

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201980

泛在电力物联网在电力设备状态监测中的应用

刘喜梅, 马俊杰

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 随着信息化水平的不断发展, 泛在电力物联网的建设提上日程, 这对提升变电站电力设备在线监测水平, 推动智能电网发展具有重要的指导意义。对基于物联网的电力设备状态监测系统进行了研究, 总结了泛在电力物联网在线监测系统的体系结构和特征。根据变电站电力设备状态在线监测的需求, 探索研究了红外热成像监测子系统和变电站环境监测子系统的系统构成, 实现了对电力设备状态监测系统的优化设计。指导变电站电力设备状态监测系统的规划、设计和建设, 具有十分广阔的应用前景。

关键词: 信息化; 泛在电力物联网; 电力设备状态监测; 红外热成像监测; 变电站环境监测

Application of the ubiquitous power internet of things in state monitoring of power equipment

LIU Ximei, MA Junjie

(College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: With the continuous development of the informatization level, the construction of an ubiquitous power Internet of Things (IoT) is put on the agenda. This has important guiding significance for improving the online monitoring level of substation power equipment and promoting the development of the smart grid. This paper studies the power equipment condition monitoring system based on the IoT, and summarizes the architecture and characteristics of the ubiquitous power IoT online monitoring system. Given the requirements of on-line monitoring of substation power equipment status, the system structure of an infrared thermal imaging monitoring subsystem and substation environmental monitoring subsystem is explored, and the optimal design of a power equipment condition monitoring system is realized. The planning, design and construction of a substation power equipment condition monitoring system are covered. These have very broad application prospects.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61803219).

Key words: informatization; ubiquitous power internet; power equipment condition monitoring; infrared thermal imaging monitoring; substation environmental monitoring

0 引言

变电站作为电网能源输送的枢纽, 其智能化会直接影响整个电网系统的智能化水平。对变电站设备进行一致、准确和频繁的系统监测是预测故障的关键^[1-2]。

随着电力系统信息化和智能化水平的快速发展, 电力设备状态监测类型和监测手段越来越丰富多样。在文献[3]中, 研究人员开发了一种视觉监控系统, 用于远程操控变电站, 以便系统操作人员观察环境。文献[4]提出了一个变电站高压设备的在线

数据类型多样, 数据处理速度无法保证。随着故障监测水平的不断提升, 文献[5]设计了一种在电力系统故障条件下变电站接地电位上升的监测系统, 但因系统受环境影响较大, 测量精度较低。文献[6]设计开发了一种实时的变电站监控系统以检测联络线上的低频电源振荡。文献[7]将数据库创新性地应用于变电站变压器的实时监控, 提高了变电站变压器监测的可靠性, 但由于其数据量大, 实时性无法得以保证。现有的电力设备状态监测方法主要针对设备本身, 基本不考虑设备故障对系统的影响, 不能满足智能电网对先进资产管理的要求^[8-11]。并且, 随着用电信息采集业务规模的快速增长, 存储的监测数据也呈现指数增长的趋势, 对数据处理速度提出了更高的要求, 现有状态监测机制无法满足

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61803219)

监测系统, 以提高变电站在线监测水平, 但因监控

该需求，其缺陷导致测量精度低、可靠性差。基于上述问题，本文提出将泛在电力物联网应用于电力设备状态监测，重点研究了基于电力物联网的变电站传感监控系统，采用红外热成像监测设备实现变电站温度监测，温湿度传感器、气体传感器等用于实现对变电站运行环境的实时监控，并通过无线中继器将监控数据实时传输到协议转换器，然后将数据发送到本地变电站监控系统或远程调度自动化系统，实现本地或远程控制，大大提高了系统的可靠性及可用性。

1 泛在电力物联网概述

1.1 泛在电力物联网的含义

泛在电力物联网是国家电网提出的“三型两网”战略中的第二张网，具体指的是围绕电力系统的各个环节，充分运用大数据、云计算、物联网、移动互联网、智慧城市等先进信息通信技术，实现各种信息传感设备与互联网和电力通信专网的结合，从而形成具有自我标识、感知和智能处理的物理实体，实现电力系统各环节万物互联、人机交互^[12-16]。

1.2 基于泛在电力物联网的变电站在线监测架构

物联网技术作为智能电网输变电系统的主要组成部分之一，能够提高输变电设备的在线监测能力，并降低设备维修的盲目性和风险性，对设备进行管理和优化。从技术视角看，基于泛在电力物联网的变电站在线监测体系包括感知层、网络层、平台层和应用层 4 个层次^[17-19]。其基本架构如图 1 所示。

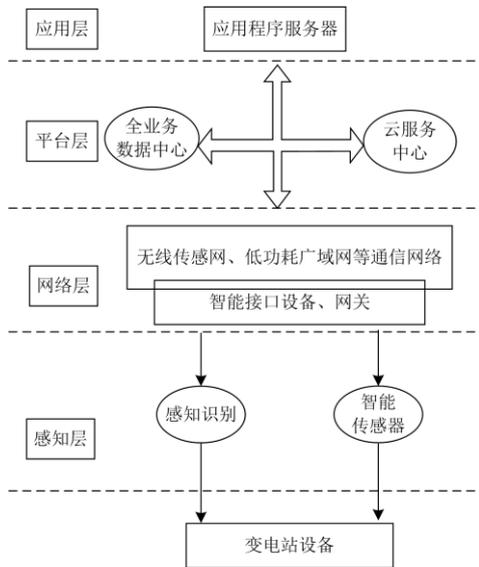


图 1 变电站在线监测架构体系

Fig. 1 Substation online monitoring architecture system

1) 感知层：感知层是系统的最底层，其主要的

功能是负责信息采集和信号处理。通过温湿度传感器、振动传感器以及 RFID 等感知识别技术对变压器等一次设备进行智能感知，实现终端标准化统一接入以及通信、计算等资源共享，在源端实现数据融通和边缘智能，

2) 网络层：通过无线传感网、低功耗广域网、移动通信网等网络设施，接入并传输来自感知层的信息，成为感知层与系统平台连接的纽带。

3) 平台层：平台层作为物联网的重要组成部分，作用为将网络内海量的泛在信息资源接入物联网云平台，实现超大规模终端统一物联管理，挖掘海量采集数据价值，提升数据高效处理能力。

4) 应用层：应用层作为物联网系统的用户接口，位于物联网系统最顶端，应用层接收感知层感知的信息，依据业务需求并对信息进行综合分析处理，对站内所有设备实现在线监测，为用户提供丰富的特定服务。

1.3 泛在电力物联网在线监测系统的主要特征

泛在电力物联网与新一代电力系统深度融合，为电力系统提供信息通信基础平台和设施支撑，实现数据的一次采集处处应用，推动业务平台从垂直结构向水平化方向演进，引导电力业务系统向着优化架构、决策智能、运行高效、附加值高的方向发展，其主要特征包含以下四个方面^[20-22]。

1) 连接的泛在化：随着电网的全联接化，发电装置呈分布式发展趋势，输电线路逐步实现全线路实时监控，覆盖从干线到全覆盖，配网控制逐步从 10 kV 走向 0.4 kV，联接节点从万到亿。微功率无线自组网、大容量电力光纤网、电力无线专网以及低功耗广域窄带物联网等应用广泛。

2) 终端的智能化：芯片处理能力的不断提升促使终端向智能化方向迭代，软件定义促进终端软硬件不断解耦，使得电力业务终端和用能终端不断向智能方向进化，以此来满足精控及调度业务的实时性。

3) 数据的共享化：海量感知层数据汇聚于应用层，成为重要的数据资源，数据模型的标准化打通了各个业务的“烟囱式”壁垒，实现了不同业务逻辑的横向贯通，以此来实现数据的开放、共享和共用。

4) 服务的平台化：服务器接口与规约的标准化促进了接入和连接的统一，通用水平化平台和垂直专业化平台得以结合，提升了平台的开放性和平台的智能化服务水平。

2 电力设备状态监测

电力设备监测系统遵循电力系统协议, 采用先进的通信技术和电力传输设备的智能信息处理技术, 实现了运行状态、资产和电网运行环境等的垂直集成和水平集成, 此外, 还实现了对电力系统网络传输设备的识别、智能传感、数据传输和动态控制的全生命周期管理。实践表明, 使用基于电力物联网的实时监控可以为电力设备状态监测提供更好的决策。电力设备状态监测结构图如图2所示^[23]。

监测物联网系统应满足以下要求。

1) 监控精度: 随着电气水平的不断提高, 变电站设备朝着规模化、复杂化的方向发展, 其中一个设备故障可能会导致整个环节无法有效运转。因此, 系统不仅要有效地运行状态监测设备, 还要准确地知道设备中存在的问题。

2) 系统的可靠性: 大多数监测机械和设备都在高速运行状态, 设备一旦发生故障, 可能造成重大财产损失和人员伤亡, 因此要求监测物联网系统十分可靠。

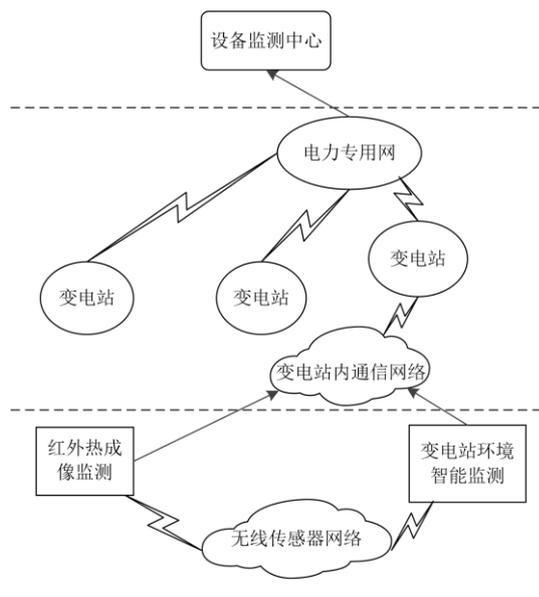


图2 电力设备状态监测结构图

Fig. 2 Power equipment condition monitoring structure

3) 监控传输节点小型化: 由于机械设备的复杂性, 要求监控设备正常运行时不影响其他设备。因此, 系统监控节点体积不能设置得过大, 应保证其长期稳定工作。

4) 响应用户数据查询: 在周期性传输数据的情况下, 用户(或基站)可以查询一些特定节点的数据来估计特定设备或子系统的现有状态。因此, 无线

传感器网络需要具有终端循环的能力以供用户查询。

5) 信号处理和故障检测: 节点有一定的信号处理能力, 当检测到故障时, 应将处理后的特征数据发送到基站, 然后, 节点可以中断循环发送紧急警报。

6) 数据传输: 监测物联网系统可以传输运行设备状态特征数据。

7) 降低系统成本: 降低生产成本是实现经济效益和社会效益的根本途径, 监测物联网系统能及时判断设备的异常状态并进行预防和消除, 延长设备的使用寿命, 降低电力设备生命周期成本。

3 基于泛在电力物联网的变电站监控系统

电力设备监测物联网系统将物联网技术, 智能感知技术, 现代通信技术, 信息处理技术相结合, 利用监测数据采集装置和智能传感器网络, 实时采集各种状态信息, 对电力设备进行实时同步管理, 为电力设备的智能监控提供了一种新的手段^[24-25]。

该监控系统由两个子系统组成: 红外热成像监测子系统和变电站环境监测子系统。每个子系统既可以独立监控每个应用场景, 也可以协同监控。

3.1 红外热成像监控子系统

在高压装置中, 热量起着关键作用, 因为它揭示了一台设备的运行状况, 基于组件的热量检测故障源, 实现监测系统正确保护动作。使用红外热成像(IRT)的温度监测已经成为一种成熟且被广泛接受的技术, 因为它比其他类型的传感器监测具有许多优点, 该技术通过感测被检查物体发出的红外辐射, 可以在安全距离上发现电气设备中的热点。红外热成像技术在电力设备监测中主要针对线路、断路器、隔离开关等外部设备故障。利用红外热像仪可以准确采集设备的热量信息, 设备的热量信息可以反应设备的状态, 将热量信息生成直观的温度分布热像图, 通过与设备正常运行时的热像图进行对比, 以此来分析设备的运行状态。

红外热成像监控系统基本结构图如图3所示。

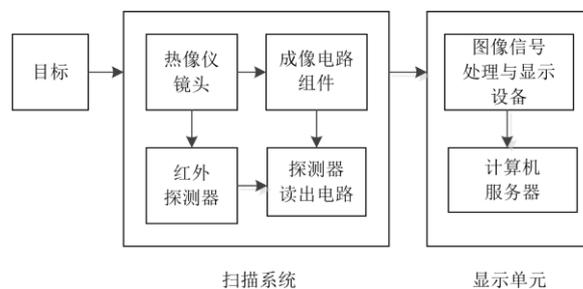


图3 红外热成像监控系统结构图

Fig. 3 Infrared thermal imaging monitoring system structure

由图 3 可以看出，红外热成像监控系统主要包含扫描系统和显示单元两大部分。

1) 扫描系统：主要由热成像仪镜头、红外探测器、探测器读出电路、成像电路组件组成。热像仪镜头用于采集传入的红外辐射并使之聚焦于探测器上，热辐射可使探测器作出可测量的反应，该反应经过电子处理生成电子热图像。

2) 显示单元：主要包括红外图像信号处理与显示设备和计算机服务器两大部分。主要负责图像的处理和诊断算法的实现，为工作人员处理判断故障提供有效信息。检测终端首先将采集到的图像进行压缩，然后通过传输系统将其传输到计算机服务器中，计算机服务器负责处理图片信息，并存储图片以及故障信息。

结合故障类型的特征，可依据故障温度值与阈值的比较以及设备的相对温差来判别故障，具体诊断流程图如图 4 所示。

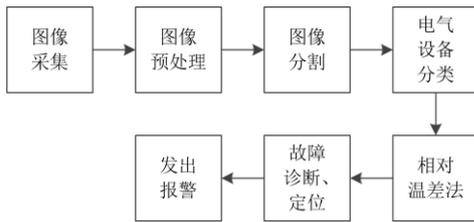


图 4 红外热成像诊断流程图

Fig. 4 Infrared thermal imaging diagnostic flow chart

使用红外热像仪进行温度测量需要将测量的红外辐射转换为温度，特别是现场被检查对象的兴趣点的温度。变电站高压电气设备在故障发生前受热、温度升高，发射肉眼无法察觉的红外光谱热辐射，红外热像仪将这种辐射转化为清晰的热图像，这种非接触式热数据可以实时显示在监测器上，也可以发送到数字存储装置中以便进行分析。目前采用较多的是在 C++ 中开发的温度监控的 TempMon 组件，利用 OpenCV 进行图像处理和热点检测，并用 eBUS SDK 从长波红外摄像机 Flir A310 获取红外图像，热图像上面的不同颜色代表被测物体的不同温度。通过查看热图像，可以观察到被测目标的整体温度分布状况。用于部署的红外摄像机 Flir A310 能够以每秒 30 帧的速度获取图像。变电站监测红外热成像图如图 5 所示。

3.2 变电站环境监测子系统

本设计中变电站环境监测子系统主要的功能包括以下几个方面：

1) 监测变电站的温湿度环境：由于不同变电站的环境参数差别较大，因此选用大量程、高精度型

的温湿度传感器 DHT21。

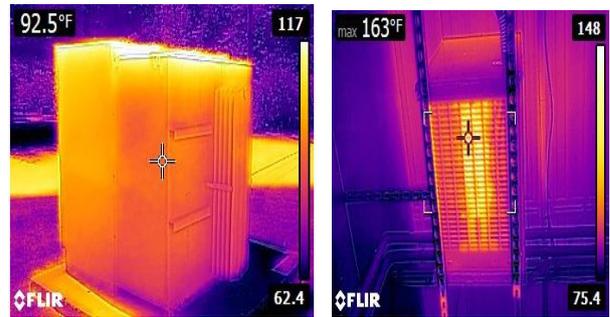


图 5 变电站监测红外热成像图

Fig. 5 Substation monitoring infrared thermography

2) 监测变电站烟雾情况：火灾对电力设备的影响很大，所以选用灵敏度高、响应快的 MQ-2 型烟雾传感器对变电站烟雾情况进行必要监测。

3) 监测变电站气体：主要用于监测变电站气体种类、浓度以及成分，以此判断电力设备是否存在故障，选用 MQ-8 型氢气传感器。

4) 监测电力设备局部放电产生的超声波：电力设备易发生局部放电故障，用超声波传感器进行监测，从而可以测定局部放电的大小和位置信息，选用 HC-SR04 超声波传感器。

5) 监测电力设备泄露电流：用电流传感器对电力设备的泄露电流进行监测，及时发现设备绝缘缺陷，选用 ACS712 电流传感器。

变电站环境监测子系统主要由传感器组成的终端节点、中继器节点和上位机监测中心组成。

1) 终端节点：传感器定时自动采集监测数据并及时上传给无线中继器，经由无线专网传送至上位机监测中心，分析数据并发出自动预警信号。终端节点的结构如图 6 所示。

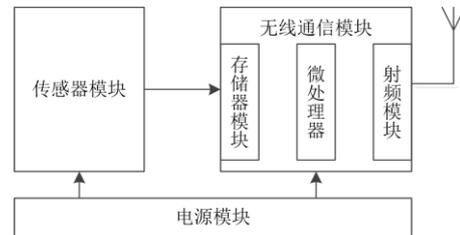


图 6 终端节点结构框图

Fig. 6 Terminal node structure block diagram

2) 中继器节点作为终端节点与监测中心沟通的桥梁，负责接收各传感器采集的现场环境数据，并将其传送至后台设备监测中心，使系统成为一个有机运行的整体。中继器节点的结构如图 7 所示。

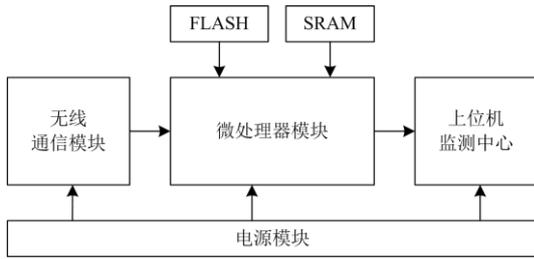


图 7 无线中继器功能框图

Fig. 7 Wireless repeater functional block diagram

3) 后台设备监测中心实时处理收集的信息, 进行故障的事件记录及自动告警等。

系统网络协议采用用户定义的形式, 采用半双

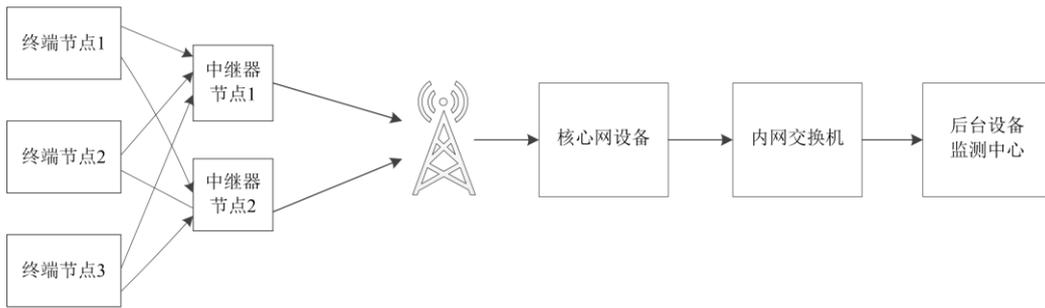


图 8 变电站环境监测系统整体结构图

Fig. 8 Overall structure diagram of substation environmental monitoring system

3.3 软件设计

协议转换器通过通信协议接收无线中继器上传的数据, 数据集中处理后转发到上级调度自动化系统或本地显示, 同时协议转换器接收调度自动化系

统发出的远程控制命令并发送给节点设备, 通过无线中继器实现节点设备的控制。系统软件流程图如图 9 所示。

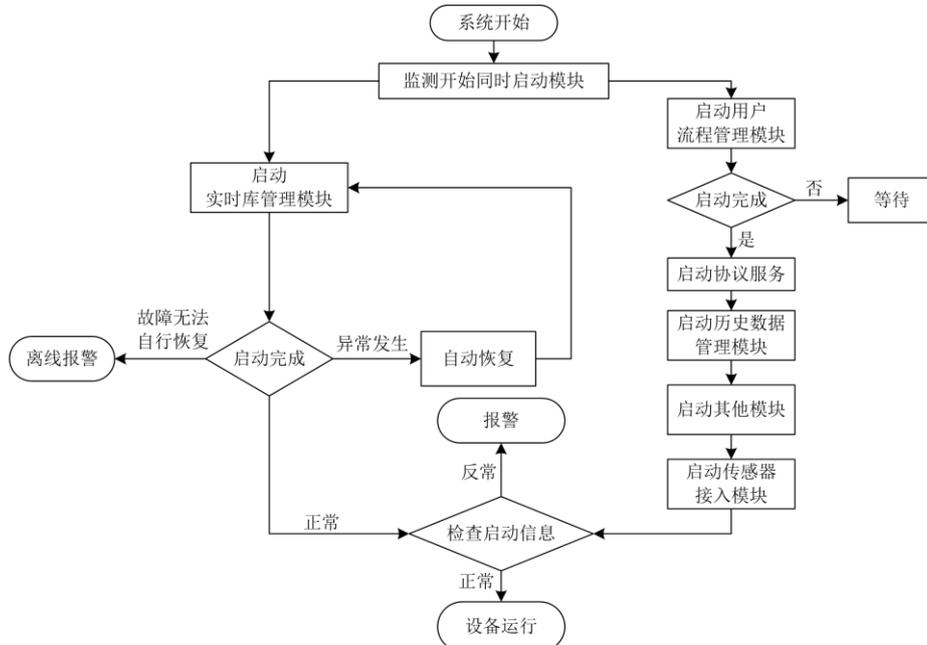


图 9 系统软件流程图

Fig. 9 System software flowchart

4 结论

本文将泛在电力物联网应用于电力设备状态监测。探究了红外热成像监测子系统和变电站环境监测子系统的构成,对原有的电力设备状态监测系统进行了优化设计,以满足监测物联网系统的新需求,为快速配置、应用程序部署和在线服务生成提供解决方案。该研究将自动化监控方法与分布式全局体系结构相结合,可应用于大型工业组织中管理的变电站。

参考文献

- [1] 陈振晓, 刘前进, 林健雄. 物联网技术在变电站在线监测中的应用研究[J]. 物联网技术, 2017, 7(9): 23-25.
CHEN Zhenxiao, LIU Qianjin, LIN Jianxiong. Application research of internet of things technology in online monitoring of substation[J]. Internet of Things Technology, 2017, 7(9): 23-25.
- [2] 孙毅, 黄婷, 崔晓昱, 等. 互联网视角下的泛在电力物联网[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 3-12.
SUN Yi, HUANG Ting, CUI Xiaoyu. Ubiquitous power internet of things from the internet perspective[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 3-12.
- [3] 漆灿, 李庆武, 郑云海, 等. 基于智能视觉物联网的变电站红外监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 135-141.
QI Can, LI Qingwu, ZHENG Yunhai, et al. Infrared monitoring system for substation based on intelligent visual internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 135-141.
- [4] 李宇泽, 齐峰, 朱英伟, 等. 多能互补综合能源电力系统的建设模式初探[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 3-10.
LI Zeyu, QI Feng, ZHU Yingwei, et al. Preliminary study on the construction model of multi-energy complementary comprehensive energy power system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 3-10.
- [5] BASTIAN M B, CARMAN W D, WOODHOUSE D J. Real-time monitoring of substation GPR and grounding system impedance using power system faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5298-5304.
- [6] 黄振兴, 李俊堂. 500 kV 变电站监控系统在线改造调试新方法[J]. 电气工程应用, 2015(1): 11-14.
HUANG Zhenxing, LI Juntang. A new method for online transformation and debugging of 500 kV substation monitoring system[J]. Electrical Engineering Application, 2015(1): 11-14.
- [7] AHMED E, YAQOOB I, HASHEM I A T, et al. The role of big data analytics in internet of things[J]. Computer Networks, 2017, 129(2): 459-471.
- [8] LI X, ZHAO N, JIN R, et al. Internet of things to network smart devices for ecosystem monitoring[J]. Science Bulletin, 2019, 64(17): 1234-1245.
- [9] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [10] BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of internet of things (IoT) in electric power and energy systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2): 847-870.
- [11] REKA S S, DRAGICEVIC T. Future effectual role of energy delivery: a comprehensive review of internet of things and smart grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 90-108.
- [12] 彭永磊, 赵忠亮, 吴杰, 等. 智能变电站中物联网技术的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(8): 250.
PENG Yonglei, ZHAO Zhongliang, WU Jie, et al. Application of internet of things technology in intelligent substation[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2019(8): 250.
- [13] 黄小庆, 张军永, 朱玉生, 等. 基于物联网的输变电设备监控体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 137-141.
HUANG Xiaoqing, ZHANG Junyong, ZHU Yusheng, et al. Research on monitoring system for power transmission and transformation equipments based on IoT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 137-141.
- [14] POTYRAILO R A. Multivariable sensors for ubiquitous monitoring of gases in the era of internet of things and industrial internet[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(19): 11877-11923.
- [15] 张彩友, 邹晖, 冯正伟, 等. 500 kV 变电站泛在电力物联网应用技术研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(8): 17-22.
ZHANG Caiyou, ZOU Hui, FENG Zhengwei, et al. Research on application technology of ubiquitous power internet of things in 500 kV substation[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 17-22.
- [16] JADIN M S, TAIB S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4): 236-245.

- [17] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [18] 杨东升, 王道浩, 周博文, 等. 泛在电力物联网的关键技术与应用前景[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 107-114.
YANG Dongsheng, WANG Daohao, ZHOU Bowen, et al. Key technologies and application prospects of ubiquitous power internet of things[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 107-114.
- [19] LIU Tong, CHEN Bo, DU Chaobo, et al. On development of the key technologies for the internet of power transmission and transformation equipments[J]. Southern Power System Technology, 2011, 91(5): 876-880.
- [20] 陆上. 基于射频识别的监测物联网系统的研究[J]. 网络安全技术与应用, 2019(7): 92-93.
LU Shang. Research on monitoring IoT system based on radio frequency identification[J]. Network Security Technology and Application, 2019(7): 92-93.
- [21] 蒋池剑, 陈勤, 叶炜敏, 等. 新型多模式红外热成像测温系统研制[J]. 仪器仪表与分析监测, 2018(1): 8-14.
JIANG Chijian, CHEN Qin, YE Weimin, et al. Development of a novel multi-mode infrared thermal imaging temperature measurement system[J]. Instrumentation and Analytical Monitoring, 2018(1): 8-14.
- [22] 刘磊. 红外热成像技术在电力设备状态检修中的运用分析[J]. 机电信息, 2019(23): 88-89.
LIU Lei. Application analysis of infrared thermal imaging technology in condition maintenance of power equipment[J]. Electromechanical Information, 2019(23): 88-89.
- [23] CHAI Q, LUO Y, REN J, et al. Review on fiber-optic sensing in health monitoring of power grids[J]. Optical Engineering, 2019, 58(7): 1.
- [24] 梁玲君. 电力变压器油色谱在线监测技术的探讨[J]. 电工技术, 2019(6): 19-20, 23.
LIANG Lingjun. Discussion on on-line monitoring technology of oil chromatography in power transformer[J]. Electric Engineering, 2019(6): 19-20, 23.
- [25] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.

收稿日期: 2019-11-12; 修回日期: 2020-02-06

作者简介:

刘喜梅(1961—), 女, 博士, 博士生导师, 研究方向为智能控制, 复杂系统的建模及优化控制, 软测量技术; E-mail: liuximeiqd@163.com

马俊杰(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, 电力电子技术。E-mail: 15764219855@163.com

(编辑 葛艳娜)