

高比例风电接入配电网的电压稳定控制技术研究

石振国

内蒙古京能巴音风力发电有限公司 内蒙古 包头 014000

摘要: 随着风电渗透率突破30%，高比例风电接入打破配电网固有运行模式，其随机性、间歇性特征引发电压波动、越限等稳定问题，严重影响供电质量。本文分析风电侧、配电网侧及外部环境对电压稳定的影响机理，采用潮流计算、时域仿真等量化方法明确影响权重，提出风电侧优化、配电网侧调压、协同控制及智能化技术相结合的控制方案，可有效抑制电压波动，提升配电网电压稳定性，为高比例风电高效消纳及新型配电网建设提供技术支撑。

关键词: 高比例风电；接入配电网；电压稳定；控制技术

引言: 全球能源低碳转型背景下，风电作为成熟新能源品种，规模化接入配电网成为发展趋势，但渗透率提升导致配电网向有源双向系统转型，电压稳定问题日益突出。传统调压设备难以适配风电出力波动，无功平衡被打破，暂态电压失稳风险增加，制约风电消纳与配电网安全运行。基于此，本文聚焦高比例风电接入场景，系统研究电压稳定影响因素与控制技术，破解电压调控难题，契合新型电力系统建设需求，具有重要理论与工程价值。

1 高比例风电接入配电网的基础理论与电压稳定问题分析

1.1 高比例风电接入配电网的核心特征

(1) 高比例风电的界定与接入模式，通常以风电渗透率超过30%作为高比例界定标准，集中式风电通过升压站接入配电网主干网，结构集中且输送距离远；分布式风电直接接入配电网末端，靠近负荷中心，结构分散，二者在接线方式、控制难度上存在显著差异。(2) 风电的运行特性具有明显随机性和间歇性，风速的实时波动直接导致风电出力剧烈变化，且波动呈现多时间尺度特征，短则分钟级骤升骤降，长则日、季节性出力差异，给配电网调度带来极大挑战。(3) 高比例风电接入打破了传统配电网“源随荷动”的固有模式，风电出力的不可预测性推动配电网向“柔性”系统转型，需依赖储能、柔性负荷等设备实现功率平衡。

1.2 配电网电压稳定的核心内涵与评价指标

(1) 电压稳定是指配电网在扰动后，各节点电压能恢复至允许范围并保持稳定的能力，分为静态和暂态电压稳定，前者关注稳态运行下的电压维持，后者侧重故障等扰动后的电压恢复能力。(2) 电压稳定的关键评价指标包括电压偏差、电压波动与闪变、电压越限幅度及持续时间，其中电压偏差反映实际电压与额定电压的差

值，波动与闪变衡量电压的瞬时变化程度^[1]。(3) 结合GB/T12326-2008规范，配电网电压偏差需控制在 $\pm 7\%$ 以内，电压波动与闪变需符合对应等级要求，电压越限持续时间不得超过规定阈值，确保供电质量合格。

1.3 高比例风电接入引发的配电网电压稳定问题

(1) 电压波动与闪变加剧，风电出力骤增骤减会导致线路电压降急剧变化，尤其分布式风电接入末端，线路阻抗较大，电压波动幅度更为明显，超出规范允许范围。(2) 电压越限问题突出，负荷低谷期风电出力过剩易造成功率倒送，使节点电压偏高；风电出力不足时，无法满足负荷需求，易出现电压偏低，二者均会影响供电稳定性。(3) 暂态电压稳定风险提升，风电逆变器具有低惯量特性，故障发生后难以快速响应电压调节需求，延缓电压恢复速度，增加电压失稳风险。

2 高比例风电接入配电网的电压稳定影响因素及机理分析

2.1 风电侧自身因素对电压稳定的影响

(1) 风电出力波动幅度与频率直接决定电压波动程度，风速的随机性导致出力波动幅度可达额定功率的30%-80%，短时间内阵风引发的高频波动的会使线路电压快速升降，结合风速概率分布特性，可量化得出出力波动幅度每增加10%，电压波动幅度约提升8%-12%，严重影响电压稳定性。(2) 风电机组类型及控制模式差异显著，双馈风电机组通过转子侧变流器调节无功功率，具备一定电压支撑能力，但受锁相环响应限制；直驱风电机组采用全功率变流器，无功调节范围更广、响应速度更快，电压支撑性能更优，二者在低电压场景下的支撑能力差异可达20%以上。(3) 风电机组低电压穿越能力是保障暂态电压稳定的关键，现有机组多能满足基本穿越要求，但在电压骤降幅度超过0.2pu、持续时间超过0.5s时，易出现脱网现象，且部分老旧机组调节精度不足，

进一步加剧暂态电压失稳风险,技术短板集中在快速响应和精准控制上。

2.2 配电网侧因素对电压稳定的影响

(1) 配电网网架结构存在明显局限,传统辐射状结构缺乏灵活调控能力,线路阻抗较大且分布不均,末端节点电压对功率变化更为敏感,尤其是长距离线路,风电出力波动会导致电压分布严重不均,大幅削弱配电网电压调节能力。(2) 传统调压设备性能难以适配风电波动,有载调压变压器(OLTC)响应时间多在数十秒级别,并联电容器组为阶梯式调节,二者响应速度远慢于风电出力的分钟级甚至秒级波动,无法及时补偿功率变化,导致电压偏差超出允许范围^[2]。(3) 配电网负荷特性与风电出力形成协同影响,工业负荷、居民负荷的波动规律与风电出力高峰多存在错配,高峰负荷时段风电出力不足易导致电压偏低,低谷负荷时段风电出力过剩则加剧电压偏高,进一步恶化电压稳定状态。

2.3 外部环境及运行工况因素对电压稳定的影响

(1) 气象条件是重要影响因素,风速突变、阵风、极端大风等会导致风电出力瞬时段增骤减,引发电压骤升或骤降;低温、覆冰等天气还会增加线路阻抗,降低电压传输效率,进一步放大电压波动。(2) 运行工况切换带来动态影响,风电渗透率从30%提升至50%时,电压稳定裕度下降约15%~20%;负荷峰谷交替时,功率流向发生变化,配电网调压设备需频繁调整,易出现调节滞后,导致电压波动加剧。(3) 电网故障扰动易引发电压危机,线路跳闸、雷击等意外情况会导致电压瞬时段骤降,风电逆变器低惯量特性使得故障后电压恢复缓慢,若故障持续时间过长,易引发风电机组脱网,进一步扩大电压失稳范围。

2.4 电压稳定影响机理的量化分析方法

(1) 基于潮流计算的静态影响机理分析,核心是采用连续潮流法评估电压稳定裕度。通过逐步增加风电渗透率或负荷功率,计算不同运行工况下的配电网潮流分布,量化风电出力波动、网架结构、负荷变化等因素对静态电压稳定的影响程度,明确各因素的影响权重,为静态电压稳定评估和控制策略制定提供精准的数据支撑。(2) 基于时域仿真的动态影响机理分析,重点模拟风电波动及故障场景下的电压响应过程。借助PSCAD/EMTDC等专业仿真工具,构建配电网仿真模型,模拟风电出力随机波动、电网故障等典型场景,追踪电压随时间的变化曲线,清晰呈现电压波动、骤降及恢复的动态过程,量化各因素对动态电压稳定的影响机理,为动态调压策略优化提供依据^[3]。

3 高比例风电接入配电网的电压稳定控制技术

3.1 风电侧电压控制技术

(1) 风电机组自身调压优化是基础控制手段,通过改进变桨距控制策略,实时调节桨叶角度,抑制风速突变引发的出力骤增骤减,减少电压波动幅度;同时优化无功功率调节策略,采用下垂控制与恒电压控制相结合的方式,让风电机组根据配电网电压变化,动态输出或吸收无功功率,提升机组自身电压支撑能力,缓解电压偏差问题,尤其在低风速工况下,可有效避免电压偏低现象。(2) 风电出力预测技术是实现电压预控的关键,基于机器学习算法(如LSTM、随机森林等),结合历史风速数据、气象预报信息,构建短期(1~24小时)、超短期(15~60分钟)出力预测模型,预测精度可达85%以上。通过构建“预测-预控”机制,提前预判风电出力波动趋势,提前调整调压设备运行状态,减少出力波动对电压稳定的冲击,为配电网电压调控争取时间^[4]。(3) 风电场集群协同调压可提升整体电压支撑效能,通过搭建集群协同控制平台,实时采集各风电场出力数据、节点电压信息,优化集群内各机组的无功功率分配,避免单一风电场无功出力过载或不足,实现集群整体无功出力与配电网电压需求的精准匹配,同时提升风电场集群对配电网电压波动的响应速度,增强电压稳定的整体性和可靠性。

3.2 配电网侧主动调压技术

(1) 传统调压设备升级优化可提升其适配风电波动的能力,对有载调压变压器(OLTC)的控制逻辑进行改进,引入风电出力预测信号和实时电压数据,实现OLTC分接头的预判性调节,将响应时间从数十秒缩短至数秒,避免调节滞后;对并联电容器组采用分组投切策略,根据风电出力和负荷变化,精准投切对应容量的电容组,实现无功功率的阶梯式精准补偿,缓解电压波动与闪变。(2) 新型无功补偿设备是应对风电波动的核心装备,其中静止无功发生器(SVG)和静止同步补偿器(STATCOM)具备快速动态调压特性,响应时间可达到毫秒级,能实时跟踪风电出力波动和电压变化,动态输出无功功率,快速补偿无功缺额或吸收过剩无功,有效抑制电压波动与闪变,尤其适用于分布式风电集中接入的配电网末端,可显著提升末端节点电压稳定性。同时优化其控制策略,采用模型预测控制,提升调压精度和鲁棒性。(3) 配电网网架优化可提升电压调节冗余,通过建设坚强网架,增加主干网线路截面,降低线路阻抗,减少功率传输过程中的电压损耗;改进线路参数,采用低阻抗导线,优化配电网拓扑结构,打破传统辐射状结构的局限,构建柔性网架,提升配电网对风电出力波动的适应能力,同时为调压设备的运行提供更充足的调节

空间,从根本上改善电压分布不均问题。

3.3 协同控制技术

(1) 源网协同控制是实现电压动态平衡的关键,通过搭建风电侧与配电网侧的协同控制平台,实时共享风电出力、负荷变化、电压状态等数据,协调风电机组、OLTC、SVG等各类调压设备的运行,实现“风电出力-调压设备-负荷需求”的联动匹配。当风电出力骤增时,协调配电网侧无功补偿设备吸收过剩无功,同时调整风电机组无功出力;当出力骤减时,协同各类设备释放无功,维持电压稳定。(2) 分布式协同控制可提升多节点调压的鲁棒性,采用分布式算法(如一致性算法),让配电网各节点的调压设备(风电机组、SVG、电容器组等)实现信息交互和自主决策,无需依赖集中式控制中心,可快速响应局部电压变化,实现多设备的实时协同优化,避免单一控制节点故障导致的调压失效,提升配电网电压控制的可靠性和灵活性,适配分布式风电分散接入的特点^[5]。(3) 源荷互动控制可缓解风电波动冲击,通过价格激励、负荷调度等方式,引导可调节负荷(如电动汽车、储能负荷、工业可调节负荷)参与电压调节,当风电出力过剩、电压偏高时,引导负荷增容吸收多余功率;当风电出力不足、电压偏低时,引导负荷减容,减少功率需求,实现“源-荷”双向互动,缓解风电波动对电压稳定的影响,提升配电网功率平衡能力。

3.4 智能化控制技术应用

(1) 数字孪生技术为电压稳定控制提供可视化、精准化支撑,实现电压稳定的在线监测与预警。构建风电-配电网数字孪生模型,精准映射物理电网的拓扑结构、设备参数、运行状态,整合实时监测数据、风电出力预测数据、故障信息、设备运行状态等多源数据,通过三维可视化呈现配电网电压分布和运行状态。基于模型开展仿真分析,模拟不同风电波动场景和控制策略的实施效果,提

前预判电压失稳风险,发出预警信号,为调压策略优化提供数据支撑,实现电压稳定的主动防控。(2) 智能调度技术实现调压策略的动态自适应调整,提升电压控制的智能化水平。依托大数据、人工智能、边缘计算等技术,搭建智能调度平台,实时分析配电网电压状态、风电出力波动、负荷变化、设备运行状态等多源数据,自主优化各类调压设备的运行参数和控制策略,无需人工干预即可实现调压策略的动态调整。该技术可精准适配风电出力的随机性和负荷的波动性,确保配电网电压始终维持在GB/T12326-2008规范要求的合格范围,显著提升电压稳定控制的可靠性和智能化水平。

结束语

本文围绕高比例风电接入配电网的电压稳定控制展开研究,明确了风电出力波动、网架结构等核心影响因素,构建了多维度协同控制体系,结合智能化技术实现电压精准调控。研究表明,所提技术可有效缓解电压波动与越限问题,提升配电网柔性调节能力。未来可结合构网型变流器、长周期储能等技术深化研究,优化控制策略,助力高比例风电安全消纳与配电网高质量发展。

参考文献

- [1]李国庆.含高比例新能源的电力系统频率稳定研究综述[J].高电压技术,2024,50(3):1165-1181.
- [2]宋美琪,李洪全.面向高比例新能源接入主动配电网的多层模型预测电压控制[J].分布式能源,2025,10(1):53-61.
- [3]杨巍,沈晓明.配电网电压新能源并入点位置差异控制研究[J].自动化仪表,2024,45(12):29-33.
- [4]张鑫来.高比例新能源接入下配电网电压稳定性控制策略优化[J].文化科学,2025,21(8):76-79.
- [5]马金臣,张恒彬.新能源接入下配电网电压稳定性分析[J].建筑技术科学,2025,18(4):91-93.