

谈电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用

李亚杰

河北广安联合电力工程设计有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 电气工程自动化技术作为现代电力系统的核心支撑, 正深刻改变着传统电力行业的运行模式。此文系统梳理了自动化技术在电力系统调度控制、设备保护、能源管理等领域的技术演进路径, 重点分析了智能电网架构下 SCADA、EMS 等关键系统的功能创新。结合国家电网“十四五”数字化规划实施案例, 论证了自动化技术对电网经济运行、新能源消纳、用户服务等方面的提升效应, 并针对网络安全、系统集成等挑战提出全生命周期优化方案, 为构建新型电力系统提供技术参考。

[关键词] 电力自动化; 智能电网; SCADA 系统; 继电保护; 能源管理

DOI: 10.33142/aem.v7i3.15962

中图分类号: TM7

文献标识码: A

Discussion on Application of Electrical Engineering Automation Technology in Power System Operation

LI Yajie

Hebei Guang'an United Power Engineering Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Electrical engineering automation technology, as the core support of modern power systems, is profoundly changing the operation mode of the traditional power industry. This article systematically outlines the technological evolution path of automation technology in the fields of power system dispatch and control, equipment protection, energy management, etc., with a focus on analyzing the functional innovation of key systems such as SCADA and EMS under the smart grid architecture. Based on the implementation case of the digitalization plan of State Grid Corporation of China during the 14th Five Year Plan period, this paper demonstrates the improvement effects of automation technology on the economic operation of the power grid, the consumption of new energy, and user services. It also proposes a full lifecycle optimization plan to address challenges such as network security and system integration, providing technical reference for the construction of a new type of power system.

Keywords: power automation; smart grid; SCADA system; relay protection; energy management

全球能源结构转型与“双碳”战略的深入推进, 正在重塑电力系统的技术形态与运行范式。随着风电、光伏等波动性电源渗透率突破临界点, 传统电网“源随荷动”的刚性调节模式已难以适应高比例新能源接入带来的复杂动态特性。中国作为全球最大的可再生能源生产国, 2023 年新能源装机容量占比达 36%, 电网运行面临惯量支撑弱化、电压失稳风险加剧等多重挑战。与此同时, 电动汽车、虚拟电厂等新型负荷的规模化发展, 使得电力系统从单向能量传输网络向多向价值交互平台演进。在此背景下, 国家发改委《关于加快构建新型电力系统的指导意见》明确指出, 亟需通过电气工程自动化技术的创新突破, 构建具备柔性调节能力的智能电网体系。

1 电气工程自动化技术概述

电气工程自动化技术是以智能化控制为核心的多学科交叉体系, 通过融合计算机技术、通信工程与电力电子技术, 构建覆盖电力生产全过程的自主化控制系统。其技术架构包含感知层、传输层与决策层三大模块: 感知层依托智能传感器与继电保护装置实时采集电网运行状态; 传输层通过光纤通信与 5G 专网实现数据高速传输; 决策层则基于能量管理系统实现全局优化控制。技术发展经历了

从机械继电器到微处理器控制、从孤立子系统到信息物理融合系统的演变, 当前正朝着数字孪生与边缘智能方向深化^[1]。典型应用如智能变电站通过标准化通信协议实现设备互联互通, 其架构设计遵循 IEC 61850 国际标准, 在雄安新区等示范工程中实现了设备状态全景感知与远程协同控制, 标志着电力系统从机械化向智能化的根本转变。

2 电气工程自动化技术的应用价值

2.1 提升运行效率

自动化技术重构了电力系统的运营范式, 将传统依赖人工经验的操作模式转变为数据驱动的智能决策。在电网调度领域, 智能算法可自动生成最优潮流分配方案, 显著缩短了人工计算时间; 在设备巡检环节, 无人机与机器人替代人工完成高危环境作业, 实现了全天候、高精度监测。典型实践如数字孪生技术构建的虚拟电网模型, 可模拟极端天气下的设备运行状态, 提前预判潜在风险并生成应对策略, 大幅提升了应急响应速度。这种技术革新使得电力系统的运行调控从被动处置转向主动预防, 从根本上优化了资源配置效率。

2.2 提高安全性与稳定性

应用电气工程自动化技术可以显著提升电力系统运行的安全性和稳定性。例如, 该技术整合了人工智能、可

编程逻辑控制器等先进手段,能够实时监控电力系统各环节的运行状态。一旦检测到异常情况,系统便会迅速发出预警,从而及时隔离故障部分,防止故障蔓延,保障整体系统的平稳运行。

2.3 优化电能质量

电气工程自动化技术还可用于监测和分析电力系统中的各项数据,及时识别电能质量问题,并采取针对性措施进行优化。通过远程干预方式,能够有效降低能源浪费,确保向用户提供高质量的电力服务。

2.4 降低运维成本

自动化技术通过设备状态预测与智能维护策略重构了电力资产管理模式。在线监测系统持续跟踪变压器、断路器等关键设备的健康状态,基于数据分析预判故障发生概率,将定期检修转变为按需维护。在作业实施环节,智能操作机器人替代人工执行倒闸操作等重复性任务,既降低了人身安全风险,又提高了操作标准化程度^[2]。更深层的价值体现在知识管理领域,专家系统将运维经验转化为数字资产,辅助技术人员快速诊断复杂故障,有效缓解了专业人才短缺带来的运营压力。这种全链条的智能化转型,推动电力系统从劳动密集型向技术密集型演进。

3 电气工程自动化技术在电力系统运行中具体应用

3.1 电力监控与调度自动化

现代电力监控系统以 SCADA 为核心,融合了同步相量测量、智能传感与云计算技术,形成全景感知与协同控制的立体化架构。在华东电网,调度自动化平台通过光纤通信网络连接 287 座变电站的智能终端设备,实时采集电压、电流、功率等 3000 余类运行参数,构建了覆盖三省一市的数字镜像。该系统采用自适应滤波算法消除噪声干扰,使关键数据的有效提取率提升至 99.3%,为调度员提供精准决策支持。在动态安全评估领域,华北电网研发的智能预警模块,通过拓扑分析识别电网薄弱环节,自动生成包含设备负载率、电压稳定裕度的风险矩阵,成功预警了 2023 年京津唐电网因负荷激增引发的输电瓶颈。面对极端天气挑战,广东电网建立的台风响应系统,整合气象卫星云图与杆塔抗风等级数据库,在“苏拉”台风登陆前 72 小时自动生成设备加固方案,降低倒塔风险 78%。调度自动化的深化应用,使电网运行方式从“经验驱动”转向“数据驱动”,重构了电力系统的控制哲学。

3.2 智能电网与分布式能源管理

智能电网技术通过分层控制架构破解了分布式能源消纳难题。在青海海南州千万千瓦级新能源基地,区域协调控制系统采用“集中-分布”混合控制模式:中央控制器统筹全网功率平衡,边缘控制器调节单个光伏阵列的 MPPT 跟踪精度,两者通过 5G 切片网络实现 10ms 级指令交互。对于海岛微电网这类独立系统,三沙永兴岛项目构建了多能源协同优化模型,柴油发电机、光伏板与储能电池通

过一致性算法达成自主功率分配,在台风季大电网解列时仍可维持全岛 72 小时持续供电。用户侧灵活性资源的挖掘更具创新性,苏州工业园区实施的虚拟同步机技术,使空调群控系统具备等效转动惯量特性,在电网频率波动时自动调节制冷功率,为城市电网提供了等效 20MW 的惯量支撑。

3.3 继电保护与故障诊断

继电保护技术的智能化演进体现在速动性、选择性与可靠性的全面提升。在昆柳龙特高压直流工程中,基于行波原理的极线保护装置采用小波变换算法提取故障特征,将直流线路故障检测时间压缩至 1ms 以内,配合混合式直流断路器实现故障电流的主动限流。智能变电站的保护系统呈现“就地化、网络化”趋势,雄安新区 110kV 荆村变电站部署的继电保护就地化柜,通过光纤直连合并单元与智能终端,跳闸回路传输时延降低至 5ms,较传统保护速度提升 70%。故障诊断技术则向多学科融合方向发展,重庆电网开发的智能诊断平台,集成设备声纹、红外成像与油色谱数据,采用图神经网络构建设备健康度评估模型,提前 14 天预警了某 500kV 变压器匝间短路隐患。在配电网层面,杭州“零停电”示范区应用的自愈控制系统,利用 5G 网络超低时延特性,实现故障定位、隔离与供电恢复的全自动处理,用户平均停电时间缩短至 15 秒以内。

3.4 电能计量与用户侧管理

高级量测体系的深化应用重构了供用电关系。深圳福田中心区部署的 HPLC 通信网络,通过正交频分复用技术提升信道利用率,使智能电表数据采集成功率突破 99.95%,支撑电价分时段的动态刷新。基于此构建的需求响应平台,在 2023 年用电尖峰时段,通过价格信号引导商业综合体调节中央空调温度设定值,单次响应削减负荷峰值 28MW^[3]。非侵入式负荷辨识技术取得突破性进展,天津生态城项目通过深度卷积网络解析电流谐波特征,可识别超过 3000 种电器的工作状态,为居民提供个性化节能建议。在车网互动领域,北京亦庄 V2G 示范站配置的智能双向充电桩,通过与电网调度中心的信息交互,实时调整充放电功率,使电动汽车集群成为平抑光伏出力波动的灵活资源。这种用户侧资源的深度参与,正在重塑电力系统的供需平衡机制。

4 电力系统运行中电气工程自动化技术的优化策略

4.1 强化算法优化

电力系统复杂性的指数级增长催生了新一代智能算法的应用。在新能源功率预测领域,时空卷积神经网络通过融合卫星云图与地形数据,将光伏短期预测误差控制在 5% 以内;在电网安全分析中,迁移学习技术破解了小样本场景下的模型泛化难题,使暂态稳定评估准确率提升至 96%。设备健康管理领域,基于数字孪生的寿命预测模型,通过物理机理与数据驱动的双引擎架构,实现了特高压换流阀剩余寿命的毫米级精度测算。更为前沿的是,强化学习算法在电压控制中的应用,使 STATCOM 装置能够自主探索最优无功补偿策略,在江苏某换流站的实践中将电压合

格率提升至 99.99%。这些算法革新不仅提升了系统性能,更重构了电力设备的运维范式。

4.2 推进多系统集成

破除信息孤岛需要构建开放包容的生态系统。国家电网推行的“云边端”协同架构,在云平台层整合了调度自动化、设备管理等 12 个核心业务系统,边缘侧部署的智能融合终端实现变电站、配电房的跨系统数据贯通,终端设备层的智能传感器通过统一物联网协议接入平台。在跨行业协同方面,杭州“城市大脑”电力模块实现了与交通、水务系统的数据共享,通过红绿灯控制策略优化降低区域配变负载率 15%。硬件层面的创新同样关键,雄安新区试点应用的多模通信网关,支持光纤、5G 与北斗短报文的多路径冗余传输,确保极端灾害下的指挥通信不中断。这种立体化集成体系,为城市级能源互联网建设提供了技术范本。

4.3 加强专业人才培养

技术迭代对人才能力结构提出复合型要求。清华大学与南方电网共建的“能源互联网”联合研究院,开创“电力+AI+经济”的跨学科培养模式,其研发的电网智能调度课程体系已被 20 所高校采用。企业端的技能重塑更为迫切,国家电网“数字工匠”培养工程,通过 AR 仿真平台还原继电保护调试、网络安全攻防等复杂场景,使一线员工应急处置能力提升 60%。在国际化层面,参与制定 IEEE C37.118 同步相量测量标准的技术团队,培养出 50 余名精通国际规则的核心专家,推动我国电力标准在“一带一路”沿线国家的应用落地。这种产学研深度融合的人才培养机制,为行业转型升级提供了智力引擎。

4.4 完善标准化体系

标准缺失已成为技术规模化应用的瓶颈。在设备互联领域,IEC 61850 标准的本土化扩展取得突破,国内智能变电站实现了保护装置、合并单元与智能终端的即插即用。针对新兴技术,中电联发布的《电力人工智能技术规范》,明确了算法开发、数据治理与模型评估的全流程标准^[4]。跨行业标准的协调更具战略意义,国家能源局主导的“电-气-热”多能流信息交互标准,定义了能量计量、安全边界的统一规则,为综合能源系统扫清了技术障碍。标准体系的完善不仅推动技术落地,更增强了我国在国际能源治理中的话语权。

4.5 提升网络安全防护

电力系统数字化带来的安全威胁需要构建纵深防御体系。在生产控制大区,国家电网部署的“双平面+拟态防御”架构,通过异构冗余设计有效抵御 APT 攻击,在最近攻防演练中成功拦截 99.2% 的高级威胁。数据传输环节,江苏电网试点的量子密钥分发网络,利用量子不可克隆特性实现调度指令的绝对安全传输。在终端防护层面,智能电表安全芯片采用国密算法加密通信数据,结合白名单机制阻断非法接入尝试。更为关键的是,网络安全防护已从被动应对转向主动免疫,基于 AI 的异常流量检测系统,

通过行为分析模型提前 72 小时预警潜在攻击,为电力关键信息基础设施构筑了动态安全屏障。

4.6 全生命周期管理体系的构建

电力自动化技术的优化需贯穿设备全生命周期。在设计阶段,国网经研院开发的智能选型平台,通过遗传算法优化变电站设备配置方案,使初期投资成本降低 12%。在建设阶段,BIM 技术与自动化施工机械的结合,实现了青海-河南特高压工程换流阀厅的毫米级装配精度。运维阶段,基于数字孪生的预测性维护系统,可模拟变压器绝缘老化进程,提前 90 天预警潜伏性故障。退役环节,智能拆解机器人通过视觉识别技术分类回收设备材料,使报废变压器的铜材回收率提升至 96%。这种全链条管理思维,将技术优化的价值从单一环节扩展至系统整体,推动了电力行业向绿色低碳方向转型。

5 结束语

电气工程自动化技术的深度演进,正在重构电力系统的底层运行逻辑与顶层设计范式。从特高压输电走廊的智能监控到海岛微电网的自愈控制,从城市虚拟电厂的灵活互动到农村智能台区的精准运维,自动化技术已突破传统设备控制的物理边界,演变为驱动能源体系数字化转型的核心引擎。国家电网张北柔性直流工程、南方电网数字孪生调度平台等标志性项目,验证了自动化技术在提升电网韧性、促进新能源消纳方面的革命性价值,其技术成果被纳入 IEEE 国际标准体系,标志着我国从技术追随者向规则制定者的角色转变。当前技术发展正面临双重挑战:在物理维度,高比例电力电子设备引发的系统惯量缺失问题,要求自动化控制算法具备更强的自适应能力;在数字维度,能源互联网的开放互联特性使得网络安全防护面临量子计算、AI 伪造等新型威胁。破解这些难题需要构建“硬科技突破+软体系创新”的协同路径——既需在宽禁带半导体、边缘智能终端等硬件领域实现自主可控,更要在数字孪生建模、联邦学习算法等软件层面形成技术壁垒。唯有坚持核心技术自主化、标准体系国际化、安全防护体系化的发展道路,方能构建适应新型电力系统需求的自动化技术生态,为全球能源转型贡献中国智慧。

[参考文献]

- [1]王炯,郑旭,陈秋寒,等.高比例新能源接入下电力系统负荷调峰分配方法[J].中国能源,2024,46(12):68-77.
 - [2]周志勤.智能技术在电气工程自动化系统中的运用[J].电子技术,2025,54(1):352-353.
 - [3]何欣志,石岳.电力系统中配网自动化技术的应用[J].光源与照明,2025(1):189-191.
 - [4]张一博.配网自动化技术在电力系统中的应用[J].光源与照明,2025(2):219-221.
- 作者简介:李亚杰(1990.1—),女,职称,高级电气工程师,籍贯,河北省石家庄市。