DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0028-06

高比例分布式光伏有源配电网电压协同控制策略

程 好[1], 张真卿[1], 徐 帆[1], 钱开吉[1], 任维银[1], 李笑丛[2]

(1.连云港智源电力设计有限公司,江苏 连云港 222000; 2.华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室,河北 保定 071003)

摘 要:随着分布式光伏在配电网中接入比例的不断提高,光伏出力随机性、波动性及源荷功率不匹配易引起有源配电网节点电压越限问题,影响配电网安全稳定运行。为提高高比例光伏接入条件下的电压调控能力,提出一种基于电压-功率灵敏度的配电网无功电压双层调控策略。分析分布式光伏电源输出功率对节点电压的调控机理,建立分布式光伏电压-功率灵敏度降序协调控制模型,通过实时评估各光伏电源对越限节点电压的调节能力,确定分布式光伏调控目标和控制顺序;利用Louvain集群划分算法实现有源配电网自适应分区,建立包含集群无功控制与集中无功控制的电压双层调控模型,结合无功补偿和有功削减两阶段控制模式,实现局部调控与全局协调的交互协同。仿真算例表明,所提策略能够有效抑制节点电压越限,提高分布式光伏消纳能力。

关键词:电压-功率灵敏度;无功电压双层调控;降序控制;无功补偿;有功削减

中图分类号: TP273;TM712 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0028-06

Voltage collaborative control strategy for high proportion distributed photovoltaic active distribution network

Cheng Hao[1], Zhang Zhenqing[1], Xu Fan[1], Qian Kaiji[1], Ren Weiyin[1], Li Xiaocong[2]

(1. Lianyungang Zhiyuan Electric Power Design Co., Ltd., Lianyungang 222000, Jiangsu, China;
2. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid of Hebei Province, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China)

Abstract: With the increasing penetration of distributed photovoltaic generation in distribution networks, the randomness and fluctuation of photovoltaic output, together with the mismatch between source and load power, can easily cause node voltage violations in active distribution networks, thereby affecting the safe and stable operation of distribution networks. To improve the voltage regulation capability under high-penetration photovoltaic integration, a two-layer reactive power and voltage regulation strategy for distribution networks based on voltage-power sensitivity is proposed. The regulation mechanism of distributed photovoltaic output power on node voltage is analyzed, and a descending-order coordinated control model based on photovoltaic voltage-power sensitivity is established. By real-time evaluation of the voltage regulation capability of each photovoltaic source for voltage-violated nodes, the regulation targets and control sequence of distributed photovoltaic sources are determined. The Louvain community detection algorithm is used to achieve adaptive partitioning of the active distribution network, and a two-layer voltage regulation model including cluster-level reactive power control and centralized reactive power control is established. Combined with a two-stage control mode of reactive power compensation and active power curtailment, the interactive coordination between local regulation and global coordination is realized. Simulation results show that the proposed strategy can effectively suppress node voltage violations and improve the accommodation capacity of distributed photovoltaic generation.

Keywords: voltage-power sensitivity; reactive voltage bilayer regulation; reduced sequence control; reactive power compensation; active reduction

“双碳”目标的提出和实质性推进,使得配电网中分布式光伏接入比例不断提高,而光伏出力的随机性和波动性,给配电网安全稳定运行带来了巨大挑战,高比例分布式光伏接入引起的配电网潮流倒送、电压越限问题十分突出。无功电压控制可稳定配电网各节点电压、提升配电网整体运行经济性与稳定性。传统配电网调压主要通过电容器组、有载调压变压器等调控设备对配电网电压进行优化,但此类设备响应速度慢,在实际工况下无法满足配电网快速电压调控需求。静止无功补偿器、静止无功发生器等无功补偿设备响应速度较快,但设备投资成本较高,其大规模应用将显著降低配电网经济性。光伏电源作为典型配电网分布式电源,可通过光伏电源逆变器调控,向配电网系统提供无功功率,满足配电网无功需求,且不会额外增加配电网无功补偿设备投资成本。充分挖掘分布式

收稿日期:2025-05-22;**录用日期**:2025-07-08

基金项目:江苏省沿海电力基础设施智能化工程研究中心科技项目(JC2024103)

作者简介:程 好(1981—),男,高级工程师,研究方向为电气工程自动化技术。

引用本文:程好,张真卿,徐帆,等.高比例分布式光伏有源配电网电压协同控制策略[J].自动化技术与应用,2026,45(8):28-33.(Cheng Hao, Zhang Zhenqing, Xu Fan, et al. Voltage collaborative control strategy for high proportion distributed photovoltaic active distribution network[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 28-33.)

光伏的电压调控能力,将传统配电网被动管控方式向主动管控方式转变已成为解决有源配电网电压稳定问题的技术趋势[1-3]。分布式光伏主动参与有源配电网电压调控,可有效平抑配电网电压波动、提升配电网光伏消纳水平、提高光伏运行经济性[4]。IEEE 1547.8 工作组提出利用光伏电源实现无功电压调控,有效提高光伏电源无功输出能力,同时降低传统无功补偿设备的投资成本[5]。

分布式光伏参与配电网电压调控过程中,电压-功率灵敏度数值可反映当前位置节点电压随注入功率的变化情况,常用于分布式电源调控、消纳能力评估以及配电网规划性建设等。文献[6]基于潮流方程约束及 Jacobian 矩阵求逆方法,推导得到电压-功率灵敏度矩阵,但在大型配电网矩阵运算中,矩阵阶数过大将显著降低灵敏度计算效率,甚至导致维数灾;文献[7-8]考虑分布式电源功率输出、系统负荷与配电网线路损耗间的内在关系,建立了二次灵敏度数学模型,但该模型对潮流计算精准度要求较高;文献[9]通过小扰动法求解节点电压与系统状态参数极小增量之间的比值,该方法计算精度较高,但整体计算耗时较长;文献[10-11]提出了一种近似电压-功率灵敏度的计算方法,计算速度显著提升但存在误差累计风险。

基于电压-功率灵敏度调控指标,文献[12-16]提出了一种多分布式光伏无功-有功顺序协调功率补偿的过电压调控策略,显著提升了配电网光伏消纳能力,但面向高维系统易出现求解超时的问题;文献[17-22]提出了一种主动配电网分区协调控制策略,通过划分无功/有功集群建立二阶锥优化模型进行求解,可有效提升调控速度,但电压深度越限时多集群间往复调用导致时效性不高。可见,传统集中电压控制和集群电压控制无法兼顾功率调整经济性与计算快速性[23-25]。为此,本文结合集群无功控制与集中无功控制优势,提出基于电压-功率灵敏度的配电网无功电压双层调控策略。

1 光伏电源电压调控机理分析

分布式光伏高比例接入配电网,引起功率倒送,造成“源荷”失衡,导致配电网出现电压越限问题。为有效平抑节点电压越限问题,需控制光伏电源的功率输出,分为无功补偿与有功削减两种方式。图 1 所示为光伏电源有功/无功关系曲线。

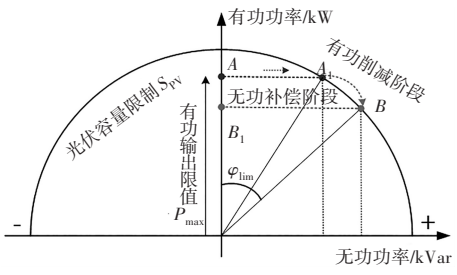


图 1 光伏电源有功/无功关系曲线

Fig. 1 P-Q relationship curve of the photovoltaic power source

电压调控的基本步骤如下。

1) 首先,光伏电源运行于最大功率点跟踪(maximum power point tracking,MPPT)曲线上 A 点,最大化消纳光伏输出有功功率。

2) 若电压发生越限,光伏电源维持有功输出不变,改变注网无功,平移至 A_1 点。

3) 当光伏电源无功裕度不足时,削减其有功功率并增加无功输出,二者共同参与电压调控,运行于 A_1B 段。

2 无功电压双层调控

2.1 光伏降序控制模型建立

基于潮流 Jacobian 矩阵求逆运算,可得如式(1)所示的电压-功率灵敏度矩阵。

$$\boldsymbol{J}^{-1}=\boldsymbol{S}_{\mathrm{en}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{X} & \boldsymbol{K}\\ \boldsymbol{\Phi} & \boldsymbol{\Psi}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{J}$ 为 Jacobian 矩阵;$\boldsymbol{S}_{\mathrm{en}}$ 为电压-功率灵敏度矩阵;$\boldsymbol{\Phi}$ 和 $\boldsymbol{\Psi}$ 分别为电压-有功和电压-无功灵敏度子矩阵。

结合潮流修正方程,可建立如式(2)所示的配电网电压调控模型。

$$\Delta U_i=U_i^0\Big(\sum_{j=1}^{N}\Phi_{ij}\Delta P_j+\sum_{j=1}^{N}\Delta Q_j\Big) \tag{2}$$

式中,Φ_{ij},Ψ_{ij} 分别为电压-有功和电压-无功灵敏度;ΔU_i 为节点 i 的电压越限量;U_i^0 为光伏电源调控前节点 i 的电压幅值;ΔP_j 和 ΔQ_j 分别为光伏电源 j 的有功功率和无功功率调整量;N 为光伏电源数量。

根据式(2),在单次电压调控时,选取对应电压-功率灵敏度最大的光伏电源为被控电源,可降低相应的功率调整量,该调控方式为光伏电源降序控制。

2.2 集群无功电压调控

为降低配电网光伏电源控制难度,提升电压调控速度,首先进行集群无功电压调控,优先利用集群内可调光伏电源的无功调控裕度,具体步骤如下。

1) 计算全网潮流,判断配电网各节点电压是否越限。

2) 若发生越限,选取电压越限量最高的节点和所在集群电压-无功灵敏度最大的光伏电源分别为主导节点和无功调控光伏。

初始条件下主导节点和对应无功调控光伏的降序向量为

$$\begin{cases}\delta\boldsymbol{U}=[\Delta U_\alpha,\Delta U_\beta,\cdots,\Delta U_\gamma]\\ \delta\boldsymbol{\Phi}=[\Phi_\sigma,\Phi_\tau,\cdots,\Phi_\omega]\end{cases} \tag{3}$$

3) 结合当前无功调控光伏裕度,计算实际无功补偿大小,进行电压调控。

对应无功调控光伏的功率补偿量为

$$\Delta Q_\sigma=\begin{cases}\Delta U_\alpha/(U_\alpha^0\Phi_{\alpha\sigma}),\Delta Q_{\mathrm{mar}}\geqslant\Delta Q_{\mathrm{dem}}\\ \sqrt{S_\sigma^2-P_\sigma^2}-Q_\sigma,\Delta Q_{\mathrm{mar}}<\Delta Q_{\mathrm{dem}}\end{cases} \tag{4}$$

式中,ΔQ_{mar} 和 ΔQ_{dem} 分别为无功调控光伏自身裕度和主导节点无功需求。

4) 计算集群潮流,更新边界节点电压与群间传输功

率,循环执行步骤(2)~(3),直至全网电压正常或所有集群无功输出受限。

2.3 集中无功电压调控

若全网无功调控裕度充足,主导节点与无功调控光伏未在同一集群时,上述调控无法发挥光伏电源的无功调压能力,此时执行集中无功电压调控,该调控包含集中无功补偿与集中有功削减。

集中无功补偿的具体步骤如下。

1) 降序分级全网电压越限量与对应光伏电源的电压-无功灵敏度,选取全网主导节点和全网无功调控光伏。

2) 计算光伏电源无功补偿量,调控主导节点越限电压。

3) 计算全网潮流,更新各节点电压无功调控光伏,迭代调控下一主导节点,直至全网电压正常或全网无功调控裕度耗尽。

集中有功削减的具体步骤如下。

1) 降序分级全网电压越限量与对应光伏电源的电压-有功灵敏度,选取全网主导节点和全网有功调控光伏。

2) 设置如式(5)所示的光伏电源功率变化约束,结合式(2)和当前光伏电源运行功率因数求解多元非线性方程组,计算其无功补偿量与有功削减量,进行电压调控。

$$(P_\alpha + \Delta P_\alpha)^2 + (Q_\alpha + \Delta Q_\alpha)^2 = S_\alpha^2 \tag{5}$$

3) 更新主导节点与有功调控光伏,迭代调控其他主导节点越限电压。

2.4 配电网双层协同控制策略

为最大化提升配电网光伏消纳水平,基于"先无功补偿后有功削减"的控制原则[26-27],将无功控制分为集群无功控制与集中无功控制,有功削减控制仍采用集中式方式进行,控制流程如图 2 所示。

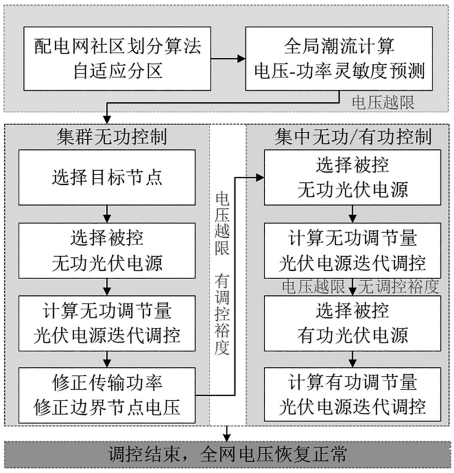


图 2 配电网双层协同电压调控流程

Fig. 2 Two-level coordinated voltage control framework for distribution networks

3 仿真算例分析

在 Matlab/Simulink 环境下建立 IEEE 33 节点典型配电网仿真模型,如图 3 所示。设置四种测试工况对所提调控策略进行验证分析:相同注网功率、不同注网功率、不同线路参数和不同网络结构。

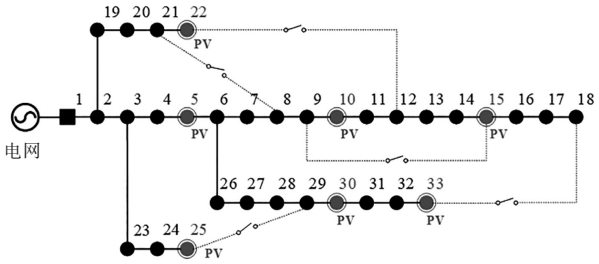


图 3 IEEE 33 节点配电网拓扑结构

Fig. 3 Topology of the IEEE 33-bus distribution network

3.1 所提控制策略适应性分析

3.1.1 相同注网功率

所有联络开关全部打开,各光伏电源分别输出 0.85 MW 有功功率,采用 IEEE 标准线路参数,初始条件下电压-功率灵敏度和电压调控过程分别如图 4、图 5 所示。

初始条件下进行第一轮调控,选取节点 15 作为主导节点,无功调控光伏 15 输出 530 kvar 无功功率后,电压越限率由 48.5%降至 12.1%;随后,进行第二轮调控,更新主导节点为 12,无功调控光伏 15 输出 81 kvar 无功功率后,电压越限率降至 3%;最后,进行第三轮调控,无功调控光伏输出 7 kvar 无功功率,全网电压恢复正常。

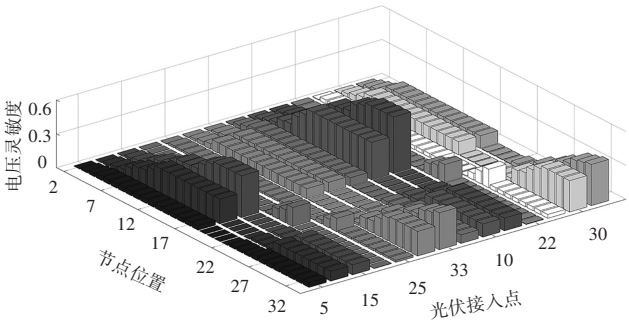


图 4 相同注网功率下的电压-功率灵敏度分布情况

Fig. 4 Voltage-power sensitivity distribution under the same grid-injected power

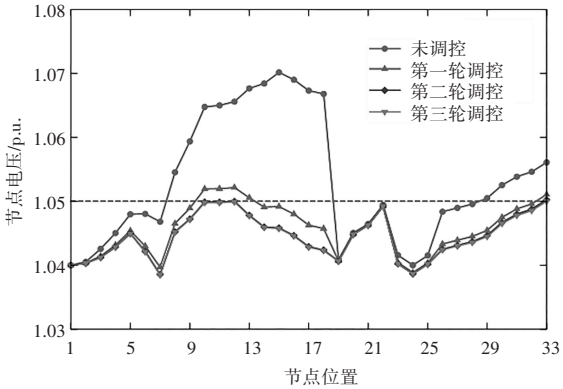


图 5 相同注网功率下电压调控过程示意图

Fig. 5 Voltage regulation process under the same grid-injected power

3.1.2 不同注网功率

所有联络开关全部打开,各光伏电源分别输出 0.60、0.60、0.60、0.55、1.20、1.20 和 1.20 MW 有功功率,采用 IEEE 标准线路参数,初始条件下电压-功率灵敏度和电

压调控过程分别如图 6、图 7 所示。

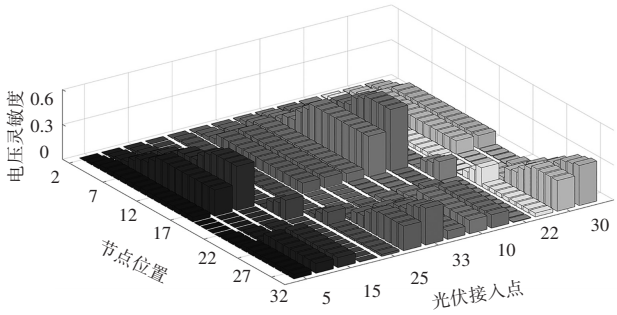


图 6　不同注网功率下的电压-功率灵敏度分布情况

Fig. 6　Voltage-power sensitivity distribution under different grid-injected power levels

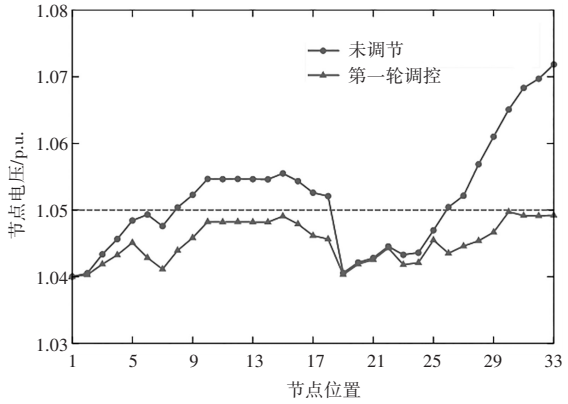


图 7　不同注网功率下电压调控过程示意图

Fig. 7　Voltage regulation process under different grid-injected power levels

对比图 4 和图 6 可知，对于同一网络结构和线路参数，相同/不同注网功率下的电压-功率灵敏度无明显差异，其数值最大波动为-5.69%，表明注网功率对电压-功率灵敏度的影响很小。

初始条件下进行第一轮调控，选取节点 33 作为主导节点，无功调控光伏 33 输出 665 kvar 无功功率后，全网电压恢复正常。

3.1.3　不同线路参数

所有联络开关全部打开，各光伏电源分别输出 0.85 MW 有功功率，将线路参数调整为 50% IEEE 标准数值，初始条件下的电压-功率灵敏度和电压调控过程分别如图 8、图 9 所示。

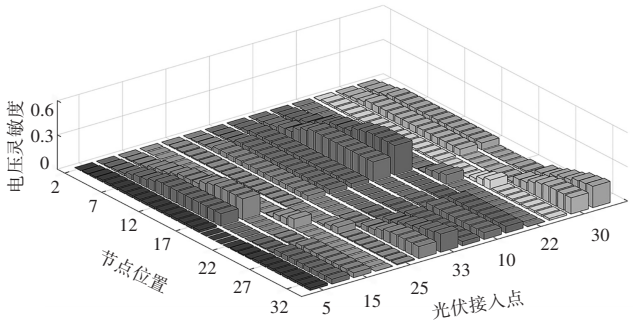


图 8　不同线路参数下的电压-功率灵敏度分布情况

Fig. 8　Voltage-power sensitivity distribution under different line parameters

对比图 4 和图 8 可知，对于同一注网功率和相同网络结构而言，线路参数变化前后的电压-功率灵敏度分布趋势近乎相同，但数值差异较大；电压-功率灵敏度的数值波动区间处于-54.15%～-46.23%，与阻抗参数呈现近似线性关系。

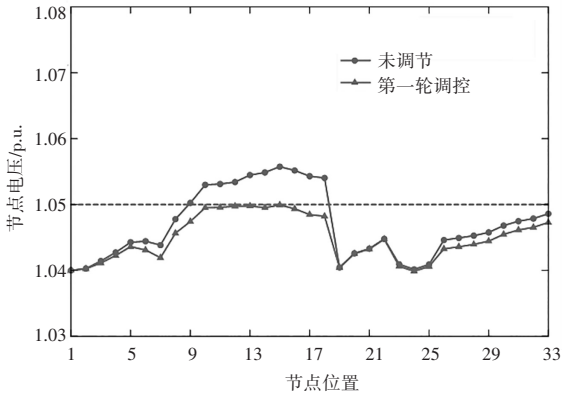


图 9　不同线路参数下电压调控过程示意图

Fig. 9　Voltage regulation process under different line parameters

初始条件下，选取节点 15 作为主导节点，无功调控光伏 15 输出 303 kvar 无功功率后，全网电压恢复正常。

3.1.4　不同网络结构

所有联络开关全部闭合，各光伏电源分别输出 0.85 MW 有功功率，采用 IEEE 标准线路参数，初始条件下电压-功率灵敏度和电压调控过程如图 10、图 11 所示。

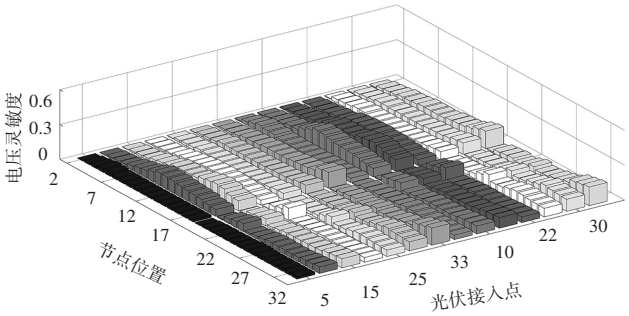


图 10　不同网络结构下电压-功率灵敏度分布情况

Fig. 10　Voltage-power sensitivity distribution under different network topologies

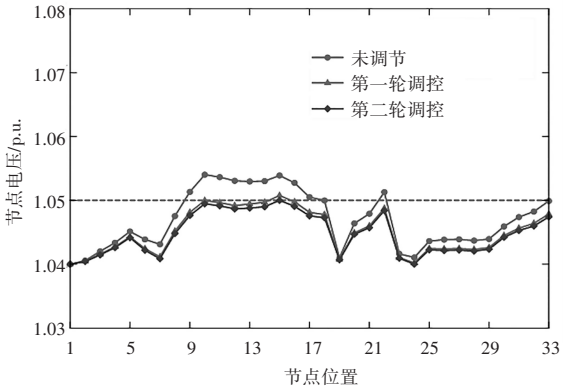


图 11　不同网络结构下电压调控过程示意图

Fig. 11　Voltage regulation process under different network topologies

对比图 4 和图 10 可知，相同注网功率和线路参数情况下，配电网网络结构变化前后电压-功率灵敏度分布和

数值差异显著,表明网络参数是影响电压-功率灵敏度的关键因素。

初始选取节点 10 作为主导节点进行第一轮调控,无功调控光伏电源 10 输出 354 kvar 无功功率后,电压越限率由 30%降至 6%;更新主导节点为 15 进行第二轮调控,无功调控光伏电源 15 输出 56 kvar 无功功率后,全网电压恢复正常。

综上,基于四种不同情况下配电网电压-功率灵敏度分布分析,验证了所提控制策略的适应性。

3.2 所提控制策略电压调控效果验证

为验证所提控制策略的有效性,利用 IEEE 33 节点环形配电网算例进行全天候电压适应性分析,配电网集群划分结果如图 12 所示,光伏电源出力与负荷功率曲线如图 13 所示。

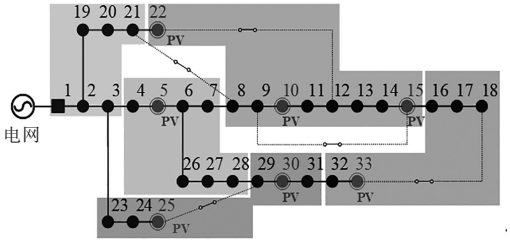


图 12 配电网集群划分结果

Fig. 12 Distribution network clustering results

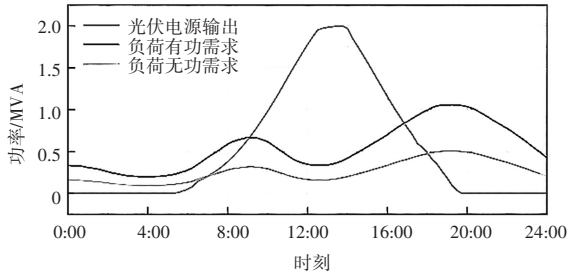


图 13 光伏出力和负荷需求走势

Fig. 13 PV power output and load demand profiles

由于配电网“源荷”匹配失衡,导致不同时间断面出现严重的过电压与欠电压问题,如图 14 所示。

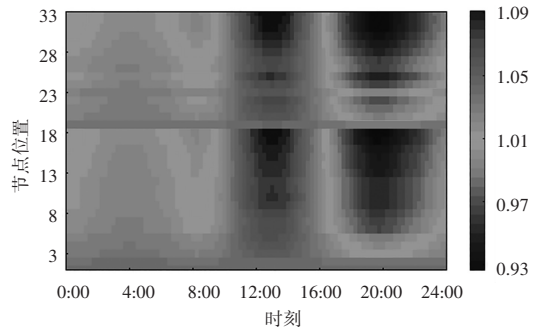


图 14 光伏电源未参与调控的电压分布

Fig. 14 Voltage distribution without PV participation in regulation

利用所提控制策略,通过调整光伏电源自身无功功率或有功功率输出,能够有效平抑配电网全天候越限电压问题,将配电网各节点电压限制在 0.95~1.05 p. u. 的正常范围内,如图 15 所示。

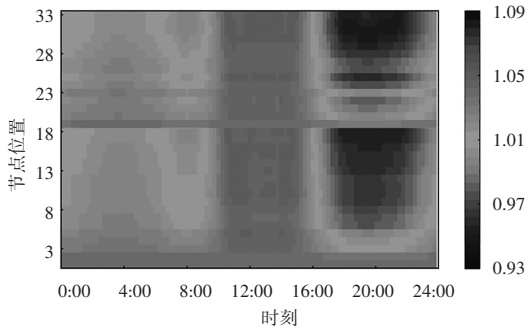


图 15 光伏电源参与调控的配电网电压分布

Fig. 15 Voltage profile of the distribution network with PV participation in regulation

4 实际配电网算例验证

以江苏省连云港市 10 kV 配电网为例,其拓扑结构如图 16 所示,每个接入点分别接入容量约为 650 kW(10 kW×65)的分布式光伏电源集群。由于就地负荷较轻,当光伏大发时,桥东、营港、假葬沟、古洞、龙窝、贾牛镇等节点电压出现越上限情况,个别情况严重节点越限达 9.7%;夜间光伏出力大幅降低,五尧、龙窝、革新庄、魏家峪等节点出现电压越下限情况,最低电压达 0.91 p. u.,严重影响了该地区的整体供电质量。

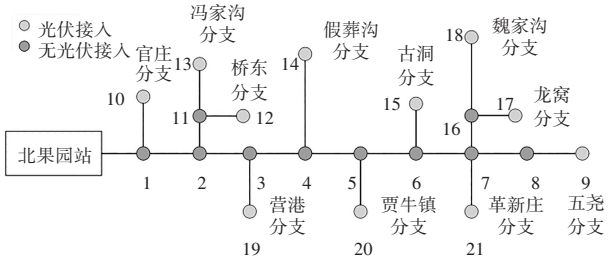


图 16 某地区实际配电网

Fig. 16 Actual regional distribution network

在本文所提优化调控策略下,该区域配电网各节点电压分布情况如图 17 所示。可见,区域内配电网各节点电压均不越限 0.95~1.05 p. u.,所提双层配电网优化调控策略可以满足配电网电压安全稳定运行要求,供电质量大幅提升。

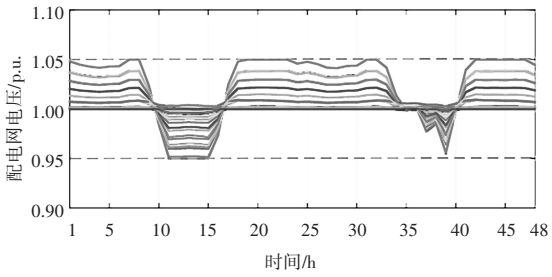


图 17 配电网运行 48 h 各节点电压

Fig. 17 Node voltage profiles of the distribution network over 48 h

5 结论

为解决高比例光伏接入引起的配电网电压越限问题，结合集群无功控制和集中无功控制，本文提出了基于电压-功率灵敏度的配电网无功电压双层调控策略，基于分布式光伏电源降序排列的最佳功率调整原则，结合无功补偿和有功削减两阶段调控模式，利用上层集群无功控制与下层集中无功控制的交互协同，克服了集中电压控制响应速度慢与集群电压控制越限电压“自治”受限的问题，实现了高比例分布式光伏有源配电网越限电压的有效调控。

参考文献

[1]刘运鑫，姚良忠，廖思阳，等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(15)：5484-5497.
[2]高鹏程，王蕾，李立生，等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备，2019，39(4)：190-196.
[3] Banfield B，Robinson D A，Agalgaonkar A P. Distributed MPC of residential energy storage for voltage regulation and peak shaving along radial distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2021，36(2)：1413-1424.
[4]刘星，陈众，陈李杰，等. 含高渗透率光伏的配电网就地-分布式电压控制[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(6)：268-275.
[5]姜涛，张东辉，李雪，等. 含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J]. 电力自动化设备，2021，41(9)：102-109.
[6]Zhang Z，Dou C，Yue D，et al. Regional coordinated voltage regulation in active distribution networks with PV-BESS[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II：Express Briefs，2023，70(2)：596-600.
[7]刘蕊，吴奎华，冯亮，等. 含高渗透率分布式光伏的主动配电网电压分区协调优化控制[J]. 太阳能学报，2022，43(2)：189-197.
[8]刘星，陈众，陈李杰，等. 含高渗透率光伏的配电网就地-分布式电压控制[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(6)：268-275.
[9]蔡永翔，唐巍，张博，等. 含高比例户用光伏低压配电网集中-就地两阶段电压-无功控制[J]. 电网技术，2019，43(4)：1271-1280.
[10] Yu P，Wan C，Sun M，et al. Distributed voltage control of active distribution networks with global sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2022，37(6)：4214-4228.
[11]Ceylan O，Paudyal S，Pisica I. Nodal sensitivity-based smart inverter control for voltage regulation in distribution feeder[J]. IEEE Journal of Photovoltaics，2021，11(4)：1105-1113.
[12]张波，文晓君，吴璇. 基于电压-功率灵敏度的有源配电网数据驱动电压协调控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报，2025，37(1)：35-42.
[13]吉亚娟，王江波. 基于在线潮流反馈优化的配电网光伏电源功率公平分配策略[J]. 电网技术，2024，48(11)：4503-4513.
[14]肖传亮，赵波，周金辉，等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J]. 电力系统自动化，2017，41(21)：147-155.
[15]曹敬，金玉龙，郑涛，等. 计及分布式电源集群不确定性的配电网分散鲁棒电压控制[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(22)：155-166.
[16]余昆，唐修明，陈星莺，等. 高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(24)：9535-9546.
[17]杨悦，陈宇航，成龙，等. 考虑节点功率储备与 GIN 中心性的主动配电网动态集群电压控制[J]. 电网技术，2024，48(2)：618-632.
[18]柴园园，刘一欣，王成山，等. 含不完全量测的分布式光伏发电集群电压协调控制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(8)：2202-2212.
[19]杜红卫，尉同正，夏栋，等. 基于集群动态划分的配电网无功电压自律-协同控制[J]. 电力系统自动化，2024，48(10)：171-181.
[20]林巧红，翁知颖，张国星. 基于粒子群算法的中低压配电网无功补偿协同优化方法[J]. 电子设计工程，2021，29(20)：134-142.
[21]高金兰，刁楠，侯学才，等. 基于改进粒子群算法的主动配电网无功优化[J]. 自动化技术与应用，2024，43(11)：19-23.
[22]赵晶晶，朱炯达，刘帅，等. 基于集群划分的配电网多时间尺度分布式有功-无功协同优化方法[J]. 电测与仪表，2024，61(10)：57-66.
[23]钱浩，董志会，项俊栋，等. 量子通信优化下配网系统日内多目标运行控制研究[J]. 电测与仪表，2025，62(2)：107-116.
[24]吕晓洁. 基于深度学习的分布式光伏发电系统电压稳定性评估[J]. 电子设计工程，2022，30(17)：114-118.
[25]黄颖峰，田巧红. 基于广域协同优化的电力系统多机暂态稳定无功控制方法[J]. 电测与仪表，2025，62(8)：170-177.
[26]许超，韩树成，王甫，等. 基于区块链技术的分布式新能源配电网调度多目标优化[J]. 自动化技术与应用，2024，43(12)：198-203.
[27]黄存强，安娟，田旭，等. 大数据接入下的主动配电网双层定性规划方法[J]. 自动化技术与应用，2025，44(2)：163-166.