

DOI: 10.7667/PSPC180015

基于分层分布的变电站带电运维智能化技术及应用

周正钦¹, 杜振波¹, 王文瑞², 江翼¹, 王辉¹, 刘正阳¹

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 200120)

摘要: 针对变电站运维工作中存在的效率低、管理成本高和智能化程度低等问题, 将带电检测技术和分层分布的设计思想应用到变电站的智能化运维中, 研制了分层分布的变电站智能带电运维系统。提出了分层分布的变电站智能运维模式, 并进行了应用验证。该系统成功提高了变电站运维的网络化、自动化和智能化水平, 提升了变电站运维的效率和质量, 具有良好的推广和应用价值。

关键词: 变电站; 分层分布; 带电检测; 运维; 红外测温; 局部放电; 工频电场

Intelligent technology and application of live detection for substation operation and maintenance based on hierarchical distribution

ZHOU Zhengqin¹, DU Zhenbo¹, WANG Wenrui², JIANG Yi¹, WANG Hui¹, LIU Zhengyang¹

(1. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency, high management cost and low intelligence in substation operation and maintenance, this paper, by applying the design of live detection technology and hierarchical distribution to the intelligent operation and maintenance of substations, develops hierarchical distribution of live detection for substation operation and maintenance intelligent system. It puts forward the hierarchical distribution substation intelligent operation and maintenance mode and verifies the application. The system has improved the networking, automation and intelligent level of substation operation and maintenance successfully and enhanced the efficiency and quality of substation operation and maintenance, which has a good promotion and application value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51537009) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 524625160017).

Key words: substation; hierarchical distribution; live detection; operation and maintenance; infrared temperature measurement; partial discharge; power frequency electric field

0 引言

变电站是电力系统的重要组成部分, 变电站中设备的安全稳定运行关系到整个电力系统的稳定运行^[1]。变电站的运行维护水平影响着变电站乃至整个电网的可靠性。目前变电站运维主要依靠人工巡视与检修的方式, 导致运维周期长、时效性差和效率低^[2]。带电检测技术对于变电站的运维有重要影响, 采用带电检测技术进行变电站运维能够发现人眼和耳朵不能发现的问题, 可以提前发现变电站运

维中存在的安全隐患, 无需停电, 不会影响变电站周边的用户用电, 同时带电检测操作安全、便捷, 结果准确、可靠^[3-4]。变电站设备的带电检测工作可以与日常巡视同步进行, 大大提高变电站运维的效率和可靠性。

针对上述问题, 从系统结构、功能优化、快速诊断和人员操控的角度出发, 将分层分布的技术应用到变电站带电运维中, 提出了分层分布的变电站智能化带电运维系统的具体实施方案。包括变电站智能运维装置和带电检测传感器, 可以实现变电站设备的智能化带电运维, 该系统兼容 IEC 61850 通信规约, 同时具有操作简单、可扩展性强的优点。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51537009); 国家电网公司科技项目资助(524625160017)

1 系统总体设计

分层分布的变电站智能化带电运维系统采用分层分布式结构设计, 分为远程主站管理层、站内管理层和本地监测层^[5-9]。包含上位机和下位机两部分: 上位机主要包含运维数据监测界面和运维管理界面; 下位机主要是系统的硬件开发和嵌入式程序设计, 包括运维装置、采集单元和监测单元等。其系统组成如图 1 所示。

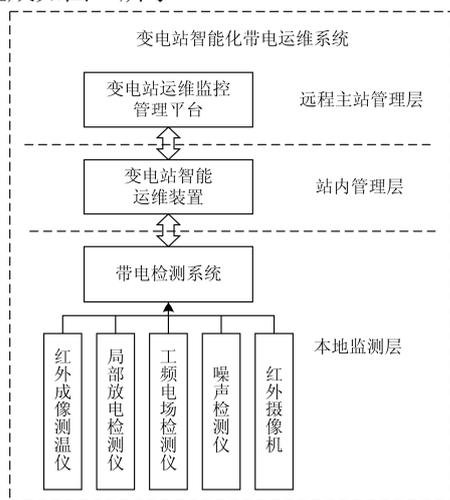


图 1 变电站智能运维系统结构图

Fig. 1 Structure of substation intelligent operation and maintenance system

分层分布的变电站智能化带电运维系统定位于变电站运维人员对变电站设备进行智能化、快速化运维工作, 集成了智能运维数据采集技术、带电检测技术、数据处理技术和故障诊断技术等, 实现运维系统集成度高、部署便捷和功能完善, 并结合变电站运维的实际需求, 最终形成带电检测与设备运维一体化的系统^[10]。

该系统采用带电检测技术可接入多种带电检测传感器, 包括红外成像测温仪、局部放电检测仪、工频电场检测仪、噪声检测仪和红外摄像机等。该系统可以远程制定运维策略和任务, 系统自动进行运维数据采集和数据分析处理, 最终形成相应的运维报告。该系统在使用过程中不需要进行停电操作, 对不同的变电站设备根据典型检测量和典型缺陷制定有针对性的运维任务, 提高了变电站设备运维的效率, 自动化数据采集和处理保证了运维结果的准确性和可靠性。

2 变电站智能运维装置

变电站智能运维装置作为站内管理层, 主要实

现对变电站中的带电检测系统采集的带电检测传感器的数据进行汇聚、融合和存储, 并通过通信单元将数据发送至远程主站管理层。变电站智能运维装置的硬件框图如图 2 所示。

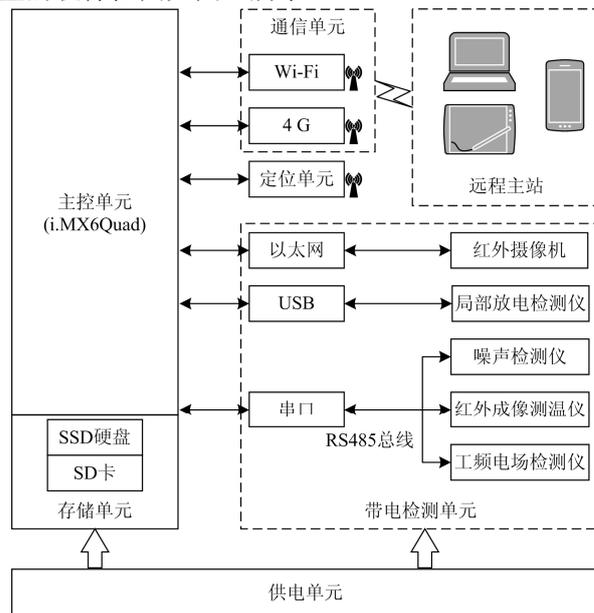


图 2 远程监控系统硬件框图

Fig. 2 Remote monitoring system hardware diagram

变电站智能运维装置以 NXP 公司的 i.MX6Quad 系列的 ARM 芯片作为主控单元的核心处理器^[11], 主控单元作为装置的核心模块主要实现整个系统的数据处理和对其他模块的管理调度。

通信单元包括 Wi-Fi 通信和 4G LTE 通信, 采用 TI 的 CC3200 传输 Wi-Fi 信号, 采用华为的 ME909s-821 LTE 模块传输 4G LTE 信号, Wi-Fi 通信用于与手持终端进行连接和无线数据传输, 4G LTE 通信用于与远程主站之间的通信和数据交互。通信方式兼容电力通用的 IEC 61850 标准^[12-13]。

定位单元采用 ublox 的 NEO-M8 模块, 支持 GPS、伽利略、格洛纳斯和北斗定位, 定位单元用于对监控系统进行位置定位和授时, 便于远程服务器获取监控系统的实时位置和标准时间, 便于监控系统接入电力 GIS(Geographic Information System)系统。

存储单元包括内部存储模块和外部存储模块, 内部存储包括 1 GB DDR3 内存和 4 GB eMMC 闪存, 外部存储包括 SD 卡和 SATA 接口的固态硬盘, 存储单元主要负责装置中程序的运行和数据的存储。

供电单元为系统各个模块提供稳定的电压, 供电电压包括 3.3 V 和 5 V 两种, 通过线性稳压器为各个模块提供相应的电压, 供电单元包括开关机电路、稳压电路、充电电路和电量检测电路。

传感器单元通过主控的外设接口与主控单元进行数据通信，外设接口包括 USB 接口、RS-485 接口、RS-232 接口和以太网接口，其中 USB 接口用于连接 USB 接口类型的带电检测传感器，如局部放电传感器等，RS-485 接口用于连接 RS-485 总线类型的带电检测传感器，如红外成像测温传感器、噪声传感器和工频电场传感器等，RS-232 用于连接 RS-232 类型的带电检测传感器，如温湿度传感器、光照传感器等，以太网接口用于连接互联网或者以太网接口的传感器，如红外摄像机等。

图 3 为变电站智能运维装置的实物图，包括智能运维装置主机、红外成像测温仪、工频电场检测仪、噪声检测仪和红外摄像机。



图 3 智能运维装置实物图

Fig. 3 Photo of intelligent operation and maintenance device

3 带电检测系统

带电检测系统作为本地监测层，主要实现对带电检测传感器的数据进行采集，并将数据发送到智能运维装置^[14-15]。可接入的带电检测传感器包括红外成像测温仪、局部放电检测仪、工频电场检测仪、噪声检测仪和红外摄像机等。

3.1 红外成像测温仪

红外成像测温仪将红外探测模块和成像系统集成在一个传感器上的新型带电检测测温传感器^[16-17]。红外成像测温仪通过红外热成像的技术检测目标对象的温度，能够快速发现变电站设备的局部过热缺陷。其主要包括红外探测单元、信号采集单元、红外图像处理单元、通信单元和供电单元五个部分。图 4 为红外成像测温仪的硬件架构框图。

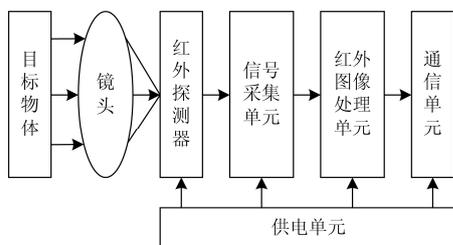


图 4 红外成像测温仪架构框图

Fig. 4 Structure of infrared imaging thermometer

图 4 中，红外探测器上的镜头将目标物体发出的红外光进行汇聚，红外探测器将采集的红外信号发送至信号采集单元，红外图像处理单元对采集的红外图像数据进行处理，并通过红外测温算法转换成温度数据，通信单元将数据发送到带电检测系统，供电单元为整个系统提供电能。

3.2 局部放电检测仪

局部放电检测仪采用暂态地电波检测的原理进行局部放电检测，能够有效检测开关柜、环网柜、组合电器等多种设备的局部放电情况^[18-20]。暂态地电压的检测原理如下：

在局部放电的过程中会产生电磁波，电磁波通过设备传送到地面会产生暂态电压脉冲信号。当设备发生局部放电的故障，带电设备将电子传送到相应的位置，在这一过程中会伴随着电磁波。电磁波从设备内部向外部传送的过程中与金属物质接触，就会产生瞬间电压信号，即为暂态地电压信号，通过检测暂态地电压信号就能够检测出设备的局部放电情况^[21-23]。

局部放电检测仪主要包括暂态地电波传感器、信号调理电路、数据采集单元、数据处理单元、通信单元和供电单元六个部分。图 5 为局部放电检测仪的硬件架构框图。

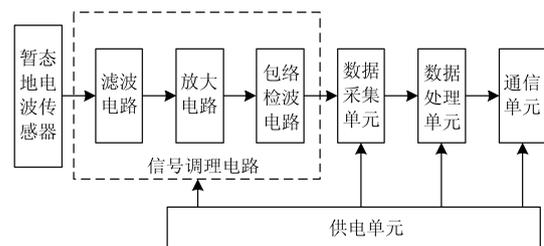


图 5 局部放电检测仪硬件架构框图

Fig. 5 Structure of partial discharge detection system

图 5 中，暂态地电波传感器检测设备局部放电过程中的暂态地电波信号，经过信号调理电路的滤波、放大和包络检波后由数据采集单元进行信号采集，采集的信号经过数据处理单元进行处理得出局部放电的数据，通过通信单元发送至带电检测系统，供电单元为局部放电检测仪各个模块提供电能。

3.3 工频电场检测仪

工频电场检测仪主要用来检测变电站中的工频电场数据，当变电站设备出现一些典型缺陷后会引起工频电场变化。工频电场检测仪采用球形电容工频电场传感器的原理进行工频电场数据采集，其主要原理如下：

球形电容工频电场检测传感器采用球形电容

检测感应电压的方法来检测电场, 一维球形传感器的结构如图 6 所示, 将一个空心金属球壳切割成两部分, 通过绝缘物质将两个半球连接在一起, 并在两个半球中间并联一个测量电容, 两个半球分别构成了传感器的两个电极^[24-25]。

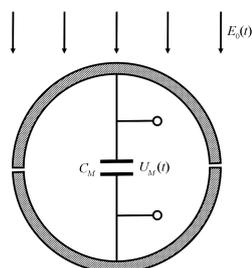


图 6 球形电容传感器的结构图

Fig. 6 Structure of spherical capacitive sensor

球形电容传感器放入电场后, 其外壳表面的电荷量与球心处的电场强度 $E_0(t)$ 成正比。

$$Q(t) = KE_0(t) \quad (1)$$

式中, K 为比例系数。球形电容传感器球壳上的感应电荷在测量电容 C_M 上产生一个微小的电压, 其电压 $U_M(t)$ 为

$$U_M(t) = Q(t) / C_M \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可以得出测量电压 $U_M(t)$ 为

$$U_M(t) = KE_0(t) / C_M \quad (3)$$

通过接入外部电路测出测量电容上的电压 $U_M(t)$, 根据式(3)求得 $E_0(t)$, 即为该点的电场^[26-27]。

工频电场检测仪主要包括球形电容传感器、信号调理电路、数据采集单元、数据处理单元、通信单元和供电单元六部分。图 7 为工频电场检测仪的硬件架构框图。

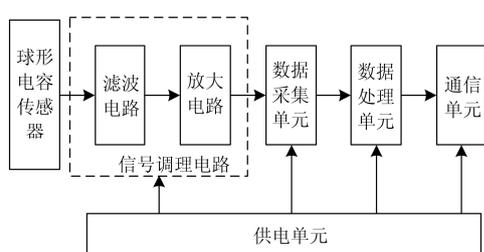


图 7 工频电场检测仪的硬件架构图

Fig. 7 Structure of power frequency electric field detection system

图 7 中, 通过球形电容传感器获取电场中的感应电势, 经过信号调理电路的滤波放大电路, 由数据采集单元的 A/D 模块转换为数字信号, 经过数据处理单元的工频电场场强算法将感应电势转换为电场数据, 通过通信单元将数据发送至带电检测系统,

供电单元为工频电场检测仪的各个模块提供电能。

4 分层分布的变电站智能化带电运维模式

分层分布的变电站智能化带电运维系统适用于变电站电力设备的日常运维监测, 通过远程主站上运行的运维监测管理平台, 能够实现对不同设备、不同运维策略和任务的远程运维操作, 根据不同变电站设备的典型缺陷和典型监测量选择合适数量和种类的带电检测传感器进行系统部署。多种带电检测传感器的实时跟踪检测, 能够对变电站中重要设备进行实时跟踪运维数据监测。运维监测管理平台对前端采集的数据进行融合处理判决, 能够快速形成运维结果和报告, 提高变电站运维的实时性和可靠性。

4.1 分层分布的变电站智能化运维的关键技术

分层分布的变电站智能化运维的关键是对采集的多种带电检测传感器的数据进行融合。变电站在进行智能化运维过程中传感器采集的数据具有异构性、数据量大和冗余的特点^[28], 本文采用 D-S 证据理论进行融合算法处理, D-S 证据理论是一个融合不确定性信息的有效手段, 可以对不同数据源, 不同类型的数据进行快速地融合^[29]。通过信任函数表达概率大小, 通过多传感器监测诊断对象, 得出每一传感器的特征属于各类运行状态的信任函数, 再利用 D-S 判决规则进行信息融合, 区分各类运行状态的信任函数。变电站智能运维的 D-S 证据理论数据融合过程如图 8 所示。

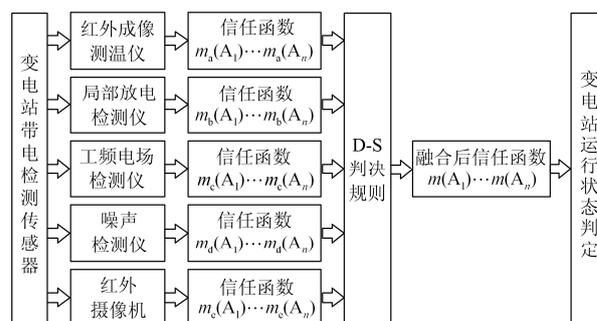


图 8 D-S 证据理论数据融合过程

Fig. 8 D-S evidence theory data fusion process

变电站智能运维装置接入的带电检测数据与远程主站的运维监测平台的数据通信满足 IEC 61850 标准^[30-31]。分层分布的变电站智能化运维决策系统通过获取带电检测传感器的数据, 对传感器数据进行预处理, 通过 D-S 证据理论进行变电站运维数据融合, 对融合的结果结合变电站运维专家库进行运行状态异常判定。如果出现运行异常, 进

行异常告警，并得出运维结果，根据变电站的运维需求形成运维报告。变电站智能化运维决策系统的流程如图 9 所示。

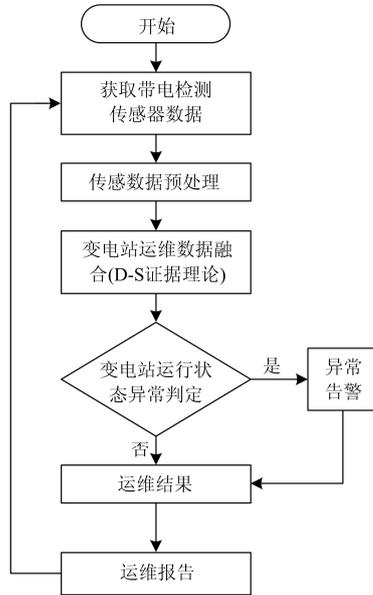


图 9 运维决策流程

Fig. 9 Operation and maintenance decision flow chart

4.2 分层分布的变电站智能化运维的创新

基于分层分布的变电站带电运维智能化系统，在某供电公司完成了所属变电站的远程智能带电运维，其创新点主要体现在以下几个方面：

1) 变电站运维方面，对传统运维工作中所涉及的检测项目进行在线监测，增加了部分常规的带电检测项目，例如：变电站设备的红外测温、电场强度检测、组合电器的局部放电检测、开关柜的局部放电检测和全站设备的红外监控等。

2) 运维人员安排方面，分层分布的变电站智能运维系统实现远程运维操作，在系统部署完成后，运维人员根据不同设备设定不同的运维策略和任务，智能运维系统自动采集数据并进行数据的融合分析处理，快速形成运维报告，运维人员根据形成的报告做进一步处理，不需要工作人员进行现场操作，可以在全天任何时间段执行运维任务，节省了运维工作人员的工作量，提高了运维效率。

3) 运维效率方面，变电站部署的智能运维系统各个节点同时执行运维任务，可以实现对全站设备同一个时间段的同步运维监测。

分层分布式的变电站智能运维系统有效地提升了变电站的运维管理效率和智能化水平，丰富了运维的手段，节约了人力成本，减少了运维工作人员的工作量。

图 10 为分层分布的变电站智能带电运维系统的现场应用图片，智能运维系统部署在某变电站对变压器、隔离开关和开关柜等设备进行运维监测。



图 10 分层分布的变电站智能带电运维现场图

Fig. 10 Scene of intelligent live detection for substation operation and maintenance based on hierarchical distribution

5 应用验证

应用分层分布的变电站智能带电运维系统，在无锡某变电站部署，按照表 1 中所列的典型缺陷和典型设备监测量进行带电检测传感器的选取^[32]。

表 1 变电站运维典型监测量

Table 1 Typical monitoring type of substation operation and maintenance

分类	运维场景	所需带电检测传感器
缺陷 监视	发热	红外成像测温仪、红外摄像机
	渗油	红外摄像机
	局部放电	噪声检测仪、工频电场检测仪、局部放电检测仪
	单一间隔通信失灵	红外摄像机
设备 监视	主变	红外成像测温仪、红外摄像机
	断路器	红外摄像机、噪声检测仪、工频电场检测仪、局部放电检测仪
	隔离开关	红外成像测温仪、红外摄像机、工频电场检测仪
	互感器	红外成像测温仪、红外摄像机、工频电场检测仪
	GIS	红外摄像机、工频电场检测仪、局部放电检测仪

通过远程主站的智能运维监测管理系统设定各个设备的运维策略、运维时间，变电站中的智能运维装置自动进行运维数据的采集、融合并传送到远程主站，远程主站在每次运维任务完成后形成运维报告。同时能够在线查看运维数据，如图 11 所示。

通过现场应用验证表明，基于分层分布的变电站智能带电运维系统及运维模式能够有效地进行变电站设备的智能化运维，大大节省了人力成本，提高了工作效率，同时形成可靠的运维报告供运维工作人员进行使用。

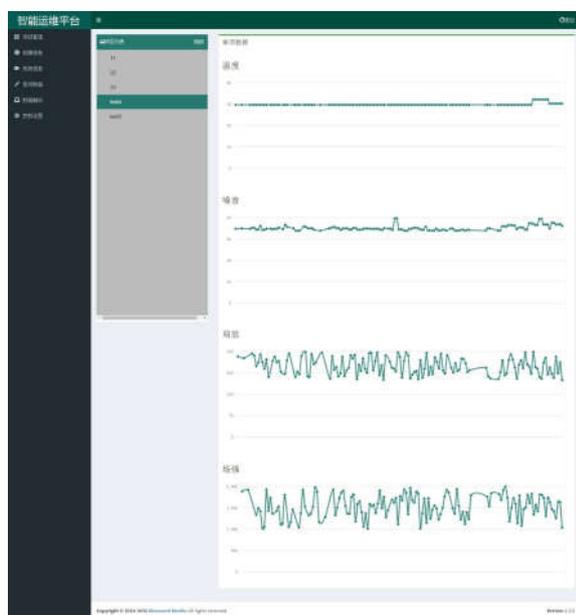


图 11 运维数据展示

Fig. 11 Show of operation and maintenance data

6 结论

研究了基于分层分布的变电站带电运维智能化技术, 并研制了变电站智能运维装置和红外成像测温检测仪、局部放电检测仪、工频电场检测仪等新型带电检测传感器, 结合分层分布的变电站智能化运维系统实际应用场景提出了智能化带电运维模式, 并进行了推广应用。该系统具有以下特点:

1) 网络化、自动化、智能化水平高, 分层分布的变电站智能带电运维系统紧密结合变电站运维的实践, 综合了运维人员的切实需求, 将网络化、自动化、智能化技术应用到实际问题中, 与国家建设智能变电站方向一致。

2) 运维效率高, 智能运维系统可以实现变电站设备的运维数据同步采集, 并形成综合的运维报告, 提高了变电站运维的效率。

3) 产生的经济效益高, 分层分布的变电站智能化运维模式可全面提高变电站的运维水平, 保障变电站设备的安全稳定运行, 有效降低了设备故障造成的损失, 具有良好的经济及社会效益。

4) 运维理念先进, 分层分布的智能化运维模式改变了传统变电站运维的工作模式, 全面提升了变电站运维人员的工作效率和质量。

5) 可扩展性强、易于推广, 分层分布的变电站智能带电运维系统可以扩展多种带电检测传感器,

系统安装部署便捷。该系统综合了运维人员的实际需求, 智能运维系统和运维模式推广后, 对于保障变电站设备的安全稳定运行有重要意义。

参考文献

- [1] 赵勤学, 杨俊杰, 楼志斌. 智能变电站安全在线监测系统[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7): 34-40.
ZHAO Qinxue, YANG Junjie, LOU Zhibin. Design of safety online monitoring system for smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7): 34-40.
- [2] 笃峻, 叶翔, 葛立青, 等. 智能变电站继电保护在线运维系统关键技术的研究及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 163-168, 175.
DU Jun, YE Xiang, GE Liqing, et al. Key technologies of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 163-168, 175.
- [3] 孙艳飞. 带电检测技术在变电运维中的应用[J]. 中国高新技术企业, 2017(11): 96-97.
SUN Yanfei. Application of live detection technology in substation operation and maintenance[J]. Science and Technology, 2017(11): 96-97.
- [4] 范闻博, 盛万兴, 高媛, 等. 带电检测技术在配电设备状态检修中的应用研究[J]. 电气应用, 2013, 32(17): 64-67, 80.
FAN Wenbo, SHENG Wanxing, GAO Yuan, et al. Research on the application of live detection technology in the condition maintenance of distribution equipment[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(17): 64-67, 80.
- [5] 林繁. 基于分层分布的变电站在线监测系统研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
LIN Fan. Research and application of substation online monitoring system based on hierarchical distribution[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [6] 余高旺. 新一代智能变电站中多功能测控装置的研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 127-132.
YU Gaowang. Research and application of multifunctional measurement & control device of new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 127-132.
- [7] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62, 79.
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62, 79.
- [8] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-27.

- LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan. The functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-27.
- [9] 彭海平, 高昌培, 熊学海, 等. 智能变电站间隔层设备智能定检作业系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 99-104.
- PENG Haiping, GAO Changpei, XIONG Xuehai, et al. Research on intelligent periodic test operating system for bay level equipment of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 99-104.
- [10] 刘兆燕, 张璞, 刘庆时, 等. 未来科技城智能电网总体方案研究[J]. 电气应用, 2013, 32(增刊 1): 134-137.
- LIU Zhaoyan, ZHANG Pu, LIU Qingshi, et al. Study on the overall scheme of smart grid in future science and technology city[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(S1): 134-137.
- [11] 杨博, 李可生, 何书专, 等. 基于 i.MX6 的 LED 异步控制系统软件设计[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(6): 1478-1484.
- YANG Bo, LI Kesheng, HE Shuzhuan, et al. Design of embedded software used on i.MX6 based asynchronous LED display control system[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(6): 1478-1484.
- [12] 贾亚军, 张宏伟, 崔潇, 等. 基于 IEC 61850 的智能电网控制研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(6): 55-60.
- JIA Yajun, ZHANG Hongwei, CUI Xiao, et al. Research on smart grid control technology based on IEC61850[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(6): 55-60.
- [13] 周成, 吴海, 胡国, 等. 基于 IEC 61850 第二版非侵入式自动测试系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 143-147.
- ZHOU Cheng, WU Hai, HU Guo, et al. Non-intruding development of automatic test system based on IEC61850 Edition 2.0[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 143-147.
- [14] 白元强, 魏旭, 周志成, 等. 适用于变电站巡检的单兵巡检装备的研制及应用[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 26-30.
- BAI Yuanqiang, WEI Xu, ZHOU Zhicheng, et al. Development of individual soldier patrol for substation operation and maintenance[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 26-30.
- [15] 胡宝, 张文, 李先彬, 等. 智能变电站嵌入式平台测试系统设计及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 129-133.
- HU Bao, ZHANG Wen, LI Xianbin, et al. Design and application of embedded platform test system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 129-133.
- [16] 陈可中, 谭翔, 董建杰, 等. 红外测温仪的设计[J]. 电子测量技术, 2007, 30(10): 11-14, 25.
- CHEN Kezhong, TAN Xiang, DONG Jianjie, et al. Design of infrared thermometer[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(10): 11-14, 25.
- [17] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
- LIAO Panpan, ZHANG Jiamin. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer[J]. Infrared Technology, 2017, 39(2): 173-177.
- [18] 张磊, 林群, 丁登伟, 等. GIS 中局部放电特高频信号传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 726-731.
- ZHANG Lei, LIN Qun, DING Dengwei, et al. Simulation analysis on the attenuation characteristics of partial discharge ultra-high frequency signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 726-731.
- [19] 王有元, 李寅伟, 陆国俊, 等. 开关柜局部放电暂态对地电压传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1683-1688.
- WANG Youyuan, LI Yinwei, LU Guojun, et al. Simulation of transient earth voltages aroused by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1683-1688.
- [20] 李亚峰, 王保保, 冯象初. 一种检测局部放电信号的新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(3): 529-533, 569.
- LI Yafeng, WANG Baobao, FENG Xiangchu. New method for partial discharge signals detection[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(3): 529-533, 569.
- [21] 罗勇芬, 孟凡凤, 李彦明. 局部放电超声波信号的检测及预处理[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(8): 964-968.
- LUO Yongfen, MENG Fanfeng, LI Yanming. Detection and pre processing of partial discharge ultrasonic signals[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(8): 964-968.
- [22] 吴吉, 吕鸿, 王流火, 等. 开关柜局部放电暂态地电波 (TEV)传播特性的实验研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 115-121.
- WU Ji, LÜ Hong, WANG Liuhuo, et al. Experimental study on propagation of transient earth voltage signals aroused by partial discharge in switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 115-121.
- [23] 陈敏. 基于暂态地电波信号的 GIS 局部放电检测技术

- 研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- CHEN Min. Study on partial discharge detection in gas insulated substation based on transient earth voltage signals[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [24] 刘聪汉, 何为, 汪金刚, 等. 便携式工频电场测量装置的设计[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 57-62.
- LIU Conghan, HE Wei, WANG Jingang, et al. Design of portable power frequency electric field measurement device[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(3): 57-62.
- [25] 蒋国雄, 杨建中. 工频电场测量和一种新型测量探头的设计[J]. 高电压技术, 1985, 11(4): 1-5.
- JIANG Guoxiong, YANG Jianzhong. Power frequency electric field measurement and the study of a new type measuring probe[J]. High Voltage Engineering, 1985, 11(4): 1-5.
- [26] 梁振光, 董霞, 郑路, 等. 500 kV 变电站工频电场的测量与分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 81-83, 122.
- LIANG Zhenguang, DONG Xia, ZHENG Lu, et al. Measurement and analysis of power frequency electric field in a 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 81-83, 122.
- [27] 张广洲, 宋春燕, 冯智慧, 等. 输变电工程工频电场实时智能监测系统的设计[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 184-187, 116.
- ZHANG Guangzhou, SONG Chunyan, FENG Zhihui, et al. Design of real-time intelligent monitoring system of power frequency electric field for transmission and distribution project[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 184-187, 116.
- [28] 李黎, 华奎, 姜昀芑, 等. 输电线路多源异构数据处理关键技术研究综述[J]. 广东电力, 2018, 31(8): 124-133.
- LI Li, HUA Kui, JIANG Yunfan, et al. Research review on key technology for multi-source heterogeneous data processing for transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 124-133.
- [29] 龚方亮, 牟龙华, 郭文明, 等. 基于 D-S 证据理论的配电终端状态诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 30-36.
- GONG Fangliang, MU Longhua, GUO Wenming, et al. D-S evidence theory based condition diagnosis for distribution terminal units[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 30-36.
- [30] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [31] 张京伦, 马永红, 王申. 基于 IEC 61850 和 MAS 的 ADN 信息通信技术研究[J]. 广东电力, 2017, 30(11): 72-78.
- ZHANG Jinglun, MA Yonghong, WANG Shen. Research on AND Information communication technology based on IEC 61850 and MAS[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(11): 72-78.
- [32] 陆启宇, 陈璐, 徐鹏. 带电检测与在线监测在特高压练塘站运维中的应用[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2827-2830.
- LU Qiyu, CHEN Lu, XU Peng. Application of online detection and monitoring technologies in Liantang UHV substation[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2827-2830.

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-02-25

作者简介:

周正钦(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为计算机应用、传感器数据融合技术;

王文瑞(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为智能检测与控制技术、物联网等。E-mail: wangwr@sari.ac.cn

(编辑 张爱琴)