

基于多源协同与深度强化学习的高渗透率分布式光伏配电网电压影响机理及治理策略研究

程祥钟*, 阳维, 孙柏杨, 吴优

国网湖北省电力有限公司孝感供电公司, 湖北孝感, 中国

*通讯作者

【摘要】针对现有治理手段在动态响应与系统协同方面的不足, 本文提出了一种基于自动电压控制 (AVC) 系统与智能逆变器动态无功调节的源网协同治理策略。研究引入了基于深度强化学习 (DRL) 的自适应调控算法, 并结合集群划分技术 (如 CS-PSO) 实现了对海量分布式资源的有序管控。通过在 IEEE 33 节点系统及实际台区模型中的实证分析, 结果表明该策略能显著平抑电压波动, 将节点电压稳定在 0.99, 1.03 标么值区间, 在有效降低系统损耗的同时, 极大提升了配电网对清洁能源的接纳能力。

【关键词】高渗透率; 分布式光伏; 配电网电压; 潮流逆转; Q (U) 控制策略; 深度强化学习; 多源协同治理

1. 引言

随着《“十四五”可再生能源发展规划》的深入实施, 分布式光伏发电已成为我国构建新型电力系统的重要支撑[1]。分布式光伏主要通过中低压配电网接入, 具有分散性强、就近消纳等特点。然而, 当分布式光伏在配电网中的渗透率 (即光伏装机容量与区域最大负荷之比) 持续攀升时, 其给电网运行带来的安全挑战也日益凸显。传统的配电网设计初衷是承载单向潮流, 其电压调节设备 (如变压器分接头、并联电容器) 多基于稳态负荷特性设计, 难以应对光伏功率秒级波动的需求[2-3]。

电压合格率是衡量配电网供电质量的核心指标。在高渗透率光伏场景下, 由于光伏出力高峰 (通常在正午前后) 与用电负荷高峰 (通常在早晚) 在时间轴上的严重错位, 导致配电网内剩余有功功率沿线路向系统上级反向流动[4-5]。这种潮流逆转现象会在配电网线路阻抗上产生反向压降, 进而抬升线路节点电压。在一些光伏装机密集的农村地区, 节点电压甚至会超过额定电压的 10% 以上, 触发逆变器频繁脱网, 既损坏了用户用电设备, 也降低了新能源的消纳效率[6]。

目前, 国内外研究者针对光伏并网引起的电压越限问题开展了大量探索。部分研究侧重于物理电网的强化, 如通过增大导线截面积降低线路阻抗, 或增加有载调压变压器 (OLTC) 的调节频次[7-9]。但此类方法投资成本高, 且机械式调节设备的响应速度无

法匹配光伏功率的快速波动。另一类研究则关注智能逆变器的无功调节能力。利用逆变器剩余容量进行感性无功吸收, 可以有效抑制电压抬升[10-12]。然而, 单体逆变器的调节行为往往具有盲目性, 缺乏与电网整体运行状态的协同, 容易导致局部无功过补偿或调节失效[13]。

本研究旨在提出一套系统性的分析与治理框架。首先, 通过构建精确的配电网潮流敏感性模型, 揭示光伏接入位置、容量与电压分布之间的耦合规律。其次, 针对中低压配电网中分布式资源“多、小、散”的特点, 设计三层结构的源网协同控制方案, 涵盖局部实时调节、区域协调优化与全局指令下发。同时, 本文还将探讨先进的人工智能算法在动态电压治理中的应用前景, 通过仿真实验验证所提方案在提升电压合格率方面的有效性, 为未来高渗透率光伏并网的工程实践提供理论支撑。

2. 分布式光伏对配电网电压影响的理论机理

2.1 分布式光伏的输出特性建模

分布式光伏 (PV) 接入配电网后, 由于潮流方向可能发生逆转, 馈线各节点的电压抬升效应最为显著。

(1) 稳态电压估算公式

设配电网某馈线节点 i 的上一级节点为 $i-1$, 该段线路阻抗为 $R_i + jX_i$ 。节点 i 处光伏发出的有功功率为 $P_{PV, i}$, 消耗的负荷为 $P_{L, i}$, 则该节点的电压 U_i 与上节点电压 U_{i-1} 的关系

为:

$$\Delta U_i = U_i - U_{i-1} \approx \frac{(P_{PV,i} - P_{L,i})R_i + (Q_{PV,i} - Q_{L,i})X_i}{U_N} \quad (1)$$

其中, U_N 为系统额定电压。

(2) 技术细节说明

潮流逆转判定: 当 $P_{PV,i} > P_{L,i}$ 时, 有功潮流由用户端流向变压器, ΔU_i 变为正值, 导致末端电压高于首端电压。

影响因子参数: 电压波动率 $\delta\%$ 与线路阻抗比 (R/X) 高度相关。在低压配电网 (0.4kV) 中, R/X 通常较大 (约 2~5), 因此光伏有功出力对电压的影响远大于无功。

2.2 光伏并网点 (PCC) 电压抬升机理

(1) 逆变器端口电压方程

光伏逆变器输出电压 U_{inv} 必须高于并网点电压 U_{PCC} 才能实现电能注入。其矢量关系满足:

$$\dot{U}_{inv} = \dot{U}_{PCC} + \dot{I}_{PV}(R_{grid} + jX_{grid}) \quad (2)$$

(2) 实现逻辑

当光伏渗透率 $K_p = \frac{\Sigma P_{PV}}{\Sigma P_{L, max}}$ 超过 50% 时,

变压器低压侧母线电压常处于上限临界值。此时若光伏继续全额出力, 且 R_{grid} 较大, 则 U_{PCC} 会迅速突破 1.07p.u. (合格率上限), 触发逆变器过压保护或导致配变调压动作频繁。

3. 核心技术与治理策略研究

3.1 基于 Q (U) 特性的逆变器智能无功控制

利用光伏逆变器剩余容量进行无功调节, 是成本最低且响应最快的手段。参照 IEEE 1547 标准, 设置多段式下垂函数计算指令无功 Q_{ref} :

$$Q_{ref} = \begin{cases} Q_{max}, & U_{PCC} < V_{min} \\ K_{droop1}(V_{low} - U_{PCC}), & V_{min} \leq U_{PCC} < V_{low} \\ 0, & V_{low} \leq U_{PCC} \leq V_{high} \\ K_{droop2}(V_{high} - U_{PCC}), & V_{high} < U_{PCC} \leq V_{max} \\ -Q_{max}, & U_{PCC} > V_{max} \end{cases} \quad (3)$$

参数配置: 死区上限 $V_{high} = 1.02U_N$, $V_{low} = 0.98U_N$; 强制干预极值 $V_{max} = 1.05U_N$, $V_{min} = 0.95U_N$ 。逆变器额定视在功率 $S_{max} = 1.1P_{PV, rated}$, 动态无功极限受容量约束: $Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{PV}^2}$ 。下垂斜率设定为 $K_{droop2} = Q_{max}/0.03$ 。

底层解算实现逻辑 (毫秒级响应):

侦测与锁相: 通过二阶广义积分器软件锁相环 (SOGI-PLL) 以 10kHz 频率提取电网

瞬时电压基波相位 θ 与有效值 U_{PCC} 。

电流解算计算: 将生成的 Q_{ref} 及有功指令 P_{ref} 经 Park 变换映射至 d-q 旋转坐标系。电网电压定向下 ($u_q = 0$), 计算参考电流:

$$i_{d-ref} = \frac{2P_{ref}}{3u_d}, i_{q-ref} = -\frac{2Q_{ref}}{3u_d} \quad (4)$$

闭环执行: 指令电流输入 PI 调节器, 生成驱动 IGBT 的空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 信号, 实现 10ms 内的无功快速注入。

3.2 顶层系统级: 融合 DDPG 的多源全局自适应调控算法

底层控制会引发网无功环流导致网损增加, 需主动级进行全局干预。

状态空间、动作空间与参数建模:

状态观测:

$$s_t = s_t + e_t \quad (5)$$

动作输出 $a_t \in A$: $a_t = e_t$, 包含 OLTC 的离散化信号 $[-1, 0, 1]$ 与 SVG/光伏偏置的连续无功指令。

复合奖励函数:

$$r_t = - \left(\lambda_1 \sum_{t=1}^N \max(0, |U_t - U_{ref}| - \epsilon) + \lambda_2 P_{loss, t} + \lambda_3 (I) \Delta T_{ap, t} \neq 0) \right) \quad (6)$$

超参数配置: 电压死区 $\epsilon = 0.04$, 权重 $\lambda_1 = 100$ (保安全), $\lambda_2 = 10$ (降损耗), $\lambda_3 = 50$ (抑磨损)。Actor 学习率 $\alpha_u = 10^{-4}$, Critic 学习率 $\alpha_a = 10^{-3}$, 折扣因子 $\gamma = 0.95$ 。

算法实现与训练逻辑 (分钟级运算):

SCADA 系统每 15 分钟获取一次全息电网断面状态 s_t 。

Actor 神经网络根据当前状态直接映射输出连续动作向量 a_t , 下发至现场设备。

执行动作后, 数字孪生环境返回新状态 s_{t+1} 及奖励 r_t 。

经验回放更新: 将网络层 s_t , a_t , r_t , s_{t+1} 压入容量为 10000 的记忆池中; 按 Batch Size=64 随机抽样, 利用时序差分 (TD Error) 最小化更新 Critic 价值网络权重, 利用策略梯度更新 Actor 策略网络权重。

4. 实验与多维数据深入分析

4.1 仿真实验设计

为了验证上述机理分析与治理策略的有效性, 本研究包含 14 个主要节点, 配备一台

400kVA 的变压器。其运行参数设定为：最高电压限值 243V，最低电压限值 233V；最大负荷 165kW，最小负荷 35kW。

实验设置了多种渗透率梯度，模拟光伏从零接入到 120% 渗透率的过程。通过 PSCAD/EMTDC 与 Matlab/Simulink 联合仿真，监测全天 24 小时内各节点的电压演变。各节点源网协同治理前后最大电压如表 1 所示。

表 1.各节点源网协同治理前后最大电压对比

仿真节点	离首端距离 (m)	光伏装机 (kW)	无控制最大电压 (V)	源网协同后最大电压 (V)
Node 1	100	20	236.5	235.2
Node 5	450	50	242.8	238.4
Node 10	850	80	248.6	240.5
Node 14	1200	100	254.2	241.8

实验结果清晰显示，在无控制状态下，线路末端 (Node 14) 在中午时段电压严重超限，达到了 254.2V，超过国标规定的上限。而在应用了源网协同控制策略后，通过逆变器的动态无功吸收与首端电压下调，末端电压被平抑至 241.8V，完全符合合格率要求。

4.2 IEEE 33 节点系统仿真分析

为了进一步评估治理策略在复杂网络中的表现，研究采用了标准 IEEE 33 节点放射状配电网模型。该系统基准电压为 12.66kV，基准功率为 10MVA。

实验将 4 组分布式光伏与储能联合单元接入系统。利用遗传算法 (GA) 对接入容量与位置进行多目标优化寻优。数据表明，在未采取治理策略前，由于高渗透率光伏的接入，系统有功损耗较高，且多个支路末端电压低至 0.94 p.u.或高达 1.08 p.u.。在引入源网协同调控及 BESS 优化配置后，系统最小有功损耗降至 27.33kW，各节点电压幅值波动被严格限制在 0.04 标么值以内。

4.3 逆变器动态响应性能实测

在 RT-LAB 硬件在环实验平台上，对单台光伏逆变器进行了阶跃响应测试。当并网点电压受模拟电网波动发生 5% 的阶跃时，逆变器通过内部全数字控制算法，在 17.4ms 内完成了 90% 的无功输出调节指令。这种响应速度远快于传统的 AVC 主站下发指令周期 (通常为 10s 级)，有力证明了分布式智能逆变器作为紧急电压支撑手段的优越性。

此外，实验还验证了华为 SUN2000 系列

智能逆变器在无光照 (夜间) 条件下的运行表现。结果发现，逆变器在夜间可作为静止无功补偿器使用，具备满容量的无功调节范围 (pm 1.0 p.u.)。这一特性对于治理农村地区夜间由于风电倒送或轻载引起的电压波动具有极高的应用价值。

5.结论

本研究针对含高渗透率分布式光伏并网对配电网电压合格率的影响进行了详尽探讨，主要结论如下：

第一，揭示了过电压产生的本质规律。分布式光伏并网引起的电压抬升主要源于潮流逆转在线路电阻上的压降累积。在 R/X 比值较大的中低压配电网中，这种效应尤为显著，且与接入位置的电气距离呈现正相关。

第二，确定了治理的关键切入点。研究发现，通过优化变压器档位以降低台区首端电压，可以为光伏出力预留“电压弹性空间”。首端电压下调 10V 可直接提升约 22% 的光伏消纳上限。同时，线路改造与负荷侧管理亦是长效解决手段。

第三，验证了源网协同治理的高效性。提出的由局部下垂控制、区域协调优化与全局调控组成的三层 AVC 框架，能够兼顾响应速度与全局最优。利用智能逆变器极速 (<20ms) 的无功调节能力，可有效抑制光伏间歇性带来的电压波动。

第四，证实了先进算法与储能的加持作用。基于 DRL 的自适应算法能够应对配电网的不确定性，提升调控策略的鲁棒性。而分布式储能通过对有功潮流的直接干预，能将全网电压波动幅值控制在 0.04 标么值以内，显著改善了电压合格率。

参考文献

- [1] 肖晶民. 分布式光伏发电并网对传统辐射状配电网运行状态的影响分析[J]. 建材与装饰, 2017 (45): 194-195.
- [2] 刘光辉, 楼颖锋. 分布式光伏并网对配电网电压稳定性的影响及全局治理策略[J]. 水利建设与电力研究, 2024 (1): 1-3.
- [3] 彭海恩. 分布式光伏接入对配电网调控运行影响分析[J]. 能源科学, 2024 (1): 112-113.
- [4] 段明辉, 苏晨, 王博. 分布式光伏接入导致配电网电压越限问题的研究[J]. 农村电气化, 2024 (10): 41-44.
- [5] 孙文文, 何国庆, 刘纯, 等. 含高渗透

- 率分布式光伏的配电网电压越限解决方法研究综述[J]. 现代电力, 2023, 41(2): 302-309.
- [6] 王振, 吴继宗, 郝杨, 等. 分布式光伏发电系统大容量接入局部配电网设计与稳态影响研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 53-56.
- [7] 吴辉成, 汪春, 尹发根, 等. 含高渗透率户用光伏的低压配电网基于功率控制的电压协同控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 27-35.
- [8] 蒋鑫业. 基于深度强化学习的农网自适应低电压调控算法研究[J]. 农村电气化, 2024(6): 10-14.
- [9] 肖晶民. 分布式光伏发电并网对传统辐射状配电网运行状态的影响分析[J]. 建材与装饰, 2017(45): 194-195.
- [10] 邹伟华. 分布式光伏接入对配电网电压稳定性的影响[J]. 大众用电, 2021(11): 76-77.
- [11] Wang Z, Liu J, Zhu X, et al. Model-free distributed voltage control for distribution networks based on state space mapping and super-linear feedback[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(4): 6290-6304.
- [12] Fazio A, Risi C, Russo M, et al. Coordinated optimization for zone-based voltage control in distribution grids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 173-184.
- [13] Sun X, Qiu J, Tao Y, et al. Data-driven combined central and distributed Volt/Var control in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(3): 1855-1867.