

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.011

输电线路雷电预警系统中心站的设计与研发

陶汉涛^{1,2}, 谷山强¹, 王海涛¹, 冯万兴¹, 郭钧天¹, 张磊¹,
陈玥¹, 吴大伟¹

(1. 国网电力科学研究院南瑞集团公司, 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 雷电预警是开展输电线路主动性防雷的关键技术。文中采用结合大气电场阈值、雷电趋势预测以及电气几何模型的雷电三级预警方法, 完成了输电线路雷电预警系统中心站的设计与开发。首先, 对适用于输电线路的雷电预警系统中心站进行了总体架构设计; 其次, 详细论述了数据库建立、前置数据采集、预警计算分析和终端应用软件的研发路线; 最后, 开发了一套输电线路雷电预警系统并进行了试点应用。应用效果表明, 由该中心站实现的雷电预警系统能够在雷暴来临前对输电线路杆塔区段及时发出雷击闪络风险预警信息, 可为运维检修、调度控制人员提供有效的辅助决策依据, 从而提高电网雷电灾害主动性防御水平。

关键词: 输电线路; 主动性防雷; 雷电预警系统; 中心站; 架构设计; 技术研发; 试点应用

Design and Development of Lightning Warning System's Central Station for Transmission Line

TAO Hantao^{1,2}, GU Shanqiang¹, WANG Haitao¹, FENG Wanxing¹, GUO Juntian¹, ZHANG Lei¹,
CHEN Yue¹, WU Dawei¹

(1. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;
2. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Lightning warning is the key technology of initiative lightning protection for transmission line. This paper adopts three levels lightning warning method based on atmospheric electric field threshold, lightning trend forecast and EGM to complete the design and development of lightning warning system's central station. Firstly, the general architecture of lightning warning system's central station applicable for transmission line is designed. Then, the paper discusses in details the research and development route of constructing database, pre-data acquisition, computing program for lightning warning, and terminal application software. Finally, a set of lightning warning system for transmission line is developed and applied to power system. Application effect shows that this lightning warning system can send lightning flashover risk warning information timely before the coming thunderstorm. As an effective decision support for operational maintenance and scheduling control personnel, it can improve the level of the initiative lightning protection of power grid.

Key words: transmission line; initiative lightning protection; lightning warning system; central station; architecture design; technology development; pilot application

0 引言

雷电是造成输电线路非正常停运的重要因素, 对电网的安全可靠运行构成了严重威胁^[1-3]。现有被

动式的雷电防护措施, 如安装避雷器(针、线)、降低接地电阻等, 已无法满足当前以特高压为骨干网架的输电网络对雷电灾害应对能力的要求^[4-7]。因此, 有必要开拓以雷电预警技术为基础的输电线路主

收稿日期: 2016-04-23; 修回日期: 2016-06-25

基金项目: 国家电网公司总部科技指南项目。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China.

动性雷电防护新思路,在雷暴临近前采取有效的处理措施或制定合理的应急预案以减小电网雷击故障率以及因雷击造成的经济损失和人员伤亡。

国内外研究学者对于雷电预警技术已有一定的研究,主要是依据雷暴前大气电场的幅值特征,辅以雷电定位、气象雷达、卫星云图等多维雷电观测资料进行雷电活动预警。如文[8]中利用雷达反射和其他气象资料对云地闪的预警预报进行了深入研究;文[9]中以大气电场的强度大小以及抖动快慢为判断标准,结合人工判断雷电的移动趋势,实现了雷电短时预警;文[10]中对雷电定位数据采用雷暴团聚类算法并通过质心拟合实现了雷暴云的趋势预测。

上述成果只停留在雷电预警理论研究和方法试验阶段,尚未形成适用于具体防雷工程的雷电预警系统^[11,12]。一般而言,电力行业的在线监测系统从组成结构上可分为子站和中心站两部分,针对电网雷电预警业务,由大气电场仪和雷电探测站组成的子站研究和生产相对成熟,文中主要介绍雷电预警系统中心站的设计与研发,并通过典型应用实例说明了由该中心站实现的输电线路雷电预警系统具有较好的预警效果,对电网防雷减灾工作具有重要的实用意义。

1 雷电预警系统中心站设计

输电线路雷电预警系统中心站是利用计算机软件技术实现针对输电线路雷击闪络的风险预警功能。文中将从物理结构和逻辑结构两个层面来完成中心站的架构设计。

1.1 物理结构

输电线路雷电预警系统中心站物理结构主要由前置通信服务器、计算分析服务器、应用软件服务器、数据库服务器、网络通讯设备以及网络安全装置组成,见图 1。其中,前置数据采集服务器负责采集雷电预警系统子站实时监测的大气电场数据以及获取雷电定位系统条件查询的雷电定位数据;计算分析服务器负责对雷电观测资料以及线路台账信息进行关联分析,设置线路雷击预警等级并计算雷击闪络风险,同时将以上数据存入数据库服务器;应用软件服务器用于部署用户终端软件,实现以主动推送和被动请求的方式向用户提供针对电力系统输电线路的雷电预警信息。

1.2 逻辑结构

输电线路雷电预警系统中心站逻辑结构采用分层设计,包括数据采集层、数据集成层、业务处理层、应用服务层和终端访问层 5 个层级,见图 2。数

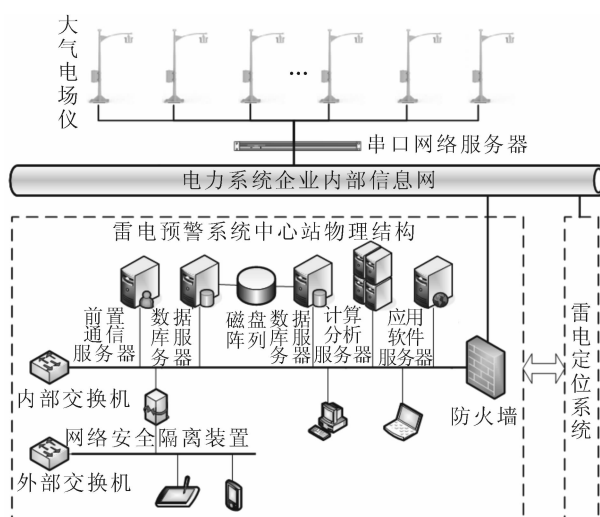


图 1 雷电预警系统中心站物理结构

Fig. 1 Physical structure of lightning warning system's central station

据采集层基于 TCP/IP 协议栈的开源网络通信框架实现大气电场数据的实时采集,并应用 Web 服务技术获取雷电定位数据和输电线路台账参数;数据集成层负责将上述数据进行集成与存储并统一化管理;业务处理层是系统业务功能处理的核心,应用集群计算得到针对输电线路的多级雷电预警信息;应用服务层采用面向服务的体系结构,以 Web 服务的方式为用户提供按需的应用功能服务;终端访问层实现面向终端用户、支持 PC 和移动终端访问的雷电预警应用软件。

2 雷电预警系统中心站研发

输电线路雷电预警系统中心站的研发过程可分为数据库建立、前置数据采集、预警计算分析以及应用软件开发 4 个部分。

2.1 数据库建立

数据库是数据的仓库,按照数据结构来存储和管理数据,是软件系统各程序模块交互的核心纽带。在对数据库进行选型过程中:①分析数据存储类型,雷电预警系统中的数据均属于结构化数据;②预估数据量,电场仪采样间隔是 1 s,单站电场仪每年将产生 GB 级数据 $[(32 \text{ B/帧}) \times (1 \text{ 帧/s}) \times (86\,400 \text{ s/d}) \times 365 \text{ d}]$,加上雷电定位数据以及电网线路相关数据,系统至少达到 TB 级的数据量;③考虑数据库的易用性、稳定性和安全性等特点,选用主流大型关系型 Oracle 数据库。

雷电预警系统中数据表主要由 4 大类组成:

1)雷电监测数据,包括大气电场仪地理坐标、电场值以及雷击点的经纬度坐标、电流等;

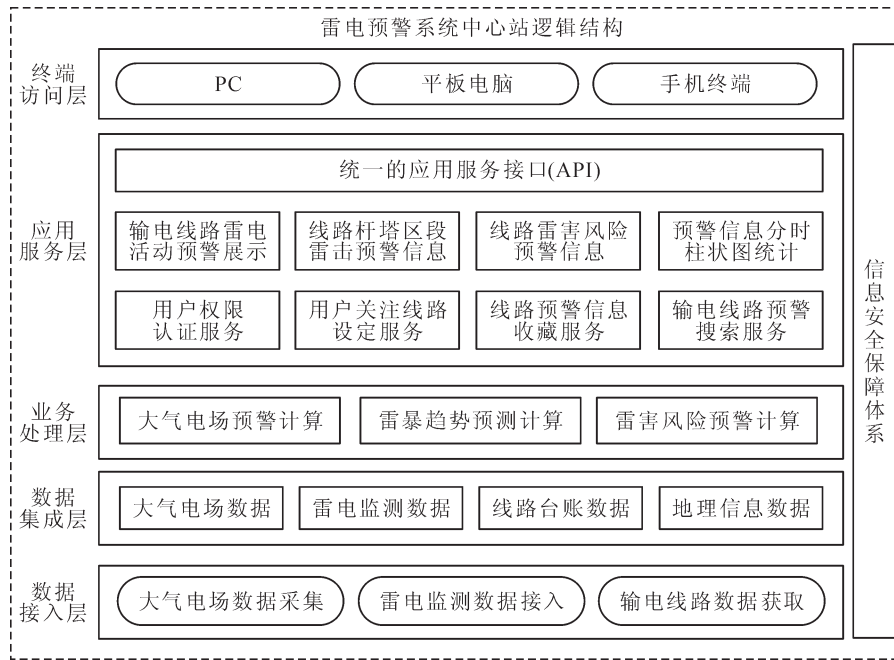


图2 雷电预警系统中心站逻辑结构

Fig. 2 Logical structure of lightning warning system's central station

2)线路台账数据,包括线路属性,以及逐基杆塔GPS坐标、绕反击耐雷水平值;

3)用户权限数据,包括用户基础信息、关注线路和对应的操作权限等;

4)预警计算数据,通过计算得到针对用户所关注的输电线路雷电预警结果信息。

使用Power Designer作为建模工具^[13],创建以上

表结构并建立实体关联关系,见图3。前置数据采集服务器获取基础数据存入电场值表和雷电监测表,接入电网PMS系统自动或人工导入线路台账数据至线路属性表和杆塔台账表,并将预警计算分析得到的多级雷电预警信息存储至预警结果表,应用展示软件结合用户信息表以及角色权限表和预警结果表中的数据展示相应的预警信息。

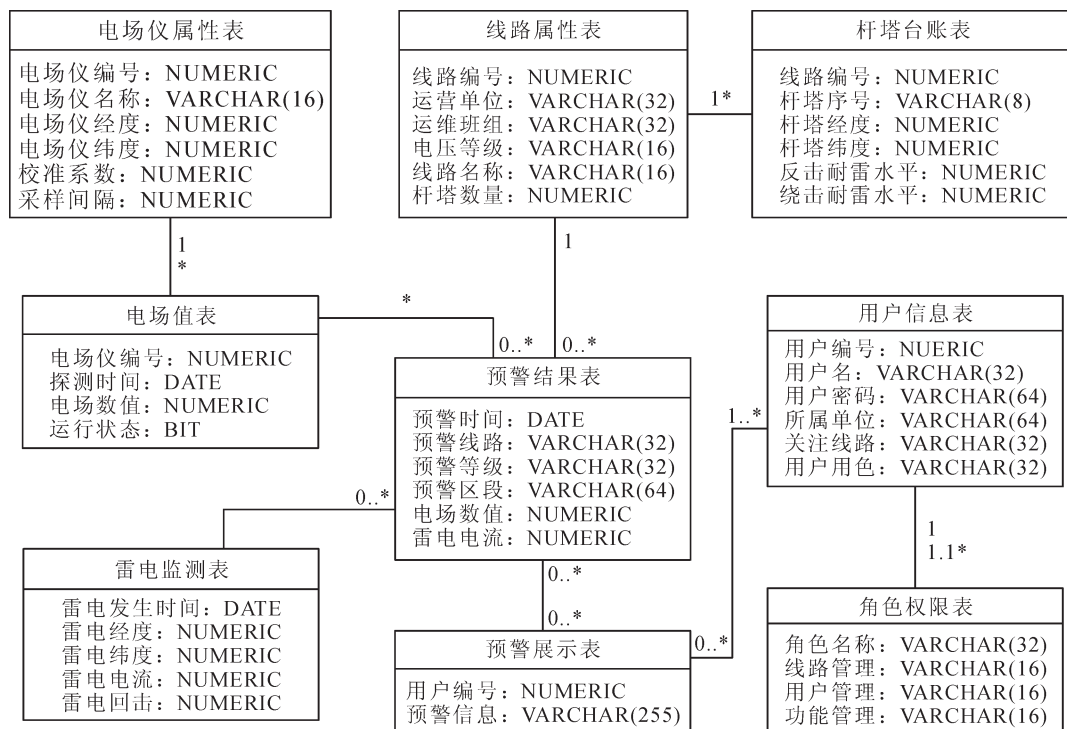


图3 数据库表建模

Fig. 3 Modeling of the database table

2.2 前置数据采集

前置数据采集是以计算机网络 TCP/IP 协议栈作为底层通信协议,采用 MINA 开源框架实现雷电预警子站的数据采集^[14-15],并可实时监控各个子站的运行状态,见图 4。

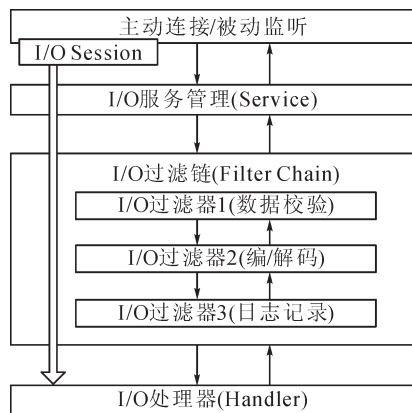


图 4 网络通信 MINA 开源框架结构

Fig. 4 Structure of open source network communication framework of MINA

具体开发步骤如下:

1) 创建实现 IoService 接口的类,支持主动连接或被动监听雷电预警子站的连接请求;

2) 设计实现 IoFilter 接口的过滤器,自定义数据校验规则、通信编/解码方式以及日志记录格式;

3) 编写 IoHandler 接口处理类进行主要业务逻辑的实现,在 messageReceived 方法中解析子站数据帧,获取 GPS 时间、电场数值、工作状态等关键信息,调用消息队列对该数据进行持久化操作,同时在 sessionOpened、sessionClosed、exceptionCaught 等函数中获取子站通信连接的状态信息;

4) 调用 IoSession 中的 write 方法与远端交互,根据预先约定的命令,可以实现对子站的配置复位、数据召回和远程升级等操作。

应用 MINA 框架可以省下处理底层 I/O 和线程并发等复杂性工作,且 MINA 多线程编程模式和非阻塞方式的异步通信优势能够同时支持对多个子站并发进行数据采集,有效提高了前置采集软件的开发效率以及数据采集速率。

2.3 预警计算分析

预警计算分析是在雷电活动规律和输电线路雷电绕、反击模型的研究基础上,对大气电场、雷电定位等雷电观测资料以及杆塔地理位置、绝缘配置、结构尺寸等线路台帐信息进行关联分析,实现输电线路的雷击闪络风险预警,是雷电预警系统中心站的核心运算模块。按照预警层次的先后次序,可分为雷电活动预警、线路雷击预警、雷害风险预

警 3 种层次。

雷电活动预警是依据雷暴前大气电场的变化特征实现目标探测区域是否发生雷电活动的预警。大气电场的变化与地理位置、气候环境等因素关系密切,为减小基于阈值法雷电活动预警的漏报率,将不同地区在标准测量状态下有雷电发生的最小场强绝对值设置为大气电场仪预警门限,通过与实测大气电场幅值大小的对比,判断输电线路附近是否存在雷云电场。雷电活动预警是后续预警的必要条件,可作为预警计算分析软件的入口。

线路雷击预警是通过分析雷电活动趋势与输电线路的位置关系实现雷电是否击中输电线路的预警。当大气电场仪判断目标区域有雷电活动发生时,可在雷电定位系统中查询当前时刻近一段时间内输电线路附近的雷电活动情况,对该时间段内雷电活动轨迹进行追踪并预测下一时刻雷电运动趋势。当预测的雷电活动是向输电线路靠近时,依据雷电查询缓冲区的大小相应雷击分级预警信息。

雷害风险预警是在输电线路电气几何模型基础上实现雷电击中输电线路后闪络风险的预警。在完成线路雷击预警后,针对可能遭受雷击的线路杆塔区段,依据其绝缘配置信息以及结构尺寸数据计算可引起输电线路雷电绕、反击的雷电流范围。提取已查询到的雷电活动记录中的雷电流大小,统计处于上述电流范围内的雷电个数,计算该雷电数量与查询到雷电总数量的比值,作为输电线路雷击闪络的风险值。

运行流程见图 5,具体实现步骤如下:

1) 统计目标区域不同情况下有雷电发生的最小场强绝对值(缺省值为 0.4 kV/m),预设大气电场仪的预警启动门限,并与输电线路附近一定范围内实时监测的大气电场进行对比;

2) 若实测的大气电场绝对值超过预警启动门限,则表明监测的输电线路所在区域可能有雷电活动发生,进入下一步,否则返回步骤 1);

3) 在雷电定位系统中依次设置 10、20、30 km 3 个不同大小的输电线路雷电查询缓冲区,查询当前时刻前 15 min 内的雷电活动情况,如果存在雷电活动记录,则进入下一步,否则返回步骤 1);

4) 按照时间先后顺序将查询到的雷电监测数据分为 3 组,每组持续时间 5 min;对每组数据采用基于密度的 DBSCAN 算法进行聚类^[16-19]并将每一类中雷电数据的平均坐标作为该类的中心点;

5) 对 3 组雷电监测数据聚类后的中心点位置,采用多项式拟合预测下一时刻雷电运动趋势。若雷电

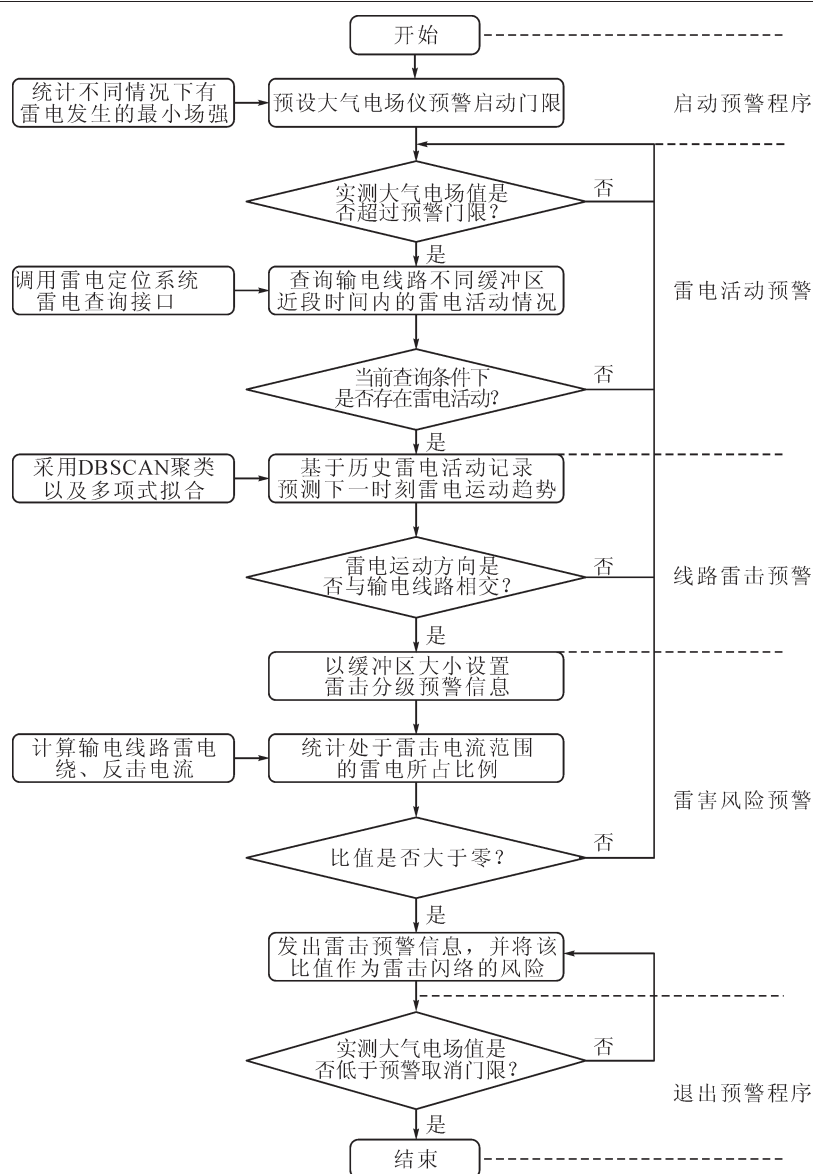


图5 雷电预警计算方法流程图

Fig. 5 Flow chart of calculation method for lightning warning

的运动方向可与输电线路相交,则以缓冲区的大小相应设置红色、橙色、黄色雷击分级预警信息,进入下一步,否则返回步骤1);

6)计算可引起输电线路雷电流、反击的雷电流范围,统计缓冲区内处于上述电流范围的雷电所占比例,若比值大于0,则发出雷击预警信息,并将该比值作为雷击闪络的风险,进入下一步;否则返回步骤1);

7)如果大气电场仪监测到输电线路附近的大气电场低于预警取消门限,则结束此次预警过程。

预警计算分析通过雷电活动预警、线路雷击预警以及雷害风险预警依次完成目标区域是否有雷电活动发生、发生雷电活动后输电线路是否遭受雷击以及雷击输电线路后是否闪络3个层次的判断,

最终实现可用于输电线路主动性雷电防护的雷击闪络风险预警。文中采用的雷电预警方法将传统的仅能预测目标区域内是否有雷电发生的预警进一步提升至可考虑目标对象耐雷水平并能评估雷电造成危险程度的预警,对雷电预警的工程实际应用价值具有重要的意义。

2.4 应用软件开发

应用软件是雷电预警系统面向用户提供雷电预警信息的窗口,雷电预警信息的快速发布与及时推送是雷电预警系统能够真正发挥实用的关键。在移动互联网时代,为了满足用户能够快速便捷的获取预警应用服务,需要开发同时支持浏览器和移动终端访问的用户终端应用软件。面向服务的体系结构(service-oriented architecture, SOA)是一种粗粒度、

松耦合的服务架构,它将应用功能模块以 Web 服务的方式抽象化供异构软件方便调用,并凭借开发平台与编程语言无关的特点,为构建性能稳定、灵活多样、开放共享的应用软件提供了良好的解决方案^[20-23]。

结合输电线路雷电预警的实际应用需求,系统设计了输电线路雷电活动预警、杆塔区段雷击预警、线路雷害风险预警、雷暴运动趋势热力图、预警分时柱状统计图等展示功能,以及权限认证、针对线路预警的关注/搜索/收藏和预警消息主动推送服务等相关辅助功能。首先,采用 SOA 思想将以上功能在应用服务层封装成 REST 风格的 Web 服务,服务提供者定义标准的调用接口和解析规范,支持返回 XML、JSON 格式的响应结果;其次,将这些原子服务在注册中心进行注册,对服务统一化管理并通过 Web 服务描述语言标记以便于服务消费者的准确查找;最后,服务消费者通过注册中心绑定和调用所需要的 Web 服务,而服务消费者可以是雷电预警系统的 B/S 版应用软件、移动应用软件,也可以是接入需要接入预警数据的其他系统,运行结构见图 6。

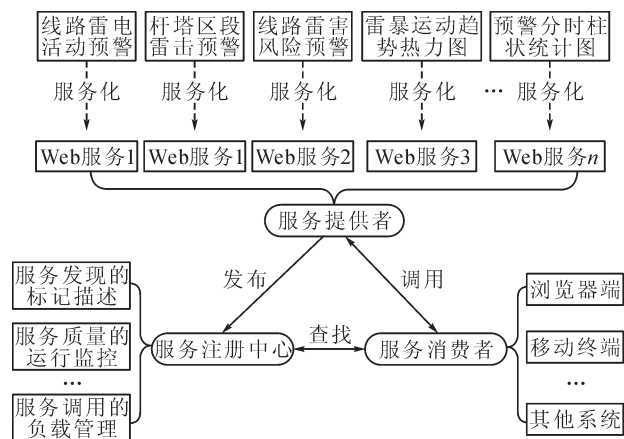


图 6 应用软件服务化运行结构图

Fig. 6 Working chart of application software service

3 典型应用实例

为了给线路运维人员提供及时有效的雷电预警信息,以提升重要输电通道雷电风险主动预控能力。在某省针对输电线路附近雷害活动较为频繁的区域安装了 7 个大气电场仪,基于现有雷电定位系统以及雷电预警系统中心站的设计与实现进行了输电线路雷电预警系统试点应用。

2015-07-13T22:32:00,500 kV 晋榆二线 C 相故障跳闸,依据榆社站保护测距显示故障点为 74 号杆塔,故障原因为雷击,实际巡线发现 C 相(左相)绝缘子串上塔处及下导线处有明显放电痕迹。在此期

间,雷电预警系统于 22:00 发布了雷电预警信息:晋榆二线 72~80 号杆塔区段雷击黄色预警,雷击闪络风险为 0.35,并在 22:10 连续发布了该区段的雷击橙色预警,雷击闪络风险为 0.62。事后查询雷电定位系统,发现该时刻 74 号杆塔附近落雷非常密集,见图 7、8。同时,该省气象局也于当日傍晚发布了全区大范围的雷电黄色预警,提示该区域有雷电活动发生,预计未来 6 h 预警区域中雷电活动将持续,局地可能伴有阵性降水天气。

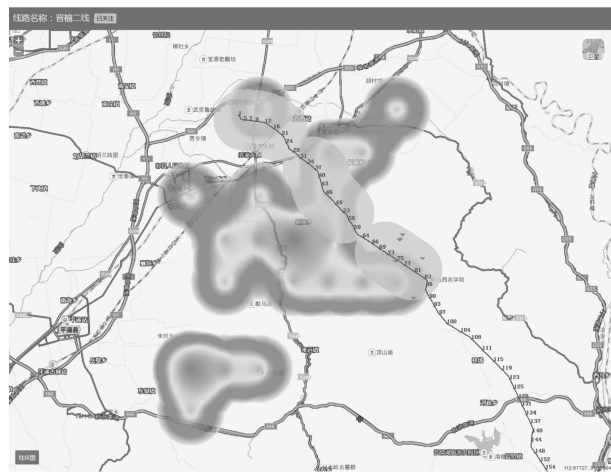


图 7 雷电预警系统于 2015-07-13T22:00:00 发布晋榆二线雷电黄色预警

Fig. 7 Lightning yellow-level warning on 2015-07-13 T22:00:00 released by lightning warning system

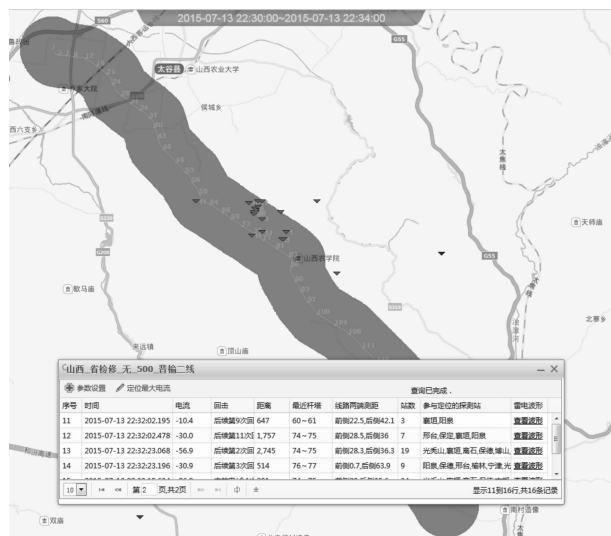


图 8 雷电定位监测系统查询到 2015-07-13T22:32:00 晋榆二线附近落雷信息

Fig. 8 Lightning information list nearby 2015-07-13 T22:32:00 inquiry by lightning location system

系统运行情况表明,可提前近 30 min 发出针对输电线路杆塔区段的雷电预警信息,并且随着雷电活动的不断临近,雷电预警等级呈现逐渐增强的趋

势。结合输电线路实际雷击跳闸故障、雷电定位系统和气象部门的大尺度雷电预报数据对比可知,输电线路雷电预警系统的开发与应用能够进一步满足电力系统输电线路主动性防雷的要求,提供精细化、小尺度的雷电预警信息,为雷电灾前制定应急预案争取宝贵的时间。

4 结语

为了实现基于雷电预警技术的输电线路主动性防雷措施的工程化应用,采用针对输电线路雷电活动预警、线路雷击预警、雷害风险预警3个层次的预警方法,对雷电预警系统中心站进行了总体架构设计和关键技术研发,并完成了一套由该中心站实现的输电线路雷电预警系统,在省级电网公司试点应用中取得了一定的效果。

输电线路雷电预警系统的建设,将进一步完善电网雷击风险预控机制,逐步形成“雷电前期预警、中期快速定位、后期评估治理”的全过程雷电灾害防御体系,为保障输电线路安全稳定运行提供新的技术支撑。雷电是一个极其复杂的物理过程,需要综合多种多维度的雷电观测资料才能实现对其中小尺度的准确预警预报,下一步工作将引入多普勒气象雷达和卫星云图以提升雷电预警系统的预报时间尺度和准确性。

需要指出的是,文中只是给出了该系统在电力行业中的一个典型应用案例。由于雷电预警系统运行时间不长,暂时无法定量衡量预警结果的准确率、漏报率以及误报率。随着系统的不断运行和数据的逐渐积累,后续将持续开展预警效果统计分析与整体评价工作,以期促进雷电预警方法和系统的改进与提升。

参考文献:

- [1] 陈家宏,张勤,冯万兴,等. 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,et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid[J]. High Voltage Engineering,2008,34(3):425-431.
- [2] 陈家宏,冯万兴,王海涛,等. 雷电参数统计方法[J]. 高电压技术,2007,33(10):6-10.
CHEN Jiahong,FENG Wanxing,WANG Haitao,et al. Statistical method of lightning parameters[J]. High Voltage Engineering,2007,33(10):6-10.
- [3] 谷山强,陈家宏,冯万兴,等. 中国电网近年来防雷技术发展及应用效果[J]. 高电压技术,2013,39(10):2329-2343.
GU Shanqiang,CHEN Jiahong,FENG Wanxing,et al. Development and application of lightning protection technologies in power grids of China[J]. High Voltage Engineering,2013,39(10):2329-2343.
- [4] 谷山强,陈家宏,陈维江,等. 架空输电线路雷击闪络预警方法[J]. 高电压技术,2013,39(2):423-429.
GU Shanqiang,CHEN Jiahong,CHEN Weijiang,et al. Method for lightning flashover warning of overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2013,39(2):423-429.
- [5] 谷山强,陈家宏,陈维江,等. 输电线路防雷性能时空差异化评估方法[J]. 高电压技术,2009,35(2):294-298.
GU Shanqiang,CHEN Jiahong,CHEN Weijiang,et al. Evaluation method of the time-space-difference of lightning protection performance of transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2009,35(2):294-298.
- [6] 赵淳,阮江军,李晓岚,等. 输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J]. 高电压技术,2011,37(2):290-297.
ZHAO Chun,RUAN Jiangjun,LI Xiaolan,et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures[J]. High Voltage Engineering,2011,37(2):290-297.
- [7] 彭向阳,李鑫,张国清. 输电线路故障辨识电磁暂态仿真研究[J]. 高压电器,2013,49(8):8-15.
PENG Xiangyang,LI Xin,ZHANG Guoqing. Electro-magnetic transient simulation on fault Identification of overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(8):8-15.
- [8] VINCENT B R,CAREY L D,SCHNEIDER D,et al. Using WSR-88D reflectivity data for the prediction of cloud-to-ground lightning:a central north carolina study[J]. National Weather Digest,2004,27(1):35-44.
- [9] 吴健,陈毅芬,曾智聪. 利用地面电场仪与闪电定位资料进行短时雷电预警的方法[J]. 气象与环境科学,2009,32(1):47-50.
WU Jian,CHEN Yifen,ZENG Zhicong. Method of making a current pre-thundering report is to use the files of the ground electric field instrument and locating the lightning[J]. Meteorological and Environmental Sciences,2009,32(1):47-50.
- [10] 高文胜,张博文,周瑞旭,等. 基于雷电定位系统监测数据的雷暴云趋势预测[J]. 电网技术,2015,39(2):523-529.
GAO Wensheng,ZHANG Bowen,ZHOU Ruixu,et al. Nowcasting of the thunderstorm trend based on data collected by lightning location system[J]. Power System Technology,2015,39(2):523-529.
- [11] 张焯,黄新波,陈小雄,等. 输电线路防外力破坏智能预警系统研究[J]. 高压电器,2015,51(8):54-61.
ZHANG Ye,HUANG Xinbo,CHEN Xiaoxiong,et al. Intelligent early-warning system for preserving transmission

- line from external damage[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):54-61.
- [12] 余 蓉,杜牧云,李国梁,等. 武汉市油气库雷电预警服务系统设计与应用[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(4):407-412.
YU Rong, DU Muyun, LI Guoliang, et al. Design and application of wuhan oil and gas depot lightning warning service system[J]. Torrential Rain and Disasters, 2014, 33(4):407-412.
- [13] 黄新波,张 瑜,朱 波. 智能变电设备监控与决策辅助系统数据库的设计与实现[J]. 高压电器, 2016, 52(3):15-22.
HUANG Xinbo, ZHANG Yu, ZHU Bo. Design and implementation of the database for monitoring and diagnosis system of smart substation equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3):15-22.
- [14] 丛凤侠,杨玉强. 基于 MINA 框架的高性能短信猫服务平台设计[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(4):213-216.
CONG Fengxia, YANG Yuqiang. Design of high performance SMS modem service platform based on MINA framework[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(4):213-216.
- [15] 杨铁军,徐和飞,黄 琳. 一种基于 MINA 框架的数据通信平台设计[J]. 微计算机信息, 2009, 25(11):22-40.
YANG Tiejun, XU Hefei, HUANG Lin. Design of data communication platform based on MINA[J]. Control and Automation, 2009, 25(11):22-40.
- [16] 王 强,王建初,顾宇丹. 电场时序差分在雷电预警中的有效性分析[J]. 气象科学, 2009, 29(5):657-663.
WANG Qiang, WANG Jianchu, GU Yudan. Validity analysis of electric field temporal difference in thunderstorm warning[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(5):657-663.
- [17] 潘家利,王明亮,吴 海,等. 基于大气电场的雷电监测预警技术研究[J]. 气象研究与应用, 2012, 33(3):94-97.
PAN Jiali, WANG Mingliang, WU Hai, et al. Lightning detection and warning based on the atmospheric electric field[J]. Journal of Guangxi Meteorology, 2012, 33(3):94-97.
- [18] 赵 芝,石季英,袁启海,等. 输电线路的雷击跳闸概率预测计算新方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3):51-59.
ZHAO Zhi, SHI Jiying, YUAN Qihai, et al. A new prediction calculation method of transmission lines lightning trip probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3):51-59.
- [19] 冯万兴,朱 晔,郭钧天,等. 基于改进的 DBSCAN 方法和多项式拟合的雷电短时预测[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(10):2028-2033.
FENG Wanxing, ZHU Ye, GUO Juntian, et al. Lightning forecast based on the improved DBSCAN and polynomial fitting[J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(10):2028-2033.
- [20] 梁 爽. 基于 SOA 的云计算框架模型的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(35):92-94.
LIANG Shuang. Design and realization of cloud computing framework model based on SOA[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(35):92-94.
- [21] 刘 涛,侯秀萍. 基于 ESB 的 SOA 架构的企业应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(5):231-233.
LIU Tao, HOU Xiuping. Research of enterprise application based on service-oriented architecture of ESB[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(5):231-233.
- [22] 张 行,李万启,郭创新,等. 基于 RESTful 快捷服务总线的输变电设备全景信息集成平台设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(12):3980-3986.
ZHANG Hang, LI Wanqi, GUO Chuangxin, et al. Transmission and transformation equipment data integration platform design based on RESTful efficient service bus[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12):3980-3986.
- [23] 唐跃中,曹晋彰,郭创新,等. 电网企业基于面向服务架构的应用集成研究与实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14):50-54.
TANG Yuezhong, CAO Jinzhang, GUO Chuangxin, et al. Research and implementation of power grid enterprise application integration based on services-oriented architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14):50-54.
- 陶汉涛(1986—),男,工程师,主要研究方向为电网雷电监测与预警技术、电力系统自动化软件研发技术(通信作者)。
- 谷山强(1980—),男,博士后,高级工程师,主要研究方向为电网雷电监测、预警与防护技术。