

基于物联网的智能配电系统研究

朱娜芬

广州华立科技职业学院，广东 广州 511325

DOI: 10.61369/TACS.2025140038

摘 要： 随着我国经济的快速发展和用电需求的持续增长，传统配电网在面对日益复杂的用电需求和新能源大规模接入时，暴露出监测手段落后、故障响应迟缓、运维成本高昂等诸多挑战。物联网技术的快速发展为配电网智能化转型提供了新的技术路径。

关 键 词： 智能配电；智能传感器；人工智能；物联网

Research on Intelligent Power Distribution System Based on the Internet of Things

Zhu Nafen

Guangzhou Huali Science and Technology Vocational College Zengcheng District, Guangzhou, Guangdong 511325

Abstract： With China's rapid economic development and continuous growth in electricity demand, traditional distribution networks face numerous challenges in meeting increasingly complex power demands and integrating large-scale new energy sources. The lag in monitoring methods, slow fault response, and high operational costs have become apparent. The rapid development of Internet of Things (IoT) technology offers a new technological path for the intelligent transformation of distribution networks.

Keywords： smart distribution; smart sensors; artificial intelligence; internet of things

引言

配电网是国民经济和社会发展的重要公共基础设施，承担着电能的分配和用户供电的关键功能，其运行效率和可靠性直接影响国民经济发展和人民生活质量。近年来，我国配电网建设投入不断加大，配电网发展取得显著成效。中心城市（区）智能化建设和应用水平大幅提高，供电可靠率达到99.99%，用户年均停电时间不超过1小时，供电质量达到国际先进水平；城镇地区供电能力及供电安全水平显著提升，供电可靠率达到99.88%以上。

随着先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术、自动控制技术和能源电力技术与电力系统的融合，分布式电源、储能装置、智能电器的快速发展，云计算、大数据、移动终端等现代信息技术的广泛应用，配电系统将会成为电力、能源、信息服务的综合技术平台，智能化配电网也将成为今后的发展趋势。

智能配电网通过在配电系统中部署大量物联网传感器和智能终端，构建覆盖配电变压器、配电线路、高低压开关柜等核心节点的感知网络，实现对配电系统运行状态的全面感知和实时监控。同时，结合5G、边缘计算、人工智能等先进技术，智能配电系统能够实现故障的快速定位、负荷的精准预测和资源的优化调度，可显著提升供电可靠性和运维效率。

一、研究意义

智能配电系统是智能配电网的关键环节，通过集成现代信息技术、通信技术和自动化控制技术，可实现对配电网的智能化管理与高效运行。

随着分布式太阳能光伏、风电等新能源的快速发展，智能配电网需具备更强的灵活性和适应性，以实现分布式能源的实时监测、精准调度和高效消纳，确保电网安全稳定运行^[1]。利用物联

网、大数据、人工智能等技术，实现设备状态实时监测、故障智能诊断与自愈控制，提高运维效率和供电可靠性。国家出台多项政策支持智能配电网建设，如《配电网高质量发展行动实施方案（2024-2027年）》等，推动电网企业加大投资，提升智能化水平。

二、研究的可行性分析

通过本项目的研究，与电力企业、智能配电设备厂商开展合

作,共同开发课程、共建实训基地等,可实现人才培养与企业需求的紧密对接。培养更多具备智能配电技术应用能力的人才,如智能配电运维工程师、电力系统自动化技术员等,提高学生的就业竞争力。

三、研究方案

(一) 研究内容

全球双碳背景下,我国正在构建新型电力系统。为提供清洁能源接入、响应电网削峰填谷、推进负荷自控管理。考虑传统配电系统监控滞后、运维低效等问题。本研究为构建一套基于物联网的智能配电系统,以协助电网实施精准需求响应,保障有序稳定供电,并使客户获得长期收益。

本研究的主要内容为:

1. 设计具有多层次物联网感知架构的智能配电系统,实现对配电设备运行状态的全面感知和精准监测^[2]。
2. 构建高效可靠的通信传输网络,满足配电系统对数据采集的实时性、可靠性的要求,实现配电数据的实时分析和智能决策。
3. 探索配电物联网系统的安全防护机制,保障系统运行安全。

(二) 智能配电系统物联网架构设计

1. 总体架构介绍

基于物联网的智能配电系统架构采用分层分布式设计理念,遵循“感知-网络-平台-应用”的技术路线,构建了一个层次分明、功能协同的整体架构。该架构充分考虑了配电系统的复杂性和实时性要求,通过多层次的技术融合,实现对配电系统运行状态的全面感知、可靠传输、智能处理和协同控制^[3]。

(1) 感知层作为系统的基础,负责采集配电系统各类设备的运行参数。该层部署了大量高精度物联网终端,包括智能电流传感器、智能电压传感器、温湿度监测模块、局部放电检测器、弧光监测、光纤测温、烟雾报警和振动传感器等。

覆盖了主要的配电一次设备,如:配电变压器、高压配电柜、低压开关柜、配电箱、配电主母线、配电主电缆等核心设备。传感器采用的是标准化接口设计,支持即插即用,并能实现毫秒级数据采集和高精度的测量。电流、电压、电能测量精度等级可达0.5s级、功率测量精度等级可达1级。

(2) 网络层的作用是将感知层感受到的信息无障碍、高可靠性、高安全性地传递,这就要依靠传感器网络、移动通信网络和互联网技术的相互配合。

采用“有线+无线”的集中采集通信架构。骨干网采用工业级光纤通信,确保核心数据传输的高可靠性;接入网针对不同场景采用差异化技术方案,城区采用5G专网,农村和偏远地区采用LoRa等的LPWAN技术^[4]。

(3) 平台层提供了数据的存储、智能分析等核心服务。采用的是分布式架构设计,支持弹性扩展,能够处理配电终端的并发接入。云平台集成了AI算法,包括故障诊断模型、负荷预测算法、设备寿命评估等,实现了配电系统的智能化管理。

平台层还具有能耗管理、资产管理(电力监控和环境监控)、故障管理、远程控制等功能。并在实现本区域管理的同时还能与云端平台进行交互,从而达到远程控制和云端同步的应用以满足不同用户多样性的需求。

(4) 应用层是由应用支撑平台子层和应用服务平台子层组成,应用支撑平台子层用于支撑跨系统、跨平台、跨应用信息的协同、共享和互通;应用服务平台子层可实现针对电网的运营业务,如智能运维、电度结算、配电自动化等;且可提供一些用户的业务,如电动汽车智能充电;还能提供综合能源的运营业务,如能源的协调规划、储能市场等。

2. 感知层技术介绍

感知层是智能配电系统的“感官”,其技术架构设计直接影响着整个配电系统的监测精度和可靠性。根据配电设备的分布特点和监测需求,感知层采用了分层分区的部署策略,确保监测的全面性和有效性^[5]。

(1) 在变压器监测方面,部署了众多监测终端,集成了电流、电压、温度、湿度、振动等多种传感器。其中,电流传感器采用了高精度互感器,能够实时监测变压器负荷变化;温度传感器采用智能光纤传感技术,可同时监测变压器的绕组、铁芯和变压器油的温度。振动传感器用于检测变压器机械状态,能够识别变压器铁芯松动、绕组变形等故障前兆。

(2) 在配电线路监测方面,在主母线、主电缆和重要负荷的供电线路上安装智能监测终端。监测参数包括各进线、出线回路的三相电流、电压、零序电流、功率因数、频率等电气参数^[6]。

(3) 在开关柜监测方面,则重点关注开关柜的绝缘状态监测。部署了局部放电检测器、温度传感器、SF6气体检测器等设备。局部放电检测采用超高频检测技术,能及时发现绝缘缺陷;温度监测覆盖主断路器触头和主母线接头等关键部位,测量精度可达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,可确保各设备在安全温度范围内运行。

(4) 在环境监测方面,考虑到配电设备运行环境的复杂性,部署了环境综合监测装置,其核心部件为环境传感器,它可通过感受规定的被测量件,并按照一定的规律转换成可用信号,对环境目标进行监测并识别环境质量状况。监测参数包括电气设备用房的温度、湿度、风速、有害气体浓度等;对设置有电缆夹层或电缆沟的配电房,还要采集电缆夹层或电缆沟集水坑的液位显示^[7]。这些数据为配电设备状态评估和配电房的环境分析提供了重要依据。

3. 网络层技术介绍

网络层是连接感知层和平台层的桥梁,其网络架构设计必须满足配电系统对实时性、可靠性、安全性的严格要求。根据配电系统的分布特点和业务需求,传输层采用多层次、多技术融合的网络架构。

(1) 骨干传输网络采用光纤通信技术,构建环网或双环网的拓扑结构,确保网络的高可靠性。核心节点间采用10Gbps以上带宽的光纤链路,满足大数据量传输需求。在变电站和配电主站之间,部署了工业级光纤交换机,支持冗余链路和快速切换,故障切换时间小于50ms。

(2) 接入网络根据不同应用场景采用差异化技术方案。在城市核心区域,采用 5G 技术,利用其超低时延、高可靠性的特性,满足配电差动保护、精准负荷控制等对实时性要求极高的业务需求^[8]。在郊区和农村地区,采用 LoRa 等 LPWAN 技术,单基站覆盖半径可达20公里左右,满足大范围、低功耗的监测需求。

4. 平台层架构介绍

平台层是智能配电系统的“大脑”,负责数据的存储和分析。云平台采用的是分布式微服务架构,具有高扩展性、高可靠性和高安全性的特点。

(1) 平台层的服务架构采用微服务设计理念,将复杂的业务系统拆分为多个独立的微服务,包括数据采集服务、数据处理服务、设备管理服务、分析服务、设备告警服务和报表服务等。

(2) AI 算法平台是平台层的核心,其集成了多种人工智能的算法,包括深度学习算法、强化学习算法、机器学习算法等^[9]。

(三) 关键技术研究

1. 多源数据融合技术

多源数据融合是智能配电系统的核心技术之一,其目标是来自不同功能和不同种类的传感器、各种通讯协议、及不同格式的数据进行整合,形成统一、准确、可靠的数据集,为后续的分析 and 决策作好准备。

(1) 多源数据融合的基础是数据标准化技术。由于配电系统中存在大量不同厂商、不同型号的设备,其数据格式和通信协议各不相同,必须通过标准化处理实现数据的互认互通。研究采用映射方法,建立了统一的数据模型,定义了设备类型、测量参数、数据格式等标准规范。通过语义映射技术,将异构数据转换为统一的标准格式,解决了配电系统间的数据兼容性问题。

(2) 多源数据的时间一致性需采用时间同步技术。配电系统中的数据采集往往来自不同部位的各种传感器,由于各传感器间的传输时延、时钟偏差等因素,数据到达时存在时间上的差异。研究采用 IEEE 1588 精密时间协议 (PTP),结合北斗 / GPS 的双模时钟同步技术,实现了全网时间同步精度达到 $\pm 1 \mu s$ ^[10]。

2. 实时故障诊断与预警机制

实时故障诊断与预警机制是智能配电系统的核心功能,其目标是在故障发生前或发生时能及时发现问题,并能快速定位故障位置,为运维人员提供故障的记录情况,并为运维人员提供决策参考,最大限度地减少故障影响范围。

(1) 故障诊断的基础是故障特征提取技术。研究采用多域特征分析方法,从时域、频域等多个角度提取故障特征。时域特征包括电流电压的有效值、峰值、波形畸变率等;频域特征通过傅里叶变换提取谐波分量、频谱特征,提取时变特征。通过特征选择算法,从大量的特征中筛选出最能表征故障的特征子集,提高诊断准确率。可实时捕捉板载和系统报警、SOE、扰动信息和波形,全面监测系统异常快速定位故障、诊断故障原因。

(2) 故障定位技术采用多源信息融合的方法,结合电流行波定位、阻抗定位、拓扑分析等技术,实现故障的精确定位。电流行波定位技术,利用故障产生的行波信号,通过测量行波到达不同测量点的时间差,计算故障位置,定位精度达到50米以内。

阻抗定位技术通过分析故障时的电压电流关系,计算故障点的阻抗,进而确定故障位置^[11]。

(四) 实际应用案例分析

基于物联网的智能配电系统实际效果,下面介绍两个典型的应用场景:

1. 某大型工业园区的进行配电系统智能升级,该园区建有20多栋工业建筑,变压器总装机容量达到 40000kVA。系统部署了200多个智能传感器,覆盖了园区内的配电变压器、高低压开关柜、配电线路等关键设备。通过系统的实时监控和智能分析,实现了园区配电系统的全面感知和智能化管理。

应用效果显示,系统能够实时监测园区内所有配电设备的运行状态,故障预警准确率达到 95% 以上,故障响应时间在5分钟以内。通过智能负荷管理,园区的平均功率因数可达到 0.95 以上,每年可节约电费约100万元。通过预测性维护,设备故障率降低约40%,维护成本降低约35%^[12]。

2. 某城市核心区域的配电网升级改造,该区域包含110kV 变电站2座、10kV 开闭所16座、配电变压器300多台。系统通过5G 网络实现了配电网的全面监控,支持故障的快速定位和自动隔离。

应用效果表明,系统实现了配电网故障的秒级定位,故障停电时间从原来的平均1小时缩短到5分钟以内。通过智能分布式馈线自动化,配电网的供电可靠性达到99.99% 以上。系统还支持配电网的智能重构,在故障情况下能够自动寻找最优的供电路径,最大限度地减少停电范围^[13]。

3. 某国内知名智能配电企业,对采用了智能配电系统的项目进行了数据总结和分析。在采用了智能配电系统后,项目的在线巡检提高效率提高了60%、预警报警快速恢复提高了50%、远程操作安全可靠提高了90%、健康评估维护效率提高了70%。

三、结论与展望

(一) 研究成果总结

本研究为基于物联网的智能配电系统,从架构设计、关键技术、系统集成等方面进行了深入研究。提出了“感知-网络-平台-应用”的四层架构,该架构充分考虑了配电系统的复杂性和实时性要求,通过层次化设计实现了功能的合理分配。

(二) 未来发展方向

基于当前的研究成果和技术发展趋势,未来可从以下几个方面深入探索:

1. 新型储能技术的集成,随着储能技术的快速发展,包括锂离子电池、钠离子电池等多种技术路线日趋成熟。未来的智能配电系统需要更好地集成各类储能设备,通过智能调度实现储能资源的优化利用,支撑高比例新能源的接入和消纳^[14]。

2. 区块链技术应用,区块链技术在配电系统中的应用前景广阔,特别是在分布式能源交易、碳交易、设备资产管理等方面。通过区块链技术,可以建立去中心化的信任机制,实现能源交易的透明化和自动化,推动配电系统向更加开放、共享的方向

发展。

总之，基于物联网的智能配电系统实时监控技术正处于快速发展阶段，随着相关技术的不断成熟和应用场景的持续拓展，该技术在构建新型电力系统、实现“双碳”目标等方面发挥越来越

重要的作用。未来的研究需要在现有基础上，继续深化技术创新，推动产学研用协同发展，为我国电力系统的智能化转型和高质量发展做出更大贡献^[15]。

参考文献

[1]《建筑电气与智能化通用规范》GB 55024-2022

[2]《配电房智能化电气设计规范》T/GSEE 0012-2024

[3]《物联网智能低压断路器配电技术标准》(T/CECA 20032-2023)

[4]《智能供配电与照明控制》(25D204-2)

[5]徐华. 智能供配电技术应用简析 [J]. 智能建筑电气技术, 2025, 19(03): 1-5

[6]王枫, 周磊, 杨凯. 基于物联网技术的输配电智能监控与管理系统的研究 [J]. 家电维修, 2024(7): 74-76.

[7]段金见. 基于物联网的智能配电台区运行监控技术研究 [D]. 山东理工大学, 2020.

[8]吴恒, 褚伟. 基于物联网技术的智能配电柜系统的研究 [C]// 管理科学与工程学会2016年年会论文集. 2016.DOI: ConferenceArticle/5af29f26c095d716588487a7.

[9]吕超. 配电网综合防误锁控管理系统的设计与实现 [D]. 华南农业大学, 2016.DOI: 10.7666/d.D01038110.

[10]王锋, 翟富昌. 基于物联网和云平台的创新型智能配电系统 [J]. 智能建筑电气技术, 2020, 14(1): 4.DOI: CNKI: SUN: ZNDQ.0.2020-01-014.

[11]曾冰倩, 李舒宁, 张震宇. 基于物联网技术的配电网设备智能监测与维护研究 [J]. 光源与照明, 2025(1): 93-95.

[12]刘凯, 游兆阳, 李华伟, 等. 基于物联网技术的配电网智能监控系统 [C]// 中国电力科学研究院有限公司, 国网电投(北京)科技中心,《电子技术应用》杂志社. 2017年“电子技术应用”智能电网会议论文集. 国网上海市电力公司浦东供电公司; , 2017: 98-102.

[13]钟剑兵. 基于物联网的可通信可组网智能接触器及其组网系统的设计与研究 [D]. 福州大学, 2020.

[14]钟加勇. 配电物联网智能融合终端云边协同模型及应用研究 [D]. 重庆大学, 2021.

[15]黄道峰. 基于物联网技术的智能配电箱设计 [J]. 电子技术, 2023(8): 388-389.