

# 高比例分布式电源接入下的配电网电压波动抑制策略研究

鲁申奇

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 210001)

**摘要** 本文以电压波动抑制为核心目标, 从主动控制与被动补偿两大维度系统分析分布式电源有功/无功协调控制、储能系统协同调度、柔性负荷响应及无功补偿设备配置等关键策略的技术内核与适用场景, 进而构建多策略分层协同控制架构, 明确各层级控制目标与协同机制。同时, 探讨策略应用中的成本优化、兼容性提升及智能化升级等核心挑战。研究结果表明, 单一抑制策略难以适配复杂波动场景, 通过主动控制与被动补偿的有机协同, 结合智能化调度手段, 可实现电压波动的精准高效抑制, 为配电网安全稳定运行提供技术参考。

**关键词** 分布式电源; 配电网; 电压波动; 主动控制; 被动补偿

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.006

## 0 引言

配电网作为能源供给末端, 其电压稳定性直接影响用户用电体验与电力系统安全运行。高比例分布式电源接入改变传统配电网潮流分布特性, 其出力的随机性、间歇性与波动性, 易诱发节点电压偏移、闪变等电压问题。电压波动抑制的核心是通过可控资源调节或补偿设备配置, 抵消分布式电源接入带来的电压扰动, 维持节点电压在允许范围。本文聚焦各类抑制策略的技术特性、适用场景及协同优化路径, 为配电网电压控制提供理论与实践参考。

## 1 配电网电压波动抑制策略分类与核心原理

### 1.1 主动控制策略

主动控制策略通过对配电网中可控资源的运行状态进行主动调节, 从源头上削弱电压波动的产生与传播, 具有灵活性强、调节范围广的特点, 主要包括分布式电源协调控制、储能系统调度与柔性负荷响应三类。

1. 分布式电源有功/无功协调控制。分布式电源具备有功与无功调节能力, 其协调控制核心在于保障电源出力效率的同时, 通过动态调整有功输出平滑度与无功补偿容量, 实现电压波动抑制。(1) 有功功率平滑控制方面, 引入出力预测与滚动优化机制, 结合短期功率波动阈值约束, 对有功输出实施限幅与平抑, 避免出力突变引发电压冲击; 超阈值波动分量通过与储能设备联动, 由储能系统吸收或释放功率抵消, 确

保注入配电网的有功功率连续稳定。(2) 无功功率就地补偿控制依托逆变器无功调节潜力, 根据节点电压偏差实时调整无功输出, 通过“就近补偿”减少线路无功传输损耗, 降低电压降落。策略采用电压一无功下垂控制模式, 分布式电源可根据节点电压变化自动调整无功出力, 实现分散式电压调节, 无需全局通信, 响应迅速且可靠性高。

2. 储能系统协同控制。储能系统作为配电网“功率缓冲器”, 其协同控制核心通过灵活充放电调度, 平抑分布式电源出力波动与负荷变化引发的电压扰动。依据波动频率与幅度差异, 储能系统采用差异化控制模式: 针对光伏秒级出力等高频小幅波动, 依托电化学储能或飞轮储能的瞬时充放电特性, 实施快速响应控制, 迅速抵消功率差值以维持电压稳定; 针对风电小时级出力等低频大幅波动, 结合日内出力预测制定充放电计划, 采用容量优化控制, 在出力高峰吸收多余功率、低谷释放补充, 保障电压中长期稳定。多类型储能互补协同可进一步提升抑制效果: 超级电容器响应迅速, 适配高频波动平抑; 锂电池储能容量充足, 适配低频波动应对。二者组合应用, 既能兼顾响应速度与调节容量, 又能降低单一储能系统的配置成本与运行损耗。

3. 柔性负荷调度控制。柔性负荷具备可平移、可中断或可调节特性, 其调度控制策略通过聚合调控, 将分散柔性负荷转化为配电网虚拟调节资源, 参与电

作者简介: 鲁申奇 (1993-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

压波动抑制。该策略核心在于构建需求响应型负荷聚合机制：通过电价激励、合同约定等方式，引导用户调整负荷运行时段或功率消耗水平，实现负荷与分布式电源出力的时空匹配。例如：分布式电源出力高峰、电压偏高时，启动电动汽车集中充电或空调负荷升档，提升负荷吸收功率以降低节点电压；出力低谷、电压偏低时，暂停非关键负荷或降低负荷功率，缓解电压降落<sup>[1]</sup>。为提升调度精度，可引入负荷聚合商模式，对海量分散柔性负荷实施集群控制，通过标准化接口与配电网调度中心交互信息，依据电压控制指令动态调整负荷聚合容量，实现电压波动的精细化抑制。

## 1.2 被动补偿策略

被动补偿策略通过在配电网关键节点配置无功补偿设备，实时抵消分布式电源接入带来的无功冲击，维持系统无功功率平衡，进而抑制电压波动。

1. 静止无功补偿设备控制。静止无功补偿设备以电力电子器件为核心，兼具响应快速、调节精准的特性，主要包括静止无功补偿器（SVC）与静止同步补偿器（STATCOM）两类：（1）SVC基于晶闸管控制电抗器（TCR）与投切电容器（TSC）的组合结构，通过调节晶闸管触发角改变电抗器等效阻抗，实现无功功率连续调节，可在感性与容性区间灵活切换，适用于中低压配网中分布式电源出力中等频率波动场景。其结构成熟、成本适中，但响应速度受晶闸管开关特性限制（通常为毫秒级），调节过程中可能产生少量谐波。（2）STATCOM采用电压源型变换器（VSC）结构，通过控制变换器输出电压与系统电压的幅值及相位差，实现无功功率快速连续调节，响应速度达微秒级，且谐波污染小、调节范围广，可适配分布式电源出力快速波动。同时，STATCOM具备低电压穿越能力，系统电压跌落时仍能维持无功输出，有效提升配电网故障恢复能力。

2. 分布式电容器组补偿。分布式电容器组于配电网分支线路或用户侧部署，通过固定容量或分组投切式配置输出容性无功功率，抵消分布式电源的感性无功损耗，抑制线路电压降落。其核心优化方向为部署位置与投切策略：位置优先选择电压波动显著的节点或线路中段，以最大化补偿效能；投切模式分为手动投切、基于电压或无功功率阈值的自动投切，以及融合分布式电源出力预测的智能投切。在技术特性上，固定容量型成本低廉、维护便捷，适配波动幅度稳定的场景；分组投切型通过多电容单元组合，实现无功容量阶梯式调节，适用于波动幅度中等的场景；智能投切型结合预测数据提前调整投切状态，减少动作次数，提高补偿精度。该方案存在调节不连续的局限，

可能引发电压小幅波动，且对快速波动的响应能力不足，通常需与其他补偿设备协同应用，以满足配电网无功补偿的全面需求。

3. 有载调压变压器（OLTC）调节。OLTC通过切换变压器分接头调整变比，实现二次侧输出电压调节，适用于配电网电压慢变波动场景，如日内负荷变化、分布式电源出力小时级波动。其控制策略以二次侧电压偏差为核心，电压超出允许范围时，触发分接头切换，使电压趋近额定值。OLTC优势显著，调节范围广、可靠性强，可满足配电网较大区域的电压调节需求；但存在固有局限，分接头切换依赖机械动作，响应速度为秒级至分钟级，无法适配快速波动，且频繁操作会缩短使用寿命，故需合理设定电压阈值与切换间隔<sup>[2]</sup>。为优化调节效果，OLTC常与无功补偿设备协同运行：OLTC负责慢变波动的粗调，无功补偿设备承担快变波动的细调，形成快慢互补的协同调节机制。

## 2 配电网电压波动抑制多策略协同控制优化

多策略协同控制通过整合主动控制与被动补偿策略的优势，建立分层协同架构，实现各类策略的有机配合，提升电压波动抑制的精准性与经济性。

### 2.1 协同控制分层架构

协同控制架构分为配网层、区域层与设备层三级，各层级分工明确、信息互通：

1. 配网层。全局控制中心制定电压控制总目标（电压偏差 $\leq \pm 5\%$ 额定电压），结合配电网运行状态开展全局优化，明确各区域电压控制指标及策略优先级，经通信系统向区域层下发控制指令。

2. 区域层。配电网分区以供电范围或馈线为划分依据，区域层统筹各类调控策略协调分配，依据配网层指令与区域内实时电压波动数据，精准下达调节任务至具体设备。针对高频波动，优先调度STATCOM与储能系统；中频波动调度SVC与分布式电源无功调节；低频波动调度OLTC与电容器组。此外，区域层需处理多设备调节同一节点电压的冲突，通过优先级排序保障调节有序开展<sup>[3]</sup>。

3. 设备层。承担各类控制设备本地执行及状态反馈工作，按区域层指令调整储能充放电功率、STATCOM无功输出量等运行参数，实时上传设备剩余容量、工作模式等状态及电压调节效果，为上层决策提供数据支撑。

### 2.2 协同控制目标与机制

协同控制的核心目标是在满足电压质量要求的前提下，实现调节成本最小化、设备损耗最低化与系统

可靠性最大化的多目标优化。为达成该目标,需建立三类协同机制:

1. 信息交互机制。配电网通信系统支撑各层级、各设备实时数据交互,涵盖分布式电源出力、负荷、电压监测及设备运行状态等数据,为上层决策提供全面准确的数据支撑。

2. 优先级分配机制。依据电压波动的频率、幅度及影响范围,明确策略执行优先级:快速波动(频率 $> 1$  Hz)优先启用 STATCOM、超级电容器等快速响应设备;中频波动(0.1~1 Hz)采用 SVC、分布式电源无功调节、锂电池储能;低频波动( $< 0.1$  Hz)选用 OLTC、电容器组、柔性负荷调度。同时,结合储能剩余容量、电容器投切次数等设备运行状态动态调整优先级,规避设备过度损耗。

3. 动态调整机制。基于实时电压调节效果与预测数据,动态适配各策略调节参数。分布式电源出力波动超预期时,自动提升储能系统调节容量;电压偏差收窄时,下调无功补偿设备输出功率,规避无效损耗。

### 2.3 协同控制优势

多策略协同控制较单一策略优势显著:其一,快慢策略协同,实现高频、中频、低频波动的全场景覆盖与全面抑制;其二,策略间优势互补,弥补单一策略短板,有效提升调节精度、缩减调节误差;其三,优化设备调度逻辑,降低 STATCOM、储能等高成本设备使用频率,延长设备寿命,进而控制运行成本;其四,强化系统鲁棒性,单一设备故障时,其余设备可快速补位,保障电压控制的连续性与稳定性<sup>[4]</sup>。

## 3 配电网电压波动抑制策略应用关键问题与优化方向

### 3.1 关键应用问题

1. 成本控制问题。储能系统、STATCOM 等设备初期投资成本较高,大规模配置会增加配电网建设成本,需在抑制效果与成本之间寻求平衡,优化设备配置容量与位置。

2. 兼容性问题。不同策略涉及的设备来自不同制造商,控制接口、通信协议不统一,导致协同控制时信息交互困难,影响调节效率。

3. 可靠性问题。主动控制策略依赖分布式电源、柔性负荷等可控资源的稳定运行,若资源退出运行,会导致调节容量不足;被动补偿设备故障会直接影响补偿效果,需提升设备冗余度与故障自诊断能力。

### 3.2 优化方向

1. 经济性优化。运用全生命周期成本分析方法,综合分析设备投资、运行损耗、维护费用等核心因素,

优化策略组合及设备配置方案;引入共享经济相关模式,有效减轻单一主体的投资负担,兼顾经济性与配置合理性。

2. 标准化建设。制定统一的控制接口与通信协议标准,实现不同设备间的即插即用;建立策略协同控制的标准化流程,规范各层级控制逻辑与数据交互格式。

3. 智能化升级。融合大数据与人工智能技术,精进分布式电源出力及负荷预测精度,达成预测性控制目标;引入强化学习算法,赋能协同控制系统自主习得波动特性,动态优化策略组合与调节参数配置;依托数字孪生技术构建配电网虚拟仿真模型,仿真各类策略调节效能,为实际运行提供科学参考依据,全面提升配电网运行调控的智能化与精准化水平<sup>[5]</sup>。

4. 韧性提升。增强策略的抗干扰能力,在分布式电源大规模脱网或设备故障时,快速重构控制策略,确保电压稳定;结合微电网技术,实现配电网分区自治,当某区域发生故障时,其他区域可独立运行,提升系统整体韧性。

## 4 结束语

在高比例分布式电源接入场景下,配电网电压波动抑制是保障供电质量的核心技术瓶颈,单一抑制方案难以适配复杂多变的波动特性。主动控制策略从源头调控电压波动,具备高灵活性;被动补偿策略依托实时补偿抵消波动效应,可靠性突出。构建“配网层—区域层—设备层”分层协同控制架构,深度融合两类策略技术优势,可实现对多频率、多幅度电压波动的精准高效抑制,为配电网安全稳定运行提供技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 李文竹,寇汉鹏,曹阳,等.含高比例分布式电源配电网谐波治理策略[J].电工技术,2023(02):65-68.
- [2] 马成廉,李闯,薛冰,等.含高比例光伏配电网分区电压协调控制策略[J].东北电力大学学报,2024,44(04):77-85.
- [3] 臧益果.含高比例分布式电源的配电网可靠性评估与提升方法研究[D].长沙:湖南大学,2023.
- [4] 欧阳金鑫,陈纪宇,袁毅峰,等.基于分布式电源主动控制的配电网合环电压波动抑制方法[J].电力自动化设备,2024,44(01):49-56.
- [5] 赵舒心,肖仕武,梁伟宸.基于聚合电流的高比例分布式电源接入配电网短路故障计算与分析[J].电力系统保护与控制,2025,53(07):16-26.