

输配电系统智能化改造的理论框架与实践路径分析

赵生辉

国网龙口市供电公司 山东龙口 265700

摘要: 随着电力系统向数字化、信息化和智能化转型,输配电系统作为连接发电与用电的重要环节,其运行与管理亟需重构。传统输配电系统存在数据孤岛、设备响应滞后、调控效率低等问题,制约电网运行质量与服务能力。本文基于电力系统现代化发展需求,从理论分析智能化改造的结构逻辑与内在机理,构建智能系统理论框架,涵盖感知层、通信层、平台层与执行层。结合典型案例梳理改造路径与关键技术应用,明确实践中的制度支持与标准保障问题。研究认为,系统性智能化改造是提升输配电系统稳定性、灵活性与能效水平的重要抓手。本文为理解智能化电网架构、推进输配电系统智能化升级提供了理论与实践参考。

关键词: 输配电系统;智能化改造;理论框架;实践路径;系统协同

引言

输配电系统是电力系统运行中枢,在保障电能输送、优化能量配置等方面起核心作用。但长期受设备、信息与运行机制限制,在感知、调控与服务方面存在结构性短板。一方面,系统复杂、数据分散,信息共享与集成分析难;另一方面,传统调控模式难应对分布式电源接入等现实需求。

在此背景下,推进输配电系统智能化改造是新型电力系统建设重点。智能化不仅是技术集成,更是运行逻辑重塑,需将感知、通信与智能算法嵌入输配电体系,实现实时监测、动态调度与自适应控制。目前相关研究已开展,但系统性理论建构与路径实践不足,需结合实际运行需求深化分析。

1 输配电系统智能化改造的理论基础

1.1 电力系统智能化的基本内涵与结构特征

电力系统智能化是指在原有电力网络基础上,融合先进感知技术、信息通信技术与智能控制技术,实现对电网状态的实时感知、精准预测和动态调控。智能化不仅体现在设备功能的自动化升级,更强调系统运行逻辑的主动性、协同性与自适应性。

从结构特征上看,智能电力系统通常由感知层、通信层、平台层与执行层组成。其中,感知层负责采集各类运行数据,通信层承担数据传输任务,平台层完成信息汇聚与智能决策,执行层将决策指令下发至现场设备。各层之间保持逻辑解耦、功能协同,构成闭环控制体系,形成以数据驱动为核

心的运行机制。

在输配电系统中,智能化表现为:状态监测从间歇采样转向连续感知;调度控制从集中式人工调节发展为分布式智能控制;系统维护由计划检修转为预测维护。系统的动态能力、调节响应能力和负荷适应能力显著提升,为构建新型电力系统提供了基础保障。

1.2 输配电智能化的逻辑起点与系统边界

输配电系统智能化的逻辑起点,在于解决传统系统中的“信息不透明、响应不及时、管控不协同”问题。传统系统运行依赖固定调度规则与人工经验,在多源接入、负荷波动与运行扰动频发的新格局下,已难以适应新的安全与效率要求。智能化改造由此成为应对系统复杂性的必要路径。

其系统边界可明确界定为:涵盖从变电站、高压输电线路、配电开关站到用户端用电设施的全链条运行单元。在空间上包括主干网、区域网与末端网络;在功能上覆盖信息采集、数据处理、智能控制与反馈执行全过程。系统内部各环节需实现数据共享、控制协同与策略同步,避免因结构分割造成运行孤岛或功能冗余。

值得注意的是,输配电智能化的边界并非固定不变,而是随着分布式电源、储能系统与用户互动能力的增强不断延伸。例如,电动汽车充放电管理系统、微电网控制系统等也逐步纳入智能化系统的调控范畴,扩展了系统的控制粒度与响应范围。

1.3 改造目标：运行可靠性、能效水平与数据融合能力提升

智能化改造的根本目标，是在保障系统稳定运行的同时，提升运行效率、降低运维成本，并增强系统的弹性与适应性。具体而言，改造任务主要集中在以下三个方面：

一是提升系统运行可靠性。通过部署分布式传感器与边缘控制终端，实现关键节点的状态实时监测与异常识别，增强故障自愈能力与主动防控水平。调度中心则可依托大数据平台与预测算法，对潮流波动与负荷偏移进行提前识别与预调节，减少事故发生频率。

二是提升系统能效水平。智能调度系统能够根据电网实时状态与负荷分布自动优化功率分配路径，减少能量损耗。在配电网中，分布式电源可通过智能逆变器接入系统，根据电压与频率变化灵活输出功率，实现源网荷协同控制，推动能效结构优化。

三是实现数据的深度融合与价值释放。以往输配电系统存在数据分散、缺乏统一平台的问题，导致信息利用率低。通过构建集成化调控平台，将感知数据、运行数据与外部环境数据统一接入，利用智能分析模型实现系统状态识别、趋势预测与策略优化，为运行决策提供支撑。

2 输配电系统智能化改造的核心理论框架构建

2.1 架构逻辑：分层协同、感知驱动与控制闭环

智能化输配电系统的本质是一个以数据为基础、以响应为目标的动态运行体系，其架构逻辑可归纳为“分层协同、感知驱动、闭环控制”三要素。

“分层协同”强调系统架构的结构化管理。在复杂多变的运行环境中，单一层级的集中控制难以应对多源扰动。系统需划分为感知层、通信层、平台层与执行层四个逻辑层级，各层功能独立但高度协同，确保各类信息流、控制流与能量流有序运转。

“感知驱动”是系统实时性的保障。感知层广泛部署温度、电流、电压、频率等传感装置，构建广覆盖、高频次的运行数据网络。数据经通信链路上传至平台层，实现态势识别与决策支撑，推动调控从被动应对向主动识别演进。

“闭环控制”则体现系统运行的自洽性。从感知、分析、决策到执行，系统构建完整的技术链条，确保调控指令可被快速反馈与动态调整，形成响应及时、逻辑闭合的运行体系。

这一架构逻辑体现了智能化系统从“人控”向“自控”

的转变，既保留人工干预接口，也充分发挥智能技术对系统动态调节的支撑作用。

2.2 模块划分：感知层、通信层、平台层与执行层联动关系

理论框架落地依赖功能模块清晰划分。各层在统一控制逻辑下实现数据共享、状态同步与策略协同。

感知层是基础，负责采集运行状态与外部环境数据，主要设备有电压/电流互感器等，安装于关键节点，为系统建模与分析提供依据。

通信层是连接纽带，保障数据流通与指令下达，依托多元通信架构，需具备高带宽等能力，还应支持冗余链路自愈机制。

平台层是决策核心，承担数据汇聚、分析处理与策略生成任务，典型系统内嵌算法模型实现潮流预测等功能，为调控提供支撑。

执行层是控制终端，由断路器等构成，直接响应指令并操作，其性能决定系统闭环性能。

模块通过标准化接口与协议互联，确保兼容性与可扩展性。

2.3 系统耦合：主站控制与边缘智能的协同机制分析

在传统输配电系统中，控制中心具备决策权，边缘设备处于被动执行地位。但在智能化系统中，边缘设备已具备一定智能判断与独立响应能力。这一变化催生了“主站—边缘”协同机制。

主站控制强调系统全局最优与策略统一。其具备高性能计算能力与全网视角，可执行资源调配、电压优化与区域协调等决策任务，适用于中长期控制与大范围事件响应。

边缘智能则负责本地即时处理与应急响应。如配电自动化终端（FTU/DTU）可在通信中断情况下独立完成故障隔离与重构供电路径，提升系统的现场自愈能力。变电站智能终端可完成局部设备保护动作与过载切除操作，减少主站响应压力。

为实现协同运行，系统需构建双向协调机制。一方面，主站平台需向边缘节点下发动态策略与边界条件；另一方面，边缘节点需实时向平台反馈运行状态与控制效果。两者之间通过控制权限分级、控制周期差异化与数据接口标准化，实现多级联动、上下协同的智能控制体系。

3 输配电系统智能化改造的实践路径分析

3.1 改造重点区域识别与典型路径设计

实际推进输配电系统智能化时,不同区域电网结构、负荷特性和运行瓶颈不同,改造需采取针对性路径策略。总体而言,城市配电网、重要输电通道和工业园区用电侧是当前智能化改造重点区域。

城市配电网负荷密度高、结构复杂,基础设施与技术条件好,适合优先布局智能化终端与自动化主站系统,通过构建馈线自动化单元等实现局部自治控制与自动复电,提高供电连续性与用户感知质量。

重要输电通道承担大规模远距离能量传输任务,对系统安全性要求高,其智能化改造应聚焦线路状态监测等能力建设,形成全天候、高精度运行状态感知体系。

在工业负荷密集区,需构建智能用电控制平台,实现能耗监测等,推动企业参与需求响应,引导用户调整用电模式,实现负荷削峰填谷,增强电网调节能力。

典型改造路径一般分四步:一是评估系统现状、识别问题,确定改造优先级;二是部署基础数据采集设备;三是建设调度平台与通信网络;四是上线运行策略并闭环调试。路径设计要注重可扩展性与兼容性,为后续升级留接口。

3.2 改造过程中的关键技术应用与案例分析

智能化改造落地依赖关键技术融合应用。感知环节,光纤测温、局放监测、电子互感器等技术提升运行数据实时性与精度。如某沿海省份 $\pm 800\text{kV}$ 特高压线路,布设分布式光纤测温系统连续感知导线温度,避免线路过载。

通信环节,多个城市开展基于5G的配电通信网络试点。5G网络低延迟、高并发,可实现毫秒级数据传输,保障配电终端状态上传与故障处置指令下达。以广州某配电站为例,基于5G回传通道的通信系统提升故障响应速度,实现故障到复电不超3秒。

平台建设方面,边缘计算终端部署逐步普及。边缘节点可本地完成状态分析与预处理,减少主站负荷,提升控制效率。如江苏某城市配电网部署边缘控制单元,实现配电台区异常数据即时过滤与报警判断,优化主站数据流量管理。

在用电管理端,智能表计与用电信息采集系统实现了全覆盖。通过与用户端APP联动,电力企业可推送用电建议、发送负荷告警,构建双向互动的服务体系。

上述改造案例表明,智能化改造并非单项技术的叠加,

而是多技术协同运行的结果。改造效果的好坏取决于设备性能、系统集成程度与运行策略设计的合理性。

3.3 推进策略:政策支持、投融资机制与标准体系协同

推动智能化改造,需在政策、资金与制度层面形成有效支撑体系。当前,国家与地方已出台多项支持政策,如《电网智能化发展“十四五”规划》等,为输配电智能化提供战略方向。

从政策引导看,应强化对智能化基础设施建设的财政补贴与专项投资引导,优先支持关键设备国产替代与区域改造试点推广,同时建立智能化绩效评估制度激励成效显著项目。

在资金保障方面,建议建立“政府+企业+社会资本”多元投入机制。对于中西部地区与县域电网,可探索设立专项基金引导社会资本参与,缓解单一主体资金压力,还可通过绿色债券等金融工具支持设备替换与系统升级。

标准体系建设是保障改造成效与系统互联互通的关键。目前设备接口等标准不统一造成系统集成困难,应由行业主管部门牵头推动标准对接,制定统一规范与接口要求,降低适配成本,提升集成效率。

同时,要加强专业人才培养与知识体系建设。智能化改造需多学科复合背景技术人员,通过高校联合培养等方式提升一线技术团队综合能力,是保障改造持续推进的基础。

4 结束语

输配电系统的智能化改造是推动电网高质量发展的重要路径。本文从理论出发,构建了包含感知、通信、平台与执行层的系统架构,明确了智能化运行的协同逻辑与模块关系,并结合实践案例探讨了多类型区域的改造路径与关键技术应用。研究表明,智能化不仅提升了系统的运行效率和安全水平,也为新型电力系统构建提供了基础支撑。未来,应持续完善标准体系、优化政策引导,强化多方协同机制,推动输配电智能化从技术示范向全域应用迈进。

参考文献:

[1] 李哲. 化工企业供配电系统智能化技术应用[C]// 中国机电一体化技术应用协会. 第八届全国石油和化工电气设计与应用论文大赛入选论文集. 国恩化学(东明)有限公司.;2025:326-328.

[2] 李珊. 智能化技术在提升输配电及用电工程质量中的应用[C]// 广西网络安全和信息化联合会. 2025年第二届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流论文集

集. 浙江容大电力工程有限公司 ;,2025:250-251.

[3] 徐国良. 输配电系统中智能配电的优化研究 [C]// 中国智慧工程研究会 .2024 智慧施工与规划设计学术交流会论文集. 浙江吉润汽车有限公司 ;,2024:921-923.

[4] 张文建. 人工智能在输配电系统设计中的应用与前

景 [C]// 江西省工程师联合会 .2024 年智能工程与经济建设学术会议论文集 (工程管理与经济建设专题). 浙江雷博人力资源开发有限公司衢州分公司 ;,2024:842-844.

[5] 吕守国. 输配电系统电力设计优化与智能电网技术应用研究 [J]. 张江科技评论 ,2025,(02):45-47.