

风电场并网升压站电压与无功调控策略研究

吕 玮 王 蒙

内蒙古华电辉腾锡勒风力发电有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：针对风电出力随机性引发升压站电压无功波动、传统调控策略响应滞后、多设备协同性差、调控精度不足等并网运行问题，本文分析风电场升压站运行机理与无功电压扰动特性，剖析传统调控技术的核心缺陷。以电压稳定、无功平衡、损耗最优为目标，搭建多设备协同动态调控模型，结合差异化工况设计自适应调控方案，优化改进粒子群算法。研究可有效平抑风电并网扰动，提升电能质量与场站运行稳定性。

关键词：风电场并网；升压站电压；无功调控策略

引言：双碳目标下风电并网规模持续扩容，已成为新能源发电核心形式。风能固有的间歇性与随机性，导致风电场升压站电压、无功功率频繁波动，极易引发电压偏移、无功震荡等问题，严重威胁电网安全稳定运行。传统调控模式难以适配风电复杂工况，存在调控滞后、协同性弱等诸多弊端。基于此，本文聚焦升压站电压无功调控难题，优化新型调控策略，为风电高效、合规并网提供技术支撑。

1 风电场并网升压站运行机理与无功电压特性分析

1.1 风电场升压站系统架构与工作原理

(1) 升压站主接线方式与核心设备组成。风电场并网升压站多采用单母线或单母线分段接线方式，结构简洁且适配风电分散并网特性。核心设备主要包括主变压器、高压开关柜、无功补偿装置、隔离开关及继电保护装置等，各类设备协同构成电能转换、调控与传输的核心载体，保障升压站稳定运行。(2) 风电能量汇集、升压与并网传输流程。各风机机组将风能转化为电能，以低压交流电形式汇集至场内集电线路，经线路输送至升压站后，由主变压器将低压电能升至电网标准电压等级，再通过高压配电装置、输电线路完成并网传输，实现风电电能向公共电网的输送。(3) 升压站电压无功调控核心设备功能原理。站内无功补偿装置为核心调控设备，常见的有 SVG、电容器组等。设备可实时监测母线电压与电网无功供需状态，通过动态发出或吸收无功功率，补偿风电系统无功缺额，抑制电压偏移，维持并网电压与无功平衡。

1.2 风电并网电压与无功波动特性

(1) 风速随机性引发的出力波动特性。风能具有间歇性、随机性与波动性特征，风速的瞬时变化、昼夜及

季节波动，会直接导致风机转子转速不稳定，使得风机有功出力持续动态波动，无规律的出力变化是风电并网扰动的核心源头。(2) 风电出力波动对升压站母线电压的影响机制。风机出力变化会改变系统有功、无功潮流分布，出力骤增时线路输送功率增大，线路压降升高，引发母线电压跌落；出力骤降时潮流减小、压降降低，母线电压抬升，造成电压持续波动偏移额定值^[1]。(3) 并网工况变化下无功功率波动规律。风电并网工况切换过程中，风机励磁系统工作状态随之改变，系统无功损耗动态变化。电网负荷高峰期风电无功需求大，无功缺口明显；负荷低谷期系统无功过剩，易出现无功倒送，呈现阶段性无序波动特征。

1.3 升压站电压无功扰动影响因素分析

(1) 内部设备参数偏差对电压无功的影响。主变变比偏差、线路阻抗参数偏移及无功补偿设备容量误差等内部参数偏差，会破坏系统无功匹配精度，导致电压调控偏差，小幅参数偏移会持续累积，加剧电压无功波动问题。(2) 外部电网负荷波动、故障扰动的影响。电网日常负荷增减会改变系统整体无功供需平衡，引发升压站母线电压小幅波动；电网短路、线路跳闸等故障会造成潮流突变，带来剧烈的电压无功扰动，严重时引发电压震荡。(3) 风电低出力、满发等极端工况的扰动特征。风电低出力工况下系统无功损耗极低，易出现无功过剩、电压偏高问题；满发工况下风电出力达到峰值，线路潮流饱和，无功损耗剧增，电压跌落显著，两类极端工况会放大电压无功扰动幅度。

2 风电场升压站传统无功电压调控技术及缺陷分析

2.1 常规无功电压调控设备调控原理

(1) 电容器、电抗器分组投切调控原理。并联电容

器与电抗器是升压站基础无源调控设备,采用分组投切的粗放式调控模式。电容器组投入运行时可向电网输出容性无功,补偿风电系统无功损耗,提升母线电压;电抗器则吸收电网过剩的感性无功,抑制电压过压问题。设备通过断路器完成分组投切操作,仅能实现阶梯式、档位化的无功调节,无法实现连续平滑调控。(2)有载调压变压器电压调节机制。有载调压变压器可在带负荷运行状态下,通过分接开关切换绕组匝数,改变变压器变比,进而调节升压站高低压侧母线电压。该设备以电压幅值为调节目标,通过机械档位调整抵消线路压降偏差,稳定并网电压基准,是风电升压站常态化电压调控的核心机械设备^[2]。(3)SVG、SVC 动态无功补偿设备工作原理。SVC 静止无功补偿器依托晶闸管控制电抗器、电容器组,根据电网无功偏差快速调整无功输出,实现动态补偿;SVG 静止无功发生器基于电力电子逆变技术,可快速、连续发出或吸收感性、容性无功,响应速度远优于传统无源设备,能够适配小幅、快速的电网无功波动,是传统动态调控的核心设备。

2.2 传统调控策略运行模式

(1)基于固定阈值的分段调控模式。传统调控系统预设固定的电压、无功阈值区间,当母线运行参数超出阈值范围时,系统触发对应调控动作,参数回归区间后停止调控。该模式调控逻辑固定,仅针对稳态工况设计,无法根据风电出力波动特性自适应调整调控阈值与策略。(2)人工辅助干预的被动调控模式。在风电极端工况、电网波动异常等复杂场景下,自动调控系统往往无法适配工况变化,需依靠运维人员人工判断无功供需状态,手动投切设备、调整变压器档位。整体调控具备极强被动性,依赖人工经验,滞后性与主观性问题突出。(3)单一设备独立调控的运行方式。传统调控模式下,电容器、调压变压器、SVG 等各类调控设备相互独立运行,各司其职,设备间无联动协同逻辑。各设备仅依据自身监测参数单独执行调控任务,缺乏全局潮流统筹调控能力,难以适配复杂并网工况。

2.3 传统调控策略存在的核心缺陷

(1)调控响应滞后,无法适配风电随机波动。电容器、变压器等设备依靠机械结构动作,响应速度慢、调节间隔长,固定阈值调控模式无法跟随风速随机变化引发的短时出力波动。面对风电频繁、快速的无功电压扰动,传统调控无法实时匹配供需变化,易出现电压动态偏移问题。(2)多设备协同性差,易出现电压无功震荡。各设备独立调控、缺乏联动配合,易出现调控动作冲突、过度调节的问题。例如电容器投切与 SVG 动态

补偿时序错位,会造成系统无功反复增减,引发母线电压震荡、无功波动紊乱,严重影响风电场并网运行稳定性。(3)调控精度低,电网并网合规性难以保障。传统阶梯式调控无法实现无功电压的精细化微调,工况小幅波动时难以精准修正参数偏差。同时人工干预模式容错率低,易出现调控偏差,导致并网电压、功率因数难以持续满足电网并网标准,增加并网考核违规风险。

3 风电场并网升压站电压与无功调控策略构建

3.1 调控优化目标与约束条件设定

(1)核心优化目标:电压稳定、无功平衡、损耗最优。本次调控策略以风电场并网安全稳定运行为核心,确立三大优化目标。电压稳定目标旨在将升压站母线电压始终维持在额定允许区间,抑制风电波动引发的电压骤升骤降问题;无功平衡目标实现全网无功就地分层平衡,避免远距离无功输送与无功倒送现象;损耗最优目标依托精准潮流调控,降低主变压器、集电线路的有功损耗与无功损耗,提升风电场整体发电运行效率与经济效益。(2)电网电压偏差、无功功率约束条件。结合电网并网规范要求,设定严格的电气参数约束,并网母线电压偏差需控制在额定电压的 $\pm 5\%$ 范围内,保障并网电能质量。同时约束风电场并网功率因数维持在电网规定区间,无功功率输出与吸收能力需匹配场站设备额定参数,杜绝无功超发、欠发等违规工况,规避电网并网考核风险,满足电力系统并网运行标准^[3]。(3)调控设备动作次数、运行安全约束。为延长设备使用寿命、降低故障概率,对电容器、电抗器、有载调压变压器等频繁动作设备设置每日最大投切次数与档位调节次数约束,避免设备频繁启停造成机械磨损。同时增设设备运行安全约束,调控过程中需规避设备过压、过流、过载等异常工况,确保所有调控动作均在设备安全运行阈值内完成。

3.2 多设备协同动态无功电压调控模型

(1)基于风电出力预测的前置预判调控机制。依托短期、超短期风电出力预测数据,构建前置预判调控机制,打破传统被动调控模式。通过分析未来 15 分钟至 1 小时的风速、出力变化趋势,预判升压站电压、无功波动趋势与波动幅度,提前制定调控预案。在风电出力骤增、骤降工况到来前,提前微调无功补偿设备出力与变压器档位,从源头削弱功率波动带来的扰动,实现“预判-前置-调控”的主动调控模式。(2)SVG 与电容电抗器分层协同调控模型。针对两类设备调控特性差异,搭建分层协同调控模型,实现优势互补。将响应速度快、

可连续平滑调节的 SVG 作为底层主力调控设备,负责平滑风电短时、高频的小幅无功电压波动,保障稳态工况下参数精准稳定。将电容电抗器组作为上层辅助调控设备,承担大幅度、持续性的无功缺额补偿,解决风电满发、低出力等极端工况下的大规模无功失衡问题,规避 SVG 长期满负荷运行,提升调控稳定性与经济性。(3) 有载调压变压器辅助调压优化逻辑。将有载调压变压器定位为辅助调压设备,优化其调控逻辑,避免主次调控冲突。日常稳态运行时,优先通过无功补偿设备调节电压,仅当母线电压出现持续性大幅偏移、无功设备调节达到容量上限时,才触发变压器档位调节。同时设置档位调节延时闭锁逻辑,规避瞬时波动引发的频繁调档,配合无功设备完成电压兜底调控,形成无功细调、电压粗调的协同格局^[4]。

3.3 自适应实时调控策略设计

(1) 不同风电出力工况的差异化调控方案。结合风电运行全工况特征,制定差异化自适应调控方案。在风电低出力工况,系统无功损耗小,优先投入电抗器吸收过剩无功,抑制母线过压;在风电中出力稳态工况,依托 SVG 精细化调节,维持电压与无功精准平衡;在风电满发高出力工况,启用电容电抗器组大规模补偿无功损耗,配合 SVG 动态稳压,解决电压跌落问题,适配不同工况的扰动特征。(2) 电网扰动下快速响应调控策略。针对电网负荷突变、线路扰动、瞬时故障等异常工况,设计快速响应调控机制。当监测到电网电压、无功突变时,即刻闭锁人工干预与慢速设备调控指令,启动 SVG 毫秒级动态补偿,快速抵消电网扰动带来的无功偏差,抑制电压剧烈波动。待电网工况恢复稳定后,再逐步恢复常规分层调控模式,保障扰动期间并网系统安全^[5]。(3) 稳态运行下精细化无功优化调控策略。风电场稳态运行时,无大幅功率与电网扰动,以精细化降耗、精准稳压为核心。通过实时采集母线电压、系统潮流、设备运行参数,动态优化各无功设备出力配比,在满足并网标准的前提下,最小化线路与变压器损耗。同时修正设备调控偏差,消除阶梯式投切带来的参数波动,实现电压无功的平滑、精准调控,提升并网运行质量。

3.4 调控策略算法优化

(1) 改进粒子群优化算法适配调控模型。针对传统粒子群算法易局部最优、适配性差的问题,对算法进行改进优化,适配多设备协同调控模型。通过动态调整算法惯性权重与学习因子,优化粒子迭代搜索机制,以电压稳定、无功平衡、损耗最小为目标函数,将设备动作次数、出力限额等作为约束条件,精准求解各调控设备最优出力配比,解决多设备协同调控的优化难题。(2) 算法收敛性与调控实时性优化设计。为满足风电实时调控需求,对算法性能进行双重优化。一方面优化迭代终止条件,精简冗余迭代步骤,提升算法收敛速度,避免迭代耗时过长导致调控滞后;另一方面简化复杂工况下的计算维度,优先保留核心调控参数计算,保障算法可在毫秒级完成最优策略求解。同时通过数据预处理降低环境干扰,提升算法稳定性,确保调控策略实时、精准落地。

结束语

本文系统分析风电场升压站电压无功扰动诱因与传统调控短板,构建多设备协同自适应调控体系,通过工况差异化调控与算法优化,解决了风电并网电压无功波动、调控精度不足等核心问题。所提策略可实现无功电压精细化、主动化调控,有效降低并网违规风险与设备损耗。后续可结合复杂电网故障场景优化算法,进一步提升调控系统的通用性与可靠性。

参考文献

- [1] 王渝红,宋雨妍,廖建权,等.风电电压主动支撑技术现状与发展趋势[J].电网技术,2023,47(8):313-320.
- [2] 周莹坤,孙华东,徐式蕴,等.提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J].电网技术,2022,46(10):384-389.
- [3] 裴凯,付雨宸,朱江涛.风光储新能源电站电压异常事件分析及无功协调控制策略研究[J].电气应用,2025,44(10):89-96.
- [4] 王磊,张鑫,李恒.高渗透率风电并网升压站无功电压分层协调控制策略[J].电力工程技术,2024,43(2):76-83.
- [5] 刘轩,王健,杨明.构网型风机参与送端升压站电压无功调控策略[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(1):56-63.