

电气系统自动化技术在智能电网中的应用

孟 健

冀建投寿阳热电有限责任公司 山西 晋中 045400

摘 要：为适配智能电网数字化、智能化发展需求，提升电力系统运行稳定性与低碳运行水平，本文梳理智能电网与电气系统自动化的核心理论与适配特性，从发电、输配电、变电、用电四大环节剖析自动化技术的具体应用场景与实践价值。同时总结当前技术兼容不足、调控精度欠缺、标准体系不完善、专业人才匮乏等问题，提出针对性优化对策，并展望技术融合、全域智能调控的发展趋势，为新型电力系统建设提供参考。

关键词：电气系统自动化技术；智能电网；应用

引言：双碳目标与新型电力系统建设背景下，新能源大规模并网让电网运行呈现复杂化、随机化特征，传统电力运维与调控模式已难以适配发展需求。智能电网依托多类前沿技术实现电网全域精细化管理，而电气系统自动化是其核心支撑技术。为明确二者融合应用价值，本文系统性研究该技术在电网各环节的应用现状，剖析现存短板并给出优化方案，助力提升电网供电可靠性、清洁能源消纳能力与智能化运行水平。

1 智能电网与电气系统自动化技术核心理论

1.1 智能电网概述

（1）智能电网是以现代通信、信息、控制技术为支撑，实现电力系统发、输、变、配、用各环节全面感知、精细调控与协同互动的下一代电力网络。其核心特征概括为“四化”：信息化——依托海量传感与数据融合，构建全域数字镜像；自动化——实现设备级、系统级操作的自适应执行；互动化——支撑电源、电网、负荷、储能间的灵活双向交互；自愈化——具备故障自主隔离、重构与快速恢复能力，最大限度减少人工干预^[1]。

（2）智能电网整体架构呈四层递进结构：感知层涵盖各类智能传感器、量测终端及执行器，负责原始电气量与非电气量的采集与本地预处理；网络层通过光纤、无线专网、5G等通信介质，保障数据高可靠、低时延传输；平台层集成云边计算资源，提供数据存储、建模分析与开放服务接口；应用层面向调度、运维、市场、用户等场景，部署高级应用系统，实现电网运行态势精准掌控与决策优化。

1.2 电气系统自动化核心技术体系

（1）电网状态监测与感知技术：以智能传感（如电子式互感器、无线温振传感器）、广域测量系统（WAMS，基于PMU的同步相量测量）及数据采集与监视控制（SCADA）为基础，构建覆盖全电压等级、全

时间尺度的感知网络，实现动态潮流、谐波、暂态波形等关键参数同步获取，为后续控制提供高保真数据源。

（2）自动控制与保护技术：包含自适应保护（根据运行方式在线整定定值）、闭环调控（基于反馈的电压/频率实时调节）以及故障自愈控制（利用智能开关与分布式电源协同，实现故障区间快速隔离与非故障区恢复供电），将传统“被动跳闸”升级为“主动防御与柔性处置”。（3）智能调度与数据处理技术：引入大数据分析平台挖掘历史与实时数据的关联规律，结合人工智能算法（如深度学习负荷预测、强化学习优化策略）实施动态调度，应对新能源波动与负荷随机性，实现日前计划、日内滚动与实时调整的多时间尺度协同。

1.3 电气自动化与智能电网的适配性分析

（1）智能电网对自动化技术提出四类核心需求：精准监测——要求微秒级同步、千赫兹带宽的采样能力；快速响应——控制指令端到端时延需低于毫秒级；智能调控——需具备多目标协调优化及在线决策能力；安全稳定——必须兼顾信息网络安全与物理系统韧性。（2）自动化技术赋能智能电网的核心价值体现为：其一，通过远程巡检、故障预判与资产全寿命管理，显著降低运维人力和设备更换成本；其二，借助动态无功补偿、智能重合闸等手段提升电压合格率与供电可靠性，减少停电损失；其三，利用灵活并网控制与储能协调策略，平抑风电、光伏出力间歇性，提高清洁能源消纳率，推动电力系统低碳转型^[2]。

2 电气系统自动化技术在智能电网中的应用

2.1 发电侧自动化应用

（1）传统发电机组自动化优化调控，是保障火电、水电及核电机组高效稳定运行的核心手段。通过部署机组协调控制系统（CCS）与自动发电控制（AGC）策略，实时响应调度端负荷指令，动态调节汽轮机进汽

阀、锅炉燃烧率及励磁系统参数,使机组在变负荷工况下仍保持最佳热效率。同时,融合振动监测、温度场分析与油液在线检测技术,对转子失衡、轴承磨损等早期故障特征进行自动识别与预警,推动发电设备从“定期检修”向“状态检修”转变,显著降低非计划停运风险,提升发电资产利用效率。(2) 新能源并网自动化管控,聚焦于解决风电、光伏出力固有的间歇性、波动性与反调峰特性对电网安全运行的冲击。具体措施包括:部署功率预测系统(结合数值天气预报与机器学习修正算法),提前24小时提供出力区间预测,为调度计划编制提供依据;配置快速功率控制模块(如光伏逆变器有功/无功调节、风电机组变桨距与转矩协同控制),在秒级时间内平滑功率波动;利用储能双向变流器(PCS)与静态无功发生器(SVG)协调控制,平抑高频分量并支撑并网点电压,使新能源场站具备类似常规机组的可调度性,满足并网导则对故障穿越、有功无功调节的刚性要求^[3]。

2.2 输配电环节自动化应用

(1) 输电线路智能监测与故障自动预警、隔离技术应用,依托分布式光纤测温、导线舞动监测、绝缘子泄漏电流检测及无人机/直升机精细化巡检等多源感知手段,构建“天地空”一体化监测体系。监测数据经边缘计算终端预处理后上传至状态评估平台,通过阈值判别与趋势分析实现异常状态早期预警。当线路发生短路或接地故障时,基于行波测距与故障指示器协同定位技术,可在数十毫秒内锁定故障区段,并驱动线路两侧智能断路器顺序跳闸隔离故障点,避免事故扩大,大幅减少人工巡线查找时间。(2) 配电自动化系统落地,是实现配电网透明化运行与高效自愈的关键举措。具体包括:在馈线主干线部署智能终端单元(FTU)、站所终端(DTU)及开闭所终端,构建“主站—子站—终端”三层架构,实时采集配网电流、电压、开关状态等运行数据;依托馈线自动化(FA)逻辑(含就地型与集中型模式),在故障发生后自动判别、隔离最小故障区间,并通过联络开关合闸实现非故障区段负荷转供,恢复供电时间从小时级压缩至分钟甚至秒级;同时,结合配电变压器负载率监测与联络容量分析,自动生成网络重构方案,实现馈线间负荷均衡分配,降低线损并延缓设备重载老化。

2.3 变电环节自动化应用

(1) 智能变电站自动化运维,依托一次设备智能化(电子式互感器、智能断路器、变压器内置光纤测温)与二次设备网络化(GOOSE/SV共网传输),实现全站

运行状态的全景感知。站控层配置在线监测与诊断系统(如油中溶解气体分析、局部放电超高频监测、断路器操作机构行程特性监测),自动生成设备健康评分与剩余寿命预测报告。辅以智能巡检机器人、高清视频监控及红外热成像联动,实现设备区定时、定点自动巡检,巡检结果自动归档比对,真正达到无人值守条件下设备状态的持续跟踪与异常早期识别^[4]。(2) 变电站二次系统自动化升级,重点在于保护、测控、计量功能的融合与数字化重构。推广基于IEC61850标准的保护测控一体化装置,统一数据源与通信协议,减少传统硬接线带来的采样误差与延时;采用智能运维管理单元替代人工定值核对与压板投退操作,实现保护定值区在线切换及软压板遥控执行。同时,引入同步相量测量(PMU)功能至保护装置,使故障录波与动态扰动记录具备统一时标,为事故反演与振荡分析提供高精度数据基础,全面提升电网保护的快速性、选择性与灵敏性。

2.4 用电侧自动化应用

(1) 智能计量与用电数据自动化采集、分析技术应用,依托智能电表(具备双向计量、分时冻结、事件记录功能)与集中器、采集主站构成的自动抄表系统(AMR),实现低压用户电量、电压、功率因数等参数每日定时或实时远程采集,替代传统人工抄表。采集数据经清洗与校验后进入用电信息大数据平台,运用聚类分析与异常检测算法,识别窃电嫌疑、表计故障及电压异常等事件,辅助稽查与运维派单。同时,基于海量历史负荷数据构建典型用户用电特征库,为分时电价制定与台区线损精细化管控提供量化依据。(2) 用户侧负荷智能调控与需求响应自动化管控,通过部署用户侧能量管理终端(如智能插座、空调控制器、充电桩控制模块),接入家庭/园区级能量管理系统(EMS),接收电网侧发布的实时电价或需求响应触发信号。系统依据用户用电优先级、储能荷电状态及分布式光伏出力,自动执行柔性负荷调节策略(如空调温度调高设定值、电热水器延时启动、电动汽车有序充电降功率)或刚性负荷切除(如可中断工业负荷)。整个过程由自动化程序执行,响应时间可达数秒至数分钟,既保障用户基本用电权益,又有效削峰填谷,缓解电网高峰时段供电压力,提升终端用能效率与电网整体运行经济性。

3 电气系统自动化技术在智能电网应用现存问题与优化对策

3.1 技术应用现存核心问题

(1) 设备与系统兼容性不足,多厂商设备协同运行难度大。当前一、二次设备及通信终端来自不同制造

商,各自遵循差异化私有协议与数据格式,导致变电站内智能电子设备互操作困难,调度主站与厂站系统间模型映射不完整,频繁依赖人工转写与协议转换,增加调试周期且埋下通信隐患,制约协同控制策略快速部署。

(2)复杂工况下自动化调控精度不足,新能源适配性有待提升。电网遭遇暂态扰动或处于高渗透率弱电网方式时,固定参数模型下的AVC/AGC算法易振荡超调,恢复缓慢;光伏逆变器、储能变流器在弱电网下动态响应迟缓,功率跟踪误差累积,加之极端气象下预测准确率骤降,调频调峰压力显著增大。

3.2 运维与体系层面存在的短板

(1)技术标准体系不完善,行业规范化程度较低。IEC61850、IEC61970等国际标准虽已推广,但具体到数据命名空间、通信服务映射及一致性测试细则,不同地区和项目仍存差异化解读,缺乏统一强制性实施细则;针对边缘物联代理、软件定义保护装置等新型智能终端的入网检测标准尚未发布,导致设备质量参差,影响系统整体可靠性。(2)专业运维人才储备不足,智能化运维能力薄弱。智能电网集成通信、网络、继保、测控等多学科知识,现有运维人员多出身传统电气专业,对工业以太网配置、IEC61850模型调阅及网络安全策略掌握有限;高校培养与产业需求脱节,基层依赖厂商远程支持,难以独立完成故障定位与系统恢复。

3.3 针对性优化改进对策

(1)强化技术创新,优化自动化算法与设备适配性能。研发数据驱动与机理模型融合的自适应算法,利用在线辨识动态修正控制器参数,保证宽运行范围内控制稳定;推广开放式模块化终端平台,支持多厂商应用容器化部署,引入数字孪生进行联调预仿真,提前暴露兼容问题。(2)健全行业技术标准与规范体系,统一数据接口与运行标准。由能源主管部门牵头,联合电网公司、科研院所及设备厂商,制定覆盖感知至应用全链路的标准化细则,明确模型命名、接口契约及测试用例;建立设备入网检测与版本备案制度,定期核查标准符合

性,实现多厂商设备“即插即用、互认互操作”^[5]。

3.4 未来发展趋势展望

(1)自动化技术与物联网、人工智能、大数据的深度融合发展。电气系统将嵌入无线传感节点与边缘智能代理,依托物联网实现终端即插即联;深度强化学习替代经验整定,在线生成最优策略;大数据融合气象、市场、设备健康等信息,驱动预测性维护与风险预判,推动调控从“被动响应”转向“主动预防”。(2)面向新型电力系统的全域自动化、智能化电网建设方向。以高比例可再生能源接入与“双碳”目标为牵引,构建“源网荷储”协同调控体系,涵盖多时间尺度协调控制;引入云一边一端分层智能协同架构,推动配电网、微电网与大电网柔性互联与自趋优运行,最终建成高度韧性、绿色低碳的智慧能源互联网。

结束语

本文全面分析了电气系统自动化技术在智能电网全环节的应用成效,梳理了技术适配、行业标准、运维体系等方面的现存问题与优化路径。电气自动化技术的深度应用,是实现电网自愈调控、高效运行、低碳发展的关键。未来,需持续推进自动化与人工智能、物联网技术融合,完善行业标准体系,强化人才建设,推动电网向全域智能化、源网荷储协同化的智慧能源网络稳步升级。

参考文献

- [1]陈彬琦,刘钊,张杰.智能电网中电气自动化技术的实时监控与故障诊断技术[J].自动化博览,2025,42(03):70-73.
- [2]张宸睿.智能电网环境下的电气自动化设备协调控制研究[J].自动化应用,2025,66(02):147-149.
- [3]孔若男.5G时代下智能电网关键技术研究及其在电气工程中的应用[J].科技与创新,2025,26(13):198-200.
- [4]李洋.智能电网电气工程自动化控制系统优化设计[J].电力系统装备,2024,11(18):89-91.
- [5]王浩宇.电气自动化技术在智能电网调度运行中的应用分析[J].电工技术,2023,34(22):102-104.