

## 4 次雷电流实测与雷电定位系统观测的比较分析

陈喜鹏<sup>1</sup>, 蔡汉生<sup>1</sup>, 李锐海<sup>1</sup>, 李哲<sup>2</sup>, 陈绍东<sup>3</sup>

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510080; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430074; 3. 广东省防雷中心, 广州 510080)

**摘要:** 雷电流波形及幅值是电网设备防雷设计及改造的重要基础参数, 文章通过研制具备 GPS 定位和对时功能的高精度雷电流实测装置, 利用高塔直击雷监测和人工火箭引雷试验, 监测积累南方电网区域内的雷电流特征参数, 并将雷电流实测结果与南方电网雷电定位系统遥测结果进行对比分析。4 次雷电流实测数据表明, 在参与定位探头个数较多的情况下, 雷电定位系统定位偏差为 172~675 m, 幅值测量偏差为 -22.8%~4.5%。

**关键词:** 南方电网; 雷电定位系统; 雷电流; 实测; 幅值; 误差

中图分类号: TM863

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0072-05

### Comparative Analysis of Four Lightning Current Measure Results with Lightning Location System

CHEN Xipeng<sup>1</sup>, CAI Hansheng<sup>1</sup>, LI Ruihai<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>2</sup>, CHEN Shaodong<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

3. Lightning Protection Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The waveform and amplitude of lightning current are important foundation parameters for lightning protection design and transform of electric power equipments. In this paper, high accuracy lightning current measure devices with the function of GPS clock and positioning are firstly developed, and the lightning current parameters in the region of China Southern Power Grid are accumulated by monitoring of lightning directly stroke on high tower and artificial rocket triggered lightning test, the measure results between the lightning current measure device and the lightning location system of CSG are comparative analysis lastly. The four lightning current measured results indicate that the position accuracy of lightning location system is reach to a high accuracy of 172 m to 675 m while the amplitude accuracy is varied from -22.8% to 4.5%.

**Key words:** southern power grid; lightning location system; lightning current; measure; amplitude; error

雷电参数是电网设备防雷设计及改造的重要基础参数, 尤其是雷电流幅值和波形, 直接决定了雷击时在电网设备上产生的雷电过电压大小, 进而影响到线路雷击闪络率和站内设备雷电侵入波过电压, 危及设备安全运行<sup>[1]</sup>。

为进一步认识雷电及其活动规律, 有效指导电网防雷, 国内外学者已通过人工记录、磁钢棒、雷电定位系统、雷电流波形监测装置、火箭引

雷<sup>[2-3]</sup>、雷击放电过程拍摄等多种方法进行雷电参数观测和积累, 并取得了一系列成果, 如: 浙江省电力试验研究院长期监测 220 kV 新杭线雷击情况, 统计得出雷电流幅值概率分布函数<sup>[4]</sup>; Berger 在 Monte San Salvatore 通过 20 余年的雷电观测, 积累了 101 次负极性的首次雷击电流波形和 135 次后续雷击电流波形<sup>[5]</sup>; 国网电科院建立了全国联网的雷电定位系统<sup>[6]</sup>; 清华大学、云南电网、武汉大学等科研单位也通过雷电实时监测获取了宝贵的雷电流波形数据<sup>[5-7]</sup>。

截至目前, 南方电网在雷电参数研究方面也开展了大量工作, 如 20 世纪 90 年代开始陆续建设了各省区雷电定位系统并于 2010 年实现联网、广东

收稿日期: 2015-01-01

作者简介: 陈喜鹏(1984), 男, 广东汕头人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统电磁暂态仿真及过电压计算工作(e-mail) chenxipeng@csgrid.cn。

电科院联合广东省防雷中心开展火箭引雷试验等<sup>[8-10]</sup>。但是, 研究工作主要集中在利用雷电定位系统进行雷电实时监测及雷电活动规律研究, 雷电波形实测工作开展较少, 导致南方电网范围内雷电实测数据相对缺乏, 且雷电定位系统无法测量雷电流波形、雷电流幅值测量存在误差但缺乏实测数据定量支撑, 这些都在某种程度上为电网防雷设计、线路跳闸及设备损坏原因分析带来了困难。

本文通过研制具备 GPS 定位和定时功能的高精度、宽量程雷电流实测装置, 结合高塔直击雷监测和人工火箭引雷试验, 捕捉雷电流实测参数, 并将雷电流实测结果与雷电定位系统遥测结果进行对比分析, 为电网防雷设计和雷电定位系统雷电流遥测结果校正提供参考依据。

## 1 雷电流实测装置工作原理及测试

### 1.1 雷电流实测装置工作原理

雷电流实测装置由雷电流传感器、高速数据采集处理存储单元、GPS 单元、ISM 无线通信单元、GPRS 无线通信单元、太阳能供电单元 6 个主要模块组成, 其工作原理如图 1 所示<sup>[11-12]</sup>。

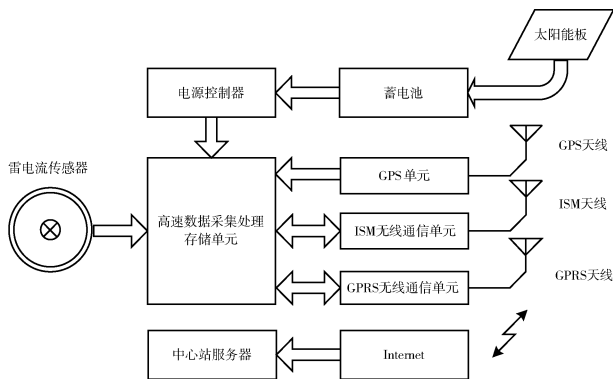


图 1 雷电流实测装置工作原理

Fig. 1 Working Principle of Lightning Current Measurement Device

其中, 雷电流传感器由罗氏线圈和积分器组成, 将高频率、大幅值雷电流转化为低电压信号; 高速数据采集处理存储单元对前端测量数据进行高速采集、处理和存储; GPS 单元记录雷击时刻和经纬度坐标; GPRS 无线通信单元实现雷电流实测装置与中心站服务器之间的无线连接; ISM 无线通信单元用于设备安装调试现场的系统参数配置和测量数据收集; 太阳能供电单元利用太阳能板对蓄电池进行浮充供电。

## 1.2 雷电流实测装置测试

### 1.2.1 罗氏线圈传感器性能测试

罗氏线圈传感器性能好坏直接影响到雷电流实测装置的测量精度, 因此对罗氏线圈传感器性能进行测试是必要的<sup>[12]</sup>。

在 40 kA 冲击电流(4/20  $\mu$ s)作用下, 罗氏线圈传感器实测结果与测试系统实测结果的归一化对比见图 2。测试结果表明, 本文研制的雷电流测量用罗氏线圈传感器能快速响应短波前、高频率的冲击电流变化趋势, 满足雷电流实测技术要求。

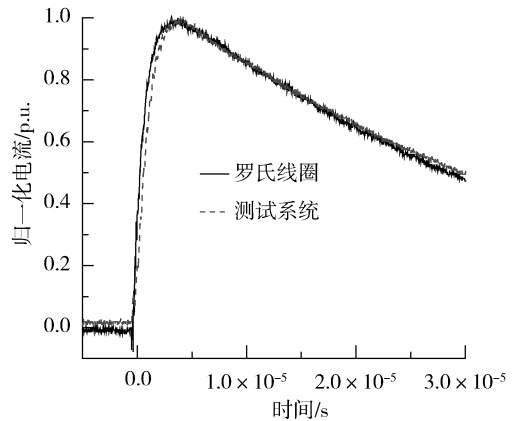


图 2 4/20  $\mu$ s 波形下罗氏线圈传感器性能测试结果  
Fig. 2 Performance Test Result of Rogowski Coil Sensor Under Waveform of 4/20  $\mu$ s

### 1.2.2 雷电流实测装置冲击电流测试

为进一步测试罗氏线圈传感器与高速数据采集处理单元组装后雷电流实测装置整体上的测量分散性, 确定传感器与高速数据采集处理单元的校正系数, 验证实测装置整体工作状况, 有必要对雷电流实测装置开展冲击电流测试。

本文针对开发的 3 套宽量程、全波形雷电流实测装置, 利用国网电力科学研究院避雷器检测中心试验条件开展冲击电流测试。不同电流幅值(波形 2/5  $\mu$ s)下, 雷电流实测装置冲击电流测试结果如表 1 所示。

幅值为 13 ~ 40 kA 的冲击电流测试结果表明, 第一套雷电流实测装置测量结果与冲击电流发生器输出结果的误差在 -1.54% ~ 0.76% 范围内, 平均测量误差约为 0.59%; 第二套装置测量结果误差在 -1.20% ~ 1.29% 范围内, 平均测量误差约为 0.65%; 第三套装置测量结果误差在 -1.00% ~ 1.52% 范围内, 平均测量误差约为 0.62%。

表1 雷电流实测装置冲击电流测试结果  
Table 1 Impulse Current Test Result of Lightning  
Current Measurement Device

冲击电 流发生 器输出 /kA	雷电流 实测装置1		雷电流 实测装置2		雷电流 实测装置3	
	实测值 /kA	误差 /%	实测值 /kA	误差 /%	实测值 /kA	误差 /%
13.13	13.23	0.76	13.30	1.29	13.33	1.52
20.08	19.77	-1.54	19.84	-1.20	19.88	-1.00
26.25	26.38	0.50	26.35	0.38	26.35	0.38
32.95	32.97	0.06	33.00	0.15	32.96	0.03
40.15	40.14	-0.02	40.07	-0.20	40.06	-0.22

三套雷电流实测装置的整体测量误差平均约为0.62%，测量结果线性度高，其线性回归系数 $a$ 和确定系数 $R^2$ 分别为0.999 9和0.999 8，测量精度满足雷电流实测要求，测量结果可用于与雷电定位系统遥测结果对比分析。

## 2 雷电流监测结果及分析

### 2.1 雷电流实测装置布点

为积累南方电网区域内雷电流实测数据，校验南方电网雷电定位系统雷电流遥测精度，结合定点监测和人工引雷试验两种方法将研发的3套雷电流实测装置分别安装于国家(昆明)特高压工程实验室、昆明太华山气象站、广州市从化人工引雷试验基地，雷电流实测装置布点及安装情况如图3和表2所示，其中受限于昆明太华山气象站消雷塔安装条件，雷电流实测装置罗氏线圈安装于消雷塔顶部多支引雷针中的一支。

表2 雷电流实测装置布点情况  
Table 2 Position Situation of Lightning Current  
Measurement Devices

地点	设备安装点 GPS 坐标		其他情况
	经度	纬度	
国家(昆明)特高压 基地门型构架避雷针	102.970 619	25.279 950	构架塔高 102 m, 针 高11 m
昆明太华山气象站消 雷塔	102.624 516	24.961 991	消雷塔塔 高约60 m
广州市从化人工引雷 试验基地(光联村)	103.590 528	23.636 515	—

### 2.2 雷电流测量结果及分析

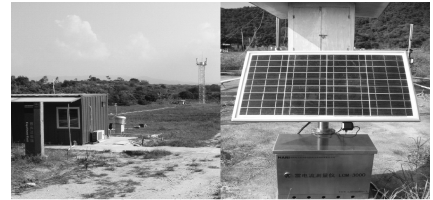
雷电流实测装置安装以后，于2012年8月至



(a) 国家(昆明)特高压工程实验室



(b) 昆明太华山气象站



(c) 广州市从化人工引雷实验基地

图3 雷电流实测装置安装情况

Fig. 3 Install Situation of Lightning Current Measurement Device

2014年8月期间总共在昆明地区和广州从化地区实测到5个雷电流数据，雷电流实测结果及其与南方电网雷电定位系统遥测结果对比情况见表3。

1) 装设于昆明特高压工程实验室门型构架避雷针上的雷电流实测装置，于2012年8月9日18点56分09秒77.6毫秒(装置GPS时间)实测到幅值50.072 kA落雷，其波前时间和半波时间分别为7.5  $\mu$ s和23.4  $\mu$ s，雷电流实测波形见图4。雷电定位系统查询设备安装地点方圆1 km、雷击时刻前后1分钟内共有3条雷击记录，其中-52.3 kA的雷击记录从时间和空间上均与雷电流实测装置测量结果较为一致，可判定为同一落雷，但是，实测雷电流极性与雷电定位系统遥测极性相反，检查表明是由于设备安装时罗氏线圈传感器极性反装所致。本次雷击，雷电定位系统遥测结果与实测结果的幅值误差为+4.5%，距离误差为172 m。

2) 装设于昆明太华山气象站消雷塔上的雷电流实测装置，于2012年8月26日03点44分21秒917.5毫秒实测到落雷数据，雷电流波形见图5。该实测波形为一振荡电流脉冲，不符合直击雷电流波形特征，可能是雷击消雷塔其他分支引雷针而在罗氏线圈传感器上产生的感应雷信号。本次雷击，雷电定位系统遥测结果的距离误差为561 m，因实

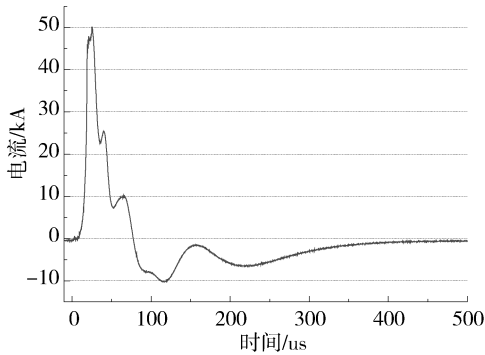


图4 国家(昆明)特高压工程实验室雷电流实测装置测量得到的雷电流波形

Fig. 4 Real Lightning Current Waveform Measured by the Lightning Current Measurement Device Installed on State (Kunming) UHV Engineering Laboratory

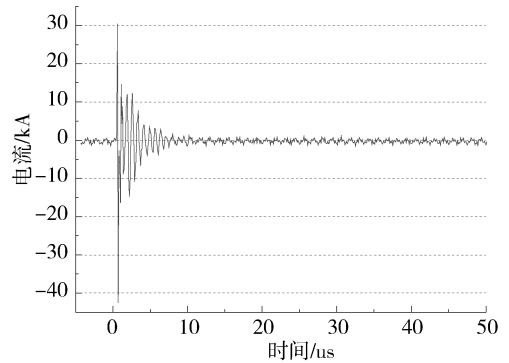


图5 太华山气象站雷电流实测装置测量得到的雷电流波形

Fig. 5 Real Lightning Current Waveform Measured by the Lightning Current Measurement Device Installed on Taihua Mountain Weather Station

表3 雷电定位系统遥测结果与雷电流实测结果对比

Table 3 Comparison of Lightning Location System Telemetry Results with Lightning Current Measured Results

序号	雷电流实测结果		雷电定位系统遥测结果			精度对比	
	时间	幅值/kA	时间	幅值/kA	定位探头数/个	幅值误差/%	定位误差/m
1	2012-08-09 18: 56: 09. 0776	50. 072	2012-08-09 18: 56: 09. 0777	-52. 3	39	+4. 5%	172
2	2012-08-26 03: 44: 21. 9175	尖脉冲	2012-08-26 03: 44: 21. 9176	-22. 3	8	—	561
3	2013-05-20 17: 43: 56. 810	-42. 4	2013-05-20 17: 43: 42. 2341	-34. 9	24	-17. 7%	675
4	2013-05-20 17: 43: 56. 9734	-16. 833	2013-05-20 17: 43: 42. 3975	-13. 0	7	-22. 8%	145
5	2014-06-20 15: 04: 57. 876	-16. 357	2014-06-20 15: 04: 57. 876	-12. 8	11	-21. 7%	514

测波形与实际不符,无法分析幅值误差。

3)2013年5月20日17时43分56秒810毫秒,广州从化人工引雷基地通过火箭发射成功触发雷电,其中主放电雷电流实测幅值 $-42.4$  kA,后续回击雷电流实测幅值 $-16.833$  kA,主放电时间和回击时间相差 $163.4$  ms。

人工引雷引流杆方圆 $10$  km、雷击时刻前后 $1$  min内雷电定位系统共探测到雷击 $11$ 次,其中有两个雷击记录(幅值分别为 $-34.9$  kA和 $-13.0$  kA),雷击记录时间间隔 $163.4$  ms,从雷击时间、空间和雷击记录的时间间隔来看均与实测结果一致,可见 $-34.9$  kA和 $-13.0$  kA这两个雷击记录与实测到的主放电和回击放电相互对应。

对于主放电,雷电定位系统遥测幅值误差和距离误差为 $-17.7\%$ 和 $675$  m;对于回击放电,雷电定位系统遥测幅值误差和距离误差为 $-22.8\%$ 和 $145$  m。

4)2014年6月20日15点04分57秒876毫秒,人工引雷成功触发雷电,雷电流实测幅值 $-16.357$  kA,雷电定位系统显示同一时刻在人工引雷试验地点附近有一幅值为 $-12.8$  kA落雷,雷电定位系统遥测幅值误差和距离误差分别为 $-21.7\%$ 和 $514$  m。

### 3 结论

本文通过研制具备GPS定位和对时功能的高精度雷电流实测装置,利用高塔直击雷监测和人工火箭引雷试验,监测积累南方电网区域内的雷电流波形和幅值特性,并将雷电流实测结果与南方电网雷电定位系统遥测结果进行对比分析。从监测得到的4个雷电流数据来看:在参与定位探头个数较多的情况下,雷电定位系统定位偏差为 $172\sim 675$  m,幅值测量偏差为 $-22.8\%\sim 4.5\%$ 。

雷电流波形及幅值是电网设备防雷设计的重要

参数, 需要通过在不同地区长期监测积累获得, 后续将在本文研究成果的基础上持续开展高塔直击雷监测和人工引雷试验, 以进一步为电网防雷设计和雷电定位系统雷电流遥测结果校正提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 解广润. 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 张义军, 杨少杰, 吕伟涛. 2006-2011年广州人工触发闪电观测试验和应用 [J]. 应用气象学报, 2012, 23(5): 513-522.  
ZHANG Yijun, YANG Shaojie, LÜ Weitao. Comprehensive Observation Experiments and Application Study of Artificially Triggered Lightning During 2006-2011 [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(5): 513-522.
- [3] 陈绿文, 张义军, 吕伟涛. 闪电定位资料与人工引雷观测结果的对比分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1896-1902.  
CHEN LÜ wen, ZHANG Yijun, LÜ Weitao. Comparative Analysis Between LLS and Observation of Artificial-triggered Lightning [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1896-1902.
- [4] 孙萍, 郑均庆, 吴璞三. 220 kV 新杭线 I 回路 27 年雷电流幅值实测结果的技术分析 [J]. 中国电力, 2006, 39(7): 74-76.  
SUN Ping, ZHENG Junqing, WU Pusan. Technical Analysis of Testing Results for Lightning Current Amplitude in 27 Years on 220 kV Xin-Hang No. 1 Line [J]. Electric Power, 2006, 39(7): 74-76.
- [5] 陈水明, 何金良, 曾嵘. 输电线路雷电防护技术研究(一): 雷电参数 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2903-2909.  
CHEN Shuiming, HE Jinliang, ZENG Rong. Lightning Protection Study of Transmission Line, Part I: Lightning Parameters [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2903-2909.
- [6] 陈家宏, 张勤, 冯万兴. 中国电网雷电定位系统与雷电监测网 [J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 425-431.  
CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing. Lightning location System and Lightning Detection Network of China Power Grid [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [7] 孙伟忠, 周文俊, 马仪. 基于雷电流测量的线路雷击类型判断方法 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 33-35.  
SUN Weizhong, ZHOU Wenjun, MA Yi. The Lightning Type Judgment of Transmission Lines Based on Lightning Current Measurement [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 33-35.
- [8] 樊灵孟, 何宏明, 钟定珠. 人工引雷试验中雷电流测量分析 [J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 50-52.  
FAN Lingmeng, HE Hongming, ZHONG Dingzhu. Analysis of The Measurement of Artificial Triggered Lightning Current [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4): 50-52.
- [9] 樊灵孟, 李志峰, 何宏明. 雷电定位系统定位误差分析 [J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 61-63.  
FAN Lingmeng, LI Zhifeng, HE Hongming. Analysis of Location Error of Guangdong Lightning Location System [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 61-63.
- [10] 陈绿文, 黄智慧, 禹继. 一次人工触发闪电事件的定位误差分析 [J]. 广东气象, 2010, 32(1): 15-21.  
CHEN LÜwen, HUANG Zhihui, YU Ji. Analysis of Location Errors for One Artificially-triggered Lightning [J]. Guangdong Meteorology, 2010, 32(1): 15-21.
- [11] 南方电网科学研究院有限责任公司. 雷电流测量及对比研究 [R]. 广州: 南方电网科学研究院有限责任公司, 2013.
- [12] 马仪, 周文俊, 孙伟忠. 雷电流传感器罗氏线圈的研制及测试 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 39-41.  
MA Yi, ZHOU Wenjun, SUN Weizhong. Development and Test of Rogowski Coil in Lightning Current Transducer [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 39-41.
- (责任编辑 高春萌)
- 
- (上接第 71 页 Continued from Page 71)
- [5] 李毅谦, 向志海, 岑章志. 关于悬臂梁振动特性的损伤灵敏度的研究 [J]. 工程力学, 2009, 25(12): 17-23.
- [6] FAN W, QIAO P. Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study [J]. Structural Health Monitoring, 2011, 10(1): 83-111.
- [7] FARRAR C R, JAUREGUI D A. Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to a Bridge: I. Experiment [J]. Smart Materials and Structures, 1998(7): 704-719.
- [8] ALLEMANG R J, BROWN D L. Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis [C]. Proceedings of the First International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics, Orlando, 1982: 110-116.
- [9] LIEVEN N A J, EWINS D J. Spatial Correlation of Modespaces: the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) [C]. Proceedings of the 6th International Modal Analysis Conference Society for Experimental Mechanics, Kissimmee, 1988: 1063-1070.
- [10] FARRAR C R, JAMES I G H. System Identification From Ambient Vibration Measurements on a Bridge [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 205(1): 1-18.
- [11] ALVANDI A, CREMONA C. Assessment of Vibration-based Damage Identification Techniques [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006(292): 179-202.
- [12] DOEBLING S W, FARRAR C R, PRIME M B. A summary Review of Vibration-based Damage Identification Methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91-105.
- [13] FARRAR C R. Vibration-based Structural Damage Identification [J]. Philosophical Transactions of The Royal Society: Mathematical, Physical & Engineering Sciences, 2001, 359(1778): 131-149.
- (责任编辑 郑文棠)