

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.006

输电线路跳闸雷电绕反击故障自动诊断系统的研发

陶汉涛¹, 冯万兴¹, 卢恩泽¹, 吴大伟¹, 何君¹, 刘旭², 郭蓉蓉³

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080;
3. 广西电网公司电力科学研究院, 南宁 530023)

摘要: 为提升输电线路雷击故障判定的自动性与时效性, 最大限度减少输电线路因雷击故障导致的停运时间, 研发了输电线路跳闸雷电绕反击故障自动诊断系统。基于输电线路跳闸信息和雷电定位系统的广域监测数据, 进行雷电流幅值与杆塔绕反击耐雷水平对比, 实现了雷击故障杆塔区间准确定位和雷电绕反击性质自动辨别。该系统已在南方电网部署应用, 将长期以来雷击故障点事后的人工查询和雷击事故判断提升为实时诊断, 为输电线路雷击故障快速处置、差异化防雷评估改造工作提供了有效的技术指导, 对于保障电网安全稳定运行具有重要的意义。

关键词: 雷电定位系统; 跳闸信息; 绕反击故障判定; 雷击故障自动诊断系统

Research and Development of Automatic Diagnosis System of Lightning Trip-out Shielding Failure and Back Striking Fault for Transmission Line

TAO Hantao¹, FENG Wanxing¹, LU Enze¹, WU Dawei¹, HE Jun¹, LIU Xu², WU Rongrong³

(1. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
2. China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
3. Guangxi Power Grid Electric Power Research Institute, Nanning 530023, China)

Abstract: In order to improve the automaticity and efficiency of lightning trip-out fault diagnosis for transmission line, and to minimize the downtime of transmission line caused by lightning failure, a lightning trip-out shielding failure and back striking fault automatic diagnosis system for transmission line is proposed and developed. Comparing lightning current with the shielding failure and back striking lightning-withstand level of line tower based on the tripping information of transmission line and wide-area lightning monitoring data of lightning location system, the lightning failures tower range accurate positioning and lightning trip shielding failure and back striking fault automatic identification is achieved. The system has been applied to southern power grid, updates the long-standing lightning strike fault points by artificial query and lightning accident judgment to real-time automatic diagnosis, and provides effective technical guidance for rapid disposal of lightning failure and differentiated lightning protection evaluation of transmission line, so as to ensure the operation of power grid more security and stability has the vital significance.

Key words: lightning location system; tripping information; judgement of lightning shielding failure and back striking; lightning fault automatic diagnosis system

0 引言

雷电是联合国公布的十大自然灾害之一, 电网

因其广域分布特征, 更容易遭受雷电冲击。据中国高压输电线路故障统计数据显示, 雷击引起的跳闸次数占总跳闸次数的 40%~70%, 是造成输电线路非正常停运的首要因素, 对电网基础设施安全构成了

收稿日期: 2015-12-19; 修回日期: 2016-01-24

基金项目: 国家电网公司总部科技指南项目(SG2015)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(SG2015).

严重威胁^[1-3]。

目前, 中国电网公司已建设有雷电定位系统, 并实施了雷电原始数据联网工程, 形成了覆盖全国电网的雷电监测网。雷电定位系统是雷击故障定位、雷击事故鉴别的主要技术手段, 已成为中国电网防雷减灾的重要支撑平台^[4-5]。当输电线路发生跳闸后, 通过访问系统查询故障时刻输电线路走廊内的落雷情况, 结合雷电专业知识或经验人工判定跳闸故障是否为雷击, 从而为线路恢复正常运行提供技术支持。但长期以来, 雷击故障点查找和雷击故障判断均属于事后的雷击故障处理措施, 尚缺乏输电线路发生故障事中自动诊断、甚至事前主动报警等手段, 未能做到为输电线路快速恢复正常运行争取到宝贵的时间^[6-10]。同时雷电定位系统必须依赖于工作站和特定电力系统的内网环境, 无法满足移动互联网时代用户更加便捷化、个性化的雷电应用体验需求。

现有的以分布式行波测距技术为基础的雷击故障诊断方法, 可通过分析故障电流的波形特征来完成雷击故障与非雷击故障、雷电绕击与反击类型的辨识。但为了实现故障电流的监测, 需要在输电线路路上安装若干个电流信号检测装置, 不仅增加了额外的建设投资, 诊断效果还易受弧垂、波速、波形衰减以及干扰信号等影响。

为了充分利用已有数据资源实现雷电绕反击故障的自动实时诊断, 文中融合能量管理系统(energy management system, EMS)跳闸信息、雷电定位系统(lightning location system, LLS)雷电监测数据以及输电线路杆塔台账参数, 研究输电线路雷电绕反击故障性质的判定方法, 开发了一套输电线路雷击故障自动诊断系统, 实现对雷电定位系统应用功能的扩展。EMS、LLS 系统的监测数据时间达到微秒级, 基于该方法开发的应用系统可实现雷击故障实时诊断, 为故障快速处置、线路恢复正常运行节约宝贵的时间。该系统为用户提供基于 Web 浏览器和移动终端两种访问方式的便捷智能化的雷击故障实时诊断以及相关辅助功能, 有效提高运维管理人员进行输电线路跳闸故障判定的时效性与准确性, 对于提升中国电网防雷技术水平具有重要的作用。

1 数据获取方法

输电线路跳闸信息、雷电监测数据和线路杆塔台账是输电线路跳闸雷击故障判断和雷击故障性质辨别的基础性数据资源, 这些数据的获取是实现雷击故障自动诊断研究工作的首要条件。电力系统

网省公司已建有雷电监测系统和能量管理系统, 可提供广域雷电监测数据和依据开关变位的输电线路跳闸详细故障信息。文中将基于这二者系统的数据融合研究雷击故障诊断方法并开发相应软件系统, 为电力系统相关人员提供自动、实时的故障诊断工具。

计算机软件技术的飞速发展, 为电力行业的应用系统开发以及系统间的交互提供了强有力的技术支撑, Web 服务就是极其具有代表性的技术之一。它凭借能够实现异构系统之间相互通信与数据交换, 具有平台环境无关性和软件开发语言无关性的优势被各类软件系统广泛采用。基于 Web 服务技术开发面向雷电定位系统和能量管理系统获取雷电监测数据、线路台账和跳闸信息是当前形势下电力系统内不同系统间进行数据交换最为可行高效的解决办法。

雷电定位系统和能量管理系统通过企业内网以消息交换的方式对外提供 Web 服务数据, 定义请求与响应格式见图 1、2。基于 Web 服务调用技术和 XML 格式的消息通信协议, 可以方便地按需获取查询范围内(实时/历史)的线路跳闸和雷电监测(杆塔参数类似)的标准化格式数据, 为雷击故障自动诊断分析工作提供了高效、便捷、快速的数据获取途径。

请求:

```
<soapenv: Body>
  <tem: GetLineBWEventDataRequest>
    <startTime>2015-08-20T12: 00: 00</startTime>
    <endTime>2015-08-20T14: 00: 00</endTime>
  </tem: GetLineBWEventDataRequest>
</soapenv: Body>
```

响应:

```
<soap: Body>
  <tem: GetLineBWEventDataResponse>
    <线路名称>增穗甲线</线路名称>
    <开关名称>5051</开关名称>
    <分闸时间>2015-08-20T13: 55: 40</分闸时间>
    <分闸时间>500 kV</电压等级>
  </tem: GetLineBWEventDataResponse>
</soap: Body>
```

图 1 线路跳闸信息 Web 服务的请求与响应格式

Fig. 1 The request and response format of trip-out information of transmission line

2 雷击故障诊断基本原理

雷电对运行中的输电线路会产生巨大冲击, 形成雷电过电压, 造成绝缘子串闪络, 容易导致输电线路发生跳闸。根据雷电是否直接作用于输电线

请求:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Table name='按线路查询' count='4'>
  <timedate>2015-08-20T13: 55: 40</timedate>
  <lineName>增穗甲线</lineName>
  <timeRadius>60</timeRadius>
  <corridorRadius>1000</corridorRadius>
</Table>
```

响应:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Table name='雷电查询结果' count='n'>
  <Columns>序号|时间|经度|纬度|电流(kA)|回击</Columns>
  <Data>1|2015-08-20T13: 55: 12.439|113.457790
  |23.159776|-36.9|1</Data>
  <Data>2|2015-08-20T13: 55: 25.662|113.658436
  |23.904227|-7.9|1</Data>
  <Data>3|2015-08-20T13: 55: 38.588|113.326411
  |23.103572|-28.1|2</Data>
  <Data>4|2015-08-20T13: 55: 39.782
  |113.490187|23.124872|-155.5|6</Data>
  .....
  <Data>n|2012-08-20T13: 55: 40.976|113.484200
  |23.138351|-16.0|3</Data>
</Table>
```

图2 雷电监测数据 Web 服务的请求与响应格式

Fig. 2 The request and response format of lightning monitoring data

路,可将雷电分为感应雷和直击雷两大类。文中提出基于输电线路跳闸信息和雷电定位系统广域监测数据的雷击故障自动诊断方法,主要适用于 220 kV 及以上电压等级的输电线路,由于感应雷引起的过电压对于绝缘水平较高的输电线路一般不会发生闪络故障,因此主要研究输电线路由直击雷(即雷电绕反击)引发跳闸故障的自动诊断方法。

2.1 雷击故障判断

应用 Web 服务技术以时间周期轮询的方式获取 EMS 和 LLS 的实时数据信息,首先对跳闸线路实现雷击故障与非雷击故障判断,具体实现步骤如下:

1)对获取的 EMS 跳闸线路和 LLS 线路数据进行正则算法匹配,使得 EMS 中的线路名称与 LLS 中的线路名称形成准确的对应关系。

2)以 EMS 跳闸线路的时间点前后 1 min 为时间查询范围,线路走廊半径 1 km 区域为空间查询范围,调用 LLS 提供的 Web 服务接口查询跳闸线路周围的详细落雷参数。

3)当该跳闸线路附近落雷在时间及空间上与故障点相吻合时,初步判定为雷击故障;否则,为非雷击故障。

完成雷击故障判断后,得到导致该线路跳闸的雷电数据集合,对所有可能引起跳闸的雷电按离跳闸时间点的时间差排序,当雷电发生时间与跳闸时

间点越近,对线路跳闸构成威胁性越大,记录其附近的杆塔号与导线垂直距离以及雷电流幅值,为下一步雷击性质识别提供准备。

2.2 雷击性质识别

输电线路遭受雷击后,因雷击点的位置不同导致作用在绝缘子上雷电过电压形式的不同,可分为绕击和反击两种。雷击杆塔塔顶或避雷线时,塔顶电位骤升,当绝缘子两端电压差超过其耐受电压时发生闪络,该过程称为反击;雷电绕过避雷线直接击在导线上的过程称为绕击,绕击产生的雷电过电压也会引发绝缘子闪络。雷电绕击、反击故障因产生机理及过程的不同,防护措施也不尽相同,反击主要与杆塔接地电阻和线路绝缘强度有关;绕击主要与保护角有关^[1]。发生雷击故障后,对雷击性质进行识别,实现雷电绕击与反击故障类别的判定,可为输电线路进行有针对性的防雷设计与改造提供技术依据。

2.2.1 反击耐雷水平

在线路防雷工程设计中,避雷线与导线间的空气距离一般留有足够的裕度,因雷击避雷线引起的线路闪络跳闸可以忽略不计^[12]。雷击输电线路杆塔顶部时,雷电流经杆塔和避雷线分流,见图 3。

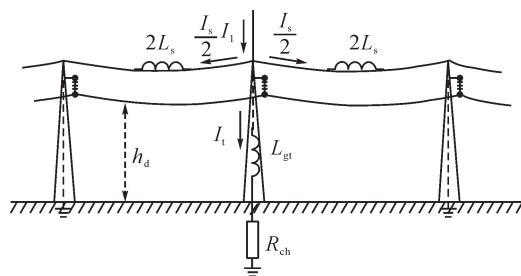


图3 雷击塔顶时雷电流的分布图

Fig. 3 Distribution diagram of lightning current when lightning striking at tower top

可推导出雷击杆塔时的耐雷水平 I 为^[12]

$$I = \frac{U_{50\%}}{(1-k)(\beta R_{ch} + \beta \frac{L_{gt}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6})} \quad (1)$$

式(1)中: h_d 为导线对地平均高度; L_{gt} 为杆塔的等值电感; R_{ch} 为杆塔的冲击接地电阻; β 为杆塔分流系数; k 为避雷线与导线间的耦合系数; $U_{50\%}$ 为绝缘子 50%冲击闪络电压。

式(1)中,计算反击耐雷水平时未考虑导线上工作电压,适用于 500 kV(330 kV)以下电压等级的输电线路。对于超特高压输电线路,导线上的工作电压所占比例较大,不可忽略,故对式(1)进行修正后得到反击耐雷水平为^[13]

$$I' = \frac{U_{50\%} + U_m \cos \varphi}{(1-k)(\beta R_{ch} + \beta \frac{L_{gl}}{2.6} + \frac{h_d}{2.6})} \quad (2)$$

式(2)中: U_m 为导线上工频电压幅值; φ 为雷击时电压相角。

2.2.2 绕击耐雷水平

绕击的原理可借助传统的电气几何模型进行分析, 见图 4。

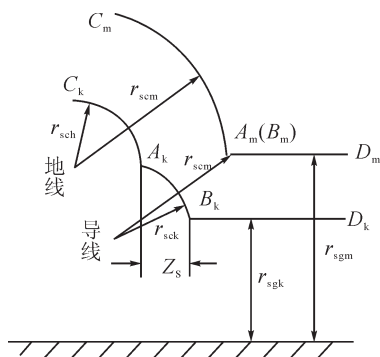


图 4 输电线路绕击电气几何模型

Fig. 4 Electrical geometry model of lightning shielding failure

当雷电流大于一定值时, 导线的暴露弧 $A_k B_k$ 缩减至零, 已不可能发生绕击, 此时对应的雷电流为可发生绕击的最大雷电流 $I_{\max}$ 。由击距与雷电流幅值的关系式可推导出最大雷电流 $I_{\max}$ 为

$$I_{\max} = \left(\frac{r_{sc}}{A} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3)$$

式(3)中: r_{sc} 为临界击距; 采用 IEEE 导则中推荐的击距公式, $A=8, b=0.65$ 。临界击距 r_{sc} 的计算公式为^[12]

$$r_{sc} = \frac{h_d + h_b}{2[1 - \sin(\theta + \alpha)]} \quad (4)$$

式(4)中: h_b 为避雷线平均高度; α 为杆塔的山坡倾角; θ 为导线保护角。

雷电绕过避雷线直击导线见图 5。

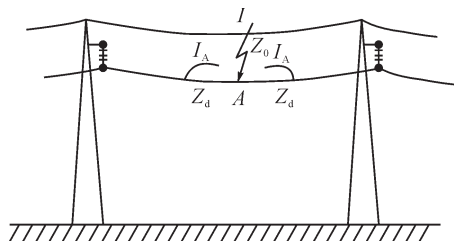


图 5 雷电绕击导线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of lightning strike wire

流经雷击点 A 处的雷电流幅值为^[12]

$$I_A = I \frac{Z_0}{Z_0 + Z_d/2} \quad (5)$$

式(5)中: I 为雷击电流; Z_0 为主放电通道的波阻抗; Z_d 为导线的等值波阻抗。

进一步由绝缘子 50% 闪络电压可推导出线路绕击的最小雷电流为

$$I_{\min} = U_{50\%} \frac{2Z_0 + Z_d}{Z_0 Z_d} \quad (6)$$

2.3 雷击故障诊断流程

基于 EMS 跳闸信息、LLS 系统雷电和线路杆塔参数, 结合式(1)–(6)计算跳闸线路雷击杆塔的绕反击耐雷水平实现输电线路雷击跳闸故障的实时自动诊断。这样的方法使得雷电实时监测和雷击跳闸分析工作紧密结合, 分析所需要的时间被分散在整个雷击过程中而不是集中消耗在用户的查询处理中, 解决了空间分析速度缓慢、雷暴期间用户集中查询信息处理的瓶颈, 从被动式响应模式演变为主动式提供服务模式, 形成了雷击跳闸实时分析诊断工作的自动化处理^[14–18]。输电线路跳闸雷击故障诊断运行流程见图 6, 主要实现步骤如下:

1) 依据 EMS 跳闸线路和 LLS 雷电数据、线路数据首先进行是否雷击故障判断, 当为雷击跳闸则获取该线路走廊内的雷电数据集, 进一步判定雷击故障性质;

2) 基于杆塔详细尺寸、绝缘配置、地形地貌参数、导线型号、地线型号、接地电阻等数据依据上一节公式计算输电线路逐基杆塔绕反击耐雷水平并存入数据库, 此过程也可在雷电定位系统运维时导入线路同步完成。取 I 为反击耐雷水平电流, $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 为绕击耐雷水平最小和最大危险电流, I_a 为实际雷电流幅值;

3) 将雷电流幅值与附近杆塔的绕反击耐雷水平比较, 判断雷击闪络的可能原因是反击或绕击。当 $I \leq I_a$ 时, 线路的雷击闪络性质判定为反击; 当 $I_{\min} \leq I_a \leq I_{\max}$ 时, 则线路的雷击闪络性质判定为绕击; 若 I 均不在此范围内, 则初步无法定性线路的雷击闪络原因^[19], 待现场巡线确认;

4) 保存输电线路雷击诊断结果至数据库, 并将诊断结果信息以短信形式实时推送给线路相关运维检修人员提供及时的技术参考。

3 雷击故障诊断系统设计与实现

3.1 系统结构设计

研发输电线路雷击故障诊断系统, 为用户提供多种访问形式的智能化雷击故障实时诊断功能, 建立电网雷击事故辅助决策的基础应用和研究平台, 有效提高运维管理人员对输电线路跳闸故障判定

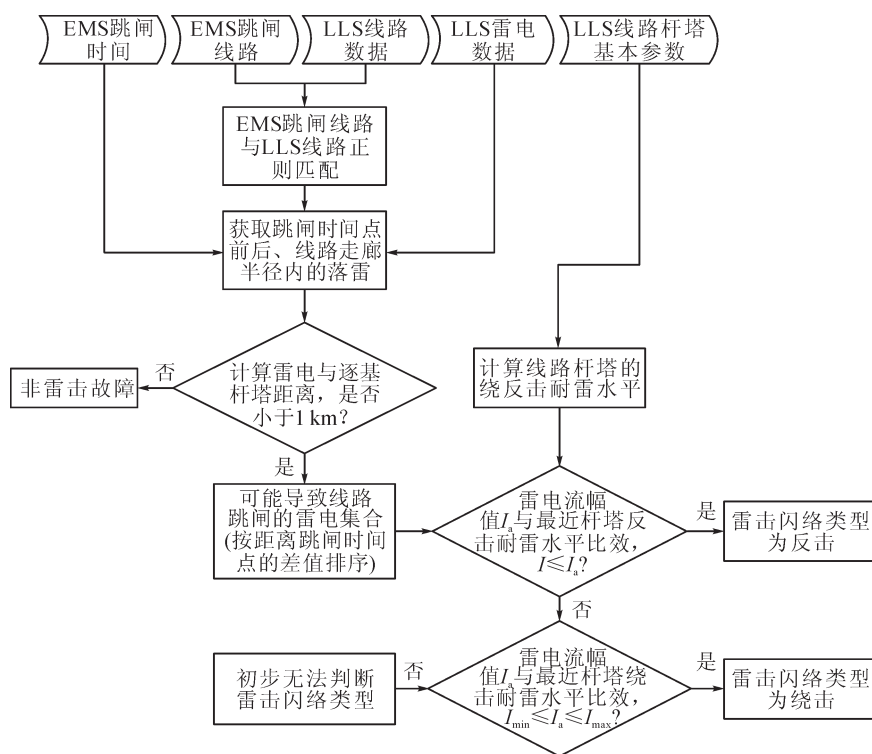


图6 输电线路跳闸雷击故障自动诊断运行流程图

Fig. 6 Flow chart of lightning fault automatic diagnosis method for transmission line

的时效性和准确性,在中国电网防雷实际工作中具有很强的实用意义。

互联网的飞速发展使得面向服务的软件开发逐渐成为网络化软件的主流趋势,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,将应用程序的不同功能单元依靠 Web 服务之间定义良好的接口和契约联系起来,为构建性能稳定、分布协作、开放共享的软件架构提供了良好的解决方案。

该系统采用 SOA 架构分层设计见图 7,分为数据接入层、数据集成层、逻辑分析层、应用展示层和终端访问层。系统从数据接入层通过 Web 服务接口获取 EMS 和 LLS 提供的基础数据;数据集成层是数据的存储与管理中心,包括线路跳闸数据、雷电地闪数据、地理信息数据以及线路属性和杆塔数据;逻辑分析层是系统功能业务的核心,是线路名匹配、线路走廊雷电活动计算、输电线路逐基杆塔绕反击耐雷水平值计算、雷击故障智能分析诊断的实施环节;应用服务层是以 Web 服务方式为用户提供所需的应用服务功能;终端访问层面向用户提供基于 Web 浏览器和移动终端的两种访问模式。

3.2 系统功能实现

系统主要应用于实时自动进行输电线路雷击故障点准确查找和雷击故障性质判断,以指导输电

线路发生故障后的应急抢修和快速恢复。具有数据接入、线路匹配、绕反击耐雷水平值计算、雷击故障自动诊断后台处理功能和面向用户使用的诊断结果信息展示、短信主动推送、跳闸线路雷击统计、线路耐雷水平管理以及线路故障巡线反馈等前台应用功能,见图 8。用户应用功能详细描述如下:

1)诊断结果信息展示。基于雷击故障智能诊断方法,实现输电线路雷击故障诊断结果在 Web 端和移动端的实时展示。包括跳闸线路名、跳闸时间、落雷个数、重点排查杆塔段号及故障性质等信息。

2)诊断结果短信推送。将输电线路雷击故障自动诊断结果以短信方式主动推动给相关运维管理人员,让用户随时随地及时获取跳闸线路诊断信息。同时,可对用户所关注区域或者电压等级进行自由设定,只发送具有针对性的线路跳闸信息给该用户,跳闸信息采用标准格式,例如“【雷击跳闸提醒】500 kV 增穗×线在 2015-08-20T13:55:40 发生跳闸,经分析 13:55:38 杆塔 13 号附近 426 m 处有 -28.1 kA 落雷,依据该杆塔耐雷水平判定故障原因为雷电绕击。”

3)跳闸线路雷击统计。实现跳闸线路按照区域/电压等级进行统计,并统计雷击导致跳闸的次数,为研究雷击跳闸特性和线路频繁跳闸治理工作提供数据支撑。

4)线路耐雷水平管理。计算线路逐基杆塔绕反

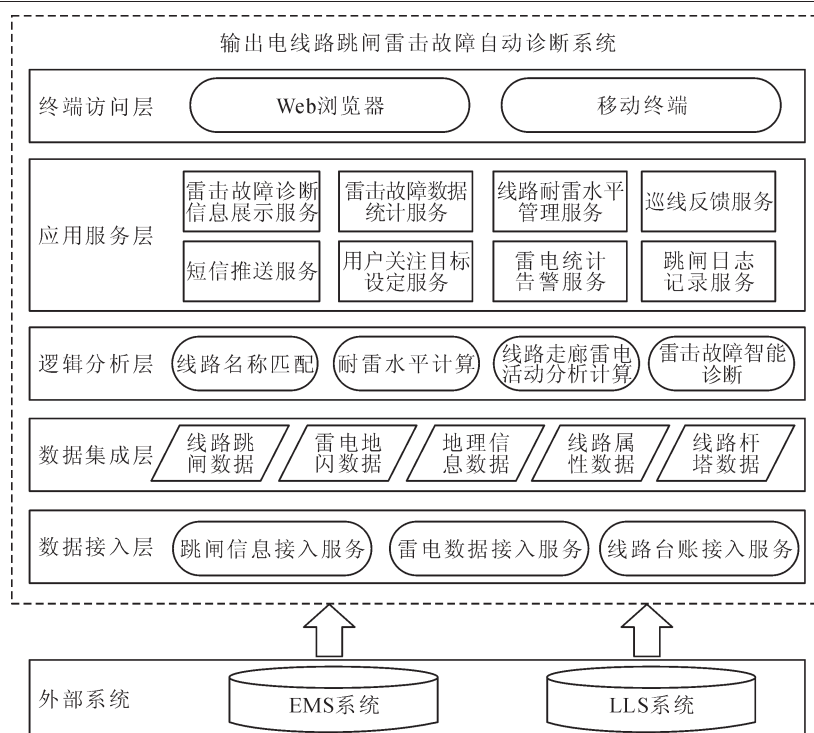


图7 输电线路跳闸雷击故障自动诊断系统逻辑结构图

Fig. 7 Logic structure diagram of lightning fault automatic diagnosis system for transmission line

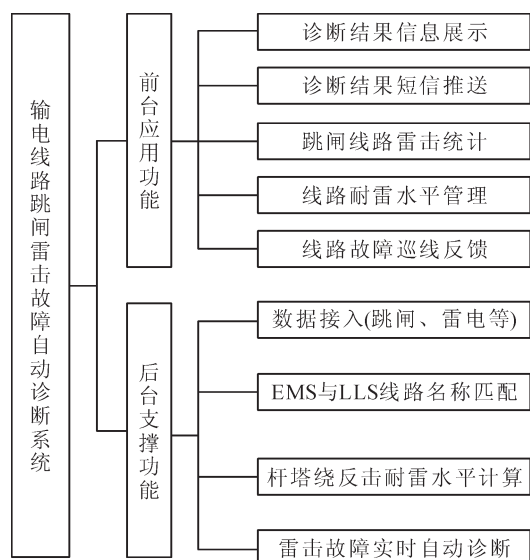


图8 输电线路跳闸雷击故障自动诊断系统功能设计图

Fig. 8 Function design figure of lightning fault automatic diagnosis system for transmission line

击耐雷水平,支持耐雷水平值的导入、修改、查看等操作,为输电线路跳闸雷击故障性质判定提供依据。

5)线路故障巡线反馈。为用户提供跳闸线路事后巡线反馈在线填报窗口,真实记录跳闸线路的实际巡线情况,总结线路故障原因和规律以提升线路管理运行水平。

3.3 应用效果分析

基于以上雷击故障自动诊断方法和系统设计,

研发了一套输电线路雷击故障诊断软件系统,在南方电网公司部署并取得了良好的应用效果。选取2015年8月份南方电网500 kV输电线路跳闸雷击故障诊断结果为例(取跳闸时间前后1 min、线路走廊半径1 km),系统共获取EMS跳闸信息24条,诊断出雷击跳闸17次,其中判定发生雷电绕击13次、反击1次,初步无法判定故障类型3次。通过系统的线路故障巡线反馈功能,收集到后期线路运维人员上传的实际巡线结果,见表1。

表1 雷击故障自动诊断与实际巡线情况对比

Table 1 Compared result of lightning fault automatic diagnosis with actual line patrol

故障类型		系统自动诊断/次	实际巡线统计/次
雷击故障	绕击	13	17
	反击	1	1
	无法判断	3	—
非雷击故障	—	7	6

在实际巡线过程中,认定发生雷击故障18次(绕击17次、反击1次)、非雷击故障6次。依据雷击故障自动诊断结果与实际巡线情况对比发现,该系统的雷击故障识别率达94.4%,绕击识别率达76.5%,诊断效果相对准确。故该系统可为运维检修人员进行故障快速处理、保障线路恢复正常运行提供有效的指导。

4 结语

为了实现输电线路雷击故障实时自动诊断,通过跳闸线路信息接入,结合现有雷电定位系统基础数据实现了雷击故障自动鉴别和绕反击故障性质判定,将雷击事故判断和雷击故障点查找的事后查询升级为实时自动诊断,更加及时高效的为线路运维管理、调度运行控制、应急防灾减灾提供动态参考信息,以最大限度减少输电线路因发生雷击故障导致的停运时间。

输电线路跳闸雷击故障自动诊断系统的研发与应用,不仅为用户提供了丰富实用的软件功能和便捷多样化的访问方式,更是以电网异构系统间信息资源共享的方式抵御雷击事故提供了有效的技术手段,降低电网因雷击而遭受的损失,具有重大的社会经济效益和应用推广价值。

随着系统的逐渐运行,将不断积累雷击故障数据和雷电监测数据,在此基础上需进一步完善输电线路绕击判定模型,减少系统雷击故障类型无法确定的情形,提高雷电绕反击识别率。同时,依托大数据技术和反演复现方法深层次研究雷击故障规律特征,以实现输电线路雷电报警技术,为电力部门主动规避雷害风险提供技术支撑手段和辅助决策信息,实现雷电事前临近报警、事中自动诊断、事后巡线反馈的多维度运行管理,进一步提升中国电网输电线路防雷技术水平。

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] 国网武汉高压研究院. 雷电定位系统全国组网技术的研究及开发[R]. 武汉:国网武汉高压研究院,2005.
Wuhan High Voltage Research Institute of State Grid. LLS's nationwide network technology research and development[R]. Wuhan:Wuhan High Voltage Research Institute of State Grid,2005.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 姚陈果,吴昊,王琪,等. 基于非接触式雷电流测量装置的新型线路分布式雷击故障定位方法[J]. 高电压技术,2014,40(9):2894-2902.
YAO Chenguo,WU Hao,WANG Qi,et al. Novel distributed lightning fault location method for transmission line based on non-contact measurement device of lightning current[J]. High Voltage Engineering,2014,40(9):2894-2902.
- [6] 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.
- [7] 彭向阳,钱冠军,李鑫,等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术,2012,38(8):1965-1972.
PENG Xiangyang,QIAN Guanjin,LI Xin,et al. Intelligent trip-out fault diagnosis of overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering,2012,38(8):1965-1972.
- [8] 杜林,陈寰,陈少卿,等. 架空输电线路雷电绕击与反击的识别[J]. 高电压技术,2014,40(9):2885-2893.
DU Lin,CHEN Huan,CHEN Shaoqing,et al. Identification method of shielding failure and back striking for overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering,2014,40(9):2885-2893.
- [9] 黄然,王磊,赵现平,等. 基于危险雷电流区间分布的输电线路雷击故障性质判断方法[J]. 电瓷避雷器,2013(1):74-78.
HUANG Ran,WANG Lei,ZHAO Xianping,et al. Identification of shielding failure and back striking based on interval distribution of dangerous lightning current[J]. Insulators and Surge Arresters,2013(1):74-78.
- [10] 张启明,周自强,谷山强,等. 海量雷电监测数据云计算应用技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(24):58-63.
ZHANG Qiming,ZHOU Ziqiang,GU Shanqiang,et al. Cloud computing application technology of massive lightning monitoring data[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(24):58-63.
- [11] 张纬钹,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社,2002:122-123.
ZHANG Weibo,HE Jinlong,GAO Yuming. Over voltage protection and insulation coordination[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2002:122-123.
- [12] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京:中国电力出版社,2006:196-200.
LIN Fuchang. High voltage engineering[M]. Beijing:China Electric Power Press,2006:196-200.

- [13] 贾磊, 郑士普, 舒亮, 等. 计及工频电压时雷击输电线路塔顶的耐雷水平研究[J]. 电瓷避雷器, 2006(1):29-32.
JIA Lei, ZHENG Shipu, SHU Liang, et al. Investigation on the lightning withstand level in case of lightning striking to the tower top with consideration of power frequency voltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(1):29-32.
- [14] 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[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8):8-15.
- [15] 任达勇, 杨泽明, 李爱民, 等. 高压直流输电线路故障特征影响因素分析[J]. 高压电器, 2010, 46(11):70-73.
REN Dayong, YANG Zeming, LI Aimin, et al. Analysis of the influencing factors on electric characteristics of HVDC line faults[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11):70-73.
- [16] 普子恒, 阮江军, 杜志叶, 等. 同塔双回 500 kV 高压直流线路感应过电压研究[J]. 高压电器, 2012, 48(10):52-57.
PU Ziheng, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Investigation to over-voltage on 500 kV HVDC double-circuit lines on same tower[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10):52-57.
- [17] 彭勇, 王志新, 陈军, 等. 输电线路雷击故障定位与识别[J]. 高电压技术, 2010, 36(2):406-410.
PENG Yong, WANG Zhixin, CHEN Jun, et al. Lightning fault location and recognition technologies in transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2):406-410.
- [18] 束洪春, 张广斌, 孙士云, 等. ± 800 kV 直流输电线路雷电绕击与反击的识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7):13-19.
SHU Hongchun, ZHANG Guangbin, SUN Shiyun, et al. Identification of shielding failure and back striking in UHVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7):13-19.
- [19] 赵淳, 陈家宏, 谷山强, 等. 山区复杂地形条件下输电线路雷击跳闸故障分析方法[J]. 电网技术, 2011, 35(12):136-141.
ZHAO Chun, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al. Analysis on the lightning trip-out failure of transmission line under conditions of complex landscape in a mountainous area[J]. Power System Technology, 2011, 35(12):136-141.

陶汉涛(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统雷电监测与防护技术、电力系统自动化软件研发技术。

冯万兴(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统雷电监测与预警技术、输电线路运行及故障诊断技术。