

大规模新能源接入下输变电装备智能化的发展

董义俊

乌海超高压供电公司 内蒙古 乌海 016000

摘要: 大规模新能源接入呈现间歇性、波动性等特性,与负荷中心空间错配,给电网带来诸多挑战,对输变电装备提出更高需求。输变电装备智能化融合多技术,实现全生命周期智能运行。本文分析大规模新能源接入对核心输变电装备的适配需求与挑战,构建包含智能感知、诊断、调控、运维的核心技术体系,提出分阶段发展路径,旨在构建适配新型电力系统的智能输变电装备体系,提升新能源接纳能力,助力“双碳”目标实现。

关键词: 新能源接入; 输变电装备; 智能化

引言: 在全球能源转型与“双碳”目标推动下,大规模新能源接入电网成为必然趋势。然而,新能源出力的间歇性、波动性以及与负荷中心的空间错配,给电网功率平衡、稳定运行等带来巨大冲击,对输变电装备提出更高要求。在此背景下,输变电装备智能化成为关键。通过融合先进技术实现装备智能运行,不仅能提升电网对新能源的接纳能力,还能保障电网安全稳定经济运行,对推动能源转型具有重要意义。

1 大规模新能源接入下输变电装备智能化的理论基础

1.1 大规模新能源接入的核心特性与电网需求

大规模新能源接入呈现出间歇性、波动性与随机性的核心特性,风电、光伏等新能源出力受气象条件影响显著,导致功率输出难以精准预测,给电网功率平衡与稳定运行带来冲击。同时,新能源发电多集中于资源富集区域,与负荷中心存在空间错配,加剧了跨区域电力输送压力^[1]。在此背景下,电网对输变电系统提出了更高需求:一是提升灵活调节能力,以应对新能源出力波动带来的电压、频率波动;二是强化精准感知能力,实现对新能源出力及电网运行状态的实时监测;三是增强协同控制能力,保障新能源与传统电源、输变电装备的协调运行;四是提高安全防御能力,抵御新能源大规模接入引发的电网安全风险,为新能源消纳提供可靠支撑。

1.2 输变电装备智能化的核心内涵

输变电装备智能化是以新型电力系统建设需求为导向,融合先进传感、通信、人工智能、大数据等技术与传统输变电装备技术,实现装备全生命周期“感知-诊断-调控-运维”一体化智能运行的技术升级过程,其核心内涵体现在四个维度。一是状态感知全面化,通过部署多维度传感设备,实现对输变电装备电气、机械、环境等多参数的实时采集,打破传统装备“盲运行”状态;二是诊断预警精准化,依托大数据分析 with 智能算法,对

采集的状态数据进行深度挖掘,实现装备故障的早期识别、精准定位与趋势预警,降低故障突发概率;三是调控运行协同化,通过装备与电网调度系统的实时交互,实现基于运行状态的自适应调控,提升装备与电网的协同运行效率;四是运维管理精益化,结合数字孪生、远程操控等技术,构建全生命周期智能运维体系,实现运维模式从“计划修”向“状态修”“预测修”转变,大幅提升运维效率、降低运维成本,保障输变电装备安全、高效、经济运行。

2 大规模新能源接入对输变电装备的适配需求与挑战

2.1 核心输变电装备的适配需求分析

大规模新能源接入背景下,变压器、电抗器、开关设备、输电线路等核心输变电装备面临针对性适配需求。对于变压器,需提升电压调节精度与范围,增强抗短路能力和过负荷能力,以应对新能源出力波动引发的电压波动及谐波冲击,同时需集成智能传感模块,实现绕组温度、绝缘状态等关键参数的实时监测。对于开关设备,需提升操作响应速度与可靠性,适应电网快速调控需求,优化灭弧性能以应对新能源接入带来的暂态过电压问题,同时强化状态感知与故障诊断功能。对于输电线路,需提升输送容量与抗风偏、覆冰等灾害能力,适应新能源基地大规模电力外送需求,部署在线监测设备实现导线温度、弧垂、微风振动等状态的实时监控。另外,各类装备均需具备标准化通信接口,实现与电网调度、运维系统的互联互通,保障数据高效传输与协同调控,提升整体输变电系统对新能源的接纳能力。

2.2 大规模新能源接入带来的核心挑战

大规模新能源接入给输变电装备带来多方面核心挑战,首要挑战是装备运行稳定性承压加剧,新能源出力的间歇性与波动性导致装备长期处于宽工况、变负荷运行状态,变压器、输电线路等装备的损耗增加、老化加

速,同时谐波、电压暂降等电能质量问题凸显,进一步影响装备运行稳定性。其次是装备状态感知难度提升,新能源基地多位于偏远地区,环境恶劣且装备分布分散,传统监测手段难以实现全覆盖、高精度感知,且海量运行数据存在异构性、冗余性特征,增加了数据处理难度^[2]。再者是装备协同调控复杂度升高,新能源电源与输变电装备、传统电源之间的交互关系愈发复杂,多主体协同调控的耦合性增强,传统调控模式难以适应多变量、快响应的调控需求。最后是装备运维压力显著增大,新能源接入使得输变电装备运行工况更复杂,故障诱因增多,且偏远地区装备运维交通不便、成本高昂,传统运维模式难以满足高效运维需求,对运维的智能化、远程化水平提出更高要求。

3 输变电装备智能化的核心技术体系构建

3.1 智能感知与数据采集技术

智能感知与数据采集技术作为输变电装备智能化的坚实基础支撑,其核心使命在于精心构建一个全维度、高精度且高可靠的状态感知网络。这一网络如同装备的“神经末梢”,能够全方位、无死角地捕捉装备运行状态数据,并确保这些数据得以全面采集与高效传输,为装备的智能化运行提供精准的数据“养分”。该技术体系主要涵盖三类关键技术。其一为高精度传感技术,它巧妙运用光纤传感、红外传感、声学传感等新型传感技术。光纤传感能凭借光在光纤中传播特性变化,精准感知装备绕组温度;红外传感可依据物体辐射红外线的特性,清晰洞察绝缘状态;声学传感则通过捕捉装备运行时的声音信号,有效监测机械振动与局部放电等关键参数。与传统传感技术相比,它测量范围更广、精度更高、抗干扰能力更强。其二是边缘计算技术,通过在装备本地部署边缘计算节点,对采集到的海量原始数据进行实时预处理。它就像一个智能“过滤器”,能迅速过滤冗余数据,精准提取关键特征,从而大大降低数据传输压力与云端处理负荷,让数据处理更加高效流畅。其三是高效通信技术,它融合5G、工业以太网、物联网等先进通信技术,构建起一个低时延、高带宽、高可靠的通信网络。这个网络如同一条畅通无阻的“信息高速公路”,能够实现感知数据与调控指令的实时交互,同时全方位保障数据传输的安全性与完整性,为输变电装备智能化运行提供全面、精准且可靠的数据支撑。

3.2 智能诊断与预警技术

智能诊断与预警技术是实现输变电装备故障早发现、早处置的核心手段,通过融合大数据分析、人工智能、机器学习等技术,构建从数据到故障的精准映射模

型。其核心技术路径包括三个层面:一是数据预处理与特征工程,对感知数据进行清洗、归一化、降维等处理,提取与装备故障相关的关键特征,构建标准化特征库;二是智能诊断模型构建,基于深度学习、支持向量机、随机森林等算法,构建多维度故障诊断模型,实现对变压器绝缘老化、开关设备灭弧室故障、输电线路覆冰等常见故障的精准识别与类型判定;三是趋势预警与寿命预测,结合装备全生命周期运行数据、环境数据,构建寿命预测模型,实现对装备运行状态的趋势预判,提前发出故障预警信号,并给出针对性处置建议。同时,通过模型迭代优化与样本积累,持续提升诊断与预警的精准度,为装备状态检修提供科学依据。

3.3 智能调控与协同技术

智能调控与协同技术是输变电领域迈向高效、稳定运行的关键支撑,其核心目标在于达成输变电装备与电网、新能源电源之间的精准协同运作,显著提升整个系统的运行效率与稳定性。该技术体系涵盖三个关键方向。首先是装备自适应调控技术,它依据装备的实时运行状态以及电网的实际需求,借助先进的智能控制算法,实现一系列自适应调控功能^[3]。例如,变压器分接头能够根据电压变化自动调节,确保电压稳定在合理范围;SVG(静止无功发生器)可动态进行无功补偿,提升电能质量;输电线路载流量也能根据环境条件和负载情况动态优化,避免线路过载。通过这些自适应调控,保障装备运行参数始终处于最优区间,提升装备运行效能。其次是多主体协同控制技术,该技术构建起输变电装备、新能源电源、传统电源以及电网调度中心之间的协同控制模型。采用分布式控制与集中调度相结合的创新方式,让各个主体之间能够实时共享信息,实现运行状态的动态匹配。这不仅有助于提升新能源的消纳能力,减少弃风、弃光现象,还能增强电网运行的稳定性,应对各种复杂的运行工况。最后是数字孪生驱动调控技术,通过构建输变电装备与电网的数字孪生体,实现物理实体与虚拟模型的实时精准映射。利用虚拟仿真技术模拟不同的运行场景,提前评估各种调控策略的效果,从而优化出最佳的调控方案,为精准调控提供提前预判和科学决策支撑,同时确保调控指令的安全性与有效性。

3.4 全生命周期智能运维技术

全生命周期智能运维技术以提升输变电装备运维效率、降低运维成本为目标,覆盖装备设计、制造、安装、运行、检修、退役全流程,构建“数据驱动+智能决策”的运维体系。其核心技术包括四个方面:一是数

字孪生运维技术,通过构建装备全生命周期数字模型,整合设计制造数据、运行状态数据、检修记录等全维度数据,实现运维过程的可视化、透明化管理;二是远程智能检修技术,融合机器人技术、远程操控技术,实现对偏远地区或高危环境下装备的远程巡检、故障处置,降低人工运维风险;三是运维决策智能优化技术,基于大数据分析 with 运维知识图谱,构建运维决策模型,实现检修计划的智能生成、资源的优化配置;四是退役处置智能化技术,通过对退役装备状态的全面评估,结合环保要求,实现退役装备的精准拆解、材料回收与环保处置,提升资源利用率,践行绿色发展理念,形成全生命周期闭环运维管理模式。

4 输变电装备智能化的发展路径

4.1 发展目标与总体思路

输变电装备智能化的核心发展目标是构建适配新型电力系统的智能输变电装备体系,实现装备状态全面感知、故障精准预警、调控协同高效、运维精益智能,大幅提升输变电系统对大规模新能源的接纳能力,保障电网安全、稳定、经济运行,为“双碳”目标实现提供核心支撑。总体思路以需求为导向、技术为核心、创新为驱动,坚持“统筹规划、分步实施、协同推进、示范引领”的原则。一方面,聚焦大规模新能源接入带来的核心需求与技术瓶颈,强化关键核心技术攻关,突破智能传感、智能诊断、协同调控等核心技术瓶颈,构建完善的技术体系;另一方面,推动技术与产业深度融合,加快智能化装备的研发、试验与产业化应用,建立健全标准规范体系与检测认证机制;同时,加强跨领域协同创新,推动电力、通信、人工智能等行业深度合作,形成“技术研发-装备制造-示范应用-标准完善”的良性发展格局。

4.2 分阶段发展路径

输变电装备智能化发展需循序渐进,结合技术成熟度与产业基础,可分为三个关键阶段。第一阶段为技术攻关与示范应用阶段(2025-2030年),聚焦核心技术突破,重点研发高精度智能传感、高效数据传输、基础智

能诊断等关键技术,开展变压器、开关设备等核心装备的智能化改造与样机研发,在新能源基地、重点输电通道等场景开展示范应用,同时启动标准规范体系建设,形成初步的技术与产业基础^[4]。第二阶段为规模化推广与体系完善阶段(2030-2035年),实现核心智能化技术的成熟落地与规模化应用,推动输变电装备智能化率大幅提升,完善智能化装备标准规范体系与检测认证机制,构建全国统一的输变电装备智能运维平台,实现跨区域、跨层级的协同运维,形成成熟的产业生态。第三阶段为全面智能化与引领发展阶段(2035年后),实现输变电装备全品类、全生命周期智能化,构建“感知-诊断-调控-运维”一体化智能体系,核心技术达到国际领先水平,形成具有全球竞争力的智能化装备产业集群,为新型电力系统全面建成提供坚实支撑,引领全球输变电装备智能化发展方向。

结束语

大规模新能源接入下,输变电装备智能化是必然选择。本文围绕其理论基础、适配需求与挑战、核心技术体系及发展路径展开研究。未来,需持续强化关键技术攻关,推动技术与产业深度融合,加强跨领域协同创新。通过分阶段有序推进,逐步构建适配新型电力系统的智能输变电装备体系,提升新能源接纳能力,为我国能源转型与“双碳”目标实现提供坚实保障,引领全球输变电装备智能化发展潮流。

参考文献

- [1]李鹏,袁帅,于浩,等.大规模新能源接入下输变电装备智能化的发展[J].高电压技术,2025,51(8):4235-4247.
- [2]王哲.智能电网中输变电技术的应用[J].光源与照明,2023,(05):204-206.
- [3]王杜,吴兴中.基于数字孪生技术的新能源输变电设备状态预警与故障诊断方法研究[J].科技资讯,2025,23(03):77-80.
- [4]李建军.基于新能源多能互补工程的输变电路实践的应用研究[J].水泥工程,2023,(06):76-78.