

论电力系统自动化智能技术在电力系统中的应用

鄢开晨

重庆彭水县三江口水利综合开发有限责任公司 重庆 409600

摘要：本文系统探讨电力系统自动化智能技术的应用，围绕技术架构、核心组成及典型场景展开研究。通过人工智能、大数据、物联网等技术融合，实现新能源发电预测、电网故障自愈、智能运维等功能，提升系统运行效率与新能源消纳能力。同时分析数据安全、多源异构系统兼容性等技术挑战，提出数字孪生、区块链交易等未来发展方向，为构建安全高效、绿色低碳的智能电网提供理论支撑与实践路径。

关键词：电力系统；自动化智能技术；应用

引言：在全球能源转型与“双碳”目标背景下，电力系统正经历从传统架构向智能化、低碳化的深刻变革。自动化智能技术通过融合人工智能、大数据、物联网等前沿科技，成为破解新能源波动性、电网安全运行等难题的核心驱动力。本文从技术架构、应用场景、挑战与趋势三个维度展开研究，旨在为构建安全可控、灵活高效的现代电力系统提供创新性解决方案，助力能源革命与数字革命深度融合。

1 电力系统自动化智能技术基础理论

1.1 自动化智能技术的核心组成

(1) 人工智能与机器学习技术：作为电力系统智能化的核心驱动力，该技术通过神经网络、深度学习等算法实现设备状态预测、故障诊断及优化调度。例如，基于历史数据的发电量预测模型可提前识别潜在故障，而强化学习算法则用于动态调整电网运行参数以维持供需平衡。

(2) 大数据分析云计算技术：依托海量运行数据（如电压、电流、气象参数），通过分布式计算框架实现数据清洗、特征提取及模式识别。云计算平台提供弹性算力支持，使实时分析成为可能，例如通过挖掘用户用电行为数据优化需求响应策略。(3) 物联网与边缘计算技术：物联网通过部署于设备端的传感器网络实现全要素感知，而边缘计算将数据处理下沉至现场层，降低通信延迟。例如，变电站内的智能终端可本地完成保护动作决策，同时将关键数据上传至云端进行全局优化。

1.2 电力系统自动化智能技术架构

(1) 分层分布式系统架构设计：采用“感知-分析-执行”三层结构：感知层集成多模态传感器与无人机巡检系统；分析层构建数字孪生平台与专家知识图谱；执行层通过自动化工单派发与远程控制实现闭环管理。各层间通过标准化接口实现数据交互与功能解耦。(2) 数据采集与传输层技术：支持Modbus、IEC61850等通信协

议，采用光纤、5G及电力线载波（PLC）实现高速数据传输。针对新能源接入场景，开发自适应压缩算法以降低带宽占用，同时通过时间敏感网络（TSN）保障关键数据实时性^[1]。(3) 智能决策与控制层技术：融合多目标优化算法与实时仿真技术，构建动态安全评估模型。例如，在负荷高峰期，系统可基于气象预测与用户画像数据，自动生成分布式能源调度方案，并通过模型预测控制（MPC）实现毫秒级响应。

1.3 关键技术支撑体系

(1) 通信协议与标准化接口：制定统一的设备描述语言（如IEC61850-7-410），规范数据格式与交互规则。开发跨平台中间件，支持异构系统（如SCADA与DMS）间的无缝对接，降低集成成本。(2) 信息安全与隐私保护机制：采用国密算法对关键数据进行加密传输，部署零信任架构实现访问控制。针对用户侧数据，开发联邦学习框架，在保护隐私的前提下实现多主体协同训练。(3) 多源异构数据融合方法：提出基于知识图谱的语义对齐技术，解决不同系统间数据语义冲突问题。开发时空数据融合算法，将气象、设备状态与用户行为数据映射至统一时空坐标系，提升分析精度^[2]。

2 电力系统自动化智能技术在电力系统中的应用

2.1 智能发电环节应用

(1) 新能源发电预测与优化调度。新能源发电受气象条件影响显著，其波动性给电网调度带来挑战。通过集成数值天气预报数据、历史发电记录及设备状态信息，采用长短期记忆网络（LSTM）与注意力机制构建时空耦合预测模型，可实现未来24-72小时发电功率的分钟级预测，误差率控制在8%以内。结合多目标优化算法，动态调整火电、水电等传统能源出力，形成新能源优先消纳、传统能源灵活调节的协同调度策略，显著提升电网对新能源的接纳能力。(2) 火电机组智能燃烧

控制技术。传统燃烧控制依赖固定参数,难以适应煤质变化与负荷波动。智能燃烧系统通过部署激光诱导击穿光谱(LIBS)传感器与声学测温装置,实时获取炉膛温度场、氧量分布及燃烧产物成分数据。利用数字孪生技术构建三维燃烧模型,结合深度强化学习算法动态优化风煤比、二次风门开度等参数,实现燃烧效率提升1.2%-1.8%,同时降低氮氧化物排放25%-30%,满足超低排放标准要求。(3)水电站智能巡检与故障诊断。水电设备长期运行于恶劣环境,传统人工巡检效率低且存在安全隐患。智能巡检系统采用无人机搭载多光谱相机与超声波传感器,对水轮机转轮、发电机定子等关键部件进行非接触式检测,结合卷积神经网络(CNN)自动识别裂纹、气蚀等缺陷。通过振动信号分析与模式识别技术,构建设备健康状态评估模型,可提前3-6个月预警轴承磨损、转子不平衡等故障,为预防性维护提供数据支撑^[3]。

2.2 智能输电环节应用

(1) 输电线路状态监测与智能巡检。输电线路分布范围广,传统巡检方式成本高且时效性差。智能监测系统在导线、绝缘子等部位安装微气象传感器、拉力传感器与图像采集模块,通过LoRa或5G通信实时回传数据。利用边缘计算节点进行本地化数据分析,结合YOLOv8目标检测算法识别导线断股、绝缘子污闪等缺陷,巡检效率提升5倍以上。同时,部署分布式行波测距装置,实现故障定位精度优于300米,大幅缩短抢修时间^[4]。

(2) 柔性直流输电与智能配网技术。柔性直流输电采用模块化多电平换流器(MMC)技术,具备无功补偿、电压支撑及黑启动能力,适用于新能源大规模接入场景。通过自适应下垂控制算法实现多端功率动态分配,支撑高比例分布式电源消纳。在配网侧,部署软件定义网络(SDN)技术实现拓扑灵活重构,结合分布式电源协调控制系统,使配电网从“无源”向“有源”转变,提升供电可靠性至99.999%。(3) 电网故障自愈与快速恢复系统。基于广域同步相量测量(WAMS)技术,构建电网实时状态感知网络,通过分布式智能代理(Agent)协同决策,在100毫秒内完成故障隔离与供电恢复路径规划。采用图论算法优化网络重构策略,结合动态潮流计算验证恢复方案的可行性,使系统平均恢复时间从分钟级缩短至秒级,显著降低停电损失。

2.3 智能变电环节应用

(1) 变电站数字化改造与智能运维。采用IEC61850标准构建全站统一信息模型,实现一次设备与二次系统的互联互通。部署智能巡检机器人与AR辅助检修系统,通过自然语言处理(NLP)技术自动生成设备台账与缺

陷报告,结合知识图谱构建故障推理引擎,使运维效率提升40%。同时,开发基于数字孪生的虚拟变电站,支持远程操作培训与应急预案演练。(2) 智能变压器状态评估与预测维护。在变压器绕组、铁芯等部位安装光纤光栅传感器与局部放电监测装置,实时采集温度、应变及放电脉冲数据。利用LSTM神经网络构建剩余寿命预测模型,结合油中溶解气体分析(DGA)数据实现故障早期预警。通过多源数据融合分析,可提前6-12个月识别潜伏性故障,为状态检修提供决策依据,延长设备使用寿命5-8年。(3) 二次设备智能化集成技术。开发基于容器化技术的二次设备虚拟化平台,支持保护、测控、计量等功能软件快速部署与动态扩展。通过时间敏感网络(TSN)实现采样值(SV)与通用面向对象变电站事件(GOOSE)报文的低延迟传输,将继电保护动作时间从50毫秒压缩至20毫秒以内,满足高可靠性电网需求^[5]。

2.4 智能用电环节应用

(1) 需求响应与负荷预测技术。基于用户用电行为聚类分析构建分时电价响应模型,结合天气、节假日等多维因素实现未来24小时负荷预测,准确率达95%以上。通过可中断负荷协议与虚拟电厂(VPP)技术,引导工业用户参与调峰,平抑电网负荷峰谷差15%-20%,提升系统运行经济性。(2) 电动汽车充电桩智能调度。采用V2G(车辆到电网)技术构建双向充放电系统,通过强化学习算法优化充电功率分配,在满足用户出行需求前提下实现电网负荷削峰填谷。结合区块链技术实现充电交易透明化,支持多运营商协同运营,提升充电设施利用率25%以上。(3) 智能家居能源管理系统。部署智能电表与物联网传感器,实时监测家电能耗与室内环境参数。通过深度Q网络(DQN)算法学习用户用电习惯,自动调节空调、热水器等设备运行模式,实现家庭能耗降低15%-20%。系统支持光伏发电与储能装置集成,形成微网级能源优化单元,推动用户侧能源消费革命。

3 自动化智能技术在电力系统中应用的挑战与未来发展趋势

3.1 技术应用面临的挑战

(1) 数据安全与网络攻击防御难题。电力系统自动化智能技术依赖海量数据交互,但设备接入多元化导致攻击面扩大。工业控制系统(ICS)协议存在漏洞,易遭受APT攻击、数据篡改等威胁,而边缘计算节点分布广泛,加密算法性能与实时性难以平衡。此外,隐私保护技术虽可实现数据“可用不可见”,但模型安全性仍需验证,全生命周期防护体系尚未完善,数据泄露风险仍存。(2) 多源异构系统兼容性问题。电力设备遵循不

同通信协议（如IEC61850、Modbus），数据格式与采样频率差异大，导致信息孤岛现象严重。虚拟电厂需整合分布式光伏、储能等多元主体，但各系统控制逻辑与响应速度不匹配，协同优化难度高。同时，传统设备数字化改造周期长，新旧系统共存期间的协议转换与数据同步成为技术整合的关键障碍。（3）高精度实时控制技术瓶颈。新能源发电的间歇性与负荷波动性要求控制指令在毫秒级响应，但现有通信网络（如5G）存在延迟抖动问题，端到端可靠性难以保障。时间敏感网络（TSN）虽能实现确定性传输，但设备成本高且生态不完善。此外，高比例电力电子设备接入导致系统惯性降低，传统控制算法难以应对强非线性场景，需开发新型智能控制策略。

3.2 未来发展方向

（1）数字孪生与全息感知技术应用。通过物联网传感器与卫星遥感构建电网数字孪生体，实现设备状态全息映射与动态交互。结合多模态数据融合技术，提升缺陷识别准确率，推动从“计划检修”向“状态检修”转型，降低运维成本。（2）基于区块链的分布式能源交易。利用区块链智能合约实现点对点电能交易与绿证核发，降低中间环节成本。结合零知识证明技术保护用户隐私，构建去中心化能源市场，激发小微主体参与需求响应的积极性。（3）人工智能与量子计算的深度融合。量子计算可突破经典计算在组合优化问题中的瓶颈，提升经济调度等场景的求解效率。同时，量子机器学习可加速新能源预测模型训练，结合AI开发自适应保护算法，实现故障定位与隔离的毫秒级决策。

3.3 政策与标准化建议

（1）完善智能电网技术标准体系。加快制定数字孪生、区块链交易等新兴领域标准，统一数据接口、通信协议与安全规范。建立设备互操作性认证机制，推动厂商遵循IEC61850-90-7等国际标准，降低系统集成成本。

同时，制定人工智能算法伦理准则，明确数据使用边界与算法可解释性要求。（2）推动跨行业数据共享机制建设。建立电力-气象-交通等多部门数据共享平台，制定数据分级分类开放规则，明确数据权属与收益分配机制。通过隐私计算技术实现“数据可用不可见”，鼓励新能源企业、电动汽车运营商等主体共享运行数据，提升系统建模精度与决策科学性。（3）加强复合型人才培养与产学研合作。高校增设“电力智能技术”交叉学科，培养既懂电力系统又掌握AI、区块链的复合型人才。企业与科研机构共建联合实验室，聚焦量子计算、数字孪生等前沿技术攻关。同时，建立行业技术联盟，制定技术路线图与知识产权共享规则，加速科研成果向工程应用转化。

结束语

电力系统自动化智能技术是推动能源革命与数字革命协同发展的关键引擎。面向未来，需聚焦量子计算、数字孪生等颠覆性技术攻关，突破数据安全、实时控制等瓶颈制约；同时加快完善技术标准体系与跨行业协作机制，推动产学研用深度融合。通过构建“源网荷储”协同互动的智能生态系统，加速实现电力系统向清洁低碳、安全可控方向转型升级，为全球能源治理与可持续发展贡献中国智慧。

参考文献

- [1]李珍珠,吴超颖.基于电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用研究[J].电力与能源前沿,2024,2(6):52-54.
- [2]肖科.电力系统自动化中智能技术的运用实践[J].工程技术与管理,2023,7(22):10-12.
- [3]何诗园.智能技术在电力系统自动化中的应用[J].水电科技,2023,6(9):90-92.
- [4]王海红,张涛.电力系统自动化技术及其在电力系统运行中的应用[J].电力系统自动化,2021,45(10):12-18.
- [5]魏晓函,孙建国.基于智能化的电力系统运行维护管理研究[J].电力建设,2022,43(2):99-105.