

分布式电源接入下配电网电压波动 优化控制策略研究

王在明, 张小龙

(兰州陇能电力科技有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要 本文针对大规模分布式电源(DG)接入配电网后出力随机性造成的电压波动问题, 提出基于日前一日内一实时三级多时间尺度协调控制的电压优化控制方法, 包括: (1)考虑到DG出力随机性, 建立配电网电压灵敏度模型, 分析不同DG渗透率下配电网电压波动特性。(2)基于上述分析结果, 构建日前一日内一实时三级协调控制架构, 通过协调控制有载调压变压器(OLTC)、无功补偿装置和DG逆变器, 实现配电网电压的分层优化控制。(3)仿真研究上述方法在不同DG渗透率下的控制效果。结果表明: 在DG渗透率为30%的情况下, 所提方法可以使电网电压波动范围控制在 $\pm 3\%$ 范围内, 相对基于传统方法的控制方法, 电压合格率提高15%。该方法有效抑制了电压波动, 具有较高的有效性和工程应用价值。

关键词 分布式电源; 配电网; 电压波动; 多时间尺度

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.041

0 引言

伴随着新能源发电技术的飞速进步, 分布式电源(Distributed Generation, DG)在配电网中的普及率也在持续上升^[1]。DG的加入彻底改变了配电网的传统单向电流模式, 为其带来了双向电流和多点电源的新属性。但是, 像光伏和风电这样的DG输出由于其间歇性和随机性, 可能导致配电网的节点电压出现频繁的波动。在极端情况下, 这种波动甚至可能超出了允许的范围, 这对电网的稳定运行和用户的用电质量构成了威胁。

传统的配电网电压控制主要依赖于OLTC和无功补偿装置, 导致调节速度缓慢、精度不高, 并且难以应对由DG引发的快速电压波动。在最近的几年中, 研究者们提出了众多的优化策略, 其中包括利用改进后的蚁狮算法进行分布式电源配电网的无功优化^[2]和采用无线通信组网技术的分布式潮流控制系统^[3]。然而, 目前的研究主要集中在单一的时间尺度或单一的控制策略上, 缺少对多种控制资源的综合优化, 这使得控制的经济性和响应速度难以得到平衡。

现有研究存在以下几方面不足: 首先, 在时间尺度协调方面, 多数方法仅考虑日前优化或实时控制单一层面, 未能充分利用不同控制设备的响应特性差异。OLTC调节速度慢但成本低, 适合日前长时间尺度优化; 无功补偿装置响应适中, 适合日内滚动调节; 而DG逆变器响应快速, 适合实时层应对突变。三者缺乏有机

协调, 导致控制效果受限。其次, 在不确定性处理方面, 传统方法多基于确定性预测, 对DG出力的随机波动和预测误差考虑不足, 当实际出力偏离预测值时, 难以保证电压质量。最后, 在控制目标方面, 现有研究往往单纯追求电压合格率, 忽视了设备动作频次、网络损耗等经济性指标, 导致过度调节, 缩短设备寿命, 增加运维成本。此外, 大多数研究基于理想通信条件, 未充分考虑实际工程中通信延迟、数据丢失等问题对控制性能的影响。因此, 亟需构建一种兼顾多时间尺度协调、不确定性应对、经济性优化和工程实用性的综合控制方法, 以应对高DG渗透率配电网的电压控制挑战。

本研究提出了一套多时间尺度协同的电压优化控制方案, 构建了日前一日内一实时三级控制架构, 充分利用各种控制设备的调节能力, 以实现配电网电压的精确管理。通过具体的算例模拟, 证实了本文提出的方法是行之有效的, 为高DG渗透率配电网的电压管理提供了坚实的技术基础。

1 DG接入对配电网电压的影响分析

1.1 配电网电压灵敏度模型

配电网节点电压受有功、无功功率影响, 可通过灵敏度系数量化^[4]。对于节点*i*, 其电压偏差 ΔU_i 与功率注入的关系可表示为:

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^n (S_{ij}^p \Delta P_j + S_{ij}^q \Delta Q_j) \quad (1)$$

式(1)中, S_{ij}^P 、 S_{ij}^Q 分别为节点 j 的有功、无功功率对节点 i 电压的灵敏度系数; ΔP_j 、 ΔQ_j 为节点 j 的有功、无功功率变化量。

灵敏度系数可通过雅可比矩阵求逆获得^[5]。对于典型配电网, R/X 比值较大, 有功功率对电压影响更为显著, 满足:

$$S_{ij}^P \approx \frac{R_{ij}}{U_{i,\text{rated}}} \quad (2)$$

式(2)中, R_{ij} 为节点 i 、 j 间线路电阻; $U_{i,\text{rated}}$ 为节点 i 额定电压。

1.2 DG出力波动特性建模

光伏出力受辐照度影响, 呈现明显的日变化规律和随机波动特性。采用Beta分布描述其概率特性:

$$f(P_{\text{PV}}) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{PV},\text{rated}}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{PV},\text{rated}}} \right)^{\beta-1} \quad (3)$$

式(3)中, P_{PV} 为光伏实际出力; $P_{\text{PV},\text{rated}}$ 为额定容量; α 、 β 为形状参数, 根据历史数据拟合确定。

风电出力与风速关系可用分段函数表示:

$$P_{\text{WT}} = \begin{cases} 0, & v < v_{\text{ci}} \text{ 或 } v > v_{\text{co}} \\ P_{\text{rated}} \frac{v^3 - v_{\text{ci}}^3}{v_{\text{rated}}^3 - v_{\text{ci}}^3}, & v_{\text{ci}} \leq v < v_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}}, & v_{\text{rated}} \leq v \leq v_{\text{co}} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, v 为实际风速; v_{ci} 、 v_{rated} 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

1.3 电压波动幅度评估指标

定义电压波动率VF (Voltage Fluctuation) 衡量电压偏离额定值的程度:

$$VF = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{U(t) - U_N}{U_N} \right| dt \quad (5)$$

式(5)中, $U(t)$ 为 t 时刻电压; U_N 为额定电压; T 为统计时段。

电压偏差超限时间占比TVD (Time of Voltage Deviation) 反映电压质量:

$$TVD = \frac{T_{\text{violation}}}{T_{\text{total}}} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中, $T_{\text{violation}}$ 为电压超出允许范围的累计时间; T_{total} 为总统计时间。

2 多时间尺度协调控制策略

2.1 三级控制框架设计

针对DG出力不确定性以及电压波动的多时间尺度特性, 本文提出日前一日内一实时三级协调控制架构。日前优化层: 基于DG出力预测, 以24h为周期优化OLTC档位以及可控DG的有、无功出力计划, 目标是减

少网损以及电压偏差。日内滚动层: 以15min为滚动周期, 根据超短期预测修正日前计划, 并通过调整无功补偿装置(SVC, SVG)以及DG逆变器无功出力, 跟从电压设定值。实时校正层: 对实时性要求相对宽松, 基于本地量测, 通过DG逆变器快速无功调节, 抑制突变造成的电压波动, 其响应时间在秒级量级。

2.2 日前优化模型

日前优化以最小化运行成本和电压偏差为目标, 建立多目标优化模型:

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T \left(C_{\text{loss}}(t) + C_{\text{DG}}(t) + \omega_1 \sum_{i=1}^N (U_i(t) - U_{\text{ref}})^2 \right) \quad (7)$$

式(7)中, C_{loss} 为网损成本; C_{DG} 为DG调节成本; ω_1 为电压偏差惩罚系数; U_{ref} 为参考电压。约束条件包括:

1. 功率平衡约束: $P_{\text{sub}}(t) + \sum P_{\text{DG},k}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{loss}}(t)$
2. 节点电压约束: $U_{\text{min}} \leq U_i^k(t) \leq U_{\text{max}}$
3. OLTC调节约束: $|n(t) - n(t-1)| \leq 1$, $n_{\text{min}} \leq n(t) \leq n_{\text{max}}$
4. DG出力约束:

$$\begin{aligned} P_{\text{DG},k}^{\text{min}} &\leq P_{\text{DG},k}(t) \leq P_{\text{DG},k}^{\text{max}} \\ Q_{\text{DG},k}^2(t) &\leq (S_{\text{DG},k}^{\text{max}})^2 - P_{\text{DG},k}^2(t) \end{aligned}$$

采用粒子群优化算法(PSO)求解上述模型, 粒子位置更新公式为^[6]:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= w \cdot v_i^k + c_1 r_1 (p_{\text{best},i} - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - x_i^k) \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1} \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中, w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 随机数。

2.3 日内滚动修正策略

日内层采用模型预测控制(MPC)思想, 在每个滚动窗口内求解优化问题:

$$\min F_2 = \sum_{t=k}^{k+H_p} \left[\omega_2 \sum_{i=1}^N (U_i(t) - U_{\text{ref}})^2 + \omega_3 \sum_j \Delta Q_j^2(t) \right] \quad (9)$$

式(9)中, H_p 为预测时域; ω_2 、 ω_3 为权重系数; ΔQ_j 为无功调节量。

通过求解二次规划问题获得未来时段的无功调节序列, 仅执行首个时段的控制动作, 在下一时段重新优化, 形成滚动控制机制。

2.4 实时本地自治控制

实时层采用基于电压一无功下垂特性的本地自治控制, DG逆变器根据本地电压偏差自主调节无功出力:

$$Q_{\text{DG}} = Q_{\text{ref}} - k_q (U_{\text{PCC}} - U_{\text{ref}}) \quad (10)$$

式 (10) 中, Q_{ref} 为无功参考值; k_q 为下垂系数; U_{PCC} 为公共连接点电压。

下垂系数根据逆变器容量裕度动态调整:

$$k_q = k_{q,max} \cdot \frac{S_{rated}^2 - P_{DG}^2}{S_{rated}^2} \quad (11)$$

当有功出力增大时, 可用无功容量减小, k_q 自动减小, 避免过度无功输出。

3 算例分析

3.1 算例系统与参数设置

采用改进的 IEEE 33 节点配电系统进行仿真分析, 基准电压 10 kV, 基准容量 10 MVA。在节点 8、15、25、30 接入光伏 DG, 单机容量 500 kW; 在节点 12、22 接入风电 DG, 单机容量 800 kW。DG 总装机容量 4.6 MW, 渗透率约为 30%。电压允许范围为 0.95 ~ 1.05 p.u., 变压器有载调压 (OLTC) 装置调节范围为 ±8%, 有 17 档, 每次调节档位的步长为 1.25%。无功补偿装置 (SVG) 容量 1 Mvar, 接于节点 18。开展三种典型控制策略的仿真分析, 典型日光伏和风电出力曲线以及负荷曲线来自气象网站, 典型日采样间隔为 15 min, 共有 96 个时段。三种控制策略分别为: (1) 策略 1: 传统 ltc+ 固定电容器控制 [7]; (2) 策略 2: 日前优化 + 实时本地控制 [8]; (3) 策略 3: 基于日前优化的三级协调控制。

3.2 电压波动抑制效果分析

策略 1 中 DG 大发 (10:00-15:00) 时段, 部分节点电压超过 1.08 p.u., 平均超限时长为 18%; 策略 2 通过日前优化可使所有节点电压恢复正常, 但存在短时间超限情况, TVD 为 8%; 策略 3 经过三级协调后, 各节点电压在整日无一例超限, 电压平均偏离为 +2.8%, TVD 为 0, 有效地抑制了电压波动。

3.3 控制设备动作协调性分析

OLTC 根据预测曲线在日前层提前调节至档位, 全天预调节 6 次, 避免频繁动作; SVG 在日内层跟踪负荷波动, 每 15 min 调整无功输出一次; DG 逆变器在实时层调节突变, 调节周期在秒量级, 三者形成“慢—中—快”逐级调节关系, 既保证了控制效果, 又保障了设备寿命。

3.4 不同 DG 渗透率场景对比

表 1 是不同 DG 渗透率下策略 3 控制效果, 表 1 显示, 渗透率由 10% 提高至 40%, 电压波动率分别提高到 0.45%、1.32%, 均在合理范围之内; 渗透率超过 50% 后, 需要增加无功补偿容量或采用储能辅助控制。研究发现, 面对中等渗透率 (20% ~ 40%) 场景, 所提方法能够保证电压质量, 具有良好的适用性。

表 1 不同 DG 渗透率场景下的电压控制性能

DG 渗透率 (%)	平均电压波动率 VF (%)	最大电压偏差 (%)	电压合格率 (%)	OLTC 日动作次数
10	0.45	±1.8	100	3
20	0.62	±2.2	100	5
30	0.78	±2.8	100	6
40	1.32	±3.9	98.5	9
50	2.15	±5.2	92.3	12

4 结论

通过研究分布式电源大规模接入配电网后出力随机性导致的电压波动问题, 得出以下结论: (1) 考虑 DG 出力随机性的配电网电压灵敏度模型, 认识 DG 接入对节点电压的影响机理, 为控制策略服务。(2) 建立日前一日内一实时三级协调控制架构, 实现 OLTC、无功补偿和 DG 逆变器梯级调节, 兼顾控制效果和设备寿命, 在渗透率为 30% 场景下电压偏差控制在 ±3% 以内, 电压合格率 100%。(3) 仿真结果表明, 所提方法具有有效性, 电压波动率较传统方法下降 62%, 超限时间占比由 18% 下降为 0, 显著提高配电网电压质量和运行水平。(4) 对比分析表明, 所提策略在渗透率为 20% ~ 40% 范围内具有良好适用性, 服务高 DG 渗透配电网电压控制。(5) 展望未来, 研究将考虑储能系统优化, 探索源网荷储多元资源智能调控, 以支撑更高渗透率 DG 接入。

参考文献

- [1] 周扬, 王主丁, 张漫, 等. 适应分布式资源渗透率提高的配电网网元规划方法 [J]. 电网技术, 2025(01):306-315.
- [2] 张萍, 张高帅. 基于改进蚁狮算法的含分布式电源配电网无功优化 [J]. 计算机与数字工程, 2025(03):643-647.
- [3] 陈泓, 封科, 钟亮民, 等. 基于无线通信组网的 DPFC 系统控制策略 [J]. 北京邮电大学学报, 2020(02):122-128.
- [4] 季柯, 韩民晓, 刘崇茹, 等. 高占比换流器电网的电压-功率小扰动谐波潮流稳定分析理论: 数学模型 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11):4430-4446.
- [5] 董大伟, 程焱焱, 李莹, 等. 基于等效功率变换的新型电力系统配电网剩余电量估计方法 [J]. 微型电脑应用, 2024, 40(11):132-136.
- [6] 武晓朦, 张钦凯, 李飞. 基于遗传量子粒子群法的含 DG 配电网无功优化 [J]. 计算机仿真, 2025, 42(02):107-112, 127.
- [7] 黎家明, 霍群海, 尹靖元, 等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究 [J]. 电网技术, 2025, 49(01):272-283.
- [8] 方磊, 牛玉刚, 王思明, 等. 基于日前调度与实时控制的微网储能系统容量配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23):102-110.