

基于可信WLAN无线接入技术的变电站充油设备渗漏在线监测系统的设计与实现

马振贺¹, 邹浩¹, 陈广辉¹, 张硕麟², 乔善龙¹

(1.国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271002; 2.山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为实现变电站内充油设备渗漏油状态的在线监测,设计并研发了一种基于可信无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)技术的变电站充油设备渗漏在线监测系统。该系统主要由滴速监测模块、报警模块及其他相关模块三个部分组成。滴速监测模块的功能是实现油滴的计数与计时,报警模块的功能是用来提醒集控运行人员油滴渗漏监测异常,其他相关模块是为了支撑监测系统的运行。最后在某变电站内进行系统测试与试验,结果表明系统可以实现对充油设备的在线监测,满足及时发现从一般缺陷到严重缺陷转化的要求。

关键词: 可信无线局域网; 变电站; 充油设备; 在线监测; 变电运维

The design and implementation of online monitoring system for leakage of substation oil filling equipment based on trusted WLAN wireless access technology

MA Zhenhe¹, ZOU Hao¹, CHEN Guanghui¹, ZHANG Shuolin², QIAO Shanlong¹

(1.State Grid Shandong Electric Power Company Tai'an Power Supply Company, Tai'an 271002, China;

2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To achieve online monitoring of oil leakage status of oil filling equipment in substations, this paper designs and develops an online monitoring system for oil filling equipment leakage in substations based on trusted WLAN wireless access technology. The system mainly consists of three parts: drip rate monitoring module, alarm module, and other related modules. The function of the drip speed monitoring module is to achieve the counting and timing of oil droplets, the function of the alarm module is to remind the centralized control operators of abnormal oil droplet leakage monitoring, and other related modules are to support the operation of the monitoring system. Finally, system testing and experimentation were conducted in a certain substation, and the results showed that online monitoring of oil filling equipment can be achieved, meeting the requirement of timely detection of defects from general to serious.

Keywords: trusted WLAN; substation; oil filling equipment; online monitoring; substation operation and maintenance

0 引言

无线局域网技术(Wireless Local Area Network, WLAN)是指应用无线通信技术将计

算机设备互联起来,构成可以互相通信和实现资源共享的网络体系^[1]。WLAN目前有两种安全技术路线:一种是美国主导的WiFi安全技术;另一种是采用国产密码技术的中国国家标准无线局域

网鉴别与保密基础结构 (WLAN Authentication and Privacy Infrastructure, WAPI)^[2]。WAPI是我国自主可控的无线局域网安全技术标准,在变电站内采用WAPI进行无线通信,相较于传统网络,可以保护信息通道安全和数据资产安全。

变电站内有数量众多的充油设备,主要包括变压器、电流互感器及电压互感器等。随着运行年限的增加,这些设备偶尔会出现渗漏油现象。目前,针对渗漏油设备的在线监测装置,运维人员对渗漏油现象的监测主要依赖增加人工巡视频次^[3]。人工巡视无法实现实时在线监测,会导致渗漏油现象从一般缺陷转化为严重缺陷的被发现时间延长,难以满足第一时间发现缺陷转化的要求。

本文在可信WLAN无线接入技术应用于变电站的背景下,设计了一种变电站充油设备渗漏在线监测系统,该系统可对变电站存在渗漏油的充油设备进行在线监测。当发现充油设备由一般缺陷转化为严重缺陷时,能够及时报警至站内后台及监控主站,有效提高了运维工作的效率和质量,该系统具有良好的现场应用效果和推广价值。

1 可信WLAN技术研究现状及应用分析

1.1 可信WLAN技术研究现状

WLAN是一种无线通信技术,相比光纤通信等有线接入技术,WLAN受变电站环境影响较小,同时经济性较高。可信WLAN采用WAPI认证标准,相比于WiFi技术,具有自主可控、安全性高和可靠性强的优点。WAPI是无线局域网中的一种安全传输协议,由无线局域网鉴别基础结构 (WLAN Authentication Infrastructure, WAI) 和无线局域网保密基础结构 (WLAN Privacy Infrastructure, WPI) 两部分组成。WAI主要对用户身份进行鉴别,采用公开密钥密码体制,利用公钥证书对WLAN系统中的无线终端站和接入式 (Access Point, AP) 进行认证。WPI主要对传输的业务数据进行加密,采用对称密码算法实现对MAC层的服务数据单元的加密解密操作^[4]。

本文主要介绍WAPI标准中的WAI, WAI采用基于椭圆曲线的公钥证书体制,移动终端 (Mobile Terminal, MT) 和通过鉴别服务器 (Authentication Server, AS) 进行双向身份鉴别。WAPI身份认证鉴别流程如图1所示,包含鉴别激活、接入鉴别请求、证书鉴别请求、证书鉴别响应和接入鉴别响应五部分。

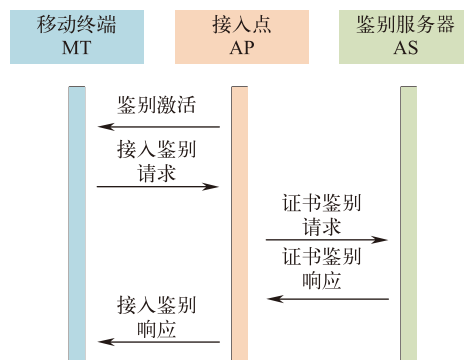


图1 WAPI身份认证流程

Fig. 1 Authentication and identification process of WAPI

1.2 可信WLAN技术应用分析

可信WLAN系统评估体系由信息安全性评估、经济性评估及传输效能评估三个核心维度构成。

在安全架构方面,系统采用双向认证与密钥协商机制,通过数字证书技术实现设备身份可信验证,不仅杜绝了伪基站和钓鱼AP的安全威胁,还通过无密码认证机制规避了传统密码验证方式可能引发的信息泄露隐患。值得注意的是,该系统创新性地应用国密SM4加密算法构建数据传输通道,经权威测试验证,其加密强度达到军工级安全标准^[5]。

从基建经济性角度分析,传统有线接入方案存在显著局限性:一方面,变电站特殊环境下的线缆敷设成本高达无线方案的3~5倍;另一方面,复杂地质条件和自然灾害频发区域常导致有线网络部署受阻。虽然电力企业曾尝试采用4G/5G公网租赁模式,但年度服务费用占运维总成本的15%~20%^[6]。相比之下,自建可信

WLAN方案初期投资回收期为2~3年, 后续运营周期内可节省90%以上的通信租赁费用, 具有显著的全生命周期成本优势^[7-8]。

技术实现层面, 系统通过工业级无线通信单元 (Customer Premise Equipment, CPE) 设备构建物联接入层。以环境监测系统为例, RS 485接口的温湿度传感器经CPE进行协议转换后, 通过无线AP与防火墙构建的安全通道, 实现与辅控主站系统的毫秒级数据交互。实测数据显示, 128个并发节点接入时延标准差不大于2 ms, 平均时延控制在4.3 ms以内^[9]。此外, 移动巡检终端通过预置WAPI安全模块及数字证书, 在完成双向认证后即可实现内网资源安全访问, 经压力测试验证其文件传输速率可达12 Mbit/s, 完全满足现场作业的数据回传需求^[10-11]。

2 系统硬件设计

2.1 监测系统总体框架

在线监测系统整体框架如图2所示。系统主要由滴速监测模块、报警模块和其他相关模块三个部分组成。滴速监测模块的功能是实现油滴的计数与计时, 可以分为油滴监测单元和计数计时单元。报警模块的功能是提醒集控运行人员油滴渗漏监测异常, 可以分为就地声光报警、集控运行报警和报警控制单元三部分。其他相关模块用于支撑监测系统运行, 可以分为视频存储单元、固定装置单元及工作电源单元。

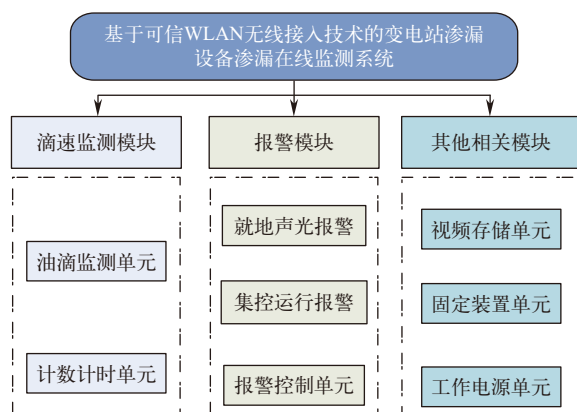


图2 在线监测系统框架

Fig. 2 Framework of online monitoring system

2.2 滴速监测模块

滴速监测模块分为油滴监测单元和油滴计数计时单元。油滴监测单元采用QL1616油滴传感器。该传感器采用红外光进行监测, 计数能力最高可达2 000次/s, 可以分辨2 mm以上油滴, 其误检率低于十万分之一。油滴计数计时单元采用ITR9606光耦器件, 它由一个红外发光二极管和一个NPN光电三极管组成。在模块槽中无遮挡时, 接收管导通, 模块OUT输出低电平; 有遮挡时, OUT输出高电平。OUT输出接口可以与单片机IO口直接相连, 监测传感器是否有遮挡。

2.3 报警模块

报警模块分为报警控制单元、就地声光报警和集控运行报警三部分。报警控制单元选择以STM32F103RCT6为核心的系统平台, 该平台是一款基于ARM Cortex-M3内核的微控制器芯片。其原理图如图3所示。就地声光报警模块采用蜂鸣器和有机电激光显示 (Organic Light-Emitting Diode, OLED) 显示器, 当油滴渗漏速率达到报警值时, 蜂鸣器会发出响声, 同时OLED显示屏也会发出报警信息。

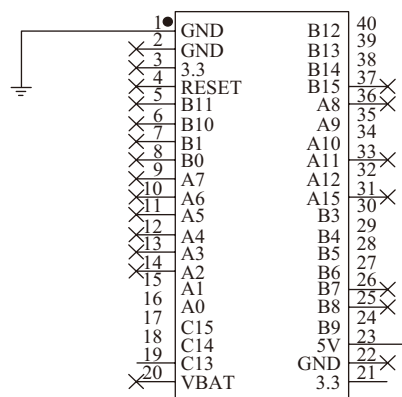


图3 STM32F103RCT6原理

Fig. 3 Principle of STM32F103RCT6

大部分变电站是无人值守变电站, 声光报警不能及时反馈给集控运维人员。因此, 将报警信息采用可信WLAN技术接入新一代集控系统, 实现对渗漏油设备的在线监测。选择博洛米M0804模块作为通信模块, 该模块内置安全芯片, 用来存放WAPI证书和密钥。该模块具有体积小、成

本低和功耗低的特点，其大小与一元硬币尺寸相仿，形态上采用了内置天线式贴片以及更加节省空间的邮票孔型式接口设计。

2.4 其他相关模块

其他相关模块用来支撑监测系统的运行，包括视频存储单元、工作电源单元及固定装置单元。视频存储单元用来记录设备渗漏油的情况，采用OV2640图像传感器。该传感器分辨率较高、画质清晰，能够在光线较弱的环境下捕捉清晰的图像，存储成功率较高。工作电源单元用来为系统供电，为了保持供电可靠性，采用检修电源供电配合锂电池供电的方案。在检修电源无电的极端情况下，锂电池还可以为该系统供电24 h。固定装置单元用来固定系统，由于设备渗漏油的位置不同，有些是平坦的地面，更多情况下是凹凸不平的环境，因此采用适用于大多数情况的嵌入式固定装置。该装置可以适应变电站内不同的工作场景，满足实际工作的需要。

2.5 系统整体工作过程

基于可信WLAN无线接入技术的变电站充油设备渗漏在线监测系统的整体结构如图4所示。

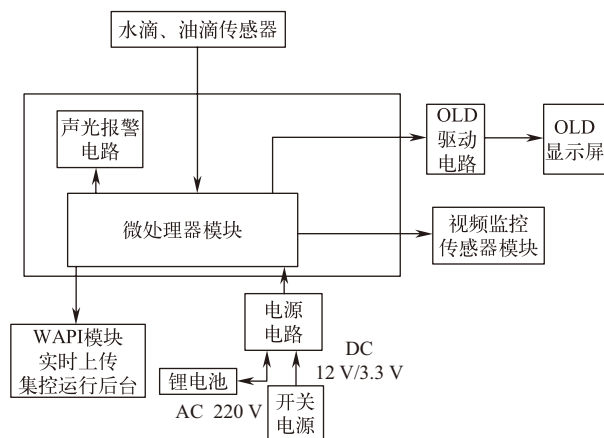


图4 系统整体结构

Fig. 4 Overall system structure

监测系统的搭建将实现以下功能：当运维人员巡视发现充油设备渗漏油后，若达不到渗漏速率，在渗漏位置点将放置在线监测装置进行持续跟踪。当渗漏速率由一般缺陷达到严重缺陷时，

给运维人员发出告警信息，运维人员紧急到现场进行检查。最后填报缺陷并依据调度指令处理，整体工作流程如图5所示。

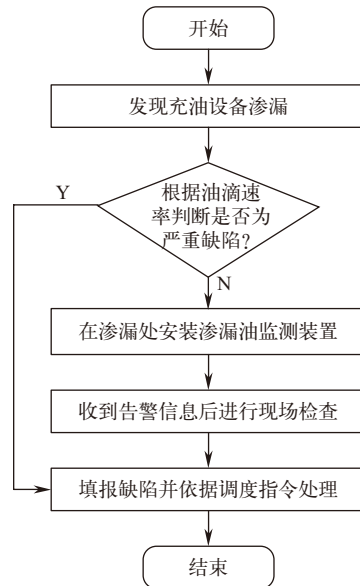


图5 整体工作流程图

Fig. 5 Overall workflow chart

3 系统软件设计

3.1 集控运行报警软件架构

集控运行报警的软件部分主要包括油滴速率采集、无线通信及在线报警弹窗三部分。在新一代集控系统建设的背景下，该部分软件可以嵌入其内部。新一代集控系统软件架构包括基础平台、基础平台支撑应用和应用功能。基础平台为各类应用的开发、运行和管理提供通用的技术支持，同时提供统一的系统管理、模型管理、数据服务、公共服务、告警服务和人机服务，满足系统各项实时、准实时和生产管理业务的需求。另外，还提供统一的系统安全体系及系统备份与恢复功能，保证系统整体安全可靠运行。应用功能基于基础平台，实现运行监视、操作与控制、监控助手以及业务管理等功能。

依据设计思路，重点是通过WAPI无线网络实现油滴速率的实时采集及监管。系统部署如图6所示。

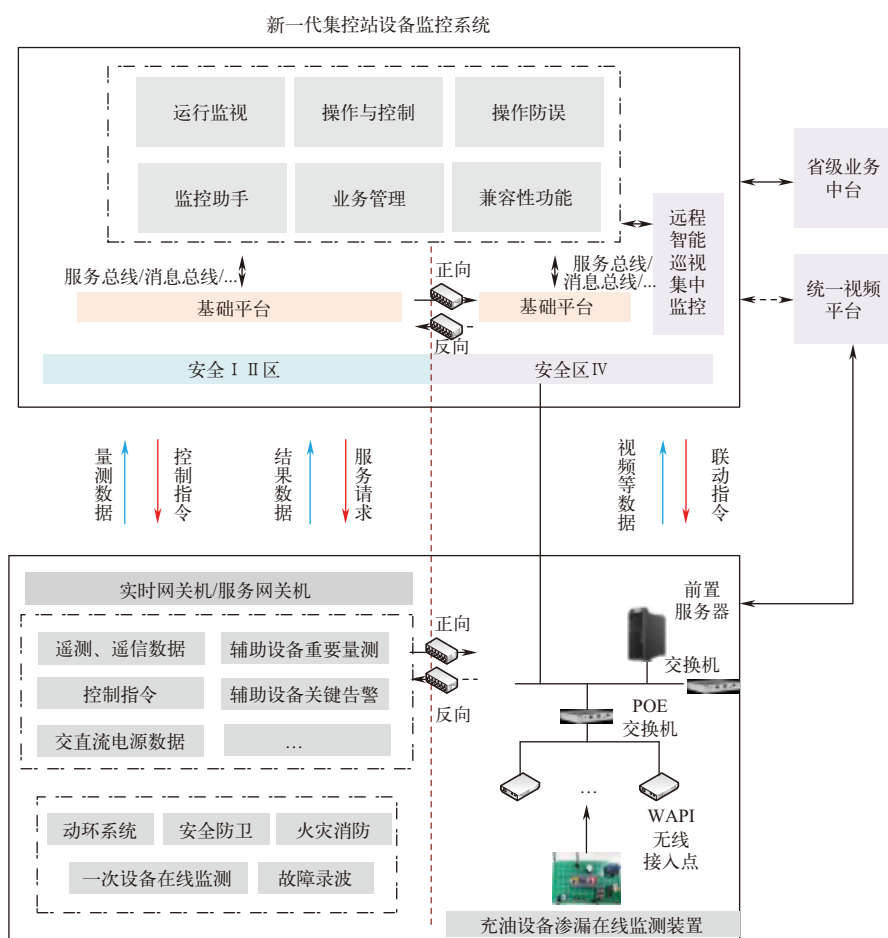


图6 系统部署

Fig. 6 System deployment

3.2 人机交互界面设计

充油设备渗漏在线监测系统的人机交互界面结构如图7所示，主要包括在线监测、报警查看、设置管理和运行日志四部分。在线监测主要用过查看所监测渗漏位置的油滴速率。报警查看用于查看超过给定阈值时的报警报文。设置管理可以对油滴速率报警阈值、装置的通信参数进行调节。运行日志将系统产生的数据文件以特定格式进行存储，以便后期调阅查看。

4 系统测试与试验

4.1 测试平台搭建

本文所设计的基于可信WLAN无线接入技术的变电站充油设备渗漏在线监测系统主要由硬件部分和软件部分组成。以某110 kV变电站为例进行测试，该变电站部署了1套专用交换机、1套无线接入

控制器（AC）以及6套无线接入点（AP），完成了站内可信WLAN网络的全覆盖。在1号变压器下放置在线监测装置，完成测试平台搭建。

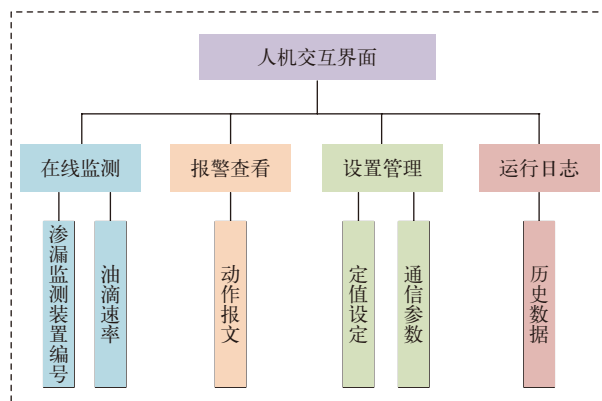


图7 人机交互界面结构

Fig. 7 Structure of human-machine interaction interface

4.2 通信性能测试

充油设备渗漏在线监测装置通过无线通信单元CPE接入可信WLAN网络,数据可以实时上送。基于可信WLAN无线接入技术,可以实现油滴速率信息的安全传输,将监测装置放在变电站内不同的位置,在线监测装置接入延时测试结果见下表。经现场测试,装置接入时延均低于10 ms,平均接入时延低于5 ms。

表 不同位置下信息上送时延测试结果

Tab. Test results of information upload delay at different locations

位置	时间/ms	丢包率(%)	位置	时间/ms	丢包率(%)
1	3	0	4	6	0
2	3	0	5	5	0
3	6	0	6	1	0

4.3 集控运行报警性能测试

在本文构建的充油设备渗漏在线监测系统中,监测装置和系统处理终端实现通信后,打开新一代集控系统,可以读取到充油设备的油滴速率数据。在线监测界面如图8所示。



图8 在线监测界面

Fig. 8 Online monitoring interface

5 结束语

本文所设计的变电站充油设备渗漏在线监测系统采用自主可控的无线局域网安全技术标准,在保证信息通道安全和数据资产安全的前提下,可以对变电站存在渗漏油的充油设备进行在线监测。在某110 kV变电站内进行测试,该监测装置可以实现油滴速率信息的实时上送,监测系统运行良好。当发现充油设备由一般缺陷转化为严重缺陷时,能够及时在站内后台和监控主站进行报

警,有效提高了运维工作的效率和质量。同时,该系统有较好的现场应用效果,在含有大量充油设备的场所具有较高的实际推广价值。

参考文献

- [1] 姜乐水. 浅谈无线局域网(WLAN)技术[J]. 信息技术与信化, 2012(5): 64-67.
- [2] 范子涛, 祁欣学, 李媛, 等. 基于WAPI协议标准的无线网络在乌鲁木齐供电公司电力系统中的应用[J]. 中国新通信, 2021, 23(21): 70-71.
- [3] 唐家萍, 蒋文涛, 黄佳林, 等. 基于紫外荧光法的电气设备渗漏油在线监测系统研究[J]. 电力与能源, 2023, 44(5): 448-451.
- [4] 苏盛, 汪干, 刘亮, 等. 电力物联网终端安全防护研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 513-525.
- [5] 封晨颖. 基于可信WAPI通信的无线智能接地线管理系统[J]. 电工技术, 2024(10): 134-137.
- [6] 马群, 于佳. 新型电力系统下通信系统远程接入网研究[J]. 山东电力技术, 2023, 50(8): 58-66.
- [7] 王玉财, 李志远, 王振锋, 等. 基于无线传感器网络的变压器呼吸器在线监测系统[J]. 宁夏电力, 2020(2): 28-32.
- [8] 贺娇, 陆璐, 王善义, 等. 地级市电力系统新一代变电集控站通信系统设计与实现[J]. 长江信息通信, 2024, 37(4): 206-209.
- [9] 赵洋, 刘伟, 赵晓红, 等. 可信WLAN无线接入技术在新型电力系统中的应用分析[J]. 山东电力技术, 2023, 50(2): 33-38.
- [10] 吕从东, 李毓才. 货运列车车载网络轻量级身份认证协议研究[J]. 网络与信息安全学报, 2018, 4(11): 23-31.
- [11] 温嘉烨, 徐国栋, 齐保振, 等. 基于WAPI网络的变电站智能运维场景实现与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(12): 83-89.

作者简介

马振贺(1997—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2025-04-04)