

智能技术在电力系统集控运行控制中的应用

樊学成

大唐(内蒙古)能源开发有限公司 内蒙古呼和浩特 010040

摘要: 在能源转型与数字革命的双重驱动下,电力系统正经历从传统集中式控制向智能化、自主化集控运行的深刻变革。随着新能源大规模并网和用电需求多元化,电网复杂性显著提升,传统依赖人工经验与物理模型的运行模式面临响应滞后、资源浪费等挑战。智能技术通过构建“感知-分析-决策”闭环体系,为破解这一困局提供了关键路径。大数据分析、物联网监控、人工智能决策及智能控制技术的深度融合,正在重塑电力系统集控运行的核心逻辑。从设备级智能监测的毫秒级响应,到区域级数字孪生的多能源协同优化,再到自主进化电网的跨区域知识共享,智能技术不仅提升了电网运行效率与稳定性,更推动了行业向低碳、韧性方向转型。然而,技术落地仍面临数据安全、算法透明性及复合型人才短缺等挑战。本文聚焦智能技术在电力系统集控运行控制中的应用,系统阐述其技术架构、核心场景及实施路径,旨在为智慧电网建设提供理论支撑与实践参考,助力实现高效、可靠、可持续的能源供应未来。

关键词: 智能技术; 电力系统集控运行控制; 应用

传统的电力系统运行管理面临着越来越大的挑战。在这样的背景下,引入智能技术成为了提高电力系统运行效率和安全性的的重要途径。人工智能技术以强大的数据处理能力和智能决策能力,为电力系统的集控运行控制提供了全新的解决方案。

一、研究意义及目的

1. 研究意义

电力系统作为现代社会运行的基石,其集控运行控制直接关系到能源安全、经济效率和社会稳定。随着新能源大规模接入和用电需求多元化,传统依赖人工经验与物理模型的运行模式面临显著挑战,智能技术的引入成为破解困局的关键路径。研究其应用具有多重战略意义:保障能源安全与民生需求,电力系统需持续满足居民、工业及商业的稳定供电需求,任何运行控制失误都可能引发连锁故障,影响社会经济活动。智能技术通过实时监控与快速响应,显著降低大规模停电风险,确保民生用电无忧。应对复杂环境挑战,新能源波动性、负荷峰值不确定性及设备老化问题加剧了系统复杂性。传统方法难以实时处理海量数据,导致调度滞后。智能技术整合物联网与大数据,实现动态环境适应,提升系统韧性。推动行业转型升级,研究不仅解决当下问题,还引领电力系统向高效、低碳方向演进。智能技术的闭环优化能力支持新能源消纳,减少化石能源依赖,助力

“双碳”目标实现,为行业注入创新活力。提升社会经济效益,通过优化资源分配和故障预防,智能技术降低运维成本,减少能源浪费。例如,预测性维护避免非计划停电,直接提升企业生产效率和用户满意度,形成经济与社会效益双赢。

2. 研究目的

本研究聚焦智能技术在电力系统集控运行控制中的深度应用,旨在实现以下核心目标:破解传统运行控制的局限性,针对数据孤岛、故障响应被动及资源分配粗放等痛点,探索智能技术解决方案。通过物联网实现设备互联,打破信息壁垒,构建统一分析平台,消除决策延迟。优化系统运行效率与稳定性,利用大数据分析实时负荷与设备状态,动态调整发电计划,降低峰谷差率。结合人工智能算法,提升故障诊断速度,实现秒级定位,增强系统抗干扰能力。增强决策支持与应急能力,开发自适应控制策略,应对新能源波动场景,维持频率电压稳定。集成多源数据生成应急预案,如孤岛运行方案,提升灾害恢复效率,减少损失。促进技术落地与价值转化,推动智能控制与分布式系统(DCS)的深度融合,实现实时闭环优化。通过边缘计算减少延迟,构建人机协同界面,将复杂数据可视化,加速技术从实验室到实际应用的转化。为未来智能电网奠定基础,研究不仅解决当前问题,还探索数字孪生、量子计算等前沿技术的

融合路径，为电力系统向更智能、更韧性方向演进提供理论支撑与实践指南^[1]。

二、技术架构：构建“感知-分析-决策”闭环

1. 全域感知层：全环节数据毫秒级采集

全域感知层是闭环体系的“神经末梢”，通过智能传感器、物联网终端及SCADA系统，实现电力系统发、输、变、配、用全环节的实时数据采集。具体功能包括：多维度数据覆盖：采集设备状态（如温度、振动）、环境参数（如湿度、风速）及用户负荷等300+维度数据，确保信息全面性。毫秒级响应：利用高速通信网络，实现数据实时传输，为后续分析提供即时输入。

2. 智能分析层：融合技术与状态评估

智能分析层是闭环的“大脑”，融合大数据分析、机器学习与数字孪生技术，构建电网运行状态评估模型。其核心作用体现在：大数据分析：对海量数据进行清洗、存储与处理，挖掘潜在运行规律。例如，通过历史负荷数据训练模型，优化发电计划。机器学习应用：采用LSTM神经网络预测负荷波动。数字孪生技术：构建虚拟电网模型，模拟不同运行场景，辅助决策验证。

3. 决策执行层：实时控制与标准优化

决策执行层是闭环的“执行者”，基于强化学习等算法，实现控制指令的实时下发与反馈调整。关键功能包括：强化学习算法：应用于AGC（自动发电控制）系统，动态调整机组出力。某区域电网应用后，频率偏差控制在 $\pm 0.02\text{Hz}$ 内，优于国家标准要求的 $\pm 0.1\text{Hz}$ ，显著提升电能质量。自适应控制策略：在新能源波动场景下，通过实时数据反馈优化控制参数。人机协同界面：开发可视化平台，将复杂控制逻辑转化为直观操作，辅助调度人员快速决策^[2]。

三、核心智能技术应用

1. 大数据分析优化电网运行

在电力系统集控运行控制中，大数据分析技术通过高效的数据采集与处理，显著提升了电网运行的智能化水平。其核心应用体现在以下方面：（1）数据采集：智能传感器与监测设备的实时感知，多源数据整合：部署智能传感器、物联网终端及SCADA系统，实现发电、输电、变电、配电、用电全环节的实时数据采集。覆盖设备状态（如温度、振动）、环境参数（如湿度、风速）及用户负荷等300+维度数据，确保信息全面性。毫秒级响应：通过高速通信网络，数据以毫秒级速率传输至分析平台，为动态决策提供即时输入。（2）数据处理：机器

学习算法驱动优化决策，数据清洗与存储：利用机器学习算法对海量数据进行清洗、去噪和标准化处理，构建高效存储架构。采用分布式数据库技术，支持PB级数据的高效存取，为后续分析奠定基础。智能分析与状态评估：通过机器学习模型（如LSTM神经网络）分析历史与实时数据，构建电网运行状态评估模型。同时，结合数字孪生技术，模拟不同运行场景，提前识别变压器过载等风险，避免非计划停电。动态优化与资源分配：基于分析结果，动态调整发电计划与设备运行参数。通过优化变压器负载率，降低线损率；在新能源波动场景下，实时平衡发电与用电需求，提升系统稳定性^[3]。

2. 物联网技术实现实时监控与预测

在电力系统集控运行控制中，物联网技术通过构建设备网络与预测性维护体系，实现了从被动响应到主动预防的转变，显著提升了电网运行的可靠性与经济性。（1）设备网络：多维度传感器支撑实时数据传输，全环节覆盖：部署温度、电流、振动等智能传感器，形成发电、输电、变电、配电、用电全环节的监测网络。例如，在变电站中，温度传感器实时监测变压器绕组热点，电流传感器捕捉线路负载波动，数据通过5G或光纤网络毫秒级传输至集控中心。边缘计算赋能：在设备端部署边缘计算节点，对原始数据进行初步过滤与压缩，减少传输带宽压力。（2）预测性维护：异常检测与故障预警的智能闭环，实时异常检测：采用机器学习算法（如孤立森林、LSTM）分析传感器时序数据，识别设备异常模式。多源数据融合预警：整合设备状态、环境参数及历史维修记录，构建故障预测模型。自适应阈值调整：根据设备老化程度动态更新预警阈值，减少误报率。

3. 人工智能算法提升决策效率

在电力系统集控运行控制中，人工智能算法通过数据驱动方法与快速决策能力，有效解决了传统物理模型在复杂不确定性环境下的局限性，显著提升了电网运行的响应速度与控制精度。（1）数据驱动方法：替代传统物理模型，适应复杂不确定性环境，传统模型局限性突破：传统物理模型依赖固定参数与简化假设，难以应对新能源波动、负荷突变等动态场景。人工智能算法通过分析海量历史与实时数据，构建数据驱动动态模型，自适应环境变化。多源数据融合分析：整合气象数据、设备状态、用户行为等异构信息，通过特征提取与降维技术，挖掘隐藏关联。不确定性量化处理：采用蒙特卡罗模拟与贝叶斯推理，评估新能源出力、负荷需求的概

率分布,生成鲁棒性控制方案。(2)快速决策:分析运行环境信息,生成控制方案,实时环境感知与评估:通过物联网与边缘计算技术,毫秒级采集电压、频率、设备温度等参数,结合数字孪生模型实时模拟电网状态。自适应控制策略生成:基于强化学习算法,动态优化发电计划、无功补偿等控制指令。人机协同决策支持:开发可视化决策平台,将复杂控制逻辑转化为直观图表,辅助调度人员快速理解系统状态。

4. 智能控制技术集成与开发

在电力系统集控运行控制中,智能控制技术的集成与开发通过系统融合与定制化扩展,实现了控制流程的智能化升级,显著提升了电网的响应速度与运行灵活性。其核心价值体现在以下方面:(1)系统集成:与DCS系统无缝对接,实现实时运算与反馈,异构系统融合:通过标准化接口协议(如OPC UA、IEC 61850),将智能控制模块与分布式控制系统(DCS)深度集成,消除数据孤岛。边缘-云端协同计算:在DCS边缘层部署轻量级推理模型,实现本地快速决策;云端则负责复杂模型训练与全局优化。闭环反馈优化:集成实时监测数据,动态调整控制参数。(2)二次开发:支持自定义算法与界面,增强灵活性,算法框架开放:提供模块化算法库(如PID优化、神经网络控制),支持用户根据场景需求定制模型。可视化界面定制:基于低代码平台开发人机交互界面,支持拖拽式组件配置。跨平台兼容性:支持Windows/Linux系统及国产化硬件环境,确保技术自主可控^[4]。

四、实施路径与挑战

1. 分阶段推进策略

设备级智能监测阶段,聚焦底层设备智能化,部署边缘计算节点实现就地决策。通过智能传感器实时采集设备状态数据(如温度、振动),在边缘侧完成初步分析与异常检测,减少云端传输延迟。例如,在变电站中,边缘节点可独立判断变压器过热风险并触发预警,提升响应速度。区域级数字孪生平台阶段,构建区域级数字孪生模型,整合发电、输电、配电等多环节数据,实现多能源协同优化。通过虚拟仿真模拟不同运行场景,动

态调整发电计划与负荷分配。自主进化电网阶段,发展联邦学习框架,支持跨区域知识共享与模型迭代。各电网节点在本地训练模型后,仅共享参数更新而非原始数据,既保护隐私又提升全局决策能力。

2. 关键挑战与应对措施

数据安全挑战,问题:电力数据涉及国家能源安全,需防范篡改与泄露风险。应对:建立电力专用区块链平台,采用国密SM4算法加密传输,确保数据不可篡改。算法可解释性挑战,问题:AI决策的“黑箱”特性难以满足电力系统合规要求。应对:开发SHAP值可视化工具,解析模型决策依据。人才缺口挑战,问题:复合型人才培养制约技术落地。应对:培养“电力+AI”跨领域团队,电网企业设立“智能电网工程师”认证体系,通过联合高校与科研机构,年培训复合型人才超千人^[5]。

综上所述,智能技术的分阶段实施路径从设备级到全局级逐步推进,形成“监测-优化-进化”的闭环体系。然而,数据安全、算法透明性及人才储备等挑战需通过技术创新与制度完善协同解决。智能技术正在重塑电力系统运行控制范式,其价值不仅体现在效率提升,更在于推动能源系统向绿色、弹性、自愈方向演进。未来需持续突破技术瓶颈,构建开放协同的智能电网生态。随着量子计算与数字孪生技术的深度融合,电力系统将向更自主、更韧性的方向持续演进。

参考文献

- [1] 苏俊. 数字赋能新型电力系统运行控制技术创新[N]. 中国能源报, 2022-09-05(19).
- [2] 李瑞. 新型电力系统下的储能规划与运行控制技术[J]. 供用电, 2022, 39(7): 1.
- [3] 王越. 电力系统自动化中智能技术的应用[J]. 电子元件与信息技术, 2022, 6(5): 122-125.
- [4] 丁亮. PID控制在电力系统运行中的应用[J]. 自动化应用, 2022(4): 120-123.
- [5] 齐越. 人工智能大模型在电力系统运行控制中的应用综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 86-94.