IED[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4):49-52.
- [20] 赵丽华, 高进强, 郭相国. 浅谈电力设备智能化[J]. 高压电器, 2010, 46(12):1-4.
- ZHAO Lihua, GAO Jinqiang, GUO Xiangguo. Discussion on intelligent electric power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12):1-4.
- [21] 鄢志平, 聂一雄, 邓忠华. 基于 IEC61850 的合并单元与二次设备通信研究[J]. 高压电器, 2009, 45(2):27-30.
- YAN Zhiping, NIE Yixiong, DENG Zhonghua. Research on communication between merging unit and secondary devices based on standard IEC 61850[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2):27-30.
- [22] 臧春艳, 胡李栋. 智能型开关电器的研发现状与分析[J]. 高压电器, 2011, 47(3):1-5.
- ZANG Chunyan, HU Lidong. Development and analysis of intelligent switch devices[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):1-5.

曾林翠(1975—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电子式互感器及智能电网。

白世军(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能变电站电磁兼容及电力设备故障诊断与状态评估。

李毅(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。

(上接第 183 页)

- QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, XU Xianzhi, et al. Study of scatter of shielding failure on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(3): 17-20.
- [16] 郑家松, 李广福, 季征南, 等. 山区 500 kV 输电线路雷电屏蔽性能模型试验研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5):119-122.
- ZHENG Jiasong, LI Guangfu, JI Zhengnan, et al. Small-scale model experimental study on lightning shielding performance of 500 kV transmission lines in mountain area[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 119-122.
- [17] 王羽, 文习山, 胡京, 等. 特高压交流输电线路中相绕击模拟试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 1-5.
- WANG Yu, WEN Xishan, HU Jing, et al. Simulation test of shielding failure of UHVAC transmission line's intermediate phase[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 1-5.
- [18] 钱冠军, 王晓瑜, 汪雁. 雷电屏蔽模拟理论与试验技术的研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 26-28.
- QIAN Guanjun, WANG Xiaoyu, WANG Yan. The lightning shielding simulation theory and test technology[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(2):26-28.
- [19] CRAWFORD D E, RAKOV V A, UMAN M A, et al. The close lightning electromagnetic environment: Dart-leader electric field change versus distance[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D14): 14909-14917.
- [20] 张瑞. 输电线路雷击闪络风险评估研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
- ZHANG Rui. Research on lightning flashover risk assessment of the transmission lines[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.
- 路永玲(1988—), 女, 工程师, 从事输电线路防雷与接地、大气外绝缘等专业技术及管理工作。