

风电场升压站无功补偿容量优化及电压稳定控制研究

王相敏 温 恺

内蒙古华电腾锡勒风力发电有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要: 本研究针对风电场升压站无功与电压强耦合的运行特性,系统梳理风电出力动态变化、主设备无功损耗引发电压波动的内在机理,明确无功补偿容量配置的核心影响因素与优化原则。针对传统固定容量补偿模式的配置缺陷,构建兼顾系统综合运行成本最小、电压波动幅度最小的多目标优化模型,设置多维度运行约束保障求解结果贴合现场实际工况。在此基础上设计全闭环动态无功电压控制策略,通过分级调节阈值与场景化参数适配完成控制效果优化,有效解决传统控制模式响应滞后、精度不足的共性问题,为风电场升压站实现全工况电压稳定运行提供可落地的技术路径。

关键词: 风电场; 升压站; 无功补偿; 容量优化; 电压稳定; 动态控制

引言: 随着国内风电并网装机规模持续扩大,风电出力的强随机波动性给升压站无功电压管控带来显著挑战,传统固定容量无功补偿模式已难以适配高比例风电接入后的复杂运行场景,电压越限、并网电能质量不达标等问题频发,直接影响风电场并网运行的安全性与经济性。在此背景下,开展风电场升压站无功补偿容量优化与电压稳定控制的系统性研究,精准匹配风电全工况运行特性完成补偿容量的量化配置,构建适配动态出力特征的闭环控制体系,对补齐当前风电场电压管控短板、支撑新能源电力系统稳定运行具备重要的工程实践价值。

1 风电场升压站无功电压特性分析

风电场升压站的无功功率流动与电压变化存在强耦合特性,风电出力的动态变化是引发升压站无功失衡、电压波动的根本原因。为精准开展无功补偿容量优化与电压控制研究,需明确风电机组、升压站主设备的无功电压运行特性,梳理电压波动与无功损耗的产生机理。

风电机组多采用异步发电机组与双馈发电机组,其中异步机组无独立励磁装置,运行过程中需要从电网吸收无功功率,且有功出力越大,无功吸收量越高,会直接造成升压站母线电压跌落;双馈机组虽具备一定的无功调节能力,但调节范围有限,且仅能适配小幅功率波动,无法应对大风速、风速骤变等极端工况下的无功突变。同时,升压站主变压器、输电线路等设备在电能传输过程中会产生固定无功损耗,且损耗大小随输电功率的变化动态改变,进一步加剧系统无功供需失衡^[1]。

在风电出力稳定工况下,升压站无功供需基本平

衡,母线电压可维持在额定区间;当风速随机波动导致风电场有功出力骤增或骤减时,系统无功消耗与无功储备出现瞬时失衡,若无及时有效的无功调节,母线电压会出现快速升降波动,不仅会降低并网电能质量,还会增加升压站设备的运行压力,长期波动工况下易引发设备老化、系统运行失稳等问题。由此可见,动态匹配风电出力特性的无功补偿配置与电压控制策略,是解决升压站电压稳定问题的核心关键。

2 升压站无功补偿容量影响因素及优化原则

2.1 无功补偿容量核心影响因素

风电场升压站无功补偿容量的合理配置受多重运行因素制约,各因素相互耦合,共同决定无功补偿的需求区间。(1)影响因素为风电出力波动特性,不同风速工况下,风电机组有功出力差异较大,对应的无功消耗、系统无功损耗呈现明显动态变化,直接决定无功补偿的动态需求量。风速稳定时段,风电出力平稳,系统无功损耗较小,所需补偿容量偏低;风速波动剧烈时段,风电出力震荡,系统无功供需差值增大,所需补偿容量显著提升。(2)升压站设备无功损耗特性,主变压器、高压输电线路、开关设备等核心设备的无功损耗是系统无功缺口的主要组成部分。变压器的无功损耗分为励磁损耗与绕组损耗,励磁损耗基本保持恒定,绕组损耗随输送功率的增大而升高;输电线路的无功损耗与线路传输功率、线路阻抗直接相关,输送功率越高,线路无功损耗越大,对应的无功补偿需求越高。(3)升压站母线电压允许波动区间是约束补偿容量的关键指标。电压波动阈值直接限制了无功调节的幅度,电

压控制精度要求越高,所需无功补偿容量的调节裕度越大,容量配置的精准度要求也越高。同时,无功补偿装置自身的调节范围、响应速度,也会对最优补偿容量的取值产生直接影响。

2.2 无功补偿容量优化基本原则

为实现升压站无功补偿系统稳定、经济、高效运行,容量优化配置需遵循多项核心原则。(1)为电压稳定优先原则,优化后的无功补偿容量需保证全工况下升压站母线电压始终维持在额定允许区间,有效平抑风电出力波动引发的电压震荡,杜绝电压越限、偏移超标等问题,保障并网系统稳定运行。(2)为运行经济最优原则,容量配置需规避容量过剩与容量不足两类问题。容量过盛会导致无功补偿装置长期轻载运行,增加设备投资成本与运行损耗,造成资源浪费;容量不足则无法有效补偿系统无功缺口,无法实现电压稳定控制。优化过程中需兼顾设备利用率与系统损耗,实现无功损耗与设备运维成本的综合最小化。(3)为动态适配原则,无功补偿容量需适配风电出力的随机性波动特征,兼顾稳态运行与暂态波动工况的补偿需求,保证小幅功率波动可精准微调、大幅功率波动可足额补偿,实现全工况无功供需动态平衡^[2]。

2.3 常规无功补偿配置存在的问题

当前风电场升压站常规无功补偿配置多采用固定容量配置模式,仅依据额定工况参数确定补偿容量,未考虑风电出力动态波动特性,存在明显配置缺陷。(1)固定容量补偿无法适配全工况运行需求,额定工况下配置的容量,在风电低出力时段出现补偿过剩,导致系统反向无功过剩,引发母线电压虚高;在风电高出力、风速骤变时段出现补偿不足,无法抵消系统无功损耗,造成电压跌落超标。(2)容量配置缺乏量化优化依据,常规配置多依托工程经验取值,未结合升压站设备损耗、风电出力特性进行精准计算,容量配置的精准性不足,系统无功损耗始终处于较高水平,运行经济性较差。其三,无功补偿与电压调节脱节,固定补偿模式无法根据电压实时波动情况动态调整补偿量,电压调节的实时性与精准性不足,难以抑制瞬时电压波动,电能质量控制效果较差^[3]。

3 升压站无功补偿容量优化模型构建

3.1 优化目标函数建立

结合升压站无功补偿优化原则,本文以系统综合运行成本最小、电压波动幅度最小为双重优化目标,构建无功补偿容量优化模型。模型兼顾系统无功损耗成本与

无功补偿设备运行损耗成本,同时约束母线电压波动范围,实现稳定性与经济性的双重最优。(1)建立系统无功损耗最小目标。升压站系统总无功损耗包含变压器损耗、输电线路损耗及机组运行无功损耗,通过量化各模块无功损耗,构建总损耗目标函数,通过优化补偿容量,最大限度降低系统有功、无功损耗,提升电能传输效率。(2)建立电压波动最优目标,以升压站母线电压实际值与额定值的偏差最小为优化目标,通过动态匹配无功补偿量,抑制电压波动,保证电压运行平稳性。为避免单一目标优化的局限性,本文采用多目标加权归一化处理方法,将无功损耗最优与电压波动最优目标融合,构建综合优化目标函数,兼顾系统运行稳定性与经济性。

3.2 模型约束条件设置

为保证优化模型求解结果贴合升压站实际运行工况,贴合设备运行特性,设置多重等式与不等式约束条件。(1)无功功率平衡约束,保证任意运行时刻,风电机组无功出力、无功补偿装置补偿量与系统无功损耗、电网无功交互量维持动态平衡,是模型求解的核心等式约束。(2)电压幅值约束,限定升压站高压母线、低压母线电压始终处于额定允许波动区间,杜绝电压越限问题,保障电压稳定运行基础条件。(3)无功补偿装置容量约束,结合补偿设备的额定调节范围,限定补偿容量的上下限值,保证优化结果符合设备实际运行能力,避免出现超出设备调节极限的无解情况。(4)机组出力约束,结合风电机组无功调节极限,限定机组无功出力区间,贴合风电机组实际运行特性,保证模型优化结果的实用性与有效性。

4 升压站电压稳定控制策略研究

4.1 电压稳定控制总体思路

针对风电出力随机波动引发的升压站母线电压动态偏移问题,结合前期优化得到的无功补偿容量配置边界,设计全链路动态闭环电压稳定控制策略。控制核心思路为:以升压站母线电压实时运行数据作为核心反馈依据,同步接入风电有功出力、系统全链路无功损耗的实时监测数据,动态调整各无功补偿装置的实时输出容量,实时平衡全系统的无功供需关系,从而平抑各类工况下的电压波动,维持母线电压长期稳定在合格区间。相较于传统固定补偿的开环控制模式,本次设计的控制策略完全摒弃静态定值调节方式,构建覆盖“全量监测-状态研判-精准调节-闭环反馈”的完整动态控制逻辑,通过持续采集升压站母线电压、主设备无功损耗、风电机组集群出力等核心运行参数,实时判断系统无功盈亏状

态与电压偏移程度,精准输出分级无功调节指令,全面适配风电出力的随机性、波动性运行特征,实现全场景下的电压精准稳定控制^[4]。

4.2 动态无功调节控制流程

(1) 依托升压站部署的高精度测控装置与同步采集单元,对全系统运行参数完成实时同步采集,覆盖母线三相电压全时段幅值、电压动态波动速率、风电场并网点总有功出力、全站输变电链路总无功损耗、各类型无功补偿装置当前实时输出容量等核心运行维度,完成升压站全工况运行状态的全域实时感知,所有采集数据均经过有效性校验与异常值剔除,避免无效数据进入后续控制环节。(2) 将经过预处理的实时运行参数导入预先搭建的无功优化计算模型,结合当前电网调度侧的电压约束边界,精准计算对应工况下系统所需的最优无功补偿需求量,将该目标值与全站当前实际运行的总无功补偿容量做差值运算,得到精准的实时无功调节偏差量。(3) 根据无功调节偏差量的正负属性与量级,向各无功补偿执行单元输出分级调节指令,控制不同类型的无功设备协同完成容量增减操作。当母线电压处于偏低区间、系统存在正向无功缺口时,逐步提升无功补偿装置的输出容量,向系统侧注入动态无功,补充链路无功消耗,抬升母线运行电压;当母线电压处于偏高区间、系统出现无功过剩状态时,有序降低无功补偿装置的输出容量,吸收系统侧多余的冗余无功,抑制母线电压虚高。控制流程末端同步接入调节效果反馈链路,实时监测动作完成后的母线电压与全站无功运行状态,形成完整闭环控制逻辑,持续迭代修正后续调节量,保障母线电压始终稳定在规程要求的最优运行区间内。

4.3 电压稳定控制效果优化

为进一步提升电压控制的实时响应能力与运行稳定性,规避风电出力随机骤变过程中引发的电压超调、系统震荡等异常工况,对原有闭环控制策略开展针对性优化改进。在传统电压-无功控制逻辑框架内引入分级偏差调节阈值与动态调节速率限制机制,当系统检测到小幅电压偏差时,自动切换至精细化微调运行模式,以低梯度的无功输出调整量完成电压校正,避免设备频繁往复动作造成的机械损耗与器件老化。当系统识别到大幅电

压偏差时,自动触发快速调节模式,按照预设的安全梯度完成无功资源的定向调度,大幅缩短电压恢复至合格区间的响应时长,同步实现控制精度与响应速度的双向平衡。同时结合不同风电出力区间的运行特性,将全站运行状态划分为稳态运行、小幅波动、大幅波动三类典型场景,针对每类场景的扰动特征适配差异化的无功调节参数组,实现全场景下的精准适配控制。通过该优化路径,可有效解决传统控制策略普遍存在的响应滞后、调节精度不足的共性问题,大幅提升升压站母线电压的全工况抗扰动能力,保证不同出力波动场景下电压运行的稳定性与过渡过程平滑性^[5]。

结束语

本研究从风电场升压站无功电压的耦合特性出发,完成了从机理分析、容量优化建模到闭环控制策略设计的全链条技术梳理,形成了一套适配风电随机波动特性的无功电压管控体系。该体系跳出了传统经验式固定补偿的局限,通过多目标优化实现了运行稳定性与经济性的双向平衡,场景化分级控制机制也进一步提升了极端工况下的电压抗扰动能力。后续随着风电场并网管控要求的持续升级,该优化体系可进一步结合场站侧储能资源完成协同调控拓展,为高比例新能源接入场景下的升压站电压稳定运行提供更完善的技术支撑。

参考文献

- [1] 丁崎峰. 风电升压站变电对电力系统稳定性的影响及控制策略[J]. 光源与照明,2025(1):225-227.
- [2] 曾通. 基于风电升压站变电的电力系统稳定性分析[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(6):060-063.
- [3] 陆明璇,梁毅,张晓天,芦思晨,夏世威,李海洋. 考虑风电场接入的电力系统暂态稳定约束网源协同规划方法[J]. 高压电器,2025,61(5):237-246.
- [4] 张海洋. 风力发电并网稳定性分析及提升方法研究[J]. 电力设备管理,2025(9):65-67.
- [5] 吴炜,刘玉飞,孙炎平,张勇军. 海上风电弱电网并网稳定性分析及关键技术综述[J]. 南方能源建设,2025,12(6):53-68.