

Research on Key Technologies and Development Trends of Smart Grid Equipment

Zhanbiao Ma

Guangdong Zhongpeng Electric Co., Ltd., Foshan, Guangdong, 528000, China

Abstract

In the context of energy structure transformation and new power system construction, distribution networks serve as critical links connecting power sources and users. The intelligence level of their equipment directly impacts system safety and reliability. Traditional distribution networks face challenges in information perception, status assessment, and self-healing control, making them inadequate for meeting the demands of distributed energy and bidirectional energy flow. This paper analyzes core technological pathways for equipment intelligence based on smart grid architecture, including integrated sensing and control, smart terminal interconnection, and self-diagnosis. It also outlines implementation mechanisms for intelligent sensing, communication interconnection, AI algorithms, and digital twin modeling. The study suggests that future equipment intelligence will evolve toward "ubiquitous perception, collaborative decision-making, autonomous control, and digital twin" to achieve full lifecycle optimization and adaptive operation of distribution networks.

Keywords

distribution network; intelligent equipment; sensing technology; artificial intelligence; digital twin; development trend

配电网设备智能化关键技术研究与发展趋势分析

马占彪

广东中鹏电气有限公司, 中国·广东 佛山 528000

摘要

在能源结构转型和新型电力系统建设背景下,配电网作为连接电源与用户的关键环节,其设备智能化水平直接影响系统的安全性与可靠性。传统配电网在信息感知、状态评估及自愈控制方面存在滞后与效率低的问题,难以适应分布式能源和双向能量流动的新需求。本文基于智能配电网体系结构,分析设备智能化的核心技术路径,包括感知测控一体化、智能终端互联和状态自诊断等,梳理智能传感、通信互联、人工智能算法及数字孪生建模的实现机制。研究认为,未来设备智能化将向“泛在感知、协同决策、自主控制、数字孪生”方向发展,实现配电网的全生命周期优化与自适应运行。

关键词

配电网; 设备智能化; 感知技术; 人工智能; 数字孪生; 发展趋势

1 引言

随着能源互联网与双碳目标的推进,电力系统正由集中式向分布式、由静态向动态转变。配电网作为最贴近用户的能源枢纽,在分布式光伏、储能、电动汽车及微电网接入后,呈现出多源互联、双向潮流与不确定性增强的特征。传统配电网依赖人工巡检与定期维护,缺乏实时感知与自主诊断能力,设备故障检测与恢复效率低,难以满足高可靠供电和能量优化分配的需求。

智能化配电网以信息化、自动化与数字化为支撑,通过集成传感、通信、控制与智能算法,实现设备运行状态的实时监测、主动预警与自愈调控。设备智能化是配电网实现

高弹性与高韧性的基础,是推动电网由“被动响应”向“主动优化”转型的关键环节。本文以配电网设备智能化为研究对象,系统探讨其关键技术体系、发展路径与未来趋势,旨在为新型电力系统的智能化建设提供技术支撑与决策参考。

2 配电网设备智能化的总体架构与特征

2.1 智能配电设备体系结构与功能定位

配电网设备智能化的体系由感知层、通信层、控制层与决策层构成,形成纵向贯通、横向协同的多层次架构。感知层包括智能传感器、监测装置及测控终端,实现电流、电压、温度、局放、振动等多参量采集;通信层通过物联网、5G专网及光纤环网,保证数据的低时延传输;控制层依托分布式控制单元执行自动调压、负荷转移与故障隔离;决策层基于人工智能与大数据分析,实现状态评估、寿命预测及优化调度。

【作者简介】马占彪(1978-),男,回族,中国河南禹州人,硕士,工程师,从事机械工程及自动化研究。

这一体系的核心特征是“自治与协同并重”。单一设备具备自感知、自诊断、自调整的智能功能，同时通过数据共享与边缘计算实现区域自治与全网协同。系统不再依赖集中控制，而是通过分布式决策与云端协调，实现多目标动态平衡。

2.2 智能化设备的核心功能与技术路径

智能化设备的关键功能包括信息感知、状态分析、决策控制与自适应优化。其技术路径涵盖嵌入式智能模块设计、AI算法嵌入、边缘计算融合及数字孪生建模。以配电变压器为例，传统变压器只能采集有限电参量，而智能变压器通过多传感融合技术，可实现载流监测、绕组温升估计、油色谱在线分析与健康状态预测，为主动维护提供依据。

在开关设备中，智能操控单元结合局放检测与红外测温，实现故障定位与自愈操作；在线监测终端结合AI识别算法实现绝缘劣化预测；而配电终端DTU/FTU/TTU的智能化升级，使馈线自动化、故障隔离及网络重构可在毫秒级完成，显著提高供电可靠性。

2.3 智能配电设备的系统集成特征

智能设备的发展呈现系统集成化与模块化并进趋势。硬件层面，嵌入式AI芯片与边缘计算单元成为标准配置；软件层面，操作系统、数据协议与安全模块实现模块化加载。系统集成体现在设备、通信与调度的协同互动，形成“端一边一云”一体化结构。通过云平台集中数据建模与分析，边缘节点执行局部决策与异常响应，终端设备完成自适应控制，从而构建弹性、自治且可进化的智能电网生态体系。

3 配电网智能感知与通信技术体系

3.1 智能感知技术的演进与融合

智能感知是设备智能化的基础。现代配电设备通过多源传感器融合，实现对电气、热、力学及环境参数的同步采集。新型光纤传感技术、微机电系统(MEMS)传感器与分布式光纤光栅传感(FBG)技术，使测量精度与可靠性显著提高。基于多物理量的融合感知系统不仅能监测运行状态，还能识别潜在隐患，如局放定位、接触电阻异常与热积聚区域。融合感知技术进一步通过边缘AI分析实现异常识别与趋势预测。例如，卷积神经网络(CNN)可用于局放信号分类；长短期记忆网络(LSTM)可进行温度变化趋势预测，实现设备运行的预防性维护。

3.2 通信互联与数据交互体系

通信层是智能化设备联通的核心。现代配电网通信架构由主干光纤、无线专网与边缘节点组成，形成多层次冗余网络。5G网络的引入显著提升了通信带宽与实时性，支持毫秒级控制与大规模终端接入。窄带物联网(NB-IoT)与电力专用无线通信(P-LTE)在低功耗、广覆盖场景下发挥重要作用，特别适用于山区与边远地区的配电自动化终端。数据交互采用IEC 61850与DL/T 860等标准，实现多厂商

设备间互操作。数据通过边缘计算网关预处理后上传至云端，以减轻通信负载并提高响应速度，构建灵活、安全的网络通信环境。

3.3 状态感知与智能诊断算法

智能诊断技术是配电网设备健康管理的重要支撑，其核心在于融合实时监测数据与历史运行样本，实现设备状态的精细化识别与预测性维护。通过构建基于机器学习的分类与回归模型，可有效识别不同类型的故障特征。随机森林与支持向量机(SVM)模型在特征选择与模式识别方面表现出较高的鲁棒性，能够区分短路、接地、过热等多种故障类型；深度强化学习模型则在动态环境下通过持续训练优化维护策略，实现设备运行状态的自我学习与调整。智能诊断系统进一步引入专家知识库与规则推理引擎，将数据驱动与知识驱动相结合，既能从大数据中挖掘潜在规律，又能结合工程经验进行推断修正，从而显著提高复杂工况下的诊断准确率与可靠性，为设备的全生命周期管理提供决策支撑。

4 智能控制与自愈调度技术研究

4.1 配电网智能控制体系结构

智能控制体系是配电网实现高效、可靠运行的核心，其结构以分布式自治和协同优化为基本特征。系统采用分层分区控制架构，上层协调控制层负责全局潮流预测、功率优化与能量分配，下层自治执行层实现区域内电压、电流及负荷的实时调节。主站侧基于多维数据融合与模型预测控制(MPC)算法，对潮流变化趋势进行动态评估，提前生成优化调度策略；终端设备如馈线自动化控制单元(FTU)、配电变压器监测终端(TTU)和智能断路器则依据局部状态执行自主响应。模糊逻辑与自适应PID算法被用于复杂工况下的调节决策，实现对电压波动、负荷不平衡及异常工况的精准控制。该体系的显著特征在于“集中决策、分布执行”，通过云一边一端协同架构，实现从监测、分析到控制的全流程闭环，显著提升电能质量与配电网运行的动态稳定性。

4.2 故障自愈与动态重构机制

故障自愈是智能配电网的重要标志，其目标在于在最短时间内隔离故障、恢复供电并保持系统稳定。当配电网发生故障时，系统通过多源监测与事件触发机制实现快速识别。智能终端采集电流突变、零序电压和相位差等信息，结合边缘AI算法判断故障类型与位置。基于图论的网络拓扑识别方法能迅速解析电气连接关系，贝叶斯网络与马尔可夫模型用于概率推理与路径优化，从而实现精准定位与动态重构。强化学习算法通过大量仿真训练智能体，使其能够在复杂拓扑环境下自主选择最优复电路径，实现自愈决策的自进化。重构策略采用分层执行机制，上层决策模块负责全网潮流再分配，下层控制模块完成断路器分合与开关联动。通过“检测—诊断—隔离—恢复”四步闭环，自愈系统可在数秒内完成故障处置，显著提高供电可靠性与配电系统韧性。

4.3 主动调压与负荷均衡策略

随着分布式光伏、储能与电动汽车的广泛接入，配电网呈现出双向潮流特征，电压波动与负荷不均成为主要运行挑战。为此，智能配电系统引入主动调压与负荷均衡机制，以实时控制和预测优化为核心。系统通过分布式无功功率调节、相位补偿及可调电容投切实现节点电压稳定，利用柔性交流输电设备（FACTS）与动态无功补偿装置（SVG）提升调节灵活性。储能系统则作为“调峰调频”装置，在功率不平衡时自动吸纳或释放能量，缓解峰谷差。AI负荷预测模型基于时间序列与深度神经网络算法，对未来负荷变化进行趋势建模，使系统提前调整控制参数，实现电压主动优化。各控制节点通过协同机制共享运行信息，在保证供电质量的前提下实现能量最优分配，从而形成以“预测—控制—优化”为核心的动态平衡体系，确保配电网运行的安全性与经济性。

5 人工智能与数字孪生技术在设备智能化中的应用

5.1 人工智能赋能设备全生命周期管理

人工智能技术的引入使配电网设备的管理体系从传统的被动检修转变为主动预防和智能预测模式。通过构建基于机器学习和深度学习的健康状态评估模型，能够实现设备剩余寿命预测、健康指数量化与风险等级划分，为精细化检修计划制定提供数据支撑。在配电变压器、断路器和电缆终端等关键设备中，AI模型可结合实时监测数据与历史样本，形成故障特征库并开展趋势预测，实现隐患识别的前置化与维护决策的科学化。强化学习算法通过持续反馈和策略迭代，使系统具备自学习能力，可在运行过程中自动调整维护周期与负荷分配策略，达到“自我优化”的运行目标。AI在故障溯源分析中同样发挥重要作用，通过因果推理模型识别故障根源与传导路径，为设备设计、制造与运维环节提供反向优化依据，构建从设计—运行—维护—反馈的全生命周期智能闭环管理体系。

5.2 数字孪生在设备运行与仿真中的应用

数字孪生技术为配电网设备提供了虚实融合的动态映射机制，通过建立高保真数字模型，实现对设备运行状态的可视化监控与多维仿真分析。以配电变压器为例，孪生模型融合结构参数、电气负荷与环境数据，可实时反映温升、振动及绝缘老化等关键指标，实现状态预警与性能预测。在断路器及开关设备中，数字孪生系统能够模拟电弧放电、机械磨损及热应力变化过程，从而实现寿命评估与维护策略优化。结合云计算平台，可对不同区域设备的运行数据进行统

一管理与远程调度，形成分布式智能控制网络。孪生体不仅服务于运行阶段，还能在设计与测试环节中发挥作用，通过虚拟实验验证结构可靠性与参数优化方案，显著缩短设备开发周期并降低维护成本。

5.3 数据安全与隐私保护机制

随着配电设备的网络化与云端化程度不断提升，数据安全已成为制约智能化系统可持续运行的重要因素。智能设备在采集与传输过程中产生大量运行参数、状态图像及控制指令，若缺乏有效防护，将面临数据泄露、恶意篡改与网络攻击风险。为此，应构建“终端—通信—云端”三层防御体系：终端层采用芯片级加密与访问控制技术，防止非法接入；通信层运用安全传输协议与身份认证机制，确保信息传递的完整性与保密性；云端层通过多重加密、访问分级及安全审计机制，实现数据全生命周期的可信管理。区块链技术的引入可保证数据不可篡改与溯源透明，增强设备运维日志的可信性。与此同时，隐私计算与联邦学习方法可在不暴露原始数据的前提下进行模型协同训练，实现跨区域、跨企业的数据价值共享与算法联合优化。在未来智能配电体系中，数据的安全与隐私保护将成为衡量设备智能化成熟度的重要维度，也是保障电力系统运行安全与社会信任的关键前提。

6 结语

配电网设备智能化是电力系统现代化的必由之路，其技术体系涵盖感知、通信、控制、人工智能与数字孪生等多个维度。通过构建“感知—分析—决策—执行—反馈”的闭环体系，智能设备实现了自适应运行与自愈调控，为新型电力系统提供了高韧性、高可靠的技术支撑。未来，随着AI算力、边缘计算与数字孪生技术的进一步成熟，配电网设备将朝着全面互联、深度学习与自进化方向发展，实现从“智能化装备”到“智慧型系统”的跃升。推动标准体系建设、完善数据安全与产业协同机制，将是实现配电网设备智能化可持续发展的关键途径。

参考文献

- [1] 王海全.10kV配电网运维的智能化技术研究与应用[J].电力设备管理,2025,(03):17-19.
- [2] 历博.高低压成套开关设备的智能化控制系统的设计和发展趋势分析[J].光源与照明,2022,(04):135-137.
- [3] 郝树青,付宇,郑友卓,等.基于大数据的配电网运维管控智能化平台设计[J].电子技术与软件工程,2021,(21):179-181.
- [4] 张黎.配网自动化及智能化相关问题分析[J].智能城市,2020,6(22):73-74.
- [5] 王科丁.中压配电站智能化关键技术研究及应用[D].华中科技大学,2017.