DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.196 **中图分类号**：TM732 **文献标志码**：A

考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控方法

兰 征(中国电源学会会员)，杨淳智，谭仁煜(中国电源学会学生会员)，
何 东(中国电源学会会员)，易 波(中国电源学会学生会员)，
喻 希(中国电源学会学生会员)
(湖南工业大学电气与信息工程学院，株洲 412007)

摘要：随着配电网中分布式光伏的渗透率不断提高，光伏功率倒送与电压越限问题日益加剧，且各光伏的控制方式与调控潜力存在差异，导致异构光伏难以协同，影响配电网的调控与运行。因此，本文提出1种考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控方法。首先，针对高渗透率分布式光伏接入场景下易出现节点电压越限的问题，提出计及电压偏差灵敏度的配电网集群划分方法，实现综合考虑电压偏差、功率平衡和节点耦合程度的配电网集群划分；其次，分析异构分布式光伏有功、无功调节特性，构建其在不同运行模式下的调控模型；再次，基于同步型交替方向乘子算法，以综合运行成本和电压偏差最低为目标建立考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控模型；最后，以改进的IEEE 33节点配电网作为算例，验证所提优化模型的有效性。结果表明，所提策略实现了异构光伏的高效管控，在保证配电网经济运行的同时，改善了配电网的电压水平。

关键词：功率倒送；电压越限；异构分布式光伏；电压偏差灵敏度；集群划分；优化调控

Optimal Regulation Method for Distribution Network Clustering Considering Voltage Governance Potential of Heterogeneous Distributed Photovoltaics

LAN Zheng, *Member*, *CPSS*, YANG Chunzhi, TAN Renyu, *Student Member*, *CPSS*, HE Dong, *Member*, *CPSS*, YI Bo, *Student Member*, *CPSS*, YU Xi, *Student Member*, *CPSS*
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of distributed photovoltaics in distribution network, the problems of photovoltaic power backflow and voltage overrun are becoming more and more serious. Meanwhile, the distribution network is faced with different control methods and regulation potentials of photovoltaic, which makes the heterogeneous photovoltaics difficult to coordinate and further affects the regulation and operation of distribution network. Therefore, an optimal regulation method for distribution network clustering (DNC) considering the voltage governance potential of heterogeneous distributed photovoltaics (HDPV) is proposed. First, to solve the problem of node voltage overrun under a scenario of the integration of high-penetration distributed photovoltaics, a DNC partitioning method considering voltage deviation sensitivity is proposed by combining the voltage deviation, power balance and node coupling degree. Second, the active and reactive power regulation characteristics of HDPV are analyzed, and a regulation model in different operation modes is established. Furthermore, based on the synchronous alternating direction method of multipliers, an optimal regulation method for DNC considering the voltage governance potential of HDPV is developed with an objective of minimizing the

收稿日期：2024-11-21；**修回日期**：2025-01-09；**录用日期**：2025-01-29；**网络首发日期**：2025-02-11
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(52077072)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52077072

comprehensive operating cost and voltage deviation. Finally, an improved IEEE 33-node distribution network is used as an example to verify the effectiveness of the proposed optimization model, and results show that the proposed strategy realizes an efficient control of HDPV, and it can guarantee an economic operation of distribution network while improving its voltage level.

Keywords: Power backflow; voltage overrun; heterogeneous distributed photovoltaics (HDPV); voltage deviation sensitivity; cluster partitioning; optimal regulation

随着“双碳”目标的持续推进，构建以新能源为主体的新型电力系统已成为电力行业的首要任务。其中，分布式光伏 DPV(distributed photovoltaics)作为可再生能源的重要代表，得到了广泛的关注与大力发展。然而，高渗透率 DPV 的接入易导致功率倒送问题，使得“弃光”现象严重，同时加剧了节点电压越限的风险[1-2]。且 DPV 的异构特性(即配电网中接入的 DPV 型号、控制方式及其调控容量不尽相同)导致配电网优化调控时各 DPV 协同困难。此外，DPV 具备不确定性、波动性等特点，使得节点电压波动更加频繁，电压调节的难度也随之上升[3]。因此，如何在高渗透 DPV 接入场景下，保持配电网经济安全运行，是当前需要解决的关键问题[4]。配电网优化调控方式可分为集中式调控与集群式调控。集中式调控在高渗透率 DPV 接入场景下，由于控制节点数量较多、数据处理量大、全局搜索能力欠缺等问题，难以适应高渗透率 DPV 并网的情况[5]。相比之下，将配电网中电气特性相近的分布式能源与负荷进行聚合，构成分布式集群，以并行计算的方式实现配电网的集群式管控，可显著提升配电网的求解速度与灵活性[6]。

配电网集群划分方法方面，目前的研究主要集中于选取与完善集群划分的综合能效指标。文献[7]针对含高渗透率 DPV 的配电网场景，构建了计及模块度与功率平衡度的综合性能指标体系，实现了兼顾节点电气耦合性及集群有功平衡性的配电网集群划分；针对未考虑集群中可控资源的功率调节能力进而导致的可再生能源消纳率低的问题，文献[8]提出了提高集群分布式能源消纳能力的集群划分改进型综合性能指标；文献[9]基于节点间新能源、负荷、储能的功率互补特性，以模块度和源-荷-储匹配度作为目标进行集群划分，提高了 DPV 消纳能力。考虑到目前高渗透率 DPV 并网的趋势，功率倒送造成的电压越限问题愈发严重[10]。然而，现有的集群划分方法缺乏直接考虑集群内电压越限风险的指标。此外，集群划分综合能效指标权重的选取也容易出现权重选取不当的情况，导致出现“单一节点”，影响配电网集群划分的效果[11]。因此，配电网集群划分的综合能效指标及其权重的选取有待进一步优化。

配电网优化调控方面，目前的研究主要集中在配电网电压管控与经济运行方面。针对电压越限问题，文献[12]利用 DPV 的剩余容量对配电网进行无功补偿，实现了 DPV 参与配电网主动调压控制，然而该研究忽视了 DPV 的有功调节作用，在 DPV 有功多发时段未调节 DPV 有功出力的情况下，配电网中的有功负荷不足以消纳大体量的 DPV 有功功率，DPV 有功功率倒送导致的节点电压越限问题没有被解决，此外配电线路相较于输电线路，其电阻值要大于电抗值，因此需要考虑 DPV 有功调节对电压治理的作用；文献[13]基于 DPV 的有功-无功调控能力，提出多时间尺度下集群内部自律控制与群间协调控制结合的优化策略，实现光伏发电损失和网络有功损耗最小化；文献[14]考虑源-荷的时序与空间分布不确定性对划分结果的影响，提出 1 种基于集群划分的考虑光伏与负荷相关性的高渗透率光储配置方法，有效提高光伏接入容量以及消除储能冗余配置的同时，降低了节点电压和支路功率越限风险。然而，现有研究少有考虑光伏资源的异构特性，在实际情况下配电网中接入异构分布式光伏 HDPV(heterogeneous distributed photovoltaics)的容量、通信与控制方式各异，采用传统的单一光伏模型难以全面、准确地反映其真实运行状态。因此，配电网优化调控需要进一步考虑高渗透率 HDPV 的特性。

针对上述问题，本文提出 1 种考虑异构分布式

光伏电压治理潜力的配电网集群优化调控方法。首先，通过引入电压偏差灵敏度，改进配电网集群划分指标体系，并利用遗传算法实现含异构分布式光伏的配电网最优集群划分；其次，构建 HDPV 有功-无功调控模型，包括不可控、无功可控及有功无功均可控 3 种模型，适配其异构特性；再次，以网络损耗成本、光伏有功缩减成本、倒送惩罚成本及电压偏差等为目标函数，建立考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式调控模型；最后，采用改进的 IEEE 33 节点配电网作为算例，采用同步型交替方向乘子法 SADMM(synchronous alternating direction method of multipliers)对集群优化问题进行解耦求解，验证本文优化模型的有效性。

1 考虑电压偏差灵敏度的配电网集群划分

本文针对高渗透率 DPV 接入场景下易出现节点电压越限的问题，提出 1 种关联配电网集群运行稳定性的电压偏差度指标，以降低节点电压越限风险并反映集群内部电压质量。此外，为便于集群的协同运行，应保证集群内部节点的电气耦合紧密，集群间电气耦合松散，使用电气模块度作为结构指标[15]。同时，为充分使各集群内的 HDPV 有功就地消纳、无功就地补偿，采用有功无功平衡度作为其评价指标。因此，本文计及电压偏差灵敏度的集群划分综合性能指标可表示为

$$\varphi = \lambda_1\varphi_{\mathrm{V}} + \lambda_2\rho + \lambda_3\varphi_{\mathrm{S}} \tag{1}$$

式中：λ_1、λ_2、λ_3 分别为各指标的权重系数，且 $\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3=1$；$\varphi_{\mathrm{V}}$ 为电压偏差度；ρ 为模块度；φ_{S} 为有功无功平衡度。对各集群划分综合能效指标选取不同的权重系数，可得到与之对应的划分结果。

1.1 电压偏差灵敏度指标

随着节点运行电压与额定电压偏差的增大，配电网电压调节的需求也相应提升。用电压期望调节量反映这一需求，其表达式为

$$\frac{U_i - U_{\mathrm{N}}}{\Delta U_i} = \frac{U_s - U_{\mathrm{N}}}{\Delta U_s} \tag{2}$$

式中：U_i 和 U_s 分别为节点 i 和节点 s 的运行电压；U_{N} 为额定电压；ΔU_i 和 ΔU_s 分别为节点 i 和节点 s 的期望电压调节量。

对于节点 i 与节点 s 的电压调节量 ΔU_{si} 和 ΔU_{ss}，存在有功、无功-电压灵敏度因子之间关系，即

$$\frac{\Delta U_{si}}{\Delta U_{ss}} = \frac{\Delta P_s/\Delta U_i + \Delta Q_s/\Delta U_i}{\Delta P_s/\Delta U_s + \Delta Q_s/\Delta U_s} = \frac{S_{\mathrm{UP},si} + S_{\mathrm{UQ},si}}{S_{\mathrm{UP},ss} + S_{\mathrm{UQ},ss}} = \frac{S_{si}}{S_{ss}} \tag{3}$$

式中：S_{si} 为节点 i 对于集群内有功、无功-电压灵敏度最大节点 s 的灵敏度系数之和；S_{ss} 为节点 s 对于自身的有功、无功-电压灵敏度系数之和；ΔP_s 和 ΔQ_s 分别为节点 s 的有功、无功调节量；$S_{\mathrm{UP},si}$ 为有功-电压灵敏度关系矩阵中第 s 行第 i 列元素，表示节点 i 有功功率的变化引起节点 s 电压的变化值；$S_{\mathrm{UQ},si}$ 为无功-电压灵敏度关系矩阵中第 s 行第 i 列元素，表示节点 i 无功功率的变化引起节点 s 电压的变化值；$S_{\mathrm{UP},ss}$ 和 $S_{\mathrm{UQ},ss}$ 分别为有功、无功-电压灵敏度关系矩阵中第 s 行第 s 列元素，表示节点 s 有功、无功功率的变化引起节点 s 本身电压的变化值。

为了真实反映集群内节点电压越限的风险程度，将电压偏差灵敏度定义为

$$\varphi_{\mathrm{V}} = 1 - \sum_{k=1}^{N_{\mathrm{C}}}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{N}\frac{S_{si}(U_i - U_{\mathrm{N}})}{S_{ss}} \tag{4}$$

式中：N_{C} 为集群数量；N 为配电网中除根节点外所有节点数量。该指标表征配电网集群中某一节点电压产生变化时，对另一节点造成的影响，可有效反映各集群内部电压水平。其值越小，集群发生电压越限的风险越低。

目前研究中，一般认为节点额定运行电压 U_{N} 恒等于 1。然而，在 HDPV 少发和负荷低谷时段，若维持较高的并网点电压，并网点的上游节点会因线路轻载而导致电压升高。在 HDPV 多发和负荷高峰时段，若并网点的电压较低，其上游节点的电压会因输电线路重载导致电压降落增大。基于此，本文通过引入“逆调压”原理，即通过各集群内的

用户负荷率 η 和 HDPV 发电负荷率 β 的概念来改进 U_{N}。相对于恒调压(U_{N}设定为恒等于 1)的形式，本文方法的改进之处在于：将节点电压水平与 HDPV 有功出力大小、配电网负荷相关联。该改进方法避免了因线路轻载导致节点电压升高的问题，进而降低网络损耗，其表达形式为

$$U_{\mathrm{N}}=\begin{cases}0.95 & \eta=\eta_{\min},\beta=\beta_{\min}\\ 0.95+a\dfrac{\beta-\beta_{\min}}{\beta_{\max}-\beta_{\min}}+b\dfrac{\eta-\eta_{\min}}{\eta_{\max}-\eta_{\min}} & \eta_{\min}<\eta<\eta_{\max},\beta_{\min}<\beta<\beta_{\max}\\ 1.05 & \eta=\eta_{\max},\beta=\beta_{\max}\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}\beta=P_{\mathrm{PV},i}(t)/P_{\mathrm{PV},i,\max}(t)\\ \eta=P_{\mathrm{L},i}(t)/P_{\mathrm{L},i,\max}(t)\end{cases} \tag{6}$$

式中：$P_{\mathrm{PV},i}(t)$为 t 时刻第 i 台 HDPV 的有功出力；$P_{\mathrm{PV},i,\max}(t)$为 t 时刻第 i 台 HDPV 的出力最大值；$P_{\mathrm{L},i}(t)$为 t 时刻系统有功负荷；$P_{\mathrm{L},i,\max}(t)$为 t 时刻系统最大有功负荷；a 和 b 分别为 HDPV 发电负荷率 β 和用户负荷率 η 的系数。

1.2 模块度指标

本文采用基于电气距离的模块度指标衡量集群的结构强度。模块度指标越大，则集群内部耦合紧密程度越高。模块度函数表达式为

$$\rho=\frac{1}{2m}\sum_{i\in\Omega}\sum_{j\in\Omega}\left(e_{ij}-\frac{k_ik_j}{2m}\right)\delta(i,j) \tag{7}$$

式中：e_{ij}为节点 i 和节点 j 相连边的权重，节点 i 与 j 相连时 e_{ij}=1，反之 e_{ij}=0；m 为整个社区网络中所有边的权重之和；k_i 和 k_j 分别为节点 i 和节点 j 所有连接边的权重之和；$\delta(i,j)$表示 2 个节点是否隶属于相同集群，为 0-1 变量。

目前大部分学者采用电气距离来衡量节点间电气耦合的紧密程度[16]，其表达式为

$$L_{ij}=\sqrt{(d_{i1}-d_{j1})^2+(d_{i2}-d_{j2})^2+\cdots+(d_{in}-d_{jn})^2} \tag{8}$$

$$d_{ij}=\lg\frac{S_{\mathrm{UQ},jj}+S_{\mathrm{UP},jj}}{S_{\mathrm{UQ},ij}+S_{\mathrm{UP},ij}} \tag{9}$$

式中：L_{ij}为节点 i 与节点 j 之间的电气距离；d_{ij}为节点 j 有功与无功功率发生变化时，节点 j 电压变化与节点 i 电压变化之比。

进一步地，节点边权值与电气距离关系可以表示为

$$e_{ij}=1-L_{ij}/\max(L_{ij}) \tag{10}$$

1.3 有功无功平衡度指标

本文考虑了功率平衡度指标进行集群划分，以实现内部功率平衡、HDPV 就地消纳，从而缓解功率倒送问题，可表示为

$$\varphi_{\mathrm{S}}=(\varphi_P+\varphi_Q)/2 \tag{11}$$

式中：φ_P为系统总有功平衡度指标；φ_Q为系统总无功平衡度指标。φ_{S}越大表明集群内部功率平衡程度越高。

有功平衡度指标用来描述单个集群内部有功功率总需求与总供给之间的平衡关系，其表达式为

$$\varphi_P=\frac{1}{N_{\mathrm{C}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{C}}}\left(\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\frac{\left|P_{\mathrm{clu},i}(t)\right|}{\max\left|P_{\mathrm{clu},i}(t)\right|}\right) \tag{12}$$

式中：$P_{\mathrm{clu},i}(t)$为 t 时刻集群 i 的净功率。

无功平衡度指标用来描述单个集群内部无功功率总需求与总供给之间的平衡关系，其表达式为

$$Q_i=\begin{cases}\dfrac{Q_{\mathrm{sup},i}}{Q_{\mathrm{need},i}} & Q_{\mathrm{sup},i}<Q_{\mathrm{need},i}\\ 1 & Q_{\mathrm{sup},i}\geqslant Q_{\mathrm{need},i}\end{cases} \tag{13}$$

$$\varphi_Q=\frac{1}{N_{\mathrm{C}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{C}}}Q_i \tag{14}$$

式中：$Q_{\mathrm{sup},i}$和 $Q_{\mathrm{need},i}$分别为集群 i 的最大无功功率输出和需求；Q_i为集群 i 的无功平衡度。

1.4 配电网集群划分方法

基于电压偏差灵敏度指标、模块度指标和有功无功平衡度指标，构建考虑电压偏差灵敏度的配电网集群划分综合能效指标体系，如图 1 所示。本文将集群划分流程分为 3 个阶段，分别为初始化阶段、节点合并阶段及集群合并阶段。

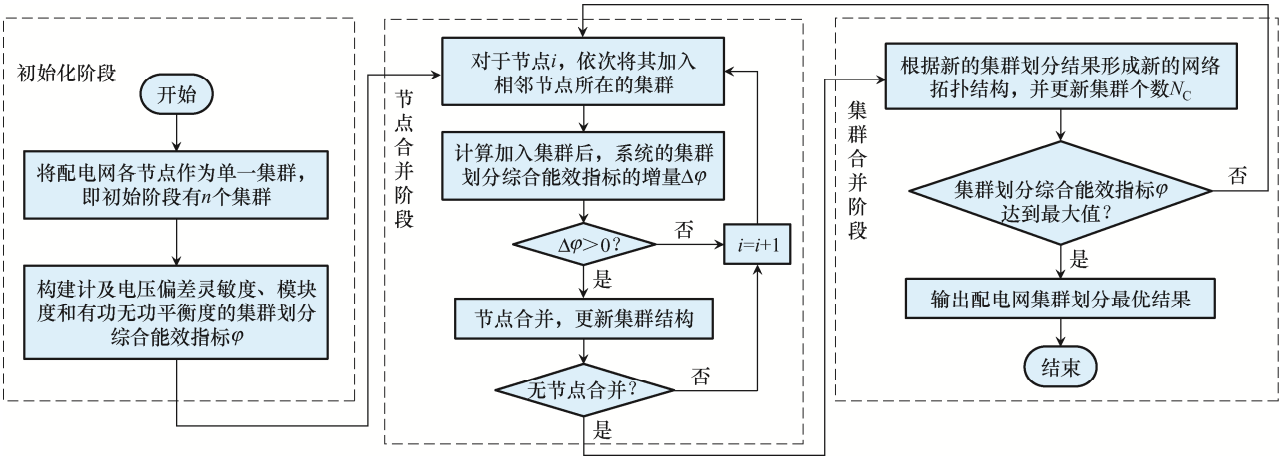


图 1 集群划分流程

Fig. 1 Flow chart of cluster partitioning

初始化阶段，系统内各个节点被视为独立集群，即共有 n 个集群，同时构建考虑电压灵敏偏差度的配电网集群划分综合能效指标体系。

节点合并阶段，对于节点 i，依次将其加入相邻节点所在的集群，计算加入集群后，系统的集群划分综合性能指标增量 $\Delta\varphi$。若 $\Delta\varphi<0$，认为该节点不适合与相邻节点合并，同时返回节点合并阶段的第一步；若 $\Delta\varphi>0$，则合并节点，更新集群结构。

集群合并阶段，将已形成的集群视为新节点，重复前述节点合并逻辑，直至系统综合能效指标 φ 达到最优水平，从而确定最优集群划分方案。

2 考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控模型

2.1 异构分布式光伏模型运行特性分析

(1)有功无功不可调节 HDPV

当 HDPV 处于离线模式时，不参与电网互动。此时，HDPV 仅按照最大功率跟踪控制方式输出有功无功，数学建模为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{HDPV}} = P(t) \\ Q_{\mathrm{HDPV}} = Q(t) \end{cases} \tag{15}$$

式中，$P(t)$和 $Q(t)$分别为 HDPV 实时输出的有功功率和无功功率。

(2)有功不可调、无功可调节 HDPV

当 HDPV 处于半离线模式时，仅无功调节功能参与电网互动。此类 HDPV 仅按照最大功率跟踪控制方式输出有功，无功功率输出在光伏并网逆变器功率因数的范围内进行调控，数学建模为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{HDPV}} = P(t) \\ Q_{\mathrm{HDPV}} = Q(t) \pm \Delta Q(t) \end{cases} \tag{16}$$

式中，$\Delta Q(t)$为 HDPV 无功功率实时调节量。

(3)有功无功可调节 HDPV

当 HDPV 处于在线模式时，具备有功无功调节功能，数学建模为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{HDPV}} = P(t) - P_{\mathrm{dec}}(t) \\ Q_{\mathrm{HDPV}} = Q(t) \pm \Delta Q(t) \end{cases} \tag{17}$$

式中，$P_{\mathrm{dec}}(t)$为 HDPV 有功功率实时缩减量。

2.2 目标函数

本文以系统综合运行成本最低和电压偏差最小为目标函数，其表达式为

$$\min F = \omega_1 (C_{\mathrm{loss}} + C_{\mathrm{pvs}} + C_{\mathrm{re}}) + \omega_2 D_{\mathrm{V}} \tag{18}$$

式中：ω_1、ω_2 分别为系统综合运行成本、电压偏差的权重系数，且 $\omega_1+\omega_2=1$；C_{loss} 为网络损耗费用；C_{pvs} 为 HDPV 有功缩减费用；C_{re} 为功率倒送惩罚费用；D_{V} 为系统整体电压偏差。

$$\begin{cases} C_{\text{loss}} = c_{\text{loss}} \sum_{t=1}^{T} I_{ij}^2(t) \cdot r_{ij} \\ C_{\text{pvs}} = c_{\text{pvs}} \sum_{n=1}^{N_{\text{PV}}} \sum_{t=1}^{T} (P_{\text{PV},i,\max}(t) - P_{\text{PV},i}(t)) \\ C_{\text{re}} = c_{\text{re}} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{re}}(t) \\ D_{\text{V}} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} \dfrac{U_i(t) - U_{\text{N}}}{U_{\text{N}}} \cdot 100\% \end{cases} \tag{19}$$

式中：c_{loss}为网损成本系数；$I_{ij}(t)$为 t 时刻线路电流；r_{ij} 为线路电阻；c_{pvs} 为光伏有功削减成本系数；$P_{\text{PV},i,\max}(t)$为每时刻的光伏最大预测输出功率；$P_{\text{PV},i}(t)$为 t 时刻光伏实时输出功率；c_{re}为倒送功率惩罚系数；$P_{\text{re}}(t)$为 t 时刻的倒送功率。

2.3 约束条件

(1)HDPV 运行约束

针对有功无功不可调节 HDPV(M1 模式)建立运行约束条件，即

$$\begin{cases} P_{\text{pv},i}(t) = P_{\text{pv},i,\max}(t) \\ Q_{\text{pv},i}(t) = 0 \\ P_{\text{pv},i}^2(t) + Q_{\text{pv},i}^2(t) \leqslant S_{\text{pv},i}^2(t) \end{cases} \tag{20}$$

针对有功不可调、无功可调节 HDPV(M2 模式)建立运行约束条件，即

$$\begin{cases} P_{\text{pv},i}(t) = P_{\text{pv},i,\max}(t) \\ -Q_{\text{pv},i,\max}(t) \leqslant Q_{\text{pv},i}(t) \leqslant Q_{\text{pv},i,\max}(t) \\ P_{\text{pv},i}^2(t) + Q_{\text{pv},i}^2(t) \leqslant S_{\text{pv},i}^2(t) \end{cases} \tag{21}$$

针对有功无功可调节 HDPV(M3 模式)建立运行约束条件，即

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{\text{pv},i}(t) \leqslant P_{\text{pv},i,\max}(t) \\ -Q_{\text{pv},i,\max}(t) \leqslant Q_{\text{pv},i}(t) \leqslant Q_{\text{pv},i,\max}(t) \\ P_{\text{pv},i}^2(t) + Q_{\text{pv},i}^2(t) \leqslant S_{\text{pv},i}^2(t) \end{cases} \tag{22}$$

式中：$P_{\text{pv},i}(t)$为 t 时刻第 i 台 HDPV 输出的有功功率；$P_{\text{pv},i,\max}(t)$为 t 时刻第 i 台 HDPV 有功功率的输出上限；$Q_{\text{pv},i}(t)$为 t 时刻第 i 台 HDPV 输出的无功功率；$Q_{\text{pv},i,\max}(t)$为 t 时刻第 i 台 HDPV 无功功率的输出上限；$S_{\text{pv},i}(t)$为第 i 台 HDPV 的容量。

(2)配电网集群安全运行约束

针对配电网集群安全运行建立约束条件，即

$$\begin{cases} U_{\min} \leqslant U_i(t) \leqslant U_{\max} \\ I_{ij,\min} \leqslant I_{ij}(t) \leqslant I_{ij,\max} \\ P_{\text{net},\min} \leqslant P_{\text{net}}(t) \leqslant P_{\text{net},\max} \\ Q_{\text{net},\min} \leqslant Q_{\text{net}}(t) \leqslant Q_{\text{net},\max} \end{cases} \tag{23}$$

式中：$U_i(t)$为 t 时刻节点 i 的电压；$U_{\min}$ 和 $U_{\max}$ 分别为电压的下限和上限；$I_{ij,\min}$ 和 $I_{ij,\max}$ 分别为电流的下限和上限；$P_{\text{net}}(t)$为 t 时刻配变传输有功功率；$P_{\text{net},\min}$ 和 $P_{\text{net},\max}$ 分别为配变传输最小和最大传输有功功率；$Q_{\text{net}}(t)$为 t 时刻配变传输无功功率；$Q_{\text{net},\min}$ 和 $Q_{\text{net},\max}$ 分别为配变最小和最大传输无功功率。

(3)潮流约束

建立潮流约束条件，即

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^{n} U_{j,t} (G_{ij} \cos\theta_{ij,t} + B_{ij} \sin\theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j=1}^{n} U_{j,t} (G_{ij} \sin\theta_{ij,t} - B_{ij} \cos\theta_{ij,t}) \end{cases} \tag{24}$$

式中：$P_{i,t}$、$Q_{i,t}$分别为 t 时刻注入节点 i 的有功、无功功率；$U_{j,t}$为节点 j 在 t 时刻的电压幅值；$\theta_{ij,t}$为 t 时刻节点 i 与节点 j 之间的电压相角差；G_{ij}、B_{ij}分别为支路 ij 的电导、电纳。

2.4 基于 SADMM 算法的配电网集群式解耦求解

本文采用 SADMM 算法对配电网集群进行解耦求解，如图 2 所示。解耦时，断开集群 m 边界节点 i 与集群 n 边界节点 j 间的联络线 l_{ij}，引入虚拟节点 j^*至集群 m 中作为节点 j 的复制节点，与节点 i 相连，再应用同样的方法引入虚拟节点 i^*。

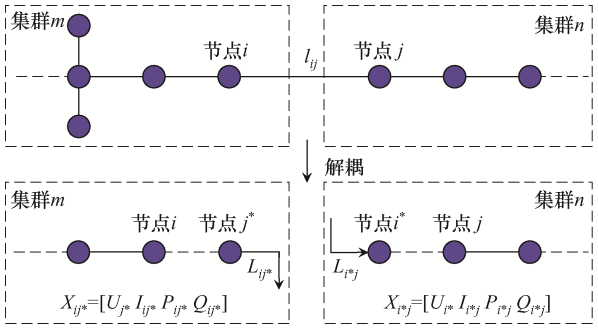


图 2　配电网集群解耦示意

Fig. 2 Schematic of DNC decoupling

在集群式计算的过程中，各集群通过虚拟节点交换一致性变量进行独立计算。采用边界节点电

压，线路的电流以及有功、无功功率作为集群间的一致性变量，即集群 m、n 的一致性变量分别为 X_{ij*}=[U_{j*} I_{ij*} P_{ij*} Q_{ij*}]、X_{i*j}=[U_{i*} I_{i*j} P_{i*j} Q_{i*j}]，U_{j*}、I_{ij*}、P_{ij*}、Q_{ij*}分别为虚拟节点 j^*的电压、虚拟联络线 L_{ij*} 的电流、有功功率、无功功率，U_{i*}、I_{i*j}、P_{i*j}、Q_{i*j} 分别为虚拟节点 i^*的电压、虚拟联络线 L_{i*j}的电流、有功功率、无功功率。

一致性约束可表示为

$$X_{ij*} = X_{i*j} \tag{25}$$

为使分布式求解达到与集中式求解相同的效果，构造考虑一致性的惩罚函数，即

$$\begin{cases} L_\alpha = \lambda_{ij*,k}(X_{ij*} - X_{ij*,\,\mathrm{ref},k}) + \dfrac{\nu}{2}\left\| X_{ij*} - X_{ij*,\mathrm{ref},k} \right\|_2^2 \\ X_{ij*,\mathrm{ref},k} = X_{i*j,\mathrm{ref},k} = \dfrac{X_{i*j} + X_{ij*}}{2} \end{cases} \tag{26}$$

式中：L_α为一致性约束的惩罚函数；$X_{ij*,\mathrm{ref},k}$、$X_{i*j,\mathrm{ref},k}$ 分别为集群 m、n 第 k 次迭代计算中边界变量参考值；ν 为一致性变量对应的惩罚参数；$\lambda_{ij*,k}$ 为集群 i 第 k 次迭代对应的拉格朗日乘子向量。

SADMM 算法的求解原理是在各子问题中加入一致性罚项，确保解耦求解过程满足全局一致性约束。据此，以集群 m 为例，原问题可等价转化为

$$L = \min\{F_m + L_\alpha\} \tag{27}$$

适用于配电网集群分布式优化的 SADMM 算法[17]计算步骤如下。

步骤 1 初始化 L_α=0，每个集群独立并行计算 HDPV 出力计划及一致性变量，并将上述计算所得的一致性变量传递至相邻的集群。

步骤 2 迭代求解过程中，各配电网集群间的虚拟边界联络上的一致性变量更新规则可表示为

$$\begin{cases} X_{ij^*,m+1} = \arg\min\left[F_i(X_{ij*}) + \lambda_{ij^*,m}(X_{ij*} - X_{ij*,\,\mathrm{ref},m}) + \dfrac{\nu}{2}\left\| X_{ij*} - X_{ij*,\,\mathrm{ref},m} \right\|_2^2 \right] \\ X_{i^*j,m+1} = \arg\min\left[F_j(X_{i*j}) + \lambda_{i^*j,m}(X_{i*j} - X_{i*j,\,\mathrm{ref},m}) + \dfrac{\nu}{2}\left\| X_{i*j} - X_{i*j,\,\mathrm{ref},m} \right\|_2^2 \right] \end{cases} \tag{28}$$

$$\begin{cases} \lambda_{ij^*,m+1} = \arg\min\left[\lambda_{ij*,m} + \left\| X_{ij*} - X_{ij*,\,\mathrm{ref},m} \right\| \right] \\ \lambda_{i^*j,m+1} = \arg\min\left[\lambda_{i*j,m} + \left\| X_{i*j} - X_{i*j,\,\mathrm{ref},m} \right\| \right] \end{cases} \tag{29}$$

式中：$F_i(X_{ij*})$、$F_j(x_{i*j})$ 分别为集群 i、j 子优化问题的目标函数；$X_{ij*,m+1}$、$X_{i*j,m+1}$ 分别为集群 i、j 第 m+1 次迭代计算所得的一致性变量值；$\lambda_{ij*,m}$、$\lambda_{i*j,m}$ 分别为集群 i、j 第 m 次迭代的拉格朗日乘子向量，$\lambda_{ij*,m+1}$、$\lambda_{i*j,m+1}$ 分别为集群 i、j 第 m+1 次迭代的拉格朗日乘子向量。

步骤 3 根据式(29)更新考虑一致性的惩罚函数，并将计算出的一致性变量传递至相邻网络。

步骤 4 当所有配电网集群完成分布式优化后，判断一致性变量是否满足迭代精度，是则返回结果，否则转入步骤 2，判断依据为

$$\begin{cases} r_{ij^*,m} = r_{i^*j,m} = \left\| X_{ij^*,m} - X_{i^*,m} \right\| \leqslant \varepsilon \\ s_{ij^*,m} = s_{i^*j,m} = \left\| X_{ij^*,\,\mathrm{ref},m} - X_{ij^*,\,\mathrm{ref},m-1} \right\| \leqslant \varepsilon \end{cases} \tag{30}$$

式中：$r_{ij*,m}$、$r_{i*j,m}$ 分别为集群 i、j 第 m 次迭代计算的原始残差；$s_{ij*,m}$、$s_{i*j,m}$ 分别为集群 i、j 第 m 次迭代计算的对偶残差；ε 为收敛精度；$X_{ij*,\mathrm{ref},m-1}$ 为集群 i 第 m−1 次迭代计算中边界变量参考值。

2.5 配电网集群优化流程

考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化流程如图 3 所示。首先，根据分布式光伏的异构特性，构建其 3 种不同的 HDPV 运行模型；然后，以综合运行成本及电压偏差等为目标建立考虑 HDPV 电压治理潜力的配电网集群式优化调控模型；最后，在最优集群划分结果的基础上，

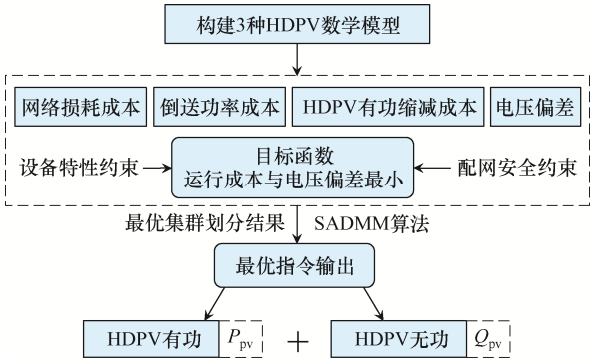


图 3 配电网集群式优化流程

Fig. 3 Flow chart of DNC optimization

利用 SADMM 算法，计算出优化后的各 HDPV 有功-无功出力，进而使配电网运行经济、电压稳定。

3　仿真算例

3.1　仿真设置

采用改进的IEEE 33 节点配电系统对本文所提方法进行仿真验证，配电网结构如图 4 所示，24 h 的 HDPV 有功出力与负荷需求曲线如图 5 所示，算例的相关参数见表 1 和表 2。

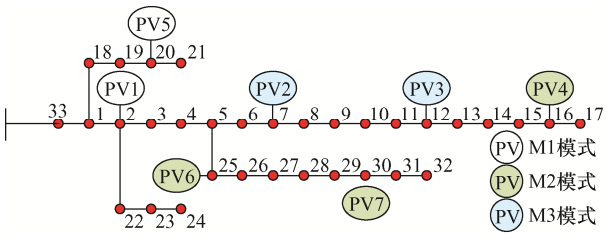


图 4　改进的 IEEE 33 节点配电系统

Fig. 4 Improved IEEE 33-node distribution system

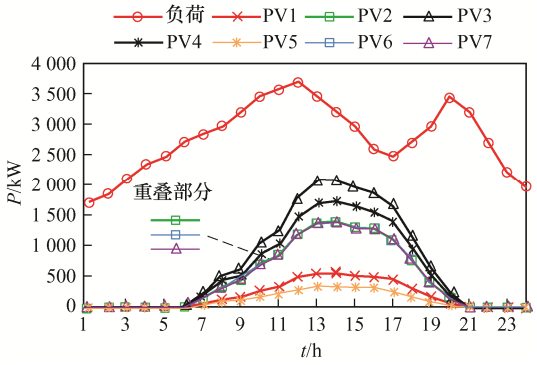


图 5　配电网负荷与 HDPV 出力预测数据

Fig. 5 Distribution network load, and forecast data of HDPV output

表 1　各 HDPV 容量

Tab. 1 Capacity of each HDPV

接入节点编号	并网逆变器容量/kVA
2	600
7、25、30	1 400
12	2 100
16	1 700
20	400

3.2　集群划分结果分析

为验证本文所提集群划分方法的有效性，集群划分中对各指标设置 5 种不同的权重。其中，权重值的选取根据层次分析法中的 9/9~9/1 分数标度法[18]。各方案的指标权重与集群划分结果见表 3。

表 2　算例相关参数

Tab. 2 Example-related parameters

参数	数值
电压等级/kV	10
电压上下限(p.u.)	0.95~1.05
光伏上网电价 c_{pvs}/[元·(kW·h)$^{-1}$]	0.65
网损经济系数 c_{loss}/[元·(kW·h)$^{-1}$]	0.40
倒送惩罚系数 c_{re}/[元·(kW·h)$^{-1}$]	1.00

表 3　不同权重下的集群划分结果

Tab. 3 Cluster partitioning results with different weights

类别	$[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$	$[\rho, \varphi_S, \varphi_V]$	φ	孤立节点数量
类别 1	[1.0, 0, 0]	[0.18,—,—]	0.18	0
类别 2	[0.5, 0.5, 0]	[0.12, 0.70,—]	0.41	0
类别 3	[0.4, 0.3, 0.3]	[0.17, 0.71, 0.46]	0.42	0
类别 4	[0.3, 0.4, 0.3]	[0.11, 0.72, 0.39]	0.44	1
类别 5	[0.3, 0.3, 0.4]	[0.08, 0.70, 0.48]	0.42	2

由表 3 可以看出：模块度方面，类别 3 比类别 1 低 6.10%，比类别 2 高 1.80%；综合考虑所有指标时，类别 3 比类别 4 高 36.00%，比类别 5 高 52.66%；有功无功平衡度方面，所设计组数的计算结果差距不大；集群电压偏差度方面，类别 3 比类别 4 高 15.22%，比类别 5 低 23.33%；综合性集群划分指标方面，类别 3 的综合集群划分指标数值相对于类别 1 与类别 2 分别提升 127.78%和 2.44%，同时，类别 3 的综合集群划分指标数值相对于类别 4 只相差 0.02，与类别 5 相同，但在类别 4 与类别 5 中出现了孤立节点。

综上所述，在权重调整过程中，功能性指标的强化导致集群划分趋于细致，虽然显著提升了功能表现，却牺牲了集群结构性能，极端情况下可能产生孤立节点集群。相反，增加结构指标的重要性时，可促使集群划分更注重内部耦合程度，有效提升了结构性能，而功能性与稳定性指标则保持相对稳定，仅受到轻微扰动。此外，实际工况下，若在孤立节点单独加装集群控制终端，会使得建设成本大幅度增加，不满足配电网改造的经济性要求。因此选取类别 3(权重为 λ_1=0.4，λ_2=0.3，λ_3=0.3)的划分

结果作为最优集群，如图 6 所示。

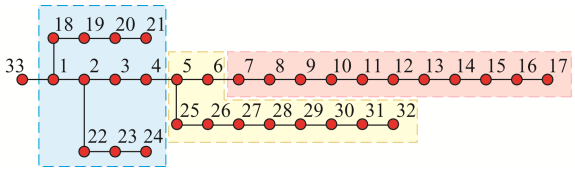


图 6 最优集群划分结果

Fig. 6 Optimal cluster partitioning result

3.3 配电网运行优化结果分析

为验证本文所提方法的有效性，采取如下 3 种策略进行仿真。

策略 1：不进行配电网集群划分，不考虑异构分布式光伏有功无功调节特性。作为空白对照组。

策略 2：基于传统集群划分结果，考虑异构分布式光伏有功无功调节特性。作为传统调控策略。

策略 3：基于最优集群划分结果，考虑异构分布式光伏有功无功调节特性。作为本文调控策略。

(1)配电网综合运行经济性分析

表 4 为各个场景下的经济性计算结果，可知：网损优化方面，本文策略作用下的网损值最小，相较于策略 1 和策略 2 分别减小 55.01%和 44.13%；有功削减和功率倒送方面，由于本文策略考虑了 HDPV 调控能力，为保证电网安全，削减了 HDPV 有功功率输出 20 473 kW，使得功率倒送情况得以改善，如图 7~图 9 所示；功率倒送方面，本文策略下的倒送罚款仅为 9 590 元，这是由于削减了异构分布式光伏的有功功率，使得倒送罚款成本大幅度减少；综合成本方面，本文策略相较于策略 1 和策略 2 分别减少 20.91%和 10.55%。因此，本文所提策略具有明显的降损和功率倒送优化效果，能够实现调控的有效性，保障配电网运行安全经济。

表 4 各个场景下的计算结果

Tab. 4 Calculation results under different scenarios

策略	网损成本/元	光伏有功削减成本/元	倒送惩罚/元	综合成本/元
1	4 030	0	25 920	29 950
2	3 245	4 675	18 560	26 480
3	1 813	12 284	9 590	23 686

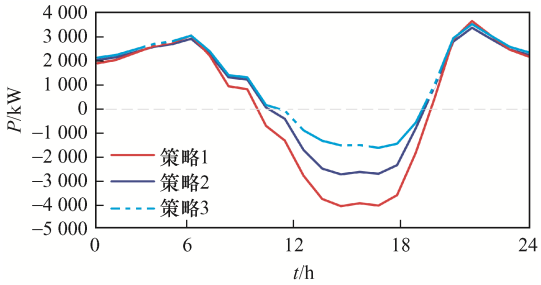


图 7 不同策略下功率倒送情况

Fig. 7 Power backflow under different strategies

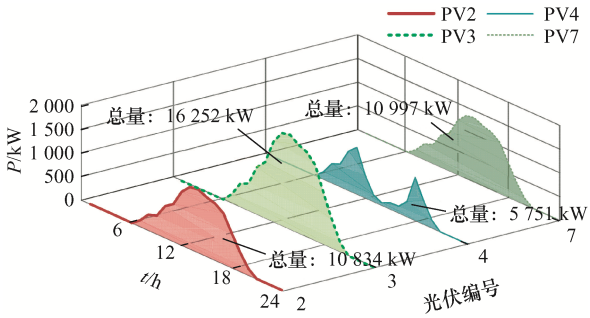


图 8 策略 2 中 M3 模式下 HDPV 有功出力

Fig. 8 HDPV active power output in mode M3 under Strategy 2

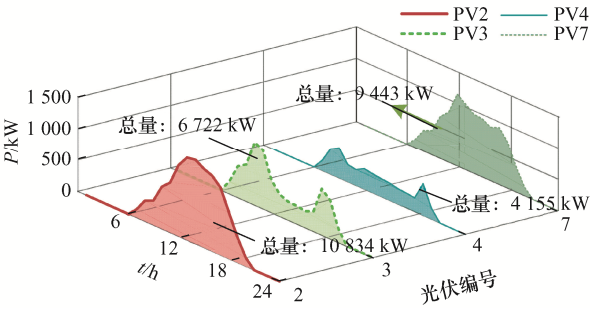


图 9 策略 3 中 M3 模式下 HDPV 有功出力

Fig. 9 HDPV active power output in mode M3 under Strategy 3

(2)配电网电压控制有效性分析

表 5 为各个策略下的电压分布与光伏无功吸收量的计算结果。各策略下的节点电压分布情况如图 10~图 12。可以看出：策略 1 中，配电网电压最大值为 1.098 p.u.，最小值为 0.901 p.u.，系统电压偏差为 11.33%，超过国家标准[19]。在本文策略中，通过削减 HDPV 有功出力的同时，利用 HDPV 的剩余容量进行无功补偿，配电网电压最大值降低为 1.028 p.u.，最小值提升至 0.978 p.u.，配电网整体电压偏差率为 0.54%，相较于策略 1 与策略 2 分别降低 10.79%和 2.68%，满足国标规定的在±7%范围内。

表 5　各个策略下的电压分布

Tab. 5 Voltage distribution under different strategies

策略	V_{max}(p.u.)	V_{min}(p.u.)	电压偏差率/%
1	1.098	0.901	11.33
2	1.030	0.967	3.22
3	1.028	0.978	0.54

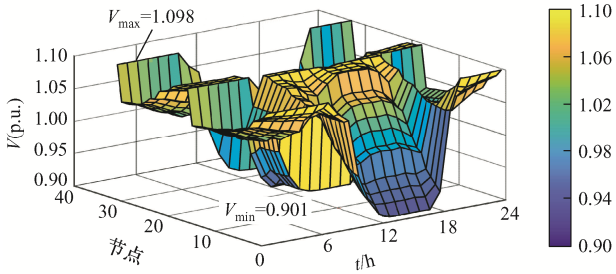


图 10　策略 1 下的节点电压分布情况

Fig. 10 Node voltage distribution under Strategy 1

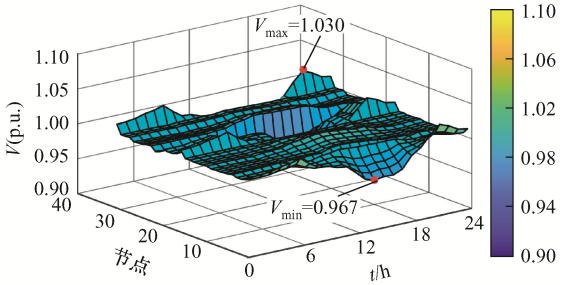


图 11　策略 2 下的节点电压分布情况

Fig. 11 Node voltage distribution under Strategy 2

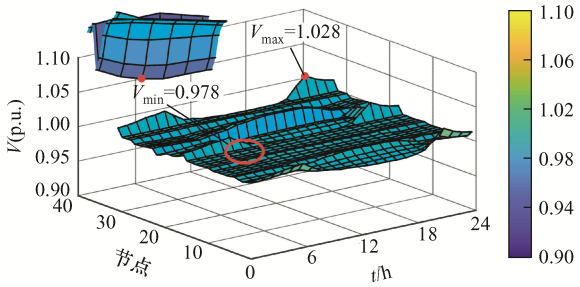


图 12　策略 3 下的节点电压分布情况

Fig. 12 Node voltage distribution under Strategy 3

图 13 和图 14 为策略 2 和策略 3 下的 HDPV 无功补偿情况。以策略 3 为例，在 0:00—10:00 和 19:00—24:00 时段，各配电网集群内负荷需求较大，HDPV 无法完全支撑配电网集群供电。在该时段若不进行无功补偿，则各集群电压水平会处于较低水准。因此，该时段 HDPV 输出感性无功功率，提升配电网集群电压水平。在 11:00—18:00 时段，HDPV 有功出力远远超过了配电网集群的负荷需求，产生了大量的倒送功率，进而发生电压越限。因此该时段 HDPV 输出容性无功，缓解配电网集群电压越限问题。

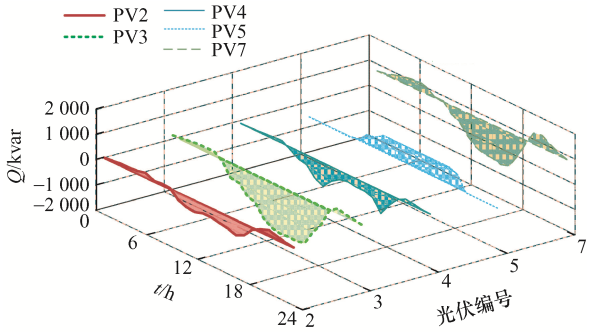


图 13　策略 2 中 M2 与 M3 模式下 HDPV 无功补偿情况

Fig. 13 HDPV reactive power compensation in modes M2 and M3 under Strategy 2

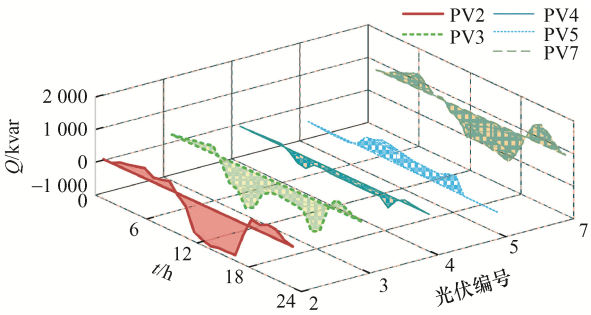


图 14　策略 3 下 M2 与 M3 模式下 HDPV 无功补偿情况

Fig. 14 HDPV reactive power compensation in modes M2 and M3 under Strategy 3

4　结论

针对高渗透率异构分布式光伏接入配电网后产生的功率倒送与过电压问题，提出 1 种考虑异构分布式光伏电压治理潜力的配电网集群式优化调控方法，通过算例分析得到如下结论。

(1)提出结合电压偏差灵敏度、模块度和有功无功平衡度的集群划分综合性能指标体系。结果表明，所提方法在综合能效指标方面，相比仅考虑模块度的场景，提高 56.1%；相比仅功率平衡度的场景，提高 2.3%，能充分发挥群内节点特性之间的协同互补特性，使得集群在初期规划和后期优化调控上均具有优越性。

(2)建立考虑异构分布式光伏调控能力的配电网集群式优化调控模型。运行成本方面，本文方法相较于未调控和传统调控方法分别减少 20.91%和 10.55%，有效提升配电网集群经济运行能力；电压偏差方面，本文方法通过对异构分布式光伏进行有功−无功调节后，配电网电压最大值降低为 1.028 p.u.，最小值提升至 0.978 p.u.，完全消除了配电网电压越限情况。与此同时，本文方法的配电网电压偏差率为 0.54%，相较于未调控与传统调控方法分别降低 10.79%和 2.68%，保证了配电网的电压稳定性。

参考文献：

[1] 郭莹霏, 池源, 王强钢, 等. 面向多元负荷和优质供电的虚拟增容配电变压器: 概念、应用与展望[J]. 电工技术学报, 2024, 39(21): 6666-6686, 6803.
Guo Yingfei, Chi Yuan, Wang Qianggang, et al. Virtual capacity-enhanced distribution transformer for diverse loads and quality power supply: Concepts, applications, and prospects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6666-6686, 6803. (in Chinese)

[2] Li Peishuai, Zhang Cuo, Wu Zaijun, et al. Distributed adaptive robust voltage/VAR control with network partition in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2245-2256.

[3] Zhang Lu, Wang Chen, Liang Jun, et al. A coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution network for resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 112-125.

[4] Venegas-Zarama J F, Muñoz-Hernandez J I, Baringo L, et al. A review of the evolution and main roles of virtual power plants as key stakeholders in power systems [J]. IEEE Access, 2022, 10: 47937-47964.

[5] 陈志业, 杨欢, 李梦菲, 等. 面向配网多馈线互联的柔性多状态开关拓扑选型分析[J]. 电源学报, 2022, 20(4): 102-112.
Chen Zhiye, Yang Huan, Li Mengfei, et al. Topology selection analysis of flexible multi-state switch for distribution network multi-feeder interconnection [J]. Journal of Power Supply. 2022, 20(4): 102-112. (in Chinese)

[6] 贾静然, 段昕, 卢锦玲, 等. 考虑需求侧响应的配电网柔性软开关优化控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 189-195.
Jia Jingran, Duan Xin, Lu Jinling, et al. Optimal control method for flexible soft switch in distribution network considering demand-side response [J]. Journal of Power Supply. 2024, 22(1): 189-195. (in Chinese)

[7] 丁明, 刘先放, 毕锐, 等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 47-52, 141.
Ding Ming, Liu Xianfang, Bi Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 47-52, 141. (in Chinese)

[8] 毕锐, 刘先放, 丁明, 等. 以提高消纳能力为目标的可再生能源发电集群划分方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6583-6592.
Bi Rui, Liu Xianfang, Ding Ming, et al. Renewable energy generation cluster partition method aiming at improving accommodation capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6583-6592. (in Chinese)

[9] 陈楚靓, 李晓露, 纪坤华, 等. 考虑源荷储匹配的配电网集群划分与优化运行[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 80-93.
Chen Chujing, Li Xiaolu, Ji Kunhua, et al. Distribution network cluster partition and optimal operation considering source-load-storage matching [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 80-93. (in Chinese)

[10] 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.
Cao Jing, Jin Yulong, Zheng Tao, et al. A decentralized robust voltage control method for distribution networks considering the uncertainty of distributed generation clusters [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 155-166. (in Chinese)

[11] 尉同正, 杜红卫, 夏栋, 等. 基于改进 K-means 算法的分布式发电集群划分方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2024, 51(6): 49-57.
Wei Tongzheng, Du Hongwei, Xia Dong, et al. Distributed generation cluster partitioning method based on LGWO improved K-means algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024, 51(6): 49-57. (in Chinese)

[12] 王贤, 刘文颖, 夏鹏, 等. 光伏电站参与电网主动调压的无功优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 76-83.
Wang Xian, Liu Wenying, Xia Peng, et al. Reactive power optimization control method for PV station participating in active voltage regulation of power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 76-83. (in Chinese)

[13] 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.
Du Hongwei, Wei Tongzheng, Xia Dong, et al. Reactive voltage self-regulation and coordination control in distribution networks based on cluster dynamic partition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 171-181. (in Chinese)

[14] 于业辉, 欧阳森, 张真, 等. 考虑运行分区和相关性的分布式光储双层优化配置[J/OL]. 南方电网技术, 2024: 1-11. (2024-07-29)[2024-08-26]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NFDW20240726003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
Yu Yehui, Ouyang Sen, Zhang Zhen, et al. Optimal allocation of distributed optical storage considering operation partition and correlation [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-11. (2024-07-29)[2024-08-26]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NFDW20240726003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ. (in Chinese)

[15] 张赟宁, 石泽. 基于快速搜索与发现密度峰值聚类算法的含有分布式光伏的配电网电压分区协调控制[J]. 现代电力, 2020, 37(1): 35-41.
Zhang Yunning, Shi Ze. Voltage partition coordinated control of distribution network with distributed photovoltaic based on CFSFDP algorithm [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1): 35-41. (in Chinese)

[16] 葛津铭, 刘英儒, 庞丹, 等. 含高渗透率光伏配电网的集群划分电压控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 74-82.
Ge Jinming, Liu Yingru, Pang Dan, et al. Cluster division voltage control strategy of photovoltaic distribution network with high permeability [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 74-82. (in Chinese)

[17] Yang Linfeng, Luo Jiangyao, Xu Yan, et al. A distributed dual consensus ADMM based on partition for DC-DOPF with carbon emission trading [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3): 1858-1872.

[18] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150, 195.
Yang Xiaobin, Li Heming, Yin Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150, 195. (in Chinese)

[19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality - Deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)



兰征

作者简介：

兰征(1985—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：分布式发电及配网电力电子技术。E-mail：lan@hut.edu.cn。

杨淳智(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：配电网优化调控技术。E-mail：m22085800028@stu.hut.edu.cn。

谭仁煜(2001—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士研究生。研究方向：配电网优化调控技术。E-mail：tanrenyu@stu.hut.edu.cn。

何东(1986—)，男，中国电源学会会员，博士，副教授。研究方向：直流配电网故障保护方法及碳化硅固态断路器。E-mail：14225@hut.edu.cn。

易波(2000—)，女，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：配电网优化调控技术。E-mail：m22085800025@stu.hut.edu.cn。

喻希(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：配电网应急管控。E-mail：m22085800038@stu.hut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)