

电力自动化系统在现代电力工程中的应用与优化

胡豪跃

新会双水发电厂有限公司，广东 江门 529153

DOI: 10.61369/ME.2024070001

摘要： 电力自动化系统通过集成物联网、人工智能与大数据技术，构建数据驱动的智能控制体系，有效提升电网稳定性与新能源消纳能力。研究聚焦系统核心组成、典型应用场景及优化策略，提出深度学习与分层架构优化方法，破解高维计算与异构兼容性瓶颈；结合区块链与数字孪生技术应对数据安全与可靠性挑战。实践案例验证了动态调度精度提升、故障恢复时间缩短等技术价值，政策导向下需强化标准制定与跨领域协同，推动新型电力系统建设。

关键词： 电力自动化系统；优化策略；数字孪生技术

Application and Optimization of Power Automation System in Modern Power Engineering

Hu Haoyue

Xinhui Shuishuang Power Plant Co., LTD. Jiangmen, Guangdong 529153

Abstract： By integrating Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and big data technologies, power automation systems build a data-driven intelligent control framework, significantly enhancing grid stability and the capability to absorb new energy sources. This study focuses on the core components, typical application scenarios, and optimization strategies of such systems, proposing deep learning and hierarchical architecture optimization methods to address high-dimensional computation and heterogeneous compatibility bottlenecks. Blockchain and digital twin technologies are combined to tackle data security and reliability challenges. Practical case studies verify the technical value in terms of improved dynamic scheduling accuracy and shortened fault recovery times. Under policy guidance, it is essential to strengthen standard setting and cross-domain collaboration to promote the construction of new power systems.

Keywords： power automation system; optimization strategy; digital twin technology

引言

电力系统作为现代社会的能源核心，其智能化转型对实现“双碳”目标与优化能源结构至关重要。随着风电、光伏等可再生能源规模扩大，电力系统面临新能源波动性消纳和实时供需平衡的挑战。电力自动化系统利用数据驱动和智能控制技术，显著提升了电网运行效率与稳定性，成为解决新能源并网问题的关键。2024年7月，《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》发布，该方案强调的配电网高质量发展与电动汽车充电设施网络的拓展，将进一步促进能源消费结构的优化，提升能源利用效率，为经济社会高质量发展奠定坚实基础。然而，技术迭代加速、异构系统兼容性不足及网络安全风险等问题仍制约其发展。本文基于当前技术演进与政策框架，探讨电力自动化系统的应用场景、优化策略及解决方案，旨在为构建安全高效的新型电力系统提供理论支撑与实践参考。

一、电力自动化系统的基础理论与技术框架

(一) 电力自动化系统的核心组成

电力自动化系统的核心组成涵盖数据采集、传输、处理与控制功能模块。数据采集与监控系统(SCADA)作为基础层，通过远程终端单元(RTU)和智能电子设备(IED)实时采集电网运行参数，并基于人机交互界面实现可视化监控。能量管理系统(EMS)在此基础上整合发电、输电和负荷数据，优化电力资源调

度与经济运行；分布式控制系统(DCS)则聚焦于局部电网或工厂站的精细化控制，通过模块化设计提升响应速度与可靠性^[1]。三类系统通过信息交互形成闭环控制架构，支撑电网从感知到决策的全流程自动化。

(二) 关键技术支撑

物联网(IoT)与传感技术为电力自动化系统提供高精度、广覆盖的数据感知能力，通过部署智能传感器与无线通信网络，实现设备状态、环境参数的全天候监测。人工智能(AI)与大数据

分析技术则驱动系统智能化升级，基于机器学习算法构建负荷预测、故障诊断等模型，结合历史数据挖掘潜在规律，优化决策逻辑^[2]。通过整合 AI 推理引擎与实时数据库，系统可动态调整控制策略，降低人工干预需求，提升复杂场景下的自适应能力，形成“感知－分析－优化”的技术闭环。

二、电力自动化系统在现代电力工程中的典型应用

（一）智能电网调度与运行优化

电力自动化系统通过实时负荷预测与动态调度显著提升电网运行效率。基于人工智能的负荷预测模型（如 LSTM 网络）融合气象、用户行为等多源数据，生成高精度短期负荷曲线，为发电计划优化提供依据；动态调度模块依托能量管理系统（EMS）实时调整机组出力与网络拓扑，平衡供需波动并降低运行成本^[3]。在故障诊断与自愈控制领域，SCADA 系统结合广域测量系统（WMS）数据，可快速定位输电线路短路或设备过载故障，触发保护装置动作并启动备用电源投切，典型案例显示新加坡电网通过自适应重构算法将平均停电时间缩短至 2 分钟以内，验证了自动化技术的可靠性提升价值。

（二）配电自动化与用户侧管理

配电自动化系统通过微电网协同控制技术实现分布式能源高效整合。基于多智能体系统的控制架构，协调光伏、储能与柴油机组出力，在浙江某海岛微电网项目中，可再生能源利用率提升至 92%。需求响应与能效优化实践则依托智能电表与用户终端设备，构建双向互动机制：德国 E-Energy 项目通过分时电价策略引导用户主动调整用电行为，结合 AI 算法分析负荷特性，实现区域峰谷差降低 18%。此类技术通过优化配电网络运行效率与用户参与度，推动电力系统向低碳化、柔性化方向演进。

三、电力自动化系统的优化策略与方法

（一）算法优化与模型改进

1. 深度学习在潮流计算中的应用

传统潮流计算依赖牛顿－拉夫逊法等数值方法，面临高维非线性方程求解效率低的问题。深度学习通过构建卷积神经网络（CNN）或图神经网络（GNN），将电网拓扑与电气参数映射为特征向量，实现快速潮流预测。例如，美国 PJM 电网采用 GNN 模型，将计算耗时降低至传统方法的 15%，且电压幅值预测误差小于 0.5%^[4]。此类模型通过端到端训练规避迭代收敛风险，尤其适用于含高比例可再生能源的电网动态分析，为实时调度提供可靠数据支撑。

2. 多目标优化算法（如 NSGA-II）的效能提升

NSGA-II 算法在解决机组组合、网络规划等多目标问题时，易受种群多样性不足与局部最优限制。改进策略包括引入自适应交叉变异算子与混合并行计算框架：巴西电力市场采用改进 NS-GA-III 算法优化水火电协同调度，目标函数涵盖经济成本与碳排放量，优化后总成本降低 7.2%，碳排放强度下降 12%。算法通过

非支配排序与精英保留机制平衡收敛性与分布性，为复杂电力系统提供高鲁棒性决策方案。

（二）系统架构优化

1. 分层分布式控制架构设计

分层架构将电力自动化系统划分为主站层、区域控制层与终端执行层，主站层统筹全局优化指令，区域层协调多微电网运行，终端层通过本地控制器实现快速响应。江苏某智能配电网试点采用三层架构后，故障隔离时间由分钟级压缩至 200 毫秒，供电可靠性提升至 99.99%。该架构通过信息纵向交互与决策横向协同，缓解集中式系统的通信压力，增强系统容灾能力^[5]。

2. 边缘计算与云计算协同优化

边缘计算节点部署于变电站或配电终端，处理实时性要求高的本地数据（如故障录波），云计算中心则承担历史数据分析与长期策略生成。芬兰 Fingrid 电网通过“云－边－端”协同框架，将数据处理延迟降低至 10 毫秒以内，同时云端 AI 模型迭代更新边缘节点控制逻辑^[6]。协同机制通过轻量级容器化技术实现资源动态分配，兼顾计算效率与模型泛化能力，支撑海量异构设备的协同管理。

四、电力自动化系统面临的挑战与解决方案

（一）技术挑战

1. 数据安全与隐私保护问题

电力自动化系统依赖海量数据交互，但数据传输与存储环节易受网络攻击（如 DDoS、中间人攻击）威胁，导致敏感信息泄露或恶意篡改。智能电表用户用电行为数据若未脱敏处理，可能暴露用户隐私。2021 年美国科罗拉多州电网因 SCADA 系统漏洞遭受勒索软件攻击，引发局部停电，凸显数据防护机制薄弱。此外，多主体数据共享场景下，权限划分模糊与加密算法滞后进一步加剧风险，亟需构建端到端安全体系^[7]。

2. 异构系统兼容性与标准化缺失

电力自动化系统常集成不同厂商设备与协议（如 Modbus、DNP3），导致数据格式差异与通信延迟。某省级电网改造项目中，旧有 RTU 设备因协议不匹配无法与新型 IED 协同，需额外开发转换接口，成本增加 23%。国际标准 IEC 61850 虽定义了通用数据模型，但实际部署中仍存在协议扩展不一致、互操作性测试覆盖不足等问题，制约系统规模化扩展与运维效率。

（二）解决方案与实践

1. 区块链技术增强数据安全性

区块链通过分布式账本与智能合约实现数据不可篡改与追溯。欧洲 Enerchain 项目利用私有链记录电力交易数据，确保交易透明且防篡改^[8]。智能合约自动执行电费结算，减少人为干预风险。在设备身份认证领域，国网公司采用联盟链技术为每个终端分配唯一数字身份，结合零知识证明验证数据来源合法性，攻击检测准确率提升至 98.6%，有效抵御伪造节点入侵。

2. 开放式通信协议（如 IEC 61850）的推广

IEC 61850 通过面向对象建模与 MMS/GOOSE 通信服务，统

一变电站自动化系统信息交互标准。南非 Eskom 电力公司全面采用 IEC 61850-90-1 架构后，设备配置时间缩短 40%，跨厂商设备互操作成功率从 72% 提升至 95%。为进一步扩展兼容性，中国推出 DL/T 860 扩展协议，支持新能源并网与需求响应功能，在张北柔直工程中实现风光储设备无缝接入，验证标准化对系统集成核心价值。

（三）可靠性优化路径

1. 冗余设计与容错机制

冗余设计通过双通道通信、热备电源等硬件冗余提升系统可用性^[9]。江苏某特高压换流站采用“双总线+双控制器”架构，单点故障下切换时间小于 50 毫秒，年均停电时长减少 82%。软件容错机制结合心跳检测与动态负载均衡，可在边缘节点故障时自动迁移任务，新加坡电网通过该技术将服务中断概率降至 0.001%。

2. 数字孪生技术在系统仿真中的应用

数字孪生通过构建电网高精度虚拟镜像，支持故障预演与策略验证。英国国家电网搭建的数字孪生平台集成 SCADA 与 PMU 数据，模拟雷击导致输电线路断股的物理过程，提前制定保护策

略，将故障恢复时间缩短 35%。在设备健康管理领域，西门子利用数字孪生预测变压器绝缘老化趋势，制定预防性维护计划，德国某风电场运维成本降低 19%，设备寿命延长 12%^[10]。

五、总结

电力自动化系统通过集成数据采集、智能分析与闭环控制技术，成为现代电力工程实现高效稳定运行的核心支撑。其在智能电网调度、配电自动化等场景的应用，显著提升了负荷预测精度、故障响应速度与可再生能源消纳能力，推动电力系统向低碳化与柔性化转型。优化策略涵盖算法创新与架构升级，深度学习与多目标优化算法破解了传统模型的计算瓶颈，分层分布式架构与云边协同机制则增强了系统扩展性与实时性。面对数据安全、异构兼容性等挑战，区块链技术与标准化协议的应用为可信交互与系统集成提供有效路径，冗余设计与数字孪生技术进一步强化了可靠性保障。未来，5G 通信、数字孪生与跨领域 AI 融合将深化电力系统全环节智能化，需通过政策引导加速标准制定与产学研协同，构建安全、开放、可持续的电力自动化生态。

参考文献

[1] 覃丁曼. 电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用探究 [J]. 电脑高手, 2020(3): 1459-1460.
[2] 周建新. 电力工程在电力自动化技术方向的应用 [J]. 建材与装饰, 2017(7): 225-226.
[3] 李佳伟. 电力驱动系统电气工程与自动化控制 PLC 的有效应用 [J]. 数码设计, 2021(23): 164-168.
[4] 韩春晶. 电气自动化在电气工程中的应用分析 [J]. 今日自动化, 2021(8): 7-9.
[5] 王姝. 储能技术应用于电力系统时的协调控制研究 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2015.
[6] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息 - 物理 - 社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 25-40, 后插 4.
[7] 吴兵. DC-DC 变换器模型降阶方法研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2023.
[8] 钟式平. 电力系统中电气自动化技术的应用和发展解析 [C]// 江西中昌工程咨询监理有限公司第十届科技大会论文集. 2016: 342-344.
[9] 何婧. 电力工程中的电力自动化技术的运用 [J]. 江苏科技信息, 2023(35): 78-80.
[10] 陈晓佩. 电力系统运行中电气自动化技术的应用策略分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(18): 555.