

自动化技术在电力系统配电网工程中的应用

王 照 王 涛

内蒙古自治区巴彦淖尔杭锦后旗供电公司 内蒙古 巴彦淖尔 015400

摘 要：电力系统配电网中自动化技术应用的功能突出，体现于在线监测及数据搜集功能、馈线自动化功能等方面。要想充分发挥其功能，还需明确把握电力系统配电网自动化的设计要点和关键技术，以推进供电质量的持续改进。本文主要对自动化技术在电力系统配电网工程中的应用进行阐述，希望对配电网的安全稳定运行起到积极参照作用。

关键词：自动化技术；电力系统；配电网工程；应用

随着智能电网与可再生能源的快速发展，配电网正面临着供电可靠性、电能质量及运行效率等方面的挑战，而配电网自动化技术的应用，可有效提升配电网的智能化水平与供电质量，实现配电网的高效运行与管理。

1 自动化技术定义

1.1 技术构成。以控制系统（如计算机、传感器、执行器）为核心载体，融合控制论、信息论、系统工程、电子学等多学科知识，强调对机器视觉、AI算法、运动控制等技术的集成应用。现代自动化系统通常包含三个层级：传感器负责环境感知，控制系统执行决策分析，执行机构完成物理操作。运行机制，通过预设规则或智能算法，系统可自主完成“感知-分析-执行”闭环操作，具体包括自动检测、信息处理、分析判断、精准控制等关键环节，最终实现预定目标。

1.2 应用价值。旨在替代重复劳动，优化生产效率与产品质量，同时降低人力成本与操作风险。其应用已从制造业拓展至医疗、农业、服务业等领域。该技术当前正朝着智能化方向发展，通过引入机器学习、深度学习等AI技术，系统可逐步具备自适应与决策能力，形成更高级的柔性自动化体系。

2 自动化技术的主要功能

2.1 核心控制流程闭环。动态感知与监测，通过传感器网络精确采集设备运行参数（如温度、压力、液位）及环境数据（如气象、振动），实现毫秒级实时监控。智能分析与决策，依托AI算法对海量数据进行处理，自动生成控制指令或调整策略，例如工业生产中基于MES系统的智能排程优化。精准执行与调控，通过执行机构（机械臂、电动机、阀门）完成物理操作，如水利工程中闸门开度的毫米级调节。

2.2 运行安全保障体系。故障自愈与应急响应，自动识别设备异常（如电机过载、通信中断），触发保护

机制并隔离故障，电力系统可35秒内恢复非故障区域供电。风险预警与预测维护，结合数字孪生技术提前72小时预判设备衰退趋势，减少突发故障发生率超60%。多重安全防护，集成防电磁干扰、操作权限分级、量子加密通信等技术，规避误操作与网络攻击风险。

2.3 资源优化与协同管理。能效提升策略，动态调整设备运行模式（如工业生产线节能切换），降低能耗20%-30%。多系统协同控制，实现跨设备、跨区域联动。

2.4 多场景应用赋能。工业生产MES系统实现生产计划动态调整、质量缺陷实时追溯，产品良率提升15%-20%。能源系统，配电自动化终端支持新能源柔性并网，波动率稳定至2%以下。基础设施，楼宇自动化整合照明、安防、空调系统，能耗降低25%。

2.5 社会价值转化。效率革命，替代重复性人力劳动，工业场景中人工参与度降低80%。质量跃升，通过标准化流程控制，产品一致性误差缩减至 $\pm 0.05\%$ 。安全性突破，高危场景（如电力倒闸、化工生产）的事故率下降90%。

3 自动化技术在配电网中的作用

3.1 运行控制能力升级。精准负荷调度，通过SCADA系统与EMS（能量管理系统）实时采集全网运行参数，结合AI算法实现分钟级负荷预测与发电计划动态调整，使能源利用率最高提升20%。电压频率稳定，自动电压调节（AVR）与自动发电控制（AGC）技术将电压波动控制在 $\pm 0.5\%$ 以内，频率偏差缩减至 $\pm 0.05\text{Hz}$ ，有效防止系统震荡。

3.2 故障响应机制革新。毫秒级故障隔离，智能分布式馈线自动化（FA）线路通过继电保护装置联动，实现故障区域识别与非故障区恢复供电最快仅需35秒，较传统人工操作效率提升300%。自愈能力构建，基于数字孪生的故障预演系统可提前72小时预测设备异常，结合智

能巡检机器人实现98%故障点精准定位。

3.3 运维管理模式转型。设备全生命周期管理，部署超150万台的配电自动化终端构成监测网络，实现设备状态实时感知与健康度评估，延长关键设备寿命周期3-5年。远程智能巡检，无人机与红外测温装置替代80%人工巡检作业，结合AI视觉识别技术使缺陷发现率提升至99.3%。

3.4 新能源消纳强化。灵活并网支持，自动化平台实现分布式电源即插即用管理，支持风电、光伏等间歇性电源并网波动率降低至2%以下。多能协同优化，VPP（虚拟电厂）技术通过自动化调度聚合分布式资源，示范项目中新能源消纳能力提升40%。

3.5 安全防护体系重构。操作风险规避，遥控操作替代传统人工倒闸，使触电事故率下降90%，高空坠落风险归零。网络安全防控，量子加密通信技术与区块链验证机制保障自动化系统数据安全，抵御网络攻击成功率提升至99.99%。当前技术演进已进入智能自主阶段示范工程数据显示，AI驱动的电力系统自动化平台可实现全年99.996%供电可靠率，平均停电时间缩短至0.45小时/户。未来发展方向聚焦边缘计算与物理信息系统深度融合，构建具备自主决策能力的能源互联网。

4 配电网自动化技术应用的关键问题

配电网自动化技术应用的关键问题涉及技术、经济、管理等多个层面，综合现有研究成果与实践经验，可归纳为以下核心挑战：

4.1 通信网络覆盖与实时性保障。通信覆盖不足：偏远地区光纤部署成本高，无线通信稳定性易受地形、天气等因素影响，导致数据传输延迟或中断。实时性要求严苛：故障定位与隔离需毫秒级响应，现有通信技术（如传统无线网络）难以满足高可靠性需求，需引入5G、RedCap等低时延技术增强实时性。

4.2 设备兼容性与标准化缺失。协议与接口不统一：不同厂商设备采用私有通信协议（如IEC 61850尚未全面普及），导致系统集成困难，互操作性差。老旧设备改造复杂：传统配电网设备智能化程度低，升级涉及硬件替换、停电协调及数据迁移，实施周期长且成本高。

4.3 数据治理与智能分析能力。数据质量与管理难题：传感器精度不足、多源数据（SCADA、GIS等）融合困难，导致数据分析可信度下降，影响决策效率。算力与算法瓶颈：海量终端数据导致中心云处理压力大，需结合边缘计算与AI技术实现本地预处理与预测优化，但目前技术成熟度较低。

4.4 网络安全风险。终端暴露面扩大：自动化终端数

量激增，易受黑客攻击、数据篡改等威胁，需构建终端认证、通道加密、主站防御的三层防护体系。数据隐私保护：用户用电信息与电网运行数据敏感性高，需通过区块链等技术强化数据防篡改能力。

4.5 投资成本与效益平衡。初期投入巨大：涵盖硬件改造、通信网络建设、软件平台开发等，部分地区因财政压力难以承担。收益周期长：需通过分阶段实施（如优先关键线路）、政企合作（PPP模式）分摊风险，并通过能效提升反哺投资。

4.6 运维能力与城乡差异。专业人员短缺：传统运维人员对自动化系统操作不熟练，需系统性培训以提升故障诊断与系统维护能力。区域发展不平衡：城乡基础设施差异显著，农村配电网自动化覆盖率低，且存在设备闲置与资源浪费现象。

4.7 系统稳定性与可靠性。复杂系统故障风险：自动化系统集成度提升后，局部故障可能引发连锁反应，需通过数字孪生技术模拟优化运行策略。冗余设计不足：部分区域配电网拓扑结构单一，故障恢复依赖人工干预，削弱自动化系统的容错能力。

5 配电网自动化技术应用

配电网自动化技术的应用已深度融入现代电力系统的建设与优化中，其核心功能与典型场景如下：

5.1 技术核心功能。实时监测与优化运行，集成SCADA、GIS及配电管理系统，实时采集电压、电流等参数，自动调节无功补偿电容器和变压器分接头档位，提升电能质量。分布式能源协同管理，支持新能源接入场景下对分布式发电设备、储能装置的实时监测与控制，优化电力调配与消纳能力。

5.2 典型应用场景。城市配电网：通过自动化系统实现负荷监测与故障快速隔离，如某供电公司全自动FA线路可在35秒内完成故障恢复。工业园区：远程控制工业设备用电，提升安全性与经济性，典型案例包括深圳供电局通过实时配电监测降低设备故障率。农村及偏远区域：结合5G/6G电力专网与星地协同通信技术，覆盖低密度供电区域，解决传统运维效率低的问题。新能源微电网：集成光伏、风电等分布式能源，通过智能终端实现动态平衡与需求侧响应。

5.3 技术支撑与创新。通信技术：采用光纤通信（高带宽）、电力线载波（低成本）及5G（低时延）等多技术融合架构，满足不同场景数据传输需求。系统架构：包含主站、子站及馈线终端的三层体系，支持集中式与分布式混合处理模式，提升系统灵活性。数字孪生与AI：结合实时仿真与韧性评估系统，优化配电网规划与

故障预测能力。

5.4 效益与政策驱动。经济性：降低人工巡检频次，节省约30%运维成本，同时通过减少停电损失提升用户满意度。政策支持：国家明确将智能配电设备列为新型电力系统建设重点，推动固体绝缘环网柜、智能终端等国产化设备普及。

6 电力系统配电网自动化技术核心技术与趋势分析

6.1 关键技术突破。智能终端与边缘计算，配电终端（DTU/FTU）通过嵌入式AI算法实现本地决策，配电网终端密度达7.5台/线路，支持毫秒级故障隔离与负荷动态调控。边缘计算框架支持模型轻量化部署，实现台区级无功功率优化与分布式电源即插即用管理。高级配电自动化（DA），集中式故障处理模式融合AI算法，故障定位准确率提升至85%，非故障区域复电时间最快缩短至35秒。智能分布式控制实现馈线级自愈，支持孤岛运行与并网切换，新能源消纳波动率控制至2%以下。数字孪生与预测性维护，基于设备级数字孪生（如配电变压器、电缆隧道模型），实现状态寿命预测精度达90%。物理-信息融合系统支持电网拓扑动态重构，提升网络韧性应对极端天气扰动。5G与物联网融合通信，低时延（<5ms）电力专网满足海量终端接入需求，保障实时监控与控制指令传输可靠性。星地协同组网（低轨卫星+地面基站）覆盖偏远区域，支持终端覆盖率突破99.9%。

6.2 发展核心趋势。AI深度集成与自主决策，联邦学习与边缘AI协同优化负荷预测精度，支持配电网自适应调压与故障预警准确率达85%。大语言模型（LLM）赋能认知型交互运维，实现自然语言驱动的电网调度与应急响应。分布式能源协同控制，虚拟电厂（VPP）技术聚合光伏、储能资源，动态平衡供需，降低峰谷差15%-20%。微电网孤岛运行能力强化，保障关键设施供电可靠性，支撑工业园区清洁能源自给率突破40%。网格化动态

网络架构，智能软开关（SOP）工程化应用，实现潮流柔性控制与电能质量优化，电压合格率提升至99.99%。网格化“花瓣型”供电结构普及，故障影响范围减少超60%，用户年均停电时间降至0.5小时以内。安全防护体系升级，量子加密通信技术防御网络攻击，操作权限分级管理降低误操作风险。多层级韧性防御体系应对自然灾害，重要用户供电恢复时间缩短至分钟级。

6.3 未来技术演进方向。智能终端异构兼容：支持IPv6与多协议转换的泛在终端架构，适配新型电力电子设备。云边端协同自治：云端决策模型下沉至边缘侧，本地自治响应速度提升至微秒级。碳流追踪与交易：区块链技术实现配电侧碳足迹精准计量，支撑绿电交易与碳配额管理。

综上所述，配电网自动化技术正从“信息化”向“认知化”跃迁，构建以数据驱动、自主决策为特征的能源互联网新生态。随着物联网与AI技术的深度渗透，配电网自动化将向全域感知、弹性调控的“自愈型”智慧网络持续演进。

参考文献

- [1]李标.自动化技术在电力系统配电网工程中的应用探讨[J].科技风,2024(3):84-86.
- [2]姚成.配电网自动化技术在电力系统中的应用[J].集成电路应用,2024,41(5):260-261.
- [3]解飞.电力系统自动化技术在配电网运行管理中的实践研究[J].通信电源技术,2020,37(1):257-259.
- [4]朱合.电力系统自动化技术在配电网运行管理中的应用[J].电力设备管理,2024(15):192-194.
- [5]顾婷.电力工程中配电网自动化技术的应用研究[J].通信电源技术,2022,39(22):3.
- [6]阮那.电力工程技术在智能电网建设中的应用探讨[J].福建质量管理,2021(10):39-40.