

Research on the Construction and Application of a Full Life Cycle Management System for Substation Equipment Based on IoT Technology

Xiang Wu

Zhanjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524000, China

Abstract

Against the backdrop of energy structure transformation and intelligent grid upgrades, the safety and management efficiency of substation equipment have become critical to the high-quality development of power systems. Traditional management methods relying on manual inspections and periodic maintenance suffer from issues such as data fragmentation and delayed responses. With the rapid advancement of IoT technology, a full life cycle management system integrating perception, communication, data analysis, and intelligent decision-making has emerged as a prevailing trend. This study establishes an IoT-based management framework covering the entire lifecycle of substation equipment from manufacturing to operation and decommissioning, encompassing equipment condition monitoring, operational analysis, intelligent maintenance, and asset evaluation. The research explores application pathways of IoT in equipment monitoring, risk prediction, energy efficiency optimization, and lifecycle management. Results demonstrate that the intelligent management system powered by IoT enables dynamic data interconnection and closed-loop decision-making, providing scientific evidence for safe operations and lean management in power enterprises.

Keywords

Internet of Things; substation equipment; full life cycle management

基于物联网技术的变电设备全生命周期管理体系构建与应用研究

吴翔

广东电网有限责任公司湛江供电局, 中国·广东 湛江 524000

摘要

在能源结构转型与电网智能化升级的背景下, 变电设备的安全与管理效率成为电力系统高质量发展的关键。传统管理依赖人工巡检与定期维护, 存在数据割裂、响应滞后等问题。随着物联网技术的迅速发展, 集感知、通信、数据分析与智能决策为一体的全生命周期管理体系成为趋势。本文以物联网技术为核心, 构建了覆盖“制造—运维—退役”的变电设备全生命周期管理体系, 涉及设备状态监测、运行分析、智能维护和资产评估等方面。研究探讨了物联网在设备监测、风险预测、能效优化及寿命管理中的应用路径。结果表明, 基于物联网的智能化管理体系能够实现设备数据的动态互联与决策闭环, 为电力企业的安全运行与精益管理提供科学依据。

关键词

物联网; 变电设备; 全生命周期管理

1 引言

在电力系统中, 变电设备是实现电能传输与调度的核心环节, 其运行安全直接关系到电网的稳定性与供电可靠性。传统的设备管理模式主要依靠周期性检修与人工经验判断, 难以满足现代电网对实时监测、预测性维护和高效决策的需求。物联网技术 (Internet of Things, IoT) 以感知层、网络层和应用层为结构, 通过传感器、通信网络与数据平台

实现设备运行状态的实时采集与信息共享, 为构建智能化、精细化的设备管理体系提供了技术支撑。将物联网技术引入变电设备全生命周期管理, 可实现设备从设计、安装、运行、维护到退役的全过程监控与决策优化, 提升资产利用率与管理效率。本文围绕“物联网技术—全生命周期管理—智能应用”三者的融合, 探讨其体系架构与实施策略, 旨在为电力行业的数字化转型提供可行路径。

2 物联网技术在变电设备管理中的应用基础

2.1 物联网技术的系统架构与特征

物联网系统由感知层、网络层和应用层三部分组成。

【作者简介】吴翔 (1977-), 女, 中国广东雷州人, 本科, 工程师, 从事电力系统电气工程及其自动化研究。

感知层通过传感器、RFID 标签和智能终端实时采集电流、电压、温度、湿度、振动等关键运行参数，确保设备状态的实时监控；网络层利用 5G、NB-IoT 和光纤通信技术实现数据的高效传输，并进行边缘计算，降低数据传输延迟；应用层依托云平台与人工智能算法进行数据分析、模型训练和故障预测，进一步优化决策支持。物联网的核心特征包括实时性、互联性和自适应性。通过多源数据的融合，物联网技术能够构建设备的数字孪生体，实现虚拟与现实的同步，动态可视化设备运行状态。这为电力系统提供了更加精准的决策支持，增强了设备管理的智能化水平，推动了电力设备管理的数字化与现代化。

2.2 变电设备运行管理的痛点与需求

变电设备的运行管理面临诸多痛点，如状态监测不连续、故障诊断滞后和信息孤岛现象严重。传统的人工巡检方式往往受限于人员经验与检查周期，难以满足复杂系统的动态监控需求^[1]。设备数据通常分散在不同的子系统中，缺乏统一的标准与共享机制，导致维护决策滞后、备件管理混乱等问题。随着电网规模的扩展和设备复杂度的提升，传统管理模式已经无法有效应对新的挑战。因此，迫切需要引入物联网技术，实现设备数据的互联互通、远程控制和智能预判，建立全生命周期的动态管理机制，优化设备运行与维护管理，提高系统整体效率和安全性。

2.3 全生命周期管理理念的引入

全生命周期管理（Life Cycle Management, LCM）强调对设备从设计制造到退役回收全过程的闭环管理。其目标是通过信息化与智能化手段，优化资源配置，延长设备使用寿命，并降低综合运行成本。对于变电设备而言，LCM 不仅关注设备运行阶段的维护，还涵盖设备选型、安装调试、性能优化及退役评估等环节。通过物联网技术的应用，各阶段数据得以实时追溯与分析，提升了管理的精细化与科学性。从设备的制造、运维到退役，物联网能够提供全方位的数据支持，确保每一环节都能够实现最优化管理，最终实现设备生命周期的动态管理和价值最大化。这一理念的引入，推动了设备管理模式的创新，使其更加高效、可持续。

3 基于物联网的变电设备全生命周期管理体系构建

3.1 体系总体架构设计

全生命周期管理体系通过数据为核心、物联网为纽带，构建了“感知—传输—分析—决策—反馈”的五层闭环结构。系统架构包括设备感知层、通信传输层、数据管理层、智能分析层和应用决策层。感知层通过多类型传感器实时采集设备的运行参数，如温度、振动、油色谱等关键数据，确保设备状态信息的实时获取；传输层负责保障数据的安全传递，采用边缘计算技术进行初步处理，减轻中心系统负担；数据管理层统一接入各个子系统的数据库并建立设备档案库，为后续分析提供稳定的数据支持；智能分析层则利用大数据与人

工智能模型进行故障预测与寿命评估，挖掘潜在故障风险；决策层基于分析结果，进行运维策略优化与可视化调度，形成设备状态评估与维护决策的动态循环体系。该架构确保了设备管理的全方位监控与智能化决策，能够实时反应设备状态变化并进行有效干预，推动了设备管理模式的智能化与精准化。

3.2 关键数据模型与功能模块

该管理体系的核心是建立标准化的数据模型与功能模块，包括设备全景数据模型、健康评估模型、故障预测模型和能效分析模型。通过融合 SCADA 系统、传感数据与历史检修记录，能够形成多维数据矩阵，为 AI 算法提供学习与训练的基础。设备全景数据模型将不同来源的数据进行整合，建立设备的全生命周期档案，支撑后续的健康评估与故障预测；健康评估模型结合设备运行参数与外部环境数据，对设备的健康状态进行量化评估；故障预测模型则利用机器学习技术分析历史数据，预测设备可能出现的故障类型及其发生时间；能效分析模型则监测设备的能效表现，帮助优化能源消耗与提高设备运行效率。功能模块包括在线监测、预警分析、维护决策、资产评估和报废管理等，确保设备全流程的信息追踪与动态优化，从而提高设备管理的效率与精度。

3.3 系统协同与信息安全设计

在多层系统协同过程中，确保通信链路的可靠性与数据的安全性至关重要。通过 VPN 专网与身份认证机制，保障数据传输的保密性与安全性；边缘计算节点上部署轻量化 AI 算法，能够实现本地数据的预处理与异常检测，减少网络延迟与中心系统的负荷，确保实时响应和高效处理。同时，为了防止数据篡改与恶意入侵，系统还构建了安全审计与访问控制机制，确保每一项操作和数据访问都有完整的记录与授权。这些安全设计确保了物联网系统在复杂电力网络环境中的稳定运行，同时提升了数据传输与处理的效率^[2]。信息安全的保障不仅保护了系统免受外部攻击，还增强了设备与管理数据的可信度，使得设备管理系统能够长期稳定运行，确保电力系统的安全与可靠性。

4 物联网支撑下的智能运维与预测管理

4.1 状态感知与智能监测技术

通过在变电设备上安装温度、振动、局放、油色谱等多维传感器，可以实现对变压器、断路器、电容器等关键设备的连续监测。传感器实时采集的设备数据通过边缘计算节点进行特征提取和异常识别，从而及时发现潜在风险。这一过程利用机器学习的模式识别算法，识别设备的健康趋势，生成状态评估曲线，为运维人员提供精准的维护依据。集成的实时监测平台结合 GIS 可视化系统，能够实现区域设备状态的全面展示，支持远程监管与应急处置。通过这一智能监测技术，能够全面提升设备管理的效率与精准性，确保设备在最佳状态下运行，并及时响应任何突发情况，避免潜在

的故障风险。

4.2 故障预测与健康评估机制

物联网技术的引入使得故障诊断从传统的“事后维修”转向了更加智能的“预测性维护”。通过对历史数据进行统计建模与特征分析，可以识别出关键性能衰减参数，并利用BP神经网络或随机森林算法实现故障模式识别与设备寿命预测。健康评估模型采用动态加权算法，综合考虑电气参数、环境因素与设备运行时间，形成设备健康指数（HI）。当设备健康指数下降至预警区间时，系统会自动生成检修工单，触发智能化的维护调度，确保故障得到及时处理。通过此机制，不仅能够精准预测设备故障，还能提前规划维修工作，减少停机时间和突发故障的发生，提高设备的运行可靠性。

4.3 智能维护与资源配置优化

智能维护体系通过物联网平台对设备健康状态进行实时监控，确保维护资源得到最优配置。系统根据设备的风险等级与维护优先级自动匹配维修队伍和备品备件，实现“人一物一任务”的智能联动。基于大数据分析的维护策略模型，可以预测设备的寿命周期，自动调整检修周期与备件库存结构，从而显著提升资源利用率和运维经济性。通过智能化的资源配置，维护任务可以高效分配，减少冗余操作和资源浪费，提高整体运维效率^[3]。此外，优化后的检修策略能够延长设备使用寿命，降低维护成本，进一步提升电力系统的整体效能和经济性。这一智能化维护模式推动了设备管理的精细化与现代化。

5 基于物联网的设备全生命周期价值提升路径

5.1 设备制造与设计阶段的数据贯通

在设备制造阶段，引入物联网标识体系（IoT-ID）为设备赋予数字标签，使得设备的出厂信息、生产批次、测试参数等关键信息得到全面嵌入。这一物联网标签不仅仅是设备的身份标识，更使设计参数与后期运行数据实现贯通，打破了数据孤岛。在设备从设计到制造、测试的全过程中，数字标签将设备信息实时传输，确保每个设备的生产环节可追溯、可验证。通过构建设计—运维数据闭环反馈，设备制造商能够根据现场运行信息对产品设计进行实时优化，从而提升设备的适应性和可维护性。设备从制造环节就与后期的运维管理紧密结合，不仅提升了产品的质量与可靠性，也为后续的智能化管理和生命周期优化奠定了数据基础。这一数据贯通机制有助于实现全生命周期的持续优化，推动产品设计与生产环节的智能化。

5.2 运行阶段的能效与资产管理

运行阶段是设备生命周期管理的核心环节，物联网技

术在此阶段的应用尤为关键。基于物联网的能效分析系统能够实时监测设备负荷、能耗及无功损耗，帮助管理人员识别能效异常，进一步优化设备运行。通过大数据算法，系统可以建立设备资产的动态价值曲线，并结合设备运行数据，精确计算设备的折旧，从而为企业提供更加科学的资产评估依据。这一过程中，设备健康与能效数据的结合，促使管理者能够从单点控制转向整体系统优化。在确保设备高效运行的同时，系统能够实现经济性与安全性的平衡，为企业节省能源成本并提高运营效率。基于物联网的能效监控与资产管理，能够及时发现潜在问题并采取针对性的措施，提升设备的综合运营效益。

5.3 退役与再利用阶段的循环管理

在设备退役阶段，物联网系统提供的详细运行与维护数据为设备寿命评估与再利用提供了科学依据。通过追踪设备的运行历史与维护记录，可以精准判定设备的剩余价值，并评估设备是否可再制造、可分解或可回收。结合绿色制造理念，物联网系统还可帮助建立退役设备资源再利用数据库，确保设备材料回收与再制造的标准化流程。通过数据追溯和监测，企业能够对退役设备的资源再利用进行全面评估，推动设备的循环经济模式。物联网技术不仅为设备生命周期的闭环管理提供了技术支持，还促进了绿色低碳转型的进程。通过这一循环管理模式，电力行业能够实现更高效、更环保的设备资源利用，符合可持续发展的需求，推动行业朝着低碳、环保的方向发展。

6 结语

基于物联网技术的变电设备全生命周期管理体系，是推动电力行业数字化、智能化与绿色化发展的重要路径。通过构建感知互联、数据融合与智能决策的管理架构，能够实现设备状态的全时监测、全域分析与全过程优化，从而提升电力系统的安全性与经济性。实践表明，该体系可有效降低故障率、延长设备寿命、优化运维资源配置，并为设备制造企业提供反馈闭环，促进全产业链协同创新。未来，随着人工智能、区块链与数字孪生技术的进一步融合，变电设备全生命周期管理将实现更高层次的自动化与自学习，为电网运行的安全、可靠与高效提供持续动力。

参考文献

- [1] 朱广宇.基于物联网的变电设备状态监测系统分析[J].集成电路应用,2025,42(07):238-239.
- [2] 李斌.物联网技术在输变电设备状态监测中的应用[J].华东科技,2022,(01):86-88.
- [3] 单立娟.分析物联网技术在设备全生命周期管理中的应用效果[J].电脑迷,2017,(01):149.