

新型电力系统下“智慧配电网+”的探索与实践

李相 郭丽娟

国网白银供电公司 甘肃白银 730400

摘要: 新型电力系统建设背景下,“智慧配电网+”的发展聚焦于技术革新与体系重构。新型电力系统以“灵活性、智能性、开放性”为核心特征,推动配电网从单向供电向源网荷储协同互动转型,使其成为连接分布式能源与用户的关键枢纽。关键技术体系涵盖数字化基础层的电力物联网与边缘计算架构、智能分析层的新能源预测与负荷画像技术、协同控制层的AI电压调节与多能互补策略。实践层面,智慧台区示范项目验证了分布式能源即插即用模式,数字孪生系统增强了电网韧性仿真能力。实施路径需完善设备接口标准、创新虚拟电厂市场机制、构建分层防御体系,通过技术迭代与制度保障推动配电网向智能化、安全化方向演进,为新型能源体系构建提供支撑。

关键词: 新型电力; 智慧配电网; 探索; 实践

随着信息技术与移动终端的普及与应用,人们对电力的需求也不断提高。国家能源局在国务院新闻办新闻发布会表示,2013年—2023年全国人均生活用电量从 $500\text{kW}\cdot\text{h}$ 增长到了近 $1000\text{kW}\cdot\text{h}$,增长了近一倍。人们对电力需求的不断提高,极大地增加了配电系统的负担。在新型电力系统下,“智慧配电网+”的应用,推动了电力行业的变革,在提高了电力系统服务性的同时,可以避免不必要的资源损耗,从而平衡好电力行业发展与环境保护的关系。因此,在新型电力系统下,加大对“智慧配电网+”的研究与应用,势在必行。

1 背景

1.1 新型电力系统的核心特征

新型电力系统建设对配电网发展提出了“灵活性、智能性、开放性”三大核心特征要求,这一转型诉求正在推动电力系统技术范式的深刻变革。在“源-网-荷-储”协同互动的新型架构下,配电网需要突破传统单向供电模式,实现分布式能源与负荷的实时动态平衡。灵活性要求配电网具备快速响应新能源波动和负荷变化的能力,通过柔性拓扑重构和动态容量调节实现供需精准匹配;智能性体现在基于人工智能的态势感知、故障诊断和优化调度能力,包括大语言模型在配网调度中的垂直应用、新能源出力预测与负荷画像等技术;开放性则要求建立标准化的数据接口和开放共享平台,支持多元主体参与的市场机制和价值共创。这种技术范式变革促使配电网从被动执行上级调度的从属角色,转变为

主动参与系统平衡的关键节点,不仅需要技术创新,更需要配套的管理机制和市场模式创新。随着可再生能源渗透率的持续提升,配电网正面临从传统单向供电向多元互动、从刚性运行向柔性调节、从封闭系统向开放平台的根本性转变,这一转变将为“智慧配电网+”的发展提供重要机遇^[1]。

1.2 配电网在新型电力系统中的战略定位

在新型电力系统架构中,配电网的战略定位已从传统电能分配载体升级为支撑能源转型的关键枢纽。作为连接分布式能源与终端用户的核心节点,现代配电网承担着消纳高比例可再生能源、实现源网荷储高效协同的基础性功能。这一战略定位的确立,直接反映在国家层面推动的配电网高质量发展专项行动中,该政策明确要求通过智能化改造提升配电网对分布式光伏、电动汽车充电设施等新型负荷的承载能力。配电网的枢纽作用具体体现在三个方面:首先,作为海量分布式电源的接入平台,需解决间歇性电源并网带来的电压波动问题;其次,作为需求侧资源的聚合通道,需构建适应动态电价、需求响应等新型交互模式的运行机制;最后,作为电力数据的重要来源,需建立覆盖全环节的数据采集体系,为电网数字化转型提供基础支撑。这种战略定位的转变,标志着配电网已从电力系统的末端环节转变为新型电力系统建设的主战场。

2 关键技术体系

2.1 数字化基础层

智慧配电网的数字化基础层构建是实现电网智能化的

首要环节,其核心在于电力物联网技术与边缘计算架构的深度融合。电力物联网通过部署智能传感设备实现配电网运行状态的全域数据采集,覆盖电压、电流、功率等关键参数的实时监测;同时采用统一通信协议打通各环节数据壁垒,构建贯通变电站、配电线路直至用户侧的全息感知网络。边缘计算技术的应用将数据处理能力下沉至配变台区等网络边缘,通过分布式部署的智能终端实现本地化快速响应,有效降低云中心计算负荷并提升系统实时性。这种"云边协同"的技术架构既满足了海量设备接入的扩展需求,又确保了故障定位、电能质量治理等关键业务的低延时处理,为上层智能应用提供了可靠的数据支撑和计算基础^[2]。

2.2 智能分析层

智慧配电网的智能分析层通过融合人工智能技术实现电网运行态势的精准认知与决策优化。大语言模型在配网调度领域展现出独特价值,其自然语言处理能力可高效解析调度规程、事故报告等非结构化文本,辅助形成更符合语义逻辑的调度指令。新能源出力预测技术结合气象数据与历史发电曲线,采用时序预测算法降低光伏、风电等间歇性电源的出力不确定性;负荷画像技术则通过聚类分析识别用户用电行为模式,为需求侧管理提供差异化策略依据。这两项技术的协同应用,既提升了配电网对可再生能源的消纳能力,又实现了负荷特性的精细化识别,为源网荷储协同运行提供了智能化分析工具。

2.3 协同控制层

在智慧配电网的协同控制层,基于AI的电压无功自动调节系统通过深度学习算法实时分析电网运行状态,动态调整电容器组投切和变压器分接头位置,有效解决分布式电源接入导致的电压波动问题。该系统采用强化学习框架,通过持续学习历史调节策略与效果反馈,逐步优化控制参数,实现电压合格率提升与网损降低的双重目标。多能互补的微电网群控策略则构建了"电-热-气"多能源协调优化模型,运用分布式优化算法求解各微电网间的功率交换计划,在满足本地供需平衡的前提下,通过群间互济提升整体运行经济性。该策略建立了包含光伏、储能、燃气轮机等多元设备的协同控制架构,采用模型预测控制方法滚动优化调度计划,既保障了关键负荷的供电可靠性,又实现了可再生能源的最大化利用。两类技术的协同应用,形成了从局部调节到全局优化的完整控制链条,为配电网安全经济运行提供了智能化

解决方案。

3 典型实践案例

3.1 智慧台区示范项目

智慧台区示范项目作为新型电力系统的典型实践,展现了分布式能源与智能配电网深度融合的创新模式。"光伏+储能+充电桩"的即插即用架构采用标准化接口设计,通过模块化组合实现不同容量光伏组件、储能电池与充电设施的快速接入与灵活配置。该模式依托电力物联网平台,构建了包含发电预测、储能调度、充电需求管理的协同控制系统,实现了台区内源荷资源的动态平衡。需求响应与动态电价联动机制则建立了基于区块链技术的可信交易平台,通过价格信号引导用户侧负荷的时空转移,形成"电价-负荷"双向反馈的调节闭环。示范项目运行数据显示,该模式下光伏自发自用比例提升明显,同时通过谷时段储能充电、峰时段放电的策略,有效缓解了配变重载问题。这种"硬件标准化+软件智能化"的实施路径,为配电网适应高比例可再生能源接入提供了可复制的解决方案^[3]。

3.2 配电网数字孪生系统

配电网数字孪生系统通过构建物理电网的高精度虚拟镜像,实现了电网运行状态的实时监测与预测分析。该系统采用多源异构数据融合技术,将SCADA、PMU、智能电表等采集的实时数据与GIS、BIM等空间信息进行三维可视化建模,形成具有毫秒级同步精度的数字孪生体。在极端天气应对方面,系统集成气象预报数据与历史故障记录,通过蒙特卡洛模拟算法生成台风、冰雪等灾害场景下的电网脆弱性评估报告,为防灾调度提供决策支持。数字孪生体与物理电网之间建立双向交互机制,既可将仿真优化的调度策略下发给实际设备执行,又能将现场运行数据反馈至虚拟系统进行模型校准。这种虚实结合的技术路径,不仅提升了配电网对复杂运行工况的感知能力,还通过预演推演显著增强了电网在极端条件下的抗灾韧性,为新型电力系统安全稳定运行提供了数字化保障手段^[4]。

4 实施路径建议

4.1 标准体系建设

标准体系建设是推动智慧配电网高质量发展的基础性工作,其核心在于建立统一的设备接口协议与数据交互规范。在设备接口协议方面,需制定涵盖物理连接、通信规约、数据格式的三层标准化框架,确保光伏逆变器、储能变流器、

智能终端等异构设备能够实现即插即用。数据交互规范则重点解决多源数据融合问题,通过定义统一的数据模型、编码规则和传输协议,构建跨平台、跨业务的数据共享机制。该标准体系采用模块化设计思路,在保持核心规范稳定性的同时,为新技术、新设备的接入预留扩展空间。实施过程中需统筹考虑国际标准兼容性与本土化需求,形成既与国际接轨又符合中国电网特点的标准体系架构。通过标准先行策略,可有效降低系统集成复杂度,提升设备互操作性,为源网荷储协同互动提供规范化基础。

4.2 商业模式创新

商业模式创新是推动虚拟电厂规模化发展的关键环节,其核心在于构建参与电力市场的合理机制。该机制设计需重点解决分布式资源聚合、交易规则适配和收益分配三个维度的问题。在资源聚合方面,建立基于区块链技术的可信计量体系,确保分布式光伏、储能系统、柔性负荷等异构资源的可监测性与可控性。交易规则适配要求设计包含日前市场、实时市场和辅助服务市场的多级交易框架,明确虚拟电厂作为新型市场主体的权利义务关系。收益分配机制则需构建考虑容量贡献度、调节响应速度和环境效益的多因素分成模型,通过智能合约实现自动结算。这种机制设计既保留了传统发电主体的市场功能定位,又赋予虚拟电厂参与调频、备用等辅助服务的资格,通过价格信号引导社会资本投资分布式能源。该商业模式的实施将有效释放用户侧灵活性资源潜力,为构建新型电力系统提供市场化解决方案^[5]。

4.3 安全防护升级

安全防护升级是保障智慧配电网稳定运行的必要措施,重点在于构建面向新型网络攻击的防御体系。该防御体系采用分层防护架构,在物理层部署具备入侵检测功能的加密通信模块,确保终端设备间的数据传输安全;在网络层实施基于零信任模型的动态访问控制,通过持续身份验证和最小权限原则降低横向渗透风险;在应用层则运用 AI 驱动的异常行为分析技术,实时监测针对 SCADA 系统和能量管理平台

的 APT 攻击。针对配电网特有的攻击场景,防御体系需特别强化对虚假数据注入攻击和拒绝服务攻击的识别能力,采用多因子认证与数字签名相结合的方式保障控制指令的真实性。同时建立覆盖威胁情报共享、应急响应和灾备恢复的全生命周期安全运维机制,通过红蓝对抗演练持续检验防御有效性。这种立体化防护策略不仅能抵御现有网络威胁,还通过自适应学习能力应对不断演变的攻击手段,为新型电力系统提供可靠的安全保障基础。

结论:综上所述,新型电力系统建设驱动下,"智慧配电网+"已成为支撑能源转型的核心载体。面对"灵活性、智能性、开放性"的刚性要求,配电网通过数字化基础层的全域感知、智能分析层的精准决策、协同控制层的动态优化,构建了源网荷储协同运行的技术架构。实践表明,标准化设备接口与数据交互规范、虚拟电厂市场化机制、分层防御体系等实施路径,有效强化了分布式能源接入能力与系统抗风险水平。未来需持续推进技术迭代与制度创新,充分发挥配电网在能源互联网中的枢纽作用,为构建新型能源体系提供可靠支撑。

参考文献:

- [1] 李华,王振宇.面向新型电力系统的配电网灵活性提升路径研究[J].电力系统自动化,2023,47(8):15-24.
- [2] 张明,周晓瑞.能源互联网背景下配电网战略定位演进分析[J].电网技术,2022,46(10):3875-3884.
- [3] 王强,李晓东.基于边缘计算的配电网数字化转型架构设计[J].电力建设,2024,45(3):28-36.
- [4] 刘洋,黄立新.人工智能在配电网智能调度中的融合应用[J].电力系统保护与控制,2023,52(5):102-110.
- [5] 陈晨,吴启帆.新型电力系统网络安全分层防护体系构建[J].电力信息与通信技术,2022,21(6):45-53.

作者简介:李相,1993.06,男,汉,甘肃会宁,本科,中级工程师,工作领域:配点安全监察、配网调控、继电保护