

大型风电机组输变电接入方案优化设计研究

陈勇军

中广核(兴安盟)新能源有限公司, 内蒙古兴安盟, 137400;

摘要: 为解决大型风电机组输变电接入设计中拓扑缺陷、设备适配不足、并网稳定性差及经济性失衡等问题, 以风电场实际运行需求与电网适配要求为导向, 对输变电接入方案优化设计展开研究。提出四大核心优化路径, 包括重构混合拓扑结构提升传输效能, 优化核心设备选型与集成设计强化适配性, 完善并网稳定性控制方案降低电网冲击, 推进全生命周期经济性设计平衡成本与效益, 配套构建技术支撑体系与适配运维机制保障落地。优化方案可有效提升风电并网灵活性、稳定性与经济性, 减少资源浪费, 为大型风电机组规模化安全并网及项目可持续发展提供技术参考。

关键词: 大型风电机组; 输变电接入; 构网型风电; 并网稳定性; 全生命周期经济性

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.007

引言

随着风电产业向规模扩张与质量提升并行阶段迈进, 构网型机组推广、沙戈荒基地建设及特高压通道升级成为行业新方向。风电资源与负荷中心逆向分布特征, 叠加机组出力随机性、极端环境运维需求, 使输变电接入环节的拓扑适配、设备耐候、并网稳定及成本平衡难题愈发突出, 制约规模化消纳与电网安全。立足《关于促进电网高质量发展的指导意见》要求, 紧扣风储融合、智能运维等技术趋势, 针对现有设计痛点展开优化研究, 构建多维度协同方案, 助力风电与新型电力系统深度适配, 为能源结构转型提供技术支撑。

1 大型风电机组输变电接入设计现状与核心痛点

1.1 接入拓扑结构设计缺陷

现有接入拓扑设计适配性不足, 制约风电高效并网与传输。传统拓扑结构多采用固定架构模式, 难以跟随风电场规模化扩容需求动态调整, 当风电场装机容量提升后, 原有拓扑易出现节点负载过载问题, 无法实现电力的均衡分配。远距离风电传输场景中, 拓扑路径设计未充分结合地形与输电距离优化, 线路迂回布置现象普遍, 直接导致电阻性损耗与电晕损耗偏高, 降低电力传输效率。拓扑冗余设计存在明显短板, 多数方案仅满足基础供电需求, 缺乏备用路径与应急切换机制, 遭遇极端天气、线路故障等扰动时, 易引发局部供电中断, 整体抗扰动能力无法匹配大型风电机组的稳定运行需求, 进一步放大了风电并网的不确定性。

1.2 接入设备选型设计适配性不足

设备选型设计和风电机组特性、电网参数配合不上, 影响到运行稳定程度, 变压器、断路器这一些核心输变电设备, 其参数设计多半基于常规火电、水电的稳定出力特性, 跟风电出力的随机性、波动性适配程度差, 容易出现设备启停频繁、负载波动过大这一些状况, 缩短设备使用时间, 风电场地多数分布在高原、戈壁这一些区域, 部分接入设备耐候性设计有所缺失, 抗风沙侵蚀、低温冻融的能力不够, 不仅增加设备故障次数, 还需要投入大量人力物力来开展运维检修, 推高运维投入, 伴随新型大功率风电机组的推广应用, 传统接入设备在接口标准、控制逻辑上存在兼容性缺口, 没办法充分发挥新型机组的技术长处, 形成设备性能跟机组出力的错配瓶颈^[1]。

1.3 并网稳定性控制方案设计瓶颈

风电随机性带来并网冲击, 稳定性控制方案设计难度不小, 风电机组出力受到风速变化影响很明显, 现有控制方案不容易做到出力的准确预判跟调节, 让电压波动跟闪变问题变得突出, 超出电网电压质量允许范围, 干扰周边负荷的正常用电, 频率调节层面, 大型风电机组自身惯性比较小, 配套控制方案的响应速度有点滞后, 不能快速匹配电网频率的动态变化, 容易破坏电网频率平衡, 低电压穿越能力设计不够完善, 当电网出现电压跌落故障, 风电机组难以保持短时间稳定运行, 经常会触发保护装置脱网, 不仅影响风电自身并网稳定性, 还可能带来连锁反应, 对电网整体运行安全造成威胁, 这显示出控制方案在故障应对跟风险规避上的设计短板。

1.4 接入方案经济性设计失衡

设计阶段没平衡好投资、运维跟效率, 经济性需要

提高,输变电路铺设跟核心设备采购的初始投资设计缺少精细化考虑,部分方案一味追求技术指标,选用了价格高的设备、过度铺设了线路,造成投资成本过高,而实际运行里的投资回报率长时间处在偏低水平,运维环节的经济性设计不够,运维流程沿用着老模式,没结合风电场布局跟设备特性来优化,加上设备故障次数偏高,人力、物料以及停机损失等叠加在一起,推动全生命周期成本不断往上升,弃风率控制没放进设计核心考量,拓扑布局跟并网调度设计不合理,使得部分区域风电没法及时并网,大量风电资源被浪费掉,风电资源利用效率不够,进一步加重了经济性失衡问题,制约风电项目的可持续发展。

2 大型风电机组输变电接入方案优化设计核心路径

2.1 接入拓扑结构优化设计

重构拓扑结构,提升接入灵活性、可靠性与传输效率。采用环形与辐射式混合拓扑架构,打破传统固定拓扑的局限,环形结构为关键节点提供双向供电路径与独立备用通道,辐射式结构依托分支线路实现电力向各负荷节点的精准输送,二者协同配合既显著增强拓扑冗余度,又大幅提升抗扰动能力,有效规避单点故障引发的区域性供电中断,保障风电传输的连续性^[2]。基于风电场机组分布密度、出力特性及地形条件开展线路路径优化,结合GIS地理信息系统精准规划杆塔位置与线路走向,缩短输电距离,减少迂回布置与地形障碍带来的线路损耗,通过优化导线截面选型与架设高度,进一步降低电阻与电晕损耗,提升电力传输效率。针对分布式风电分散布局、出力波动更大的发展趋势,构建微网与主网协同接入拓扑,微网内部整合分布式风电机组、储能设备与本地负荷,承担区域内风电消纳与功率调节功能,平抑局部出力波动,主网则负责剩余电力的远距离输送与跨区域调配,实现分布式与集中式风电的协同并网。这种拓扑设计既适配不同规模风电项目的接入需求,又能灵活应对风电出力变化,大幅提升拓扑整体适配性与运行效能。

2.2 核心接入设备选型与集成设计优化

优化设备选型跟集成设计,提升适配性以及耐候性,选用宽电压、宽频率适配型变压器,其调压范围与频率响应区间能够灵活匹配风电出力的剧烈波动,借助内置智能调压模块实时调整运行参数,减少设备启停频次,避免负载骤变对设备带来的损耗,保障运行稳定性,针对风电场地恶劣环境,加强设备耐候性集成设计,在设

备外壳采用防腐、抗风沙的复合材质,优化密封结构防止杂质侵入,内部元器件选用耐低温、抗老化型号,部分关键设备增加加热、除沙辅助装置,明显延长户外设备使用时间,降低故障发生率与运维成本,推广智能监测型设备集成应用,在变压器、断路器等核心设备上搭载温度、压力、振动等多维度传感模块,实时采集运行参数与状态信息,借助物联网技术传输至后台运维系统,为运维决策给出精准数据支撑,实现设备状态的可视化管理,统一新型风电机组与接入设备的接口标准、控制逻辑及通信协议,搭建标准化集成平台,消除设备间的兼容性障碍,实现设备间数据互通与协同控制,充分释放新型机组的技术效能,形成设备选型与集成的协同优化效果^[3]。

2.3 并网稳定性控制方案设计优化

强化主动控制能力,降低风电并网给电网带来的冲击,优化储能装置配置与控制逻辑,结合风电出力预判模型的计算结果,合理搭配储能容量与充放电速率,借助储能装置的快速充放电调节,平抑短期功率波动,将风电出力波动幅度控制在电网能够承受的范围里,减少风电出力不确定性对电网造成的影响,聚焦低电压穿越与频率调节能力提升,优化风电机组控制策略,在机组控制系统中融入自适应调节算法,实时监测电网电压、频率变化,当电网出现电压跌落故障时,快速调整机组励磁参数与转子转速,维持机组短时间稳定运行,避免频繁脱网,采用柔性直流输电技术优化并网设计,依托其换流装置的快速调节特性,精准控制输出电压与频率,有效隔离风电波动对主网的干扰,改善并网电压与频率稳定性,同时提升输电线路的功率传输极限,借助多维度控制手段的协同设计,构建主动预判、快速响应、精准调节的闭环控制体系,将被动应对故障转化为主动预防与实时调控,破解风电随机性带来的并网稳定性难题,实现风电与电网的协调运行,为大型风电机组规模化并网给出技术支撑。

2.4 全生命周期经济性设计优化

以设计作为核心来平衡投资、运维跟效率,提升综合效益,初始投资这个环节,结合风电项目规模、出力特性还有运行需求,开展设备跟线路选型的多维度经济性评估,建立技术指标跟成本指标的平衡模型,在满足安全运行跟传输效能的前提下,优先选用性价比高的国产设备跟优化线路铺设方案,精准控制初始投资成本,避免盲目追求高端配置带来的资金浪费,运维环节,借助智能监测设备采集的实时数据,构建智能化运维体系,

借助大数据分析预判设备运行状态跟故障风险,推行预防性运维模式,替代传统定期检修模式,减少非计划停机跟无效检修,降低运维人力跟物料投入,控制全生命周期运维成本,借助拓扑优化缩短输电距离、控制方案优化平抑功率波动,双管齐下降低弃风率,提升风电资源利用效率,增加项目发电收益,从设计源头统筹初始投资、运维成本跟发电效率的内在关系,构建全生命周期经济性评估体系,动态调整设计参数跟方案细节,实现各环节成本跟效益的动态平衡,这种以设计为核心的经济性优化,并非单一环节的成本削减,而是系统性提升项目综合效益,增强风电项目的经济可行性与市场竞争力。

3 优化设计方案实施保障措施

3.1 设计技术支撑体系构建

完善设计技术标准与研发体系,支撑优化方案落地。制定针对性的大型风电机组输变电接入优化设计技术标准,覆盖拓扑结构、设备选型、控制方案、集成安装等全环节,明确各环节设计规范、技术参数与质量要求,统一设计口径与评估标准,规避设计乱象与技术壁垒,为优化方案的设计与实施提供依据^[4]。聚焦柔性直流输电、智能运维、储能协同控制、拓扑动态优化等核心技术,加大研发投入力度,鼓励科研机构与企业联合攻关,突破关键技术瓶颈,推动技术成果从实验室走向实际应用,为优化设计提供核心技术支撑。搭建专业化仿真测试平台,整合地形模拟、气象模拟、电网运行模拟等功能模块,模拟不同地形、气候及电网运行条件下优化方案的运行状态,对方案的可行性、稳定性与经济性开展全面测试与验证,提前排查设计漏洞与潜在风险,优化设计参数^[5]。同时,加强行业内技术交流与合作,搭建技术共享平台,吸纳国内外先进设计经验与技术成果,持续更新设计技术储备,推动设计理念与技术手段的迭代升级,提升优化设计的科学性、前瞻性与可操作性,为优化方案落地筑牢坚实的技术根基。

3.2 适配优化设计方案的运维机制优化

搭建同优化设计方案相适配的运维机制,确保其能够长期平稳运转,借助优化设计方案里已经装好的智能监测装置,打造一个依赖大数据的设备状态监视和预警系统,把来自不同方面的传感器数据和运行日志整合到一块,借助算法模型来解析设备运行的趋势,准确找出可能的故障苗头,达成运维数据的即时收集、解析和异常提醒,给运维任务给出明确引导,替换掉过去主要凭经验的巡查方式,推动预防性质的运维机制,联系设备

运行状况、生命周期特点以及过往的故障记录,制定出有针对性的运维安排,针对不一样设备、不同运行条件来调整检修的时间点和具体项目,提前发现可能的故障,减少设备出问题的概率和应急处理的开销,增强设备运行的靠谱程度,构建跨部门协作的运维机制,把风电场运营小组、专业运维单位、设备供应商等多方资源都整合进来,明确每个参与方的责任划分和沟通步骤,打破信息不通和部门隔阂,做到故障信息即时互通、技术力量迅速调配,提高故障处理的协作效果和准确度,针对优化设计之后出现的新设备和拓扑结构特点,组织运维人员参加专门培训,重点加强新设备操作、智能系统使用、故障判断和处理等能力,提升运维队伍的专业水平,保证运维工作同优化设计方案精确匹配,确保优化方案能够长期稳定地起作用。

4 结语

大型风电机组输变电接入方案的优化设计,是破解风电规模化并网瓶颈、释放风电资源价值的关键抓手。本次研究立足行业现存痛点,结合风电出力特性与场地环境特点,形成多维度协同优化体系,兼顾技术可行性与实际运营需求,弥补传统设计在适配性、稳定性及经济性上的短板。该优化思路既适配集中式与分布式风电的发展趋势,又能应对复杂工况下的电网运行需求,为新能源项目接入设计提供实践范式。未来可结合储能技术迭代、智能电网建设深化方案优化,持续提升风电与电网的协同运行水平,助力能源结构转型与“双碳”目标实现。

参考文献

- [1] 廖建敏, 阳雪兵, 李重桂, 等. 大型风电机组滑动式偏航系统制动过程机电耦合特性规律[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(18): 7669-7675.
- [2] 王富文, 熊伟, 邓燕飞, 等. 大型风电机组气动计算相似模型构建[J]. 新能源进展, 2023, 11(06): 572-576.
- [3] 张林伟, 蔡安民, 林伟荣, 等. 基于储能的大型风电机组极限载荷研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(09): 418-423.
- [4] 唐道贵, 柯耀, 张乾能, 等. 港口实景下大型风电机组工程化设计分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(01): 64-72.
- [5] 田德, 周臣凯, 唐世泽, 等. 基于自适应模型预测控制的大型风电机组MPPT方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(06): 501-508.