

基于 5G 通信的电气设备远程监控方法研究

周根生¹ 周静²

1.河南油田水电厂, 河南 南阳 473132

2.河南油田采油二厂, 河南 南阳 473132

[摘要]随着发电厂规模的不断扩大,对电气设备的运行状态进行实时监控和故障预警已经成为保证电力生产连续、安全运行的重要前提。5G 以其高传输速率、毫秒级时延和大范围连通能力,将为工业远程监控系统的革新提供全新的解决方案,虽然已有研究初步探索了 5G 技术在电力系统中的应用前景,但针对电站强电磁干扰、高温高压等复杂工况的系统化远程监测体系还存在明显不足,特别是在设备感知层和通信网络层的深度协同设计上还没有形成成熟的范式。因此,迫切需要建立一套适用于电厂特殊环境的 5G 远程监测系统,实现对设备状态数据的高效采集、高可靠传输和智能化的远程运维管理。

[关键词]5G 通信; 电气设备; 远程监控; 监控方法

DOI: 10.33142/sca.v8i12.18763

中图分类号: TP301.

文献标识码: A

Research on Remote Monitoring Method of Electrical Equipment Based on 5G Communication

ZHOU Gensheng¹, ZHOU Jing²

1. He'nan Oilfield Hydropower Plant, Nanyang, He'nan, 473132, China

2. No. 2 Oil Production Plant of He'nan Oilfield, Nanyang, He'nan, 473132, China

Abstract: With the continuous expansion of power plants, real-time monitoring and fault warning of the operating status of electrical equipment has become an important prerequisite for ensuring the continuous and safe operation of power production. 5G, with its high transmission rate, millisecond level latency, and wide range connectivity, will provide a new solution for the innovation of industrial remote monitoring systems. Although preliminary research has explored the application prospects of 5G technology in the power system, there are still significant shortcomings in the systematic remote monitoring system for complex working conditions such as strong electromagnetic interference and high temperature and high pressure in power plants, especially in the deep collaborative design of device perception layer and communication network layer, which has not yet formed a mature paradigm. Therefore, there is an urgent need to establish a 5G remote monitoring system suitable for the special environment of power plants, to achieve efficient collection, high reliability transmission, and intelligent remote operation and maintenance management of equipment status data.

Keywords: 5G communication; electrical equipment; remote monitoring; monitoring methods

引言

5G 通信具有低时延、高可靠性和广域性等特点,为构建电力设备远程监测系统提供了基础技术支持,与 4G 等传统无线通信技术相比,5G 在关键性能指标上实现了跨越式突破:将端到端时延降低到毫秒级,为设备异常状态的实时感知和预警创造了条件,将连接密度提高到每平方公里百万个量级,充分满足工业场景中大规模节点并发接入的需要。本项目提出基于多模态监测数据并行传输的新方法,其理论峰值速率可达 10Gb/s,可同时实现高清视频、多通道振动、温度场等多模态监测数据

的并行传输,为设备健康状态精细表征和多维度特征挖掘提供数据基础^[1]。

1 电气设备远程监控需求分析

在工业自动化系统持续演化的大背景下,电气设备远程监测系统建设面临多维度技术挑战,其需求特征对系统体系结构设计和技术路径选择产生深刻影响,其一,在功能实现方面,需要实现对多种物理量的精确捕捉和实时传输。其中,关键电参数的采样率必须突破万次/s,才能完全捕捉到瞬态故障的特征;同时,将感知节点到控制中心之间的全链路传输延时压缩到 50ms 以内,以保证继电保

护设备的快速响应。其二，在运行可靠性方面，面临强电磁干扰和不稳定网络环境的双重考验，数据传输完整性必须达到 99.9% 以上，核心状态参数的丢失概率低于千分之一，本项目的研究将为无线通信链路的抗干扰设计、自适应纠错机制和高效的重传策略提出严格的要求。其三，安全防护体系需要建立深度防御机制：一方面利用高强度的加密算法来抵御数据窃取和恶意篡改；另一方面，构建严格的设备身份认证系统和细粒度的权限控制模型，保证敏感的监测信息只对被授权的人开放，此外，该系统还需要适应变电站、电厂等复杂应用场景，监测点密集，并面临高温高湿等极端工作环境，这就要求体系结构具有很强的可伸缩性，不仅能够支持多个终端的并发访问，而且能够在恶劣环境下长时间稳定运行。

2 基于 5G 通信的电气设备远程监控方法

2.1 系统架构设计

本项目以电力设备运行状态为研究对象，以实时状态感知、智能诊断分析和远程运维调控为核心，构建一套完整的运行状态管理系统，本项目将 5G 通信的低时延、高可靠、广连接的核心特征充分结合起来，采用分层结构，总体上由 5G 通信传输单元、设备状态采集单元、数据智能处理和分析单元、用户交互和遥控单元（四个功能单元组成。在系统运行过程中，设备状态采集单元利用前端的传感器阵列实时采集设备的运行参数，如电流、电压、温度、振动等，采集的数据通过 5G 通信传输单元，以较高的速率和较低的丢包率完成端到端的数据传输，并将数据传输到后端的智能处理和分析单元。在此基础上，本项目以深度学习模型为基础，对海量数据进行特征提取和关联分析，实现设备健康状态评估和隐患预测，最后通过人机交互和远程控制单元，将分析结果以可视化的图形、趋势报告等形式呈现出来，并与远程指令下发界面相结合，支持操作人员对设备进行参数调整、启停控制等操作，实现对设备全生命周期的智能远程控制^[2]。

2.2 关键技术与模块设计

2.2.1 5G 通信模块

本系统所使用的 5G 通信模块主要包括基站、核心网络和边缘计算服务器，5G 基站部署在变电站、配电房等用电设备密集的区域。作为底层接入节点，承担设备状态数据实时采集和转发，并向最近的边缘计算节点发送数据，5G 核心网络以服务化架构构建，具有灵活的网络切片能力，能够为电力设备提供低时延高可靠性传输信道，以满

足不同应用场景的差异性需求，边缘计算服务器一般布置在设备侧的机房附近，负责数据的汇聚、预处理和实时分析，以缓解云的计算压力。在数据传输方面，模块采用了多种安全机制：对数据包进行加密、解密和完整性检验，结合多因子身份认证机制，防止非法侵入，保证数据的保密性和安全性，模块内建有网络切片编程器，可以根据数据延时的敏感性、可靠性等因素，自动调整高、中、低三个层次的切片资源，优化传输效率。在模块之间的交互方面，5G 通信模块将采集到的数据传输到数据分析和处理模块中，接收控制命令，实现设备的遥控调整，当通信链路发生异常时，该模块将主动上报链路质量指标，为故障诊断和自愈决策提供依据。

2.2.2 电气设备数据采集模块

电气设备数据采集模块作为前端状态感知单元，由智能传感器、数据采集器及现场总线构成，智能传感器直接安装在设备关键部位上，采集温度、湿度、振动和局放等多维状态参数，采集到的数据通过现场总线上传到现场数据采集器，经过滤波、放大、A/D 转换，将其转换成数字量，存入高速缓冲存储器中。针对电流和电压等容易受到电磁干扰的模拟量，采用自适应门限滤波技术滤除噪声；对于开关量，采用抗抖动算法，消除触点抖动的影响。同时，为了提高数据的传输效率，对原始数据进行压缩编码，为了保证时间序列的一致性，采集器内部采用了高精度时钟，通过精确的时间协议实现了与网络时钟的同步，使得时钟误差可以精确控制在 1 μ s 以内。在模块联动层次上，数据采集器通过光纤环路向 5G 通信模块实时上传数据，根据数据分析和处理模块反馈的采样速率，对采集策略进行动态优化，当检测到异常数据时，数据采集器将报警信息发送给数据分析和处理模块，并启动本地保护措施，避免设备受到损害^[3]。

2.2.3 数据处理与分析模块

数据处理与分析模块部署在电网调度中心数据中心机房中，该模块对 5G 通信模块上传的设备状态数据进行处理，按照设备类型和监控参数等维度对其进行分类存储，并进行数据清洗和规范化处理，在分析阶段，将机器学习算法和专家知识库相结合，对设备的健康状况进行评估和趋势预测。在对变压器油中溶解气体的分析中，首先提取油中的特征气体，如 H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂ 等，利用“三比值法”对故障类型进行判别，并将 Rogers 比率法和多因子加权法相结合，计算出系统的运行风险指标，以此来识别故障隐患。分析变压器油溶解气体时，常用的

特征气体浓度门限和标准如表 1 所示,当监测参数超出预定阈值或者运行风险指标超过 0.7,系统会触发预警机制,将预警信息推送给运维人员,并将分析结果反馈给人机交互控制模块,支持设备维修决策。

表 1 变压器油中溶解气体分析常用特征气体浓度阈值及判据

特征气体	浓度阈值/($\mu\text{L/L}$)	缺陷判据
H ₂	>150	放电、局部过热、电晕
CH ₄	>200	低温过热、电弧放电
C ₂ H ₆	>150	高温过热
C ₂ H ₄	>280	高温过热、电弧放电

2.2.4 用户交互与控制模块

用户交互与控制模块是电力设备远程监测系统的人机交互前端,由工业级计算机、高精度 LCD 显示屏等硬件和人机交互软件平台组成,是电力设备远程监测系统的人机交互前端。在硬件配置上,工业电脑采用英特尔 E5-2640V4 系列处理器,拥有 32GB 的内存,保证了数据处理和图形显示的流畅;该高精度 LCD 显示屏具有超 4K 的分辨率和 65 英寸以上的对角线尺寸,可以满足多人协作观看的需要。在软件实现方面,该模块利用网络服务从数据分析模块中获取设备的健康评价信息,经过模型映射和坐标转换等处理,把数据转换成图形化的仪表盘、曲线图、告警表等人性化组件,例如,当氢气浓度大于 $150\mu\text{L/L}$ 或者甲烷浓度大于 $200\mu\text{L/L}$ 时,系统会在报警列表中产生严重报警项,同时仪表盘上对应的变压器指针由绿色变为红色,操作人员可以通过报警信息进入设备详细信息页面,查看各种气体浓度的时间变化曲线,并根据罗格斯比率等准则对故障原因进行初步诊断。当需要对设备进行跳闸操作时,维护人员通过身份验证,选择目标断路器,设置其开断指令和启动时间,该系统采用加密的隧道方式将指令进行加密后发送到现场的智能开关装置,同时要求现场值班人员进行二次确认,将误操作的风险降到最低^[4]。

2.2.5 边缘计算协同处理模块

边缘计算协同处理模块是 5G 远程监测系统的近端算力中心,部署在电厂厂区边缘节点机房内,该模块通过 5G 专网与前端采集模块和后端云平台建立低延迟通信连接,实现数据预处理、实时分析和局部决策响应。在数据预处理方面,模块对采集到的多模态数据进行实时滤波、去重和格式转换,利用滑动窗算法提取关键周期的特征数据,去除无用的冗余信息,使数据传输量降低 40% 以上,显著减少骨干网络对带宽的占用,针对变压器振动信号、断路器工作时序等时滞敏感数据,通过

构建轻量化机器学习模型,实现毫秒级的故障特征识别,当检测到幅度大于 3.5mm/s 或者 PD 信号出现异常峰值时,及时触发局部报警并向控制模块推送,为设备的应急保护赢得时间。同时,模块具备边缘-云计算协同调度功能,将设备健康趋势预测、大数据统计建模等非实时分析任务上传到云中,通过分层计算能力提升系统整体运行效率,并支持断网情况下局部独立运行,保证监测服务不中断^[5]。

2.2.6 抗干扰与冗余备份模块

针对发电厂强电磁干扰和复杂的工作环境,设计了抗干扰和备份模块,从硬件保护和传输冗余两个方面构建了系统的可靠性保证体系。在硬件抗干扰方面,5G 通信终端和前端采集模块都采用电磁屏蔽外壳,屏蔽效果大于 100dB,能够有效抵御 400kV 以下输变电设备的电磁辐射干扰;传感器信号电缆采用双绞式屏蔽线,并安装有电涌保护器,可有效抑制共模干扰和瞬时过电压冲击,针对 5G 主链路和工业光纤备用链路双链路结构,采用实时链路质量监控模块(LQMM)对 5G 信号强度、丢包率等指标进行动态评估,在主链路丢包超过 0.5% 或者时延超过 50ms 时,自动切换到备用光纤链路,控制切换时间不超过 200ms,保证数据传输的连续性。在存储冗余方面,采用本地缓存+云备份+异地容灾三级存储策略,对关键数据进行 24h 缓存,云端实时同步到异地灾备中心,采用 RAID5 阵列和数据校验机制,保证数据存储的可靠性达到 99.99%。

3 实验验证

3.1 实验设计

本项目以 220kV 智能变电站为研究对象,开展基于工业以太网+4GLTE 的传统监测方式的性能对比研究,采用 32 台 5G 微基站和 8 台边缘计算单元,监测终端采用 12kHz 采样频率的多参量传感模块,支持 pi/2-BPSK 调制和 LDPC 信道编码。本项目以典型工况、过负载和故障为研究对象,模拟三种典型工况:正常运行(60%负荷)、过负载(90%负荷)和故障(短路故障)^[6]。

3.2 实验结果解析

实验结果表明,该方法在电力设备远程监测方面具有明显的性能优势,如表 2 所示,三种工作状态下,传输时延稳定在 39ms 以内,完整数据传输率大于 99.97%,设备状态辨识准确率大于 99%,丢包率小于 0.06%,信道切换耗时小于 20ms,能效比大于 6.5Mbit/J ,各项性能指标均远超传统方案。在此基础上,结合 URLLC 网络切片、MIMO 空间复用、LDPC 前向纠错等关键技术,在数据传

输实时性、数据可靠性和能耗经济性等方面取得突破，充分满足电力设备远程监测对实时性、稳定性和安全性的苛刻要求。

表 2 不同监控方案性能对比

设备状态	性能指标	本方案	传统方案
正常状态	平均传输时延 (ms)	36.7	125.3
	数据传输完整率 (%)	99.98	98.45
	状态识别准确率 (%)	99.23	88.72
	识别响应时间 (ms)	44.8	151.2
	最大丢包率 (%)	0.04	0.79
	信道切换耗时 (ms)	17	63
	能量效率比 (Mbit/J)	6.9	2.08
过载状态	平均传输时延 (ms)	35.9	127.5
	数据传输完整率 (%)	99.99	98.58
	状态识别准确率 (%)	99.11	87.59
	识别响应时间 (ms)	43.5	153.8
	最大丢包率 (%)	0.05	0.81
	信道切换耗时 (ms)	16	65
	能量效率比 (Mbit/J)	7.2	2.25
故障状态	平均传输时延 (ms)	37.1	128.6
	数据传输完整率 (%)	99.97	98.53
	状态识别准确率 (%)	99.18	89.38
	识别响应时间 (ms)	42.3	155.9
	最大丢包率 (%)	0.05	0.85
	信道切换耗时 (ms)	18	71
	能量效率比 (Mbit/J)	6.7	1.87

4 结论

综上所述，本文以 5G 技术为背景，以电力设备远程监控为应用背景，构建多模块融合的智能监测架构。实验结果表明，该系统能够在高负荷工况下进行高效的数据处理和故障判别，具有良好的实时性和稳定性，为电网设备的智能化运行提供可靠的技术支持，本项目的研究成果对于促进电力物联网的发展和电网数字化水平的提高具有重要的借鉴意义。

[参考文献]

- [1]汪坤华,朱玉鑫,曹雄宣.基于 5G 通信的电气设备远程监控方法研究[J].电气技术与经济,2025(11):47-50.
 - [2]王晨力.基于 5G 的钢铁电气设备远程监控系统关键参数实验室检测研究[J].实验室检测,2025,3(22):133-135.
 - [3]马战南,高杰,宋淼,等.5G 通讯技术在火电厂设备监测与故障诊断中的应用研究[J].电气技术与经济,2025(10):115-117.
 - [4]刘超飞,胡武超.5G 物联网技术在汽车维修智能诊断系统中的应用[J].汽车电器,2025(9):158-160.
 - [5]孟宪政,郟鑫,王晓宁,等.带有隔震装置的特高压电抗器-套管体系地震模拟振动台试验及地震易损性分析[J].中国电机工程学报,2025,45(21):8634-8646.
 - [6]唐风会.电气设备智能化技术在智能变电站的应用研究[J].电力设备管理,2024(17):182-184.
- 作者简介：周根生（1977.9—），男，长江大学，计算机科学与技术，电气工程师。