160

电力系统雷击远程在线拍摄系统

江安烽¹,傅正财¹,顾承昱²,颜楠楠³,陈 坚¹,阮浩浩¹ (1.上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200030;

2. 上海市电力公司电力科学研究院,上海 200437;

3. 上海电力公司检修公司,上海 200120)

摘要:为对电力系统雷击事故确切原因进行远程实时调研,研发了基于雷击光触发的全天候电力系统雷击远 程在线拍摄系统。该系统采用高速摄像机拍摄光电触发前后数秒的雷击视频,通过无线通信模块将视频发送 至远程监控中心系统,并通过专用软件对视频进行逐帧分析。已有4套系统在线运行于上海电网2条10kV 和1条35kV 配电线路,通过一个雷季的运行,获得了上百段云闪和20段雷击配电线路附近地面的地闪视频。 对视频进行分析,分析结果和统计数据一致。

关键词: 电力系统: 雷击光触发: 雷击视频: 远程在线拍摄系统: 配电线路

中图分类号: TM 867 文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.025

0 引言

国内外运行经验表明雷击是输配电线路安全稳 定运行面临的主要风险,开展输配电线路雷击事故 调研对进一步降低雷击风险是至关重要的^[1-2]。图像 信息是输配电线路事故调研的重要方式,日本最先 采用传统胶片照相机拍摄输配电线路雷击^[2],随后 南非采用摄像机^[3]、美国采用单反相机^[4-5]记录配电 线路雷击。近年来,日本的拍摄技术发展最快,已将 静态相机、摄像机、高速摄影仪成功应用于输配电线路 雷击拍摄研究而国内研究较少,主要是中国电科院、 气象科学研究院采用摄像机、高速摄影仪观测人工 引雷、雷击地面、建筑物的过程^[12-13]。

以往研究最深入、应用最多的拍摄装置是日本 的传统胶片照相机,但其不能进行在线拍摄,无法与 今后智能电网的在线监测系统结合,且传统胶片照 相机已退出主流市场,更新维护存在问题,与摄像机 相比可能漏拍。高速摄像机花费巨大,拍摄分辨率很 低,只适用于雷电上、下行先导起始和传播的观测。 普通摄像机比传统胶片照相机拍摄效果好,但以往 的系统存在体积大、能耗高、不能远程控制的问题。

本文研发的基于光电触发有预录功能的全天候 电力系统雷击远程在线拍摄系统,实现了电力系统 雷击的视频采集和远程无线传输。已有4套该系统 在线运行于上海电网2条10kV和1条35kV配电 线路,通过一个雷季的运行,获得了上百段云闪和 20段雷击配电线路附近地面的视频,并将20段雷击

收稿日期:2014-12-29;修回日期:2015-01-14

线路附近的地闪数据与线路运行统计数据、雷电定 位系统数据进行对比研究。

1 雷击远程在线拍摄系统原理

电力系统雷击远程在线拍摄系统主要由雷击在 线拍摄装置终端系统和监控中心系统组成,系统原 理如图1所示。



图 1 电力系统雷击远程在线拍摄系统原理图 Fig.1 Schematic diagram of online remote lightning

stroke shooting system for power system

雷击在线拍摄装置终端系统可安装在输配电线 路杆塔或建筑物上,开机后始终处于拍摄状态的摄 像机将摄得的模拟视频信号输入到视频采集模块, 视频采集模块将模拟视频图像压缩转换为数字视频 图像后传送到中央处理模块。当探测视野范围内发 生雷闪时,光探测器发送触发信号给中央处理模块, 中央处理模块收到触发信号后截取触发时刻前后数 秒的数字视频图像作为雷击图像存储到闪存数据存 储模块中,同时通过无线通信模块将数字视频图像 信息通过 3G 网络发送到远程监控中心系统,客户终

基金项目:国网上海市电力公司资助项目(SHSHJX00ZSJS14-01135)

Project supported by the State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company(SHSHJX00ZSJS1401135)

端可以通过 Internet 访问 FTP 服务器上的雷击统计数据库,并通过专用软件逐帧分析获得的视频。通过电源控制器控制太阳能电池板和蓄电池的输出电压,作为终端系统的电源。

2 雷击在线拍摄系统设计与实现

2.1 雷击光触发器

设计的雷击光触发器由光接收器和光电信号检测电路组成。已有研究表明雷电光信号的可探测波长主要集中在 300~1000 nm,因此光接收器选用 OTRON公司的 OSD50-HT 型光电二极管,其光谱响应范围为 400~1100 nm,峰值响应波长为 900 nm, 感光面积为 50 mm²,响应时间为 18 ns。

当发生雷击时,雷击光触发器接收到由雷电光 探测信号和背景光干扰信号组成的光信号。与持续 时间数百毫秒的雷电光信号相比,主要由日光、路灯、 汽车车灯产生的背景光持续时间为数分钟,可以看 作变化缓慢的环境光,在电路中表现为直流分量。 以往研究表明,雷电光信号的频谱能量主要集中在 1~5 kHz范围内。由于背景光噪声信号变化非常缓 慢,可看作高斯限带白噪声,其频谱能量分布主要集 中在 300 Hz 以下。因此可根据雷击光辐射与背景光 频率特性的差异消除噪声干扰以获取有用信号。

设计的光电信号检测电路如图 2 所示,其由前 置光电转换电路、高通滤波放大电路和脉冲展宽电 路三部分组成,图中 4 个运算放大器都接成电压跟 随器的形式,起到缓冲隔离作用。其中,前置光电转 换电路用于将微弱的光电二极管雷电光生电流进行 前置放大并转换为电压信号。高通滤波放大电路用 于去除混杂在雷电光信号中的低频背景光噪声信号 并且降低电路噪声信号的影响,设置高通滤波器 - 3 dB 带宽的截止频率 f 为 1.64 kHz,提取出雷电光 信号后再将其送入脉冲展宽电路。脉冲展宽电路用 于将雷电光脉冲信号展宽以满足雷电拍摄设备的触 发要求。

2.2 摄像视频模块

系统选用 SONY 1/3 SUPER HAD CCD 传感器,

其水平分辨率为 540 线;感光面积宽 4.8 mm,高 3.6 mm; 内置定焦镜头 8 mm;直流工作电源 12 V。摄像机以 录像的模式记录雷击发生前后数秒的视频,避免了 触发时间误差导致的漏拍。

2.3 远程通信控制模块

系统通信记录单元选用的视频终端处理器型 号为TL-MR9004,支持 6~36 V 电压输入,采用标准 H.264 压缩算法,可提供 3G 无线通信并支持 SD 卡存 储。为实现雷击在线拍摄系统的远程人工控制、调试 及低功耗开启关闭等功能,设计了远程控制通信开关 电路并编制了相应算法,其工作的主要流程见图 3。



图 3 远程通信控制模块工作流程图 Fig.3 Flowchart of remote communication control module





2.4 自供电源模块

自供电源模块采用 40 W 的太阳能电池板对 12 V、40 A・h 的蓄电池供电,在缺少阳光的情况下,蓄 电池可供系统连续工作 2 d。

2.5 系统测试

为了验证系统对空气间隙击穿产生的光信号的 拍摄效果,在上海交通大学高电压实验室中,采用 3000 kV的冲击电压发生器,对 1.5 m 长的棒-板间隙 施加负极性雷电冲击电压(1.2/50 μs),拍摄装置与 放电间隙距离为 10 m,拍摄结果如图 4 所示。由图 可见,光信号可以有效触发系统,系统通过记录触 发时刻前后数秒的视频,有效捕捉长间隙放电的图 像信息。



图 4 系统拍摄的棒-板间隙放电图像 Fig.4 Image of rod-plane gap discharge shot by developed system

3 拍摄结果与运行统计数据对比

3.1 典型拍摄结果

在上海电网历年来雷击跳闸多发的配电线路附 近安装该系统,其中在2条无避雷线的10kV配电 线路附近安装2套,在1条单避雷线35kV配电线路 附近背靠背安装2套,运行调试时人工触发拍摄的结 果如图5和图6所示。经过一个雷季的运行,系统获 得了上百段云闪和20段雷击配电线路附近地面的 地闪视频,其中典型的雷击配电线路附近地面的图 像如图7—10所示。

3.2 和运行统计结果对比

结合线路雷击跳闸统计数据、上海电网生产管理 系统 PMS(Production Management System)中雷电定 位系统与线路位置和电气参数的数据,对观测结果 进行分析,典型分析过程如下。

a. 雷击图像如图 7 所示,雷击时间为 2013 年 7 月 31 号 21:07:42,在 PMS 中查找在该 10 kV 线路附 近该时刻 ±5 min 的雷电定位数据,得到 21:08:06 的 雷击点如图 11 所示,负极性雷电流的幅值为 12.3 kA。

b. 采用 PMS 中的测量工具获得雷击点与线路 最近距离如图 11 所示,为 423 m。

c. 采用 IEEE 标准公式计算感应过电压[14]:

 $U_{\text{max}} = \frac{Z_0 I (h + 0.25 \sqrt{\rho})}{y} \left[1 + \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{2 - (v/c)^2}} \right] (1)$ 其中, U_{max} 为感应雷过电压最大值(kV); I 为雷电流



图 5 人工触发拍摄 10 kV 配电线路 Fig.5 Image of 10 kV distribution line shot by developed system with manual trigger



图 6 人工触发拍摄 35 kV 配电线路 Fig.6 Image of 35 kV distribution line shot by developed system with manual trigger



图 7 拍摄的雷击 10 kV 配电线路附近 地面画面(1)

Fig.7 Image of ground lightning stroke nearby $$10\,{\rm kV}$$ distribution ${\rm line}(1)$



图 8 拍摄的雷击 10 kV 配电线路附近地面画面(2) Fig.8 Image of ground lightning stroke nearby 10 kV distribution line(2)

162



图 9 拍摄的雷击 35 kV 配电线路附近地面画面(1) Fig.9 Image of ground lightning stroke nearby 35 kV distribution line(1)



图 10 拍摄的雷击 35 kV 配电线路附近地面画面(2) Fig.10 Image of ground lightning stroke nearby 35 kV distribution line(2)



图 11 PMS 中雷击点与 10 kV 配电线路的相对位置 Fig.11 Lightning stroke position relative to 10 kV distribution line shown in PMS

幅值(kA); Z_0 为雷电通道特征波阻抗,采用观测经验值 30 Ω ;y为雷击点与线路绝缘子的距离(m);c为光速;v为雷电流在回击通道中的传播速度,一般为c/3;h为导线平均高度,取为 7.8 m; ρ 为土壤电阻率,由于没有实测,取 100~1000 Ω /m。计算得到感应雷过电压幅值为 19.3~42.7 kV,该 10 kV 线路采用PS-15 针式支柱绝缘子,其在标准雷电波下的 50% 闪络电压为 105 kV,表明该线路未发生雷击跳闸,线路运行统计结果也证实了该结论。

采用以上方法分析了系统拍摄的 20 段雷击配 电线路附近地面的地闪视频,其中,雷击点与 10 kV 线路的最近距离为 30 m,最大雷电流为 13.7 kA,产生 的最大感应雷过电压为 42.7 kV;雷击点与 35 kV 线 路的最近距离为 210 m,最大雷电流为 12.4 kA,产生 的最大感应雷过电压为 31.8 kV。

感应雷过电压的计算结果与运行统计结果都表明,系统拍摄的 20 段地闪没有造成线路跳闸。

3.3 雷击点定位讨论

采用安装在多个位置的多台拍摄装置对准同一 区域可以进行雷击点的定位。如图 12 所示,安装 2 台拍摄方向正交的观测装置,可以根据摄像视场分 析进行雷击点的定位,但是由于当前项目经费有限, 观测重点是尽可能多地有效捕获雷击图像,所以并 没有安装对准同一区域拍摄的多台观测装置。



∘ 雷击点, ○ 杆塔, Ⅲ 配电线路

图 12 采用 2 台拍摄装置进行雷击定位的示意图 Fig.12 Schematic diagram of lightning stroke located by two shooting devices

4 结论

本文研发的电力系统雷击远程在线拍摄系统已 在户外配电线路上正常稳定运行,成功拍摄到上百 段云闪和 20 段雷击配电线路附近地面的地闪视频。 将 20 段雷击配电线路附近地面的地闪视频与线路 雷击跳闸统计数据、上海电网 PMS 中雷电定位系统 与线路位置和电气参数的数据进行对比分析,结果 表明观测结果与运行统计相符。

参考文献:

[1] 李晓岚,陈家宏,谷山强,等. 2000~2007 年输电线路雷击闪络统 计分析[J]. 高电压技术,2009,35(3):705-710.

LI Xiaolan, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al. Statistics analysis of lightning flashovers of transmission lines during 2000~2007[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3);705-710.

- [2] 横山茂. 配电线路雷害对策[M]. 北京:中国电力出版社,2008: 22-24.
- [3] ERIKSSON A J. Lighting induced overvoltages on overhead distribution lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(4):960-968.
- [4] BARKER P. Photography helps solve distribution lightning problems[J]. IEEE Power Engineering Review, 1993, 13(6):23-26.
- [5] SHORT T A,AMMON R H. Monitoring results of the effectiveness of surge arrester spacings on distribution line protection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3):1142-1150.
- [6] SHONO M,SHIMIZU M,MATSUMOTO A. Observation of lightning strike phenomena on 500 kV transmission lines[C]//International Conference on Lightning Protection. Kanazawa,Japan:ICLP,2006:

938-943.

164

- [7] MIYAZAKI T, OKABE S. A detailed field study of lightning stroke effects on distribution lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 352-359.
- [8] TAKAMI J, OKABE S. Characteristics of direct lightning strokes to phase conductors of UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):537-546.
- [9] MIKI M, MIKI T, SHIMIZU M. Observation of lightning flashes to transmission lines using a high speed camera system [C]//International Conference on Lightning Protection. Cagliari, Italy: ICLP,2010:1-6.
- [10] TANIGUCHI S, TSUBOI T, OKABE S. Observation results of lightning shielding for large-scale transmission lines [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16 $(2) \cdot 552 - 559.$
- [11] MIYAZAKI T, OKABE S. Field analysis of the occurrence of distribution-line faults caused by lightning effects [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(1):114-121.
- [12] 谷山强,陈维江,陈家宏,等. 雷电放电过程高速摄像观测研究 [J]. 高电压技术,2008,34(10):2030-2035. GU Shanqiang, CHEN Weijiang, CHEN Jiahong, et al. Observation of lightning discharge process with high speed videos[J]. High

Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2030-2035. [13] 张义军,吕伟涛,张阳,等. 广州地区地闪放电过程的观测及其 特征分析[J]. 高电压技术,2013,39(2):383-392.

ZHANG Yijun, LÜ Weitao, ZHANG Yang, et al. Observation of

the cloud-to-groud lightning discharge process and analysis of its characteristic in Guangzhou[J]. High Voltage Engineering, 2013,39(2):383-392.

[14] IEEE. IEEE Std 1410TM-2010 IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines[S]. New York, USA: IEEE Power & Energy Society, 2010.

作者简介:



江安烽(1987-),男,浙江宁波人.博士 研究生,研究方向为电力系统过电压与防雷 保护(E-mail:anfeng@situ.edu.cn):

傳正财(1965-),男,浙江衢州人,教 授,博士研究生导师,研究方向为电力系统 过电压与防雷保护、电能质量与电磁兼容、 高电压试验设备与试验技术:

江安隆

顾承昱(1971-),男,安徽淮南人,高级 工程师,硕士,从事防雷接地技术研究工作;

颜楠楠(1981-),女,吉林吉林人,工程师,博士,从事高 电压试验技术、过电压与绝缘计算研究工作:

坚(1975-),男,福建福清人,工程师,博士研究生、 陈 研究方向为高电压试验设备与试验技术(E-mail:chen_jian@ situ.edu.cn):

阮浩浩(1987-),男,浙江上虞人,硕士研究生,研究方 向为电力系统过电压与防雷保护(E-mail:sjturuan@126. com)

Online remote lightning stroke shooting system for power system

JIANG Anfeng¹, FU Zhengcai¹, GU Chengyu², YAN Nannan³, CHEN Jian¹, RUAN Haohao¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Electric Power Research Institute, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

3. Maintenance Company, Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: In order to investigate in real time the exact cause of power system lightning faults, an online remote lightning stroke shooting system based on lightning optical trigger is developed for power system, which adopts high-speed camera to shoot the video of lightning stroke during a few seconds before and after the lightning optical triggering and transmits it to the remote system in monitoring centre via the wireless communication module. Special software is applied to analyze the video frame by frame. Four sets of the developed system are online operating on two 10 kV and one 35 kV distribution lines. During one storm season, more than one hundred video segments of cloud flash and twenty video segments of ground flash are shot and analyzed. The analytical results are consistent with the statistical data.

Key words: electric power systems; lightning optical triggering; lightning stroke video; online remote shooting system; distribution lines