

电气工程及其自动化在智能输配电系统中的应用与优化

马友骏

国电电力内蒙古新能源开发有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19219

[摘要] 智能输配电系统凭借双向互动性、自愈能力、高效能管理及数据驱动决策等核心特征,实现了能源的灵活流通与精准管理。电气工程自动化技术在输电、配电及跨环节协同中发挥关键作用,通过特高压输电、智能变电站、配电自动化等技术提升系统效能。未来,智能输配电系统将向人工智能与能源互联网深度融合、绿色转型与机制创新双轮驱动、国际合作与标准制定全球化方向发展,为能源转型与可持续发展提供强劲动力。

[关键词] 电气工程; 自动化; 智能输配电系统; 应用

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A

Application and Optimization of Electrical Engineering and Automation in Intelligent Transmission and Distribution Systems

Youjun Ma

Guodian Power Inner Mongolia New Energy Development Co., Ltd.

[Abstract] Intelligent transmission and distribution systems, with their core characteristics such as bidirectional interactivity, self-healing capability, efficient energy management, and data-driven decision-making, have achieved flexible energy flow and precise management. Electrical engineering automation technology plays a key role in power transmission, distribution, and cross-link coordination, enhancing system efficiency through technologies such as ultra-high voltage transmission, intelligent substations, and distribution automation. In the future, intelligent transmission and distribution systems will develop toward the deep integration of artificial intelligence and energy internet, the dual-driven approach of green transformation and mechanism innovation, and the globalization of international cooperation and standard setting, providing strong impetus for energy transformation and sustainable development.

[Key words] electrical engineering; automation; intelligent transmission and distribution system; application

1 智能输配电系统核心特征

1.1 双向互动性: 构建能源流通的双向通道

智能输配电系统的双向互动性突破了传统电网单向供电的局限,通过信息通信技术与电力电子技术的深度融合,实现了能源生产端与消费端的信息实时交互。在发电侧,分布式光伏、风电等可再生能源通过智能逆变器将电能上传至主网,其发电功率、设备状态等数据同步传输至调度中心;在用户侧,智能电表、电动汽车充电桩等设备可接收电网的实时电价信号,用户根据价格波动调整用电行为,甚至通过储能装置向电网反向供电。这种双向互动不仅提升了电网的灵活调节能力,更催生了需求响应、虚拟电厂等新型商业模式。例如,南方电网通过智能电表实现用户用电数据的分钟级采集,结合分时电价政策引导用户错峰用电,使区域负荷峰谷差降低15%,同时为参与需求响应的用户提供经济补偿,形成供需双方共赢的生态。

1.2 自愈能力: 赋予电网自我修复的“免疫系统”

自愈能力是智能输配电系统的核心安全保障,其本质是通过实时监测、智能诊断与快速隔离实现故障的自主处置。在输电环节,行波测距技术可精准定位故障点,结合分布式电源的孤岛运行能力,在主网故障时自动切换至微电网模式,保障关键负荷供电;在配电环节,智能开关通过电流突变检测与逻辑判断,在0.1秒内完成故障区段隔离,较传统人工操作效率提升90%以上^[1]。南方电网的实践案例极具代表性:其研发的智能跳闸系统通过行波测距与保护动作数据融合分析,将故障定位精度从千米级提升至百米级,2024年一线路故障中,系统在30秒内完成故障定位并推送处置方案,使抢修时间缩短80%。更值得关注的是,自愈能力正从被动响应向主动预防延伸,通过设备状态监测与大数据分析,可提前预测变压器、开关等关键设备的寿命周期,实现预防性维护,将非计划停电率降低至0.5次/年·户以下。

1.3 高效能管理: 实现资源最优配置的“智慧大脑”

高效能管理贯穿于智能输配电系统的全生命周期, 涵盖发电计划优化、潮流动态调整、线损精准控制等多个维度。在发电侧, 通过整合风电、光伏的出力预测数据与负荷预测曲线, 采用混合整数规划算法制定日前发电计划, 使可再生能源消纳率提升至95%以上; 在输电环节, 柔性交流输电 (FACTS) 装置通过动态调节线路阻抗, 将输电容量提升20%-30%, 同时降低网损3-5个百分点; 在配电侧, 智能无功补偿装置根据负荷变化实时投切电容器, 使功率因数稳定在0.95以上, 减少线路损耗。国网冀北物资公司的实践提供了典型范式: 其构建的配网物资模型库, 通过分析11类物资的耗用特征与配比关系, 优化采购资金安排, 使协议采购规模预测误差率控制在5%以内, 同时通过物料ID精简优化将库存周转率提升40%, 实现供应链全链条的降本增效。

1.4 数据驱动决策: 打造精准决策的“数字孪生”

数据驱动决策是智能输配电系统的核心支撑, 通过物联网、云计算等技术构建覆盖发、输、配、用全环节的数据采集网络, 形成海量多维数据资产。在调度环节, 基于SCADA、WAMS等系统的实时数据, 结合机器学习算法构建负荷预测模型, 使预测精度提升至98%以上; 在设备管理领域, 通过振动、温度等传感器采集设备运行数据, 利用深度学习算法实现故障类型识别与剩余寿命预测, 将设备故障率降低60%; 在市场交易层面, 整合气象数据、市场价格、用户行为等信息, 构建多市场耦合优化模型, 为电力现货交易提供决策支持。南方电网的“云大物移智”平台极具代表性: 其通过生产指挥移动应用实现关键数据在手机端的实时流转, 使应急指挥效率提升50%, 同时利用数字孪生技术构建主网架三维模型, 为规划决策提供可视化支撑。

2 电气工程自动化技术在智能输配电中的应用

2.1 输电环节自动化应用: 构建安全高效的“电力高速公路”

输电环节的自动化技术以特高压交直流输电、智能变电站、在线监测系统为核心, 实现大容量、远距离、低损耗的电力输送。特高压输电技术通过采用八分裂导线、串联补偿装置等措施, 将输电容量提升至1000万千瓦级, 同时将输电损耗控制在3%以内; 智能变电站采用数字化采样、网络化通信、智能化控制技术, 实现设备状态实时监测与一键式顺序控制, 使运维效率提升3倍; 输电线路在线监测系统通过部署微气象、导线温度、杆塔倾斜等传感器, 结合无人机巡检与图像识别技术, 实现缺陷识别准确率95%以上^[2]。南方电网的智能跳闸系统与开关特性平台是典型代表: 前者通过行波测距与保护动作数据融合分析, 实现故障定位精度百米级; 后者通过实时监测开关分合闸涌流、角度等特征量, 提前发现机械故障隐患, 避免大范围停电风险。

2.2 配电环节自动化应用: 打造灵活可靠的“末端神经网络”

配电环节的自动化技术以配电自动化系统 (DAS)、分布式电源接入控制、智能电表为核心, 实现配电网的实时监测、故障自愈与需求响应。配电自动化系统通过部署FTU、DTU等智能终端, 实现馈线自动化覆盖率100%, 故障隔离时间缩短至秒级; 分布式

电源接入控制技术采用分层分区控制策略, 通过协调逆变器无功输出与有功切机, 将并网点电压波动控制在±5%以内; 智能电表不仅实现用电量精准计量, 更通过双向通信功能支持分时电价、阶梯电价等政策实施, 引导用户参与需求响应。国网冀北公司的实践具有示范意义: 其构建的配网供应链模型库, 通过分析物资耗用时空分布特征, 优化采购计划编制, 使协议采购规模预测误差率控制在5%以内, 同时通过物料ID精简优化将库存周转率提升40%, 为配电网建设提供精准物资保障。

2.3 跨环节协同优化技术: 实现全链条的“能量流-信息流-业务流”融合

跨环节协同优化技术通过打破发、输、配、用各环节的信息壁垒, 实现能源流、信息流、业务流的深度融合。在源网协调层面, 通过构建风光水火储联合优化调度模型, 结合储能装置的充放电调节, 使可再生能源消纳率提升至95%以上; 在网荷互动层面, 通过需求响应平台整合工业可中断负荷、商业空调负荷、电动汽车充电负荷等可调节资源, 形成虚拟电厂参与电力市场交易; 在源网荷储协同层面, 通过构建多时间尺度优化模型, 实现日前计划、日内滚动、实时调度的有机衔接。南方电网的实践极具代表性: 其通过“云大物移智”平台实现生产数据跨区互联传输, 结合数字孪生技术构建主网架三维模型, 为规划决策提供可视化支撑, 同时利用移动应用实现应急指挥的实时化、移动化, 使故障处置效率提升50%。

3 电气工程及其自动化在智能输配电系统中的优化策略

3.1 技术创新与优化: 突破关键技术瓶颈

技术创新是推动智能输配电系统发展的核心动力, 需聚焦核心装备研发、关键算法突破、新型材料应用三大方向。在核心装备领域, 研发高可靠性、低损耗的特高压GIS设备、智能断路器、固态变压器等, 提升设备智能化水平; 在关键算法领域, 突破多时间尺度优化调度、分布式电源集群控制、故障精准定位等算法, 提升系统运行效率; 在新型材料领域, 探索纳米材料在绝缘子、电缆中的应用, 提升设备耐候性与使用寿命。南方电网的实践具有借鉴意义: 其研发的智能跳闸系统通过行波测距与保护动作数据融合分析, 实现故障定位精度百米级; 开关特性平台通过实时监测开关分合闸特征量, 提前发现机械故障隐患, 避免大范围停电风险。

3.2 管理与运营优化: 构建高效协同的运营体系

管理与运营优化需从组织架构、业务流程、市场机制三方面入手。在组织架构层面, 建立“总部-区域-现场”三级运维体系, 实现运维资源的集中调配与快速响应; 在业务流程层面, 推行标准化作业流程 (SOP), 通过移动应用实现工单派发、现场作业、质量验收的全流程数字化; 在市场机制层面, 完善电力现货市场、辅助服务市场、容量市场规则, 通过价格信号引导市场主体参与系统调节。国网冀北公司的实践具有示范效应: 其构建的配网供应链模型库, 通过分析物资耗用时空分布特征, 优化采购计划编制, 使协议采购规模预测误差率控制在5%以内, 同时通

过物料ID精简优化将库存周转率提升40%,实现供应链全链条的降本增效^[3]。

3.3 标准化与安全防护优化: 筑牢系统安全防线

标准化与安全防护是智能输配电系统可持续发展的基础,需从技术标准制定、信息安全防护、设备准入管理三方面发力。在技术标准层面,加快制定智能电表、分布式电源接入、需求响应等领域的国家标准,推动设备互联互通;在信息安全层面,构建“云-管-端”一体化防护体系,通过数据加密、访问控制、入侵检测等技术保障数据安全;在设备准入层面,建立设备全生命周期管理制度,从设计、制造、安装、运维等环节实施质量追溯。南方电网的实践具有借鉴价值:其通过生产指挥移动应用实现关键数据在手机端的实时流转,结合数字证书认证技术保障数据传输安全,同时利用区块链技术实现设备运维记录的不可篡改,提升系统可信度。

4 未来发展趋势与展望

4.1 技术融合方向: 人工智能与能源互联网的深度渗透

未来智能输配电系统将呈现“人工智能+能源互联网”的深度融合趋势。在人工智能领域,深度学习、强化学习等技术将广泛应用于负荷预测、故障诊断、优化调度等场景,使系统决策从“经验驱动”转向“数据驱动”;在能源互联网领域,通过构建“源网荷储”一体化平台,实现多能互补、供需互动、市场融合,推动能源系统从“单一供电”向“综合能源服务”转型。例如,基于数字孪生技术的虚拟电厂可整合分布式光伏、储能、电动汽车等资源,通过实时优化调度参与电力市场交易,预计到2030年,全球虚拟电厂市场规模将突破500亿美元。

4.2 市场与政策驱动: 绿色转型与机制创新的双轮驱动

市场机制与政策导向将成为智能输配电系统发展的核心驱动力。在市场机制层面,电力现货市场、辅助服务市场、容量市场的完善将激发市场主体参与系统调节的积极性,通过价格信号引导可再生能源消纳与需求响应;在政策导向层面,碳交易市场、可再生能源配额制、需求响应补贴等政策将推动能源结构绿色转型,预计到2030年,非化石能源占一次能源消费比重将提升至25%以上。例如,欧盟通过建立容量市场机制,保障了可再生能源大规模接入后的系统备用容量,同时通过碳关税政策倒逼高碳产业转型,为智能输配电系统发展提供了政策保障。

4.3 国际合作与标准制定: 构建全球能源治理新格局

国际合作与标准制定将成为智能输配电系统全球化的关键支撑。在技术合作层面,通过共建联合实验室、开展技术交流等方式,推动特高压输电、智能变电站、需求响应等技术的全球推广;在标准制定层面,积极参与IEC、IEEE等国际标准组织活动,推动我国标准“走出去”,提升国际话语权^[4]。例如,我国主导制定的特高压输电国际标准已覆盖设备、试验、运行等多个领域,为全球能源互联网建设提供了技术规范;南方电网与东南亚国家开展的智能电网合作项目,通过技术输出与本地化适配,助力当地能源系统转型升级,为构建人类命运共同体贡献我国智慧。智能输配电系统与电气工程自动化技术的融合发展,正深刻改变着能源生产与消费模式。从双向互动到自愈能力,从高效能管理到数据驱动决策,从技术创新到标准制定,每一个环节都彰显着科技的力量与时代的使命。面向未来,需以技术创新为引领,以市场机制为驱动,以国际合作为桥梁,共同推动智能输配电系统向更高水平的智能化、绿色化、全球化迈进,为全球能源转型与可持续发展注入强劲动力。

5 结束语

智能输配电系统与电气工程自动化技术的深度融合,正引领能源领域迈向智能化、绿色化新阶段。从技术创新到市场机制,从国内实践到国际合作,每一环节都凝聚着推动能源转型的智慧与力量。面向未来,需持续突破技术瓶颈、优化管理体系、强化标准制定,以全球视野推动智能输配电系统高质量发展,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,实现全球可持续发展目标贡献力量。

[参考文献]

- [1]姚一鸣,李春燕,邵常政,等.计及淡水生产过程调控的电网-水综合系统协同优化运行[J].电网技术,2022,46(12):71-75.
- [2]吕彬彬.电气工程及其自动化供配电系统的节能优化[J].电工技术,2023,(S1):271-273+276.
- [3]陶仁海.电气工程及其自动化供配电系统节能控制分析[J].科技创新与应用,2022,12(36):189-192.
- [4]卞锦珍.电气自动化技术在供配电系统中的应用研究[J].造纸装备及材料,2022,51(05):21-23.