

电力工程输配电及用电工程自动化运行解析

张枝宁 于鑫杰

桐乡市电力工程有限责任公司 浙江 嘉兴 314500

摘要：电力工程输配电及用电工程自动化是现代能源体系的核心支撑，通过特高压/超高压输电技术实现远距离、大容量电力输送，依托智能传感器、5G通信及人工智能算法构建实时监测与动态调控体系。自动化系统融合分布式发电、需求侧响应及电动汽车充电管理，提升供电可靠性与能源效率，结合数字孪生与区块链技术实现故障预判、精准运维及电力交易透明化，推动能源互联网向智能化、市场化方向演进。

关键词：电力工程；输配电；用电工程；自动化运行

引言：在能源转型与“双碳”目标驱动下，电力工程输配电及用电工程自动化成为构建新型电力系统的关键。传统输配电系统面临实时监测滞后、故障响应慢、能源损耗高等挑战，而用电工程自动化技术通过智能感知、数据互联与柔性控制，实现了供电可靠性提升与能源效率优化。本文聚焦输配电系统核心架构、自动化技术体系及其融合运行模式，探讨技术突破方向与未来发展趋势，为推动能源互联网智能化升级提供理论支撑与实践参考。

1 电力工程输配电系统基础理论

1.1 输配电系统组成与功能

(1) 高压输电网络结构以特高压和超高压技术为核 心支撑。特高压技术凭借1000千伏及以上交流、±800 千伏及以上直流的电压等级，实现远距离、大容量电力 输送，能有效解决能源基地与负荷中心地理分布不均的 问题；超高压技术（330千伏-750千伏交流、±500千伏 直流）作为区域电力输送的骨干力量，承担着省际、区 域间的电力交换任务，两者共同构成了全国电网的主网 架。(2) 配电网拓扑呈现辐射状、环网型等多种结 构，层级划分清晰。按电压等级可分为高压配电（35千 伏-110千伏）、中压配电（6千伏-10千伏）和低压配电 （220伏-380伏）三级，分别对应区域供电、城镇供 电和用户终端供电，形成从电源侧到用户侧的完整配 电链条，保障电力的精准配送。

1.2 关键技术要素

(1) 电力电子器件如IGBT、晶闸管等在输配电中应 用广泛，可实现电能的高效转换与控制，用于整流、逆 变、调压等环节，提升输配电系统的灵活性和可控性， 是现代电力系统智能化的核心器件。(2) 柔性输电技术 (FACTS) 基于电力电子器件，通过控制电力系统的 参数（电压、电流、阻抗），改善电能质量，提高线路传

输容量，解决电网稳定性问题，常见装置包括静止无功 补偿器、可控串联补偿器等。(3) 无功补偿与电压控制 机制通过投入电容器、电抗器等设备，平衡系统无功功 率，维持节点电压稳定。合理的无功补偿可降低线路损 耗，避免电压波动对用电设备的影响，保障电力系统安 全经济运行^[1]。

1.3 传统输配电系统的局限性

(1) 人工监控效率低，传统系统依赖人工巡检和数 据记录，难以实现对电网运行状态的实时监测，数据采 集滞后且易出错，无法及时掌握系统动态变化。(2) 故 障响应滞后，缺乏智能化的故障诊断与定位技术，故障 发生后需人工排查，导致故障处理时间延长，影响供电 可靠性，甚至可能引发大面积停电。(3) 能源损耗控制 不足，传统输配电设备效率较低，且缺乏精准的负荷调 节手段，在电力传输和分配过程中存在较大的线损和变 损，能源利用效率有待提升。

2 用电工程自动化技术体系

2.1 自动化技术核心模块

(1) 传感器与数据采集系统（SCADA）是自动化体 系的“感知中枢”。各类传感器（如电流传感器、电压传 感器、温度传感器）实时采集电网运行参数，SCADA 系统 通过数据传输网络汇集信息，实现对用电设备状态、电 力负荷变化的动态监测，为后续控制决策提供精 准数据支撑，同时具备数据存储与异常预警功能，保障 数据连续性与可靠性。(2) 通信技术是自动化系统的 “信息纽带”，5G技术凭借高带宽、低时延特性，满足 大规模设备接入与实时数据传输需求，适用于远程控制 与应急通信场景；电力线载波PLC技术则利用现有电力 线路传输数据，无需额外布线，降低通信成本，在配电站 区、用户侧设备互联中应用广泛，二者互补构建全覆盖 通信网络。(3) 智能控制算法是自动化运行的“决策大

脑”。模糊控制算法能处理电网中不确定、非线性的运行数据，在负荷波动调节中实现柔性控制；神经网络算法具备自学习能力，可通过历史数据训练模型，精准预测电力负荷、优化能源分配策略，提升系统对复杂工况的适应能力。

2.2 自动化运行模式

(1) 分布式发电与微电网协同控制打破传统集中供电模式。通过自动化系统协调光伏、风电等分布式电源与储能设备的运行，根据负荷变化动态调整发电出力，实现微电网与大电网的灵活并网/离网切换，保障局部区域供电稳定性，提高可再生能源消纳率。(2) 需求侧响应技术引导用户主动参与电网调节。自动化系统根据电网供需状况(如峰谷电价、供电紧张预警)，向用户推送调节指令，通过智能开关、可调负荷设备(如空调、储能热水器)自动调整用电时段与功率，平衡电网负荷，减少峰期供电压力。(3) 电动汽车充电负荷动态调控应对充电设施规模化接入挑战。系统实时监测区域电网负荷与充电桩运行状态，采用有序充电策略，在电网负荷低谷时段优先充电，高峰时段限制非必要充电，避免充电负荷集中导致的电网过载，同时结合电池储能特性，实现“车-网互动”(V2G)，提升电网备用容量^[2]。

2.3 典型应用场景

(1) 智能变电站自动化运维替代传统人工巡检。通过机器人巡检、在线监测装置实时采集设备状态数据，自动化系统分析数据判断设备健康状况，自动生成运维工单，实现故障提前预警与精准检修，减少人工成本，提升变电站运行安全性与运维效率。(2) 配电线路故障自愈系统缩短故障恢复时间。系统通过故障定位装置快速识别故障区段，自动发送指令至分段开关、联络开关，实现故障隔离与负荷转移，无需人工干预即可恢复非故障区域供电，将停电时间从数小时缩短至分钟级，大幅提升供电可靠性。(3) 用户侧能源管理系统(EMS)助力用户优化用能。系统整合家庭/企业内用电设备、分布式电源与储能装置数据，生成用能分析报告，通过智能控制实现设备联动(如光伏优先供电、储能峰谷套利)，降低用户用电成本，同时响应电网需求侧调节，实现用户与电网的双赢。

3 电力工程输配电与用电工程自动化融合运行

3.1 系统集成架构

(1) 云-边-端协同计算框架是融合运行的“算力中枢”。云端平台凭借海量存储与超强算力，承担输配电系统全局数据汇总、负荷预测模型训练及长期运行策略优化任务，实现跨区域电网协同管理；边缘节点部署于

变电站、配电台区等关键位置，就近处理实时性要求高的数据(如设备故障预警、用电负荷调控指令)，降低数据传输时延，保障毫秒级响应；终端设备(智能电表、传感器、充电桩)作为数据采集源头，实时上传设备状态与用电信息，形成“终端感知-边缘处理-云端决策”的闭环算力体系，支撑融合系统高效运行。(2) 数字孪生技术为电网模拟提供“虚拟镜像”。通过构建与物理电网完全映射的数字模型，整合输配电线路参数、用电负荷数据、设备运行状态等信息，实现电网全生命周期动态模拟。在融合运行中，可通过数字孪生模拟极端天气、设备故障等场景下的电网运行状态，提前制定应急预案；同时结合实时数据不断校准模型，精准预测用电负荷变化，为输配电调度与自动化控制提供科学依据，避免物理试验的高成本与高风险^[3]。

3.2 关键技术突破

(1) 基于大数据的负荷预测模型提升融合系统“预测能力”。整合输配电历史运行数据、用户用电习惯、气象数据(温度、降水)、经济指标等多维度大数据，通过时序分析、机器学习算法(如LSTM神经网络)挖掘负荷变化规律，实现从短期(小时级)到长期(年度)的精准负荷预测。该模型为输配电线路容量配置、自动化调控策略制定提供数据支撑，避免因负荷预测偏差导致的电网过载或资源浪费。(2) 人工智能驱动的故障诊断与定位实现“精准运维”。利用深度学习算法(如卷积神经网络)分析输配电线路电流电压波形、设备温度变化等数据，自动识别线路短路、设备老化等故障类型；结合GIS地理信息系统，快速定位故障位置(精度可达米级)，并联动自动化控制模块触发故障隔离指令，将故障影响范围最小化，相比传统人工排查效率提升10倍以上，大幅缩短停电时间。(3) 区块链技术为电力交易提供“可信保障”。在输配电与用电自动化融合场景中，区块链凭借去中心化、不可篡改特性，实现分布式电源(如用户光伏)发电量计量、电力交易结算等数据的透明存证。用户可通过区块链平台直接参与电力交易，自动化系统根据交易结果调整输配电调度策略，保障交易公平性与安全性，推动新能源消纳与电力市场化改革。

3.3 运行优化策略

(1) 经济调度与线损最小化算法降低融合系统“运行成本”。结合输配电线路参数、用电负荷实时数据，通过线性规划、粒子群优化算法制定最优调度方案，动态调整发电机出力、变压器分接头位置及无功补偿设备投入量，在满足用电需求的前提下，减少线路传输损耗

与设备能耗，实现全网运行经济性最优，据统计可降低线损率2%-5%。（2）多能互补系统能量管理提升“能源利用效率”。整合电、热、冷、气等多种能源形式，通过自动化控制系统协调输配电网络与分布式能源（光伏、风电、燃气轮机）、储能设备的运行，根据用户用能需求与能源价格波动，优化能源分配路径。例如，在用电高峰时段，优先调用储能设备与燃气轮机供电，减少输配电网络压力；在用电低谷时段，利用多余电能制热、制冷，实现能源梯级利用，提升综合能效^[4]。（3）弹性电网构建与抗灾能力提升增强融合系统“韧性”。通过自动化系统实时监测电网运行状态，在极端天气（台风、暴雪）来临前，提前调整输配电线线路负荷分布，断开高危区段电源；部署移动式储能、应急供电车等备用电源，与输配电网形成联动；结合故障自愈技术，在灾害导致线路故障时，快速切换供电路径，保障医院、交通枢纽等关键用户用电，提升电网抗灾恢复能力，减少灾害造成的经济损失。

4 电力工程输配电与用电工程自动化发展趋势与展望

4.1 技术演进方向

（1）人工智能与深度学习的深度融合将重塑系统运行逻辑。未来会突破当前算法在复杂场景的局限性，比如通过深度学习模型精准挖掘输配电与用电数据的隐性关联，实现电网负荷超短期预测（分钟级）、设备故障提前预警（提前数小时），同时结合强化学习优化调度策略，让系统具备自主适应新能源波动、用户负荷变化的能力，推动自动化从“被动响应”向“主动预判”升级。（2）量子通信在电网安全中的应用前景广阔。其

“一次一密”的加密特性可解决传统通信的安全漏洞，未来将逐步应用于跨区域电网调度指令传输、用户隐私用电数据保护等场景，尤其在特高压输电网络、跨网电力交易等关键环节，能抵御量子计算带来的破解风险，为电力系统数据传输与指令执行提供绝对安全保障。

4.2 政策与市场驱动

（1）新型电力系统建设政策为技术发展定调。我国“双碳”目标下，政策明确要求提升电网对新能源的消纳能力、推动电力系统智能化转型，例如鼓励输配电网与分布式能源、储能的协同技术研发，这将直接推动

自动化技术向多能互补控制、柔性调节方向突破，加速融合系统落地。（2）电力市场改革对自动化技术需求激增。随着现货市场、辅助服务市场的完善，用户参与电力交易的灵活性提升，需自动化系统实现交易数据实时处理、电价信号精准推送、负荷动态调整，同时要求系统具备市场化的调度能力，比如根据电价波动自动优化用户用能策略，推动自动化技术从“功能导向”向“市场导向”转变。

4.3 未来挑战与应对策略

（1）新能源高比例接入的稳定性问题需技术突破。风电、光伏的间歇性会导致电网电压、频率波动，应对策略是构建“新能源+储能+柔性控制”体系，通过自动化系统协调储能充放电、灵活调节无功补偿设备，同时优化新能源并网控制算法，提升系统抗扰动能力。（2）跨区域电网协同控制难题需机制与技术协同解决。不同区域电网的调度标准、数据格式存在差异，需建立统一的协同控制平台，通过标准化通信协议打破数据壁垒，同时研发分布式协同算法，实现跨区域负荷调配、故障互助，提升全网运行效率与可靠性。

结语

电力工程输配电及用电工程自动化是推动能源转型、实现“双碳”目标的核心引擎。通过输配电技术升级与自动化深度融合，电网运行已从被动响应迈向主动预判，供电可靠性、能源效率与市场化水平显著提升。未来，随着人工智能、量子通信等技术的突破，自动化系统将更趋智能、安全、柔性，为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系注入持久动能。

参考文献

- [1] 黄盛春. 电力工程输配电与用电工程自动化的结合应用[J]. 设备管理与维修, 2021, (12): 112-114.
- [2] 谢叙鹏. 输配电及用电工程自动化运行探究[J]. 产业创新研究, 2020, (14): 160-161.
- [3] 尹训广, 孟现永. 电力工程输配电及用电工程自动化运行解析[J]. 今日自动化, 2022, (15): 128-130.
- [4] 王古鑫. 输配电与用电工程中的自动化技术应用[J]. 电子技术, 2024, (10): 102-103.