

电气工程及其自动化在智能输配电系统中的应用与优化

马晓龙

保定天威新域科技发展有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17171

[摘要] 本文聚焦电气工程及其自动化在智能输配电系统中的应用与优化,阐述了智能输配电系统的核心特征、传统系统面临的挑战及自动化技术的赋能方向,接着介绍电气工程及其自动化技术体系的发展演进,详细分析柔性输电、分布式能源协调控制等核心应用。并从拓扑结构、控制策略等多维度提出优化策略,并通过数据对比展现应用效果。最后指出未来发展方向,为智能输配电系统发展提供参考。

[关键词] 智能输配电系统; 自动化技术; 柔性控制; 数字孪生

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A

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

Xiaolong Ma

Baoding Tianwei Xinyu Technology Development Co., Ltd.

[Abstract] This paper focuses on the application and optimization of electrical engineering and automation in intelligent power transmission and distribution systems. It elaborates on the core characteristics of intelligent power systems, challenges faced by traditional systems, and the enabling directions of automation technology. The evolution of the technical system of electrical engineering and automation is introduced, with detailed analysis of core applications such as flexible power transmission and coordinated control of distributed energy resources. Optimization strategies are proposed from multiple dimensions, including topological structure and control strategies, and application effects are demonstrated through data comparison. Finally, future development directions are outlined, providing references for the advancement of intelligent power transmission and distribution systems.

[Key words] Intelligent Power Transmission and Distribution Systems; Automation Technology; Flexible Control; Digital Twin

引言

在能源转型与“双碳”目标背景下,智能输配电系统作为新型电力系统的关键构成,对新能源消纳和能源供应保障意义重大。传统输配电系统在新能源高渗透场景下,面临供电可靠性不足、新能源消纳能力弱、控制模式僵化、设备运维效率低等诸多挑战。电气工程及其自动化技术凭借独特优势,为破解这些难题提供了有效途径,其应用与优化成为推动智能输配电系统发展的关键。

1 智能输配电系统的关键特征与技术需求

1.1 智能输配电系统的核心特征

智能输配电系统打破传统系统的刚性架构,呈现“感知全面化、控制柔性化、互动协同化”的核心特征。全面感知能力通过部署海量传感器实现,工业聚集区域智能配电网已安装2.3万个监测终端,实现电压、电流、功率等参数的毫秒级采集,数据

覆盖率达100%。柔性控制是应对新能源波动的关键,通过柔性输电设备与储能系统联动,可将风电、光伏出力波动幅度从±30%平抑至±5%以内,智能电网试点已实现这一控制效果。另外,系统具备自愈能力,配电网故障后自动隔离与恢复时间从45分钟缩短至1.5分钟,凸显智能系统的高效性,这些特征共同构建了适应新能源的新型输配电体系。

1.2 传统系统面临的挑战

传统输配电系统在新能源高渗透场景下面临多重挑战,首先是供电可靠性不足,国家电网2022年数据显示,传统配电网故障年均发生率为0.32次/公里,故障定位依赖人工巡查,平均修复时间超40分钟,曾因线路故障导致1.2万户居民停电超3小时。其次是新能源消纳能力弱,传统系统缺乏柔性调节手段,新能源富集区域2020年弃风弃光率分别达8.2%和7.1%,大量清洁电力无法并网。再者是控制模式僵化,传统调度依赖经验判断,难以

应对分布式电源的随机波动,工业聚集区域曾因光伏出力骤降,导致配电网电压偏差超±7%,影响精密制造企业生产^[1]。最后是设备运维效率低,传统人工巡检模式下,输电线路巡检人均日检2公里,缺陷发现率仅35%,曾因未及时发现绝缘子老化,引发线路跳闸事故。

1.3 自动化技术的赋能方向

自动化技术从感知、控制、运维三个维度为智能输配电系统赋能,精准破解传统系统短板。在感知层面,物联网与边缘计算技术实现数据的实时处理,城市配电网采用边缘计算节点,将故障数据处理延迟从500毫秒缩短至50毫秒,为快速响应奠定基础。控制层面,AI与大数据技术实现精准调控,国家电网研发的电网调度AI系统,可预测24小时内新能源出力,预测准确率达92%,应用后新能源消纳率提升18%。数字孪生技术实现全生命周期管理,产业新片区构建的输配电数字孪生系统,可模拟设备老化过程,提前制定维护计划,设备故障发生率下降62%,推动系统从“被动应对”向“主动调控”转型。

2 电气工程及其自动化的技术体系与发展演进

电气工程及其自动化技术体系历经“自动化—智能化—智慧化”三阶段演进,形成以感知、通信、控制、决策为核心的技术架构。第一阶段为基础自动化,20世纪80-90年代以PLC和SCADA系统为主,实现设备的远程监控,大型电厂引入的SCADA系统,将输配电设备监控从人工现场操作转为远程控制,操作效率提升50%。第二阶段为智能化发展,21世纪初至2010年,物联网与嵌入式技术普及,实现数据的全面采集,城市配电网部署的智能终端,使设备状态监测覆盖率从30%提升至85%。第三阶段为智慧化融合,2010年后AI、数字孪生等技术深度应用,实现精准决策,南方电网构建的智慧调度系统,将电网负荷预测误差从10%降至3%。当前技术体系包含感知层(传感器、智能终端)、网络层(5G、电力专网)、应用层(AI调度、数字孪生),各层级协同联动,2023年该技术体系市场规模已达1200亿元,年均增长率保持15%以上^[2]。

3 电气自动化技术在智能输配电中的核心应用

3.1 柔性输电技术 (FACTS)

柔性输电技术 (FACTS) 通过电力电子器件实现电压、功率的精准调节,是提升系统柔性的核心手段,核心设备包括静止同步补偿器 (STATCOM)、静止同步串联补偿器 (SSSC) 等。新能源富集区域风电基地部署的STATCOM设备,响应时间仅10毫秒,能在风电出力骤降时维持电网电压稳定,电压波动控制在±2%以内,该基地弃风率从2018年的12%降至2023年的3.5%。500kV变电站安装的SSSC设备,可调节线路潮流,将输电能力提升30%,每年多输送清洁电力12亿千瓦时。统一潮流控制器 (UPFC) 实现多目标优化,区域电网环线UPFC项目,可同时调节电压、潮流和阻抗,解决电网潮流分布不均问题,线路损耗降低25%,每年节约电费超8000万元,为应对新能源波动提供“柔性肌肉”。

3.2 分布式能源协调控制

分布式能源协调控制技术通过多代理系统 (MAS) 与微电网

技术,实现分布式电源的协同运行。分布式光伏示范区整合1.2万个分布式光伏用户,采用分层控制策略,底层代理负责单户光伏出力调节,上层代理实现区域协同,系统可根据电网负荷变化实时分配出力,光伏消纳率从75%提升至98%。微电网技术实现“孤岛—并网”无缝切换,景区微电网项目整合光伏、储能与柴油发电机,在电网故障时0.5秒内切换至孤岛运行模式,保障3000余户用电连续,供电可靠性达99.999%。虚拟电厂技术实现负荷聚合调控,工业聚集区域虚拟电厂项目整合200家企业的柔性负荷,在电网高峰时可削减负荷8万千瓦,相当于新建一座小型电站,响应速度较传统调峰方式提升10倍,提升电网调节灵活性。

3.3 智能配电自动化终端

智能配电自动化终端是配电网精准控制的“神经末梢”,具备数据采集、故障处理、远程控制等功能,核心终端包括馈线终端 (FTU)、配变终端 (TTU) 和用户终端 (DTU)。城市配电网大规模部署FTU终端,故障后可自动完成定位、隔离与恢复,故障处理时间从45分钟缩短至1.8分钟,2023年该区域配电网供电可靠性提升至99.99%。TTU终端实现配变变压器精准监控,工业区域安装的5000台TTU终端,可实时监测变压器负载率,负载率超85%时自动预警,避免设备过载烧毁,变压器故障发生率下降72%。DTU终端实现用户与电网互动,居民用户通过DTU终端参与电网需求响应,高峰时段减少用电获得补贴,2023年参与用户达5万户,削峰负荷2万千瓦,实现电网与用户的双向共赢^[3]。

3.4 数字孪生与仿真优化

数字孪生技术通过构建物理电网的虚拟映射,实现输配电系统的全流程仿真优化。沿海区域构建的输配电数字孪生系统,整合1200公里输电线路和300座变电站数据,可模拟台风、雷暴等极端天气影响,提前制定线路加固计划,台风期间线路故障发生率下降80%。规划阶段,工业聚集区域通过数字孪生仿真,将新建配电网的线路损耗降低18%,投资成本节约12%。运维阶段,数字孪生结合AI算法预测设备寿命,输电线路数字孪生系统预测绝缘子老化准确率达91%,提前更换老化绝缘子避免线路跳闸事故15起。仿真优化支持新能源并网测试,新能源基地通过数字孪生仿真,验证百万千瓦级光伏并网可行性,为项目落地提供技术支撑,提升工程建设科学性。

4 智能输配电系统的多维度优化策略

4.1 拓扑结构优化

拓扑结构优化通过构建“网格化、柔性化”电网结构,提升系统稳定性与供电可靠性。传统放射式拓扑故障影响范围大,改为环网拓扑后,故障隔离范围缩小至单条支线,城市配电网改造后,故障影响用户数从平均500户降至50户以内。采用“手拉手”环网结构实现负荷双向转移,工业配电网构建的环网系统,在线路检修时可快速转移负荷,用户停电时间从4小时缩短至0。基于大数据的拓扑动态优化,城市配电网通过分析负荷变化规律,动态调整电网拓扑结构,将线路负载率均衡度从65%提升至90%,线路损耗降低22%。结合分布式电源接入采用“就近消纳”

原则,将光伏电站接入配电网末端,减少输电距离,线损率从6.2%降至3.8%,每年节约电力1.2亿千瓦时^[4]。

4.2 控制策略优化

控制策略优化采用“分层协同、精准调控”模式,提升系统对新能源波动的适应能力。底层采用模型预测控制(MPC),实时调节分布式电源出力,光伏电站应用MPC策略后,光伏出力波动平抑至±3%以内,满足电网并网要求。中层采用多目标优化算法,平衡供电可靠性与经济性,城市配电网调度系统在保障供电的前提下,将购电成本降低8%,每年节约购电费用超3000万元。上层采用AI调度策略实现全网协同,国家电网研发的电网AI调度系统,可同时处理10万+节点数据,调度指令生成时间从30分钟缩短至5分钟,应用后新能源消纳率提升15%。引入虚拟同步发电机(VSG)技术提升分布式电源惯量支撑,风电项目应用VSG后,电网频率波动控制在±0.1Hz以内,提升系统稳定性。

4.3 设备运维优化

设备运维优化通过“状态检修+智能巡检”模式,提升运维效率与设备可靠性。状态检修基于设备运行数据实现按需维护,输电线路采用状态检修后,设备维护成本降低45%,故障发生率下降62%。智能巡检结合无人机、机器人技术,新能源富集区域输电线路采用无人机巡检,配备红外热像仪与激光雷达,缺陷发现率达98%,较人工提升63个百分点,巡检效率提升20倍。引入设备健康管理系统实时监测设备状态,变电站部署的健康管理系统通过振动、温度数据预测变压器故障,预测准确率达92%,提前更换故障变压器避免停电事故。偏远地区变电站采用远程运维技术实现无人值守,远程运维覆盖率达100%,运维人员减少70%,运维成本降低55%。

4.4 市场机制协同优化

市场机制协同优化通过“价格引导+激励机制”,激发源网荷储各主体的互动积极性。推行分时电价政策,工业区域实行的峰谷电价差达3倍,工业用户高峰负荷削减12%,低谷时段储能充电量提升30%。建立需求响应激励机制,居民聚集区域用户参与需求响应,每削减1千瓦负荷可获得8元补贴,2023年参与用户达2万户,削峰负荷15万千瓦。构建分布式能源交易市场,试点区域分布式光伏用户与工业用户直接交易,电价较电网电价低0.1元

/千瓦时,光伏用户收益提升25%,工业用户用电成本降低10%。引入辅助服务市场,储能电站通过提供调频、备用等服务获得收益,储能电站参与调频服务年收益达800万元,投资回收周期缩短3年,形成“技术+市场”良性循环。

4.5 自动化技术应用效果对比

为直观呈现自动化技术的应用价值,以工业聚集区域智能输电系统2021年(改造前)与2023年(改造后)的核心指标为例,对比数据如下表所示:

指标名称	2021年(改造前)	2023年(改造后)	变化幅度
供电可靠性(%)	99.85	99.992	0.00142
新能源消纳率(%)	72	95	0.23
故障平均修复时间(分钟)	42	1.6	-0.962
线路损耗率(%)	6.5	3.2	-0.508
运维成本(万元/年)	2800	1260	-0.55

5 结束语

智能输电系统是新型电力系统的核心组成部分,其安全高效运行直接关系到新能源消纳与能源供应保障。电气工程及其自动化技术通过柔性输电、分布式能源控制等核心应用,精准破解传统系统供电可靠性低、新能源消纳难等短板。未来,需推动自动化技术与5G、区块链深度融合,构建“技术先进、机制灵活”的智能输电系统。电力企业应加大技术研发投入,完善市场机制,为“双碳”目标实现提供有力支撑。

[参考文献]

- [1]李强.电气工程及其自动化在智能输电系统中的应用与优化[J].电气开关,2025,63(4):86-90.
- [2]姚一鸣,李春燕,邵常政,等.计及淡水生产过程调控的电-水综合系统协同优化运行[J].电网技术,2022,46(12):71-75.
- [3]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.
- [4]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.