

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.018

基于分布式光伏集群控制的主动配电网电压优化策略

蒋春容¹, 朱博汶¹, 周旭峰², 陆佳妮³, 曾艾东¹

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 南京中大智能科技有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 江苏大学京江学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 对于因高比例分布式光伏接入主动配电网引发的电压越限问题, 文中提出一种基于分布式光伏集群控制的主动配电网电压优化策略。首先, 在日前阶段以经济性为目标, 确定日内阶段的可平移负荷量、有载调压变压器档位以及离散无功补偿设备出力。然后, 基于日前阶段调控结果计算近似电压灵敏度, 并采用 K-means 算法, 依据集群综合指标划分集群。最后, 日内阶段按照集群调节特性, 以集群内部网损最小或节点电压偏差最小为目标进行滚动集群自律优化, 基于交替方向乘子法进行集群间协同优化。在 IEEE 33 节点系统上实施该策略, 考虑多种天气及不同调控策略进行电压调控效果对比, 结果表明: 日前集中优化后节点电压处在限值范围内且不越限, 日内集群滚动优化后电压偏移量进一步降低, 晴天情况下电压偏移量不超过 3%。算例结果验证了所提优化策略可以有效保证电压质量, 并提高配电网运行经济性。

关键词: 分布式光伏; 集群控制; 集群自律; 群间协同; 电压偏差; 主动配电网

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)03-0188-13

0 引言

为应对全球能源危机, 大力推动节能减排, 促进能源侧绿色转型, 国家大力提倡对分布式电源的建设与发展^[1-3]。随着国家多项能源产业政策的落地, 包括分布式光伏、分布式风电、分布式燃料电池等多种形式的电源高比例接入配电网, 这已成为未来能源发展的趋势^[4-5]。然而, 局部地区高比例分布式电源的接入给配电网的运行和控制带来了多重挑战。由于分布式电源出力随机、规模不一、分布广泛, 配电网的结构变得更为复杂, 从原来的单点辐射状转变为多电源交织的网络^[6]。这种变化使得网络中电压出现大幅波动且增加了网络损耗, 亟须深入研究并制定相应的对策, 以应对分布式电源接入带来的挑战。

截至 2023 年底, 中国光伏发电累计装机容量达到 61 GW, 分布式光伏已占总光伏装机容量的 50%。为了应对高渗透分布式光伏接入配电网引发的网络电压大幅波动问题, 目前已有学者对分布式光伏集群优化调控展开研究。在集群划分方面, 文献[7]提出一种利用源荷储匹配度指标的集群划分方法, 采用 Louvain 社区检测算法以减少集群内部净负荷。文献[8]通过改进三角形白化权函数, 结合赋权指标权重, 利用灰色聚类算法划分供电分区。文献[9]在复杂社团结构理论上采用改进粒子群算法对电网分区, 有效提升了划分后集群结

构的收敛性。尽管现有研究采用 Louvain 社区检测算法、灰色聚类算法、社团理论算法等不同集群划分方法, 考虑了电气距离、功率平衡等不同指标, 但仍缺乏对集群内无功补偿装置和储能的电压调控潜力的评估。

在配电网电压调控方面, 现有的研究主要可以分为集中式调压和分布式调压 2 种方式^[10-11]。集中式调压通常考虑多时间尺度, 通过统一控制无功补偿装置来优化全局目标, 虽可以缓解因高比例光伏接入导致的电压越限情况, 但仍存在控制时间较长, 通信较为不便, 投资成本较高^[12-14]等缺陷。分布式调压把网络划分为若干集群, 集群内部自律调压的同时考虑群间协同调压^[15-16]。文献[17]针对配电网内部线路拓扑存在未知的情况, 基于线路潮流拟合的方法训练网络潮流数据, 采用主从分裂法实现群间协同无功优化。文献[18]基于部分网络量测的方法简化系统模型, 采用交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 进行集群式调控。文献[19]采用梯度投影方法, 针对分布式电源与无功补偿装置, 在无需中央控制器和本地控制器通信的情况下, 以分布式方式实现两者的最优协调。文献[20]将集群划分为有功和无功两类, 分阶段优化以有效防止电压越限。文献[21]基于动态网络划分, 在同一区域内设置相同无功-电压曲线, 基于模型预测控制方法以应对电压越限问题。文献[22]基于目标级联法, 将整个配电网解耦为多个子系统和单个主系统, 满足整体经济性和多个子系统局部需求。文献[23]着重研究

收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2024-12-05

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20210932)

日前离散无功补偿设备的投切计划,采用同步型ADMM求解分布式集群间协同优化问题。文献[24]考虑日前负荷预测误差,采用日前-日内时间跨度的分布式有功-无功协同优化,有效降低了日前预测误差的影响。文献[25]引入考虑本地无功功率平衡的改进模块化指数,采取贪婪网络优化分区算法划分网络,并提出有功和无功的优化策略控制电压。文献[26]采用鲁棒优化模型,结合列和约束生成算法与ADMM处理不确定性电压优化问题。尽管现有分布式调压研究已较多考虑多层级、多时间跨度的分布式光伏优化调控策略,但未考虑各个分布式光伏集群自身调节特性,也没有针对各个集群特性采取差异化的优化目标和调节手段,导致在配电网电压调节控制过程中局部过度调节或调节不足,不仅造成不必要的经济损失,还有可能影响电压质量。

综上,文中考虑分布式光伏集群调节特性的差异,提出一种配电网分布式光伏集群的电压优化策略,采用日前-日内集群优化调控的整体架构,基于集群特性实施差异化的优化目标,在提高经济性的同时,保证电压质量。日前阶段确定日内阶段的可平移负荷量、优化有载调压变压器(on-load tap changing transformers, OLTC)分接头挡位以及制定离散无功补偿设备出力计划,同时根据日前调控结果计算出近似电压灵敏度,并综合考虑无功补偿装置和储能的电压调控潜力,完成集群划分。日内阶段首先考虑各分布式光伏集群调节特性,以不同目标函数进行群内滚动自律优化,然后通过ADMM进行集群间协同优化调控。经算例验证,该策略可以有效减缓电压波动程度,控制电压在合理区间,并提高系统运行经济性。

1 分布式光伏集群电压优化策略

基于日前-日内时间跨度的分布式电压优化框架,文中提出的主动配电网分布式光伏集群优化策略整体架构如图1所示。策略由日前和日内两阶段构成。

日前集中式优化调控以整个主动配电网为调控对象,结合日前负荷、光伏出力,以线路潮流约束、节点电压约束、无功补偿设备约束、OLTC约束、储能系统(energy storage system, ESS)约束、激励型需求侧响应(incentive-based demand response, IDR)约束等条件,以储能成本、分布式光伏售电收益、可响应负荷成本、电容器组(capacitor bank, CB)投切成本、OLTC动作成本在内的经济性为目标函数,进行全局调控。

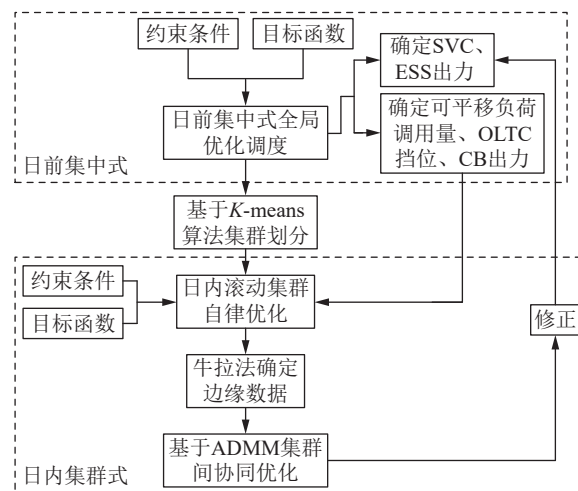


图1 整体调控框架

Fig.1 Overall scheduling framework

由于文中所考虑的前日阶段的时间尺度较长为1 h,日内阶段时间尺度偏短为15 min,并考虑到各类需求侧响应时长,IDR中考虑了须提前24 h制定调度计划的可平移负荷和具备15 min响应能力的可中断负荷。根据日前调控结果,确定日内阶段的可平移负荷量、OLTC挡位以及CB出力,并通过近似电压灵敏度计算,采用K-means聚类算法,依据集群综合指标划分集群。

日内集群式优化调控进行滚动集群自律优化,结合随机性光伏、负荷预测数据,考虑潮流方程约束、节点电压约束、静态无功补偿器(static var compensator, SVC)调节约束以及储能运行约束,依据集群内部无功补偿容量情况,考虑网损最低的经济性目标函数或电压偏差最小的安全性目标函数进行优化。日内滚动集群自律优化后,根据牛拉法确定边缘节点电压及集群间线路传输功率,并基于ADMM实现集群间解耦。通过引入边缘数据的增广拉格朗日函数惩罚项进行群间协同优化。

上述电压优化策略中,日前阶段进行集中式调度,可以在全局范围协调配电网资源,确保整个配电网的稳定性和经济性,以更好地确定长期计划。日内阶段通过滚动集群自律优化以及基于ADMM的群间协同优化,可以更快地响应实时变化、灵活应对局部问题。这种方法可以在不同集群之间进行快速的信息传递和协同优化,以适应快速变化的环境和需求。

2 日前集中式全局优化调控

2.1 目标函数

日前集中式全局优化以24 h为调度周期,1 h为时间颗粒度。根据分布式光伏和负荷数据,考虑

包括分布式光伏售电收益、IDR 成本、ESS 充放电成本、CB 投切成本、OLTC 动作成本在内的以经济性为最优的目标函数,其表达式为:

$$f = \min \sum_{t=1}^{24} \left[\sum_{i=1}^{n_{pv}} P_{i,t}^{\text{sell}} C_t^{\text{sell}} + (P_t^{\text{ESS}} + P_t^{\text{ESSDIS}}) \delta + P_t^{\text{IDRA}} \alpha_1 + P_t^{\text{IDRB}} \beta_1 + N^{\text{CB}} \alpha_2 + N^{\text{OLTC}} \beta_2 \right] \quad (1)$$

式中: n_{pv} 为配电网中光伏接入节点数; $P_{i,t}^{\text{sell}}$ 为 t 时刻节点 i 的主网卖电量; C_t^{sell} 为 t 时刻售电价; P_t^{ESS} 、 P_t^{ESSDIS} 分别为 t 时刻储能的总充电功率和总放电功率; δ 为储能充放电成本; P_t^{IDRA} 、 P_t^{IDRB} 分别为 t 时刻可平移负荷总量、可中断负荷总量; α_1 、 β_1 分别为可平移负荷成本、可中断负荷成本; N^{CB} 、 N^{OLTC} 分别为 CB、OLTC 在 24 h 内动作次数; α_2 、 β_2 分别为 CB、OLTC 的单次动作成本。 $P_{i,t}^{\text{sell}}$ 、 P_t^{ESS} 、 P_t^{ESSDIS} 、 P_t^{IDRA} 、 P_t^{IDRB} 、 N^{CB} 、 N^{OLTC} 为应优化变量。

2.2 约束条件

(1) 线路潮流约束。

文中对配电网潮流约束进行二阶锥松弛。首先考虑引入:

$$\begin{cases} \alpha_{i,t} = U_{i,t}^2 \\ \beta_{ij,t} = I_{ij,t}^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 组成线路 ij 的电流; $\alpha_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压平方; $\beta_{ij,t}$ 为 t 时刻线路 ij 的电流平方。支路潮流应满足的约束为:

$$\begin{cases} \alpha_{i,t} - \alpha_{j,t} = 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - \beta_{ij,t}(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\ \beta_{ij,t} \alpha_{i,t} \geq P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \\ P_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij,t} - \beta_{ij,t} r_{ij}) \\ Q_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij,t} - \beta_{ij,t} x_{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} P_{j,t} = P_{j,t}^{\text{load}} - P_{j,t}^{\text{PV}} - P_{j,t}^{\text{ESS}} + P_{j,t}^{\text{ESSDIS}} - P_{j,t}^{\text{IDRA}} + P_{j,t}^{\text{IDRB}} \\ Q_{j,t} = Q_{j,t}^{\text{load}} - Q_{j,t}^{\text{PV}} - Q_{j,t}^{\text{SVC}} - Q_{j,t}^{\text{CB}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{j,t}$ 为 t 时刻节点 j 的电压平方; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为线路 ij 的电阻和电抗; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻线路 ij 的有功和无功功率; $\delta(j)$ 为以节点 j 为首端节点的支路末端节点集合; $\pi(j)$ 为以节点 j 为末端节点的支路首端节点集合; $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 注入的有功和无功功率; $P_{jk,t}$ 、 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时刻线路 jk 的有功和无功功率; $P_{j,t}^{\text{load}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{load}}$ 分别为 t 时刻节点 j 负荷的有功和无功功率; $P_{j,t}^{\text{PV}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{PV}}$ 分别为 t 时刻节点 j 光伏的有功和无功出力; $P_{j,t}^{\text{ESS}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{ESSDIS}}$ 分别为 t 时刻节点 j 储能的充电和放电功率; $P_{j,t}^{\text{IDRA}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{IDRB}}$ 分

别为 t 时刻节点 j 可平移负荷量和可中断负荷量; $Q_{j,t}^{\text{SVC}}$ 为 t 时刻节点 j 接入的 SVC 出力; $Q_{j,t}^{\text{CB}}$ 为 t 时刻节点 j 接入的 CB 出力。

(2) 节点电压约束。

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (5)$$

式中: $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 的电压上、下限。

(3) 离散无功补偿设备约束。

CB 为离散无功补偿设备,采用分组投切方式运行。为增加 CB 的使用寿命,须严格限制其投切次数,其约束条件为:

$$Q_{i,t}^{\text{CB}} = N_{i,t}^{\text{CB}} Q_i^{\text{CB}} \quad (6)$$

$$0 \leq N_{i,t}^{\text{CB}} \leq N_{i,\max}^{\text{CB}} \quad (7)$$

$$N_{i,t}^{\text{CB}} \in \mathbf{Z} \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |N_{i,t}^{\text{CB}} - N_{i,t-1}^{\text{CB}}| \leq N_{\text{sum,max}}^{\text{CB}} \quad (9)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 为 t 时刻节点 i 接入的 CB 出力; Q_i^{CB} 为节点 i 接入的 CB 单组功率大小; $N_{i,t}^{\text{CB}}$ 为 t 时刻节点 i 接入的 CB 组数,且取整数; $N_{i,\max}^{\text{CB}}$ 为节点 i 接入的 CB 最大投切组数; $\mathbf{Z}$ 为整数集; $N_{\text{sum,max}}^{\text{CB}}$ 为 CB 在 24 h 内最大动作次数。

(4) 连续无功补偿设备约束。

SVC 为连续无功补偿设备,其约束可表示为:

$$Q_{i,\min}^{\text{SVC}} \leq Q_{i,t}^{\text{SVC}} \leq Q_{i,\max}^{\text{SVC}} \quad (10)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{SVC}}$ 为 t 时刻节点 i 接入的 SVC 出力; $Q_{i,\max}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{i,\min}^{\text{SVC}}$ 分别为节点 i 接入的 SVC 出力上、下限。

(5) OLTC 约束。

OLTC 通过挡位进行调节,与 CB 类似,须限制 OLTC 在 24 h 内动作次数,其约束为:

$$K_{ij,t}^{\text{tap}} = K_0 + N_{ij,t}^{\text{tap}} K_{ij}^{\text{tap}} \quad (11)$$

$$N_{ij,\min}^{\text{tap}} \leq N_{ij,t}^{\text{tap}} \leq N_{ij,\max}^{\text{tap}} \quad (12)$$

$$N_{ij,t}^{\text{tap}} \in \mathbf{Z} \quad (13)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |N_{ij,t}^{\text{tap}} - N_{ij,t-1}^{\text{tap}}| \leq N_{\text{sum,max}}^{\text{tap}} \quad (14)$$

式中: $K_{ij,t}^{\text{tap}}$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间接入的 OLTC 变比; $N_{ij,t}^{\text{tap}}$ 为 t 时刻节点 i 和节点 j 之间接入的 OLTC 挡位,且取整数; K_{ij}^{tap} 为调节步长; K_0 为初始挡位,取 0.95; $N_{ij,\max}^{\text{tap}}$ 、 $N_{ij,\min}^{\text{tap}}$ 分别为节点 i 和节点 j 之间接入的 OLTC 挡位上、下限; $N_{\text{sum,max}}^{\text{tap}}$ 为 OLTC 在 24 h 内最大动作次数。

(6) 分布式储能约束。

$$P_{i,\min}^{\text{ESS}} H_{i,t}^{\text{ESS}} \leq P_{i,t}^{\text{ESS}} \leq P_{i,\max}^{\text{ESS}} H_{i,t}^{\text{ESS}} \quad (15)$$

$$P_{i,\min}^{\text{ESSDIS}} H_{i,t}^{\text{ESSDIS}} \leq P_{i,t}^{\text{ESSDIS}} \leq P_{i,\max}^{\text{ESSDIS}} H_{i,t}^{\text{ESSDIS}} \quad (16)$$

$$\begin{cases} S_{i,t}^{\text{SOC}} = S_{i,t-1}^{\text{SOC}} + \left(\eta_i^{\text{ESS}} P_{i,t}^{\text{ESS}} - \frac{P_{i,t}^{\text{ESSDIS}}}{\eta_i^{\text{ESSDIS}}} \right) \Delta t \\ S_{i,\min}^{\text{SOC}} \leq S_{i,t}^{\text{SOC}} \leq S_{i,\max}^{\text{SOC}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ESS}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ESSDIS}}$ 分别为 t 时刻节点 i 储能的充电和放电功率; $P_{i,\min}^{\text{ESS}}$ 、 $P_{i,\max}^{\text{ESS}}$ 分别为节点 i 储能充电功率的最小值和最大值; $P_{i,\min}^{\text{ESSDIS}}$ 、 $P_{i,\max}^{\text{ESSDIS}}$ 分别为节点 i 储能放电功率的最小值和最大值; η_i^{ESS} 、 η_i^{ESSDIS} 分别为节点 i 的储能充电和放电效率; $S_{i,t}^{\text{SOC}}$ 为 t 时刻节点 i 的储能荷电量; Δt 为日前调度的时间颗粒度; $S_{i,\min}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{i,\max}^{\text{SOC}}$ 分别为节点 i 的储能荷电量最小值和最大值; $H_{i,t}^{\text{ESS}}$ 、 $H_{i,t}^{\text{ESSDIS}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的储能充电和放电标识位, 其中 $H_{i,t}^{\text{ESS}}$ 取 0 表示停止充电, 取 1 表示开始充电, $H_{i,t}^{\text{ESSDIS}}$ 取 0 表示停止放电, 取 1 表示开始放电, 且两者满足式(18)所示的互斥约束。

$$H_{i,t}^{\text{ESS}} + H_{i,t}^{\text{ESSDIS}} \leq 1 \quad (18)$$

(7) 需求侧响应约束。

需求侧响应考虑可平移负荷和可中断负荷:

$$P_{i,\min}^{\text{IDRA}} \leq P_{i,t}^{\text{IDRA}} \leq P_{i,\max}^{\text{IDRA}} \quad (19)$$

$$P_{i,\min}^{\text{IDRB}} \leq P_{i,t}^{\text{IDRB}} \leq P_{i,\max}^{\text{IDRB}} \quad (20)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{IDRA}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{IDRB}}$ 分别为 t 时刻节点 i 的可平移负荷量和可中断负荷量; $P_{i,\max}^{\text{IDRA}}$ 、 $P_{i,\min}^{\text{IDRA}}$ 分别为节点 i 的可平移负荷量的上、下限; $P_{i,\max}^{\text{IDRB}}$ 、 $P_{i,\min}^{\text{IDRB}}$ 分别为节点 i 的可中断负荷量的上、下限。

3 集群划分

分布式电源集群即根据地域界限、网络拓扑等, 将分布式电源、储能、负荷以及其他无功控制装置进行集合。通过每个独立集群自律优化调控以及集群间协同优化调控, 从而实现对整个主动配电网的优化调控。由于不同集群内部节点调节常常会对其他集群节点产生一定影响, 因此需要进行合理的分布式电源集群划分, 使得集群内部耦合紧密、群间耦合较松, 方便集群运行调控。

3.1 集群划分指标

3.1.1 近似电压灵敏度

采用近似电压灵敏度来描述电气距离。网络中某节点的电压值会随着其他节点注入功率的变化而变化, 该节点的电压变化越大, 其灵敏度系数越大, 节点间电气距离越近。近似电压灵敏度的计算借助于极坐标下的牛拉法。依照近似电压灵敏度, 可以将节点电压变化量与各节点有功、无功功率变化量通过函数的形式联系起来, 其潮流方程为:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: ΔU 、 $\Delta \theta$ 分别为节点电压和相角的修正量矩阵; U 为电压对角阵; ΔP 、 ΔQ 分别为节点注入有功和无功功率的改变量矩阵; H 、 N 、 J 、 L 参考文献

[27] 组成雅可比矩阵 $\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}$, 表示节点注入的功率波动(ΔP 、 ΔQ)与节点电压变化($\Delta \theta$ 、 ΔU)之间的关系。

$$\Delta U = (HJ^{-1}L - N)^{-1} \Delta P + (JH^{-1}N - L) \Delta Q \quad (22)$$

当 ΔP 、 ΔQ 分别为 0, 即节点注入有功或无功功率不变时, 可得到:

$$\begin{cases} \Delta U = (HJ^{-1}L - N)^{-1} \Delta P = S^{\text{VP}} \Delta P & \Delta Q = 0 \\ \Delta U = (JH^{-1}N - L)^{-1} \Delta Q = S^{\text{VQ}} \Delta Q & \Delta P = 0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: S^{VP} 、 S^{VQ} 分别为近似有功电压灵敏度矩阵、近似无功电压灵敏度矩阵。

节点 i 和节点 j 基于功率灵敏度的电气距离 l_{ij} 表达式为:

$$l_{ij} = \sqrt{(d_{i1} - d_{j1})^2 + (d_{i2} - d_{j2})^2 + \dots + (d_{ins} - d_{jns})^2} \quad (24)$$

$$d_{ij} = S_{ii}^{\text{VP}} - S_{ij}^{\text{VP}} + S_{ii}^{\text{VQ}} - S_{ij}^{\text{VQ}} \quad (25)$$

式中: d_{ij} 为节点 j 的功率变化对节点 i 的影响程度, d_{ij} 越小, 两节点间电气距离越小, 表明节点 j 的功率变化对节点 i 影响越大; n_s 为网络中总节点数; S_{ii}^{VP} 、 S_{ij}^{VP} 、 S_{ii}^{VQ} 、 S_{ij}^{VQ} 分别为节点 i 有功电压灵敏度、节点 j 对节点 i 的有功电压灵敏度、节点 i 无功电压灵敏度、节点 j 对节点 i 的无功电压灵敏度。

3.1.2 集群电压调控潜力

集群电压调控潜力是指某集群内无功补偿装置、ESS 对集群内部节点电压越限的调控能力。以集群 K 为例, 集群电压调控潜力表达式为:

$$\rho_K = \alpha_3 D_K^{\text{Q}} + \beta_3 D_K^{\text{P}} \quad (26)$$

式中: D_K^{Q} 、 D_K^{P} 分别为集群 K 内无功补偿装置和 ESS 对节点电压的越限调控能力; α_3 、 β_3 分别为无功补偿装置和 ESS 的权重系数, 两者总和为 1, 且都取 0.5, 以保证无功补偿装置和 ESS 的电压越限调控能力权重相同。无功补偿装置和 ESS 的电压越限调控能力可分别表示为:

$$D_K^{\text{Q}} = \begin{cases} 1 & \Delta U_{K,\max} \leq \sum_{j \in K} Q_j^{\text{KV}} S_{ij}^{\text{VQ}} \\ \frac{\sum_{j \in K} Q_j^{\text{KV}} S_{ij}^{\text{VQ}}}{\Delta U_{K,\max}} & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

$$D_K^{\text{P}} = \begin{cases} 1 - D_K^{\text{Q}} & (1 - D_K^{\text{Q}}) \Delta U_{K,\max} \leq \sum_{j \in K} P_j^{\text{KV}} S_{ij}^{\text{VP}} \\ \frac{\sum_{j \in K} P_j^{\text{KV}} S_{ij}^{\text{VP}}}{\Delta U_{K,\max}} & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\Delta U_{K,\max}$ 为集群 K 内最高电压节点的电压越限量, 如果电压不越限, 则 $\Delta U_{K,\max} = 0$; P_j^{KV} 、 Q_j^{KV} 分别为节点 j 的 ESS 有功裕度、无功补偿装置无功裕度。

3.1.3 集群划分综合指标

集群划分综合考虑近似电压灵敏度和电压调控潜力指标, 其综合性能指标的表达式为:

$$\gamma = \left(1 - \frac{l_{ij}}{l_{ij,\max}}\right) \min\{\rho_K\} \quad K = 1, 2, \dots, n_c \quad (29)$$

式中: γ 为集群划分综合指标, 其值越大说明集群划分的性能越佳; $l_{ij,\max}$ 为 l_{ij} 中的最大值; n_c 为网络划分后的集群数量。

3.2 集群划分方法

集群划分有多种不同的算法, 其中 K -means 聚类算法是一种典型聚类分析方法, 用于将数据分成 m 个类别数据点。该算法的基本流程如下: (1) 随机挑选 m 个数据点作为初始的簇中心; (2) 将每个数据点分配到距离最近的簇中心; (3) 重新计算每个簇的中心点; (4) 重复上述步骤直到簇中心不再变化或达到最大迭代次数。文中采用 K -means 聚类算法求得集群内部节点与集群中心间电气距离平方和最小值, 并以集群划分综合指标为划分依据, 集群划分的目标函数为:

$$f_c = \min \sum_{K=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_K} l_{j \in K}^2 \quad (30)$$

式中: $l_{j \in K}$ 为节点 j 与集群中心 e_K 的电气距离; n_K 为集群 K 中的样本个数。

集群划分算法步骤如下。

(1) 对于配电网中节点 i , 根据式(24)计算其与网络中其他节点的电气距离, 组成集合 L , 即:

$$L = \{l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}, \dots, l_{ins}\} \quad (31)$$

(2) 对集合 L 中的所有元素按升序排列, 并随机选取 1 个元素作为节点 i 的指标 d_i 。该指标用于描述节点 i 周围节点密度, 即节点 i 周围节点的数量或连接密度, d_i 值越小, 表明距离其他节点越近, 节点附近其他节点数量越多。

(3) 对于网络中所有节点的指标按照升序排列, 并随机选取 1 个元素作为阈值, 小于该阈值的节点, 通常周围节点数目较多, 可以看作集群中心。因此选取小于该阈值的节点组成集合 E , 并从该集合内部选取集群中心。

(4) 选取集合 E 中指标最高的节点作为第一个集群中心 e_1 。

(5) 在集合 E 的剩余节点中, 选取远离现有集群中心的节点作为下一个集群中心。

(6) 若划分结果改变, 则重复步骤(2)—步骤

(5), 随机选取集群中心进行迭代, 直至其结果不再改变。

(7) 依据肘部法则确定合理的集群数量, 计算其集群划分综合指标, 最终选取综合指标最高值对应的集群数量及其划分结果。

4 日内滚动集群优化调控

在集群划分的基础上, 构建日内滚动集群自律优化和群间协同优化双层架构。上层日内滚动集群自律优化, 选取 24 h 为调度周期, 15 min 为时间颗粒度。考虑分布式光伏的出力具有很强的不确定性以及随机性, 在预测值的基础上加入 5%~10% 的随机变量, 以确保出力的随机性。根据集群特性, 分别以经济性或安全性为目标函数进行协调优化。下层群间协同优化调控则依照上层集群自律优化调控结果, 获取各集群边缘节点功率和集群间线路传输功率, 进行群间协同优化。日内滚动集群优化更侧重于灵活性和动态性, 更贴合光伏和负荷实际的随机波动情况, 依靠滚动优化调度可以在不断变化的场景下进行实时优化和调整。

4.1 日内滚动集群自律优化

不同集群特性分别考虑以经济性或安全性的目标函数如下:

$$f^e = \sum_{i=1}^{n_K} \sum_{j=1}^{n_K-1} \frac{r_{ij}(P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2)}{U_{i,t}^2} \quad (32)$$

$$f^s = \sum_{i=1}^{n_K-1} (U_{i,t} - U_{\text{ref}})^2 \quad (33)$$

式中: f^e 为以经济性为主的目标函数; f^s 为以安全性为主的目标函数; U_{ref} 为电压基准值。若集群内部所包含的无功调节设备较少或没有时, 考虑安全性优化目标, 若集群内部无功调节设备充足时, 则考虑经济性优化目标。

日内滚动集群自律优化约束条件考虑线路潮流约束、节点电压约束、连续无功补偿设备约束、分布式储能约束、可中断负荷约束, 如式(2)—式(5)、式(10)、式(15)—式(18)和式(20)所示。

经过日内滚动集群自律优化调控后, 根据最优结果中的分布式光伏、储能、无功补偿设备以及可中断负荷调用量, 采用牛拉法计算出准确的集群边缘节点电压、群间线路传输的有功和无功功率、虚拟边缘节点电压以及虚拟群间线路传输的有功和无功功率, 以便后续进行集群间协同优化调控。

4.2 基于 ADMM 的群间协同优化

日内滚动集群自律优化可以有效调用集群内部的无功补偿设备, 快速调节集群内部电压, 但不

能充分利用各集群的无功资源, 容易造成调控潜力的浪费。因此, 在集群自律优化的基础上, 引入 ADMM 进行群间协同优化, 以达到无功资源在各集群间充分利用的目的。在各集群内部自律优化调控获取当前各个集群最优结果后, 采取群间协同优化以交互相邻集群边缘节点信息并实时更新, 用于下一轮次各个集群内部自律优化, 直至集群边缘节点数据偏差收敛于设定阈值。采用 ADMM 进行群间协同优化。ADMM 将一个复杂的宏观问题分解为多个局部子问题, 有助于简化求解过程。通过协调解决每个局部子问题, 有效地解决整个宏观问题。

为了方便群间协调优化, 对集群进行解耦。考虑通过在集群间引入虚拟边缘节点, 构建虚拟功率传输线路以建立集群间的关系, 集群间解耦过程如图 2 所示。在集群间协同优化调控时, 通过上游集群的边缘节点和下游集群虚拟节点交互信息并进行下一轮次的集群内部自律优化, 集群接收上游集群边缘节点 a 准确电压、虚拟线路 a_1b 传输的有功功率和无功功率、下游集群虚拟边缘节点 c_1 电压、线路 cl 传输的真实有功功率和无功功率, 同时向上游集群发出虚拟边缘节点 a_1 节点电压、线路 ab 传输的准确有功功率和无功功率, 向下游集群发出 c 节点真实电压以及线路 c_1l 传输的有功功率和无功功率。为满足集群间协同优化数值收敛, 上游边缘节点和下游虚拟节点数据需满足如式(34)所示约束。

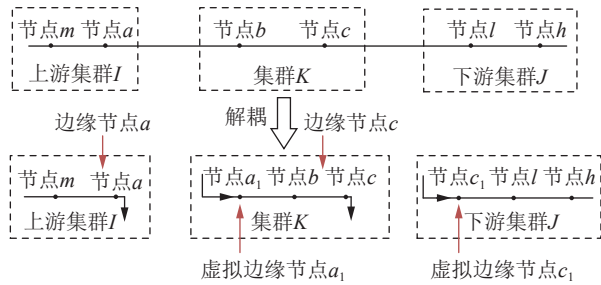


图 2 集群间解耦过程

Fig.2 Decoupling process between clusters

$$\begin{cases} P_{ab} = P_{a_1b} \\ Q_{ab} = Q_{a_1b} \\ U_a = U_{a_1} \end{cases} \quad (34)$$

式中: P_{ab} 、 Q_{ab} 分别为群间线路 ab 传输的有功、无功功率; P_{a_1b} 、 Q_{a_1b} 分别为下游虚拟线路 a_1b 传输的虚拟有功、无功功率; U_a 、 U_{a_1} 分别为上游边缘节点和下游虚拟节点电压。

为保证各个集群间边缘节点数据相互一致, 考虑在增广拉格朗日函数中加入相同的惩罚项:

$$L^{CF} = \frac{\tau}{2} \left[\left(U_a^{(n)} - U_{a_1}^{(n)} \right)^2 + \left(P_{ab}^{(n)} - P_{a_1b}^{(n)} \right)^2 + \left(Q_{ab}^{(n)} - Q_{a_1b}^{(n)} \right)^2 \right] + \lambda_U \left(U_a^{(n)} - U_{a_1}^{(n)} \right) + \lambda_P \left(P_{ab}^{(n)} - P_{a_1b}^{(n)} \right) + \lambda_Q \left(Q_{ab}^{(n)} - Q_{a_1b}^{(n)} \right) \quad (35)$$

式中: n 为迭代次数; τ 为保证边缘节点数据一致的惩罚系数; λ_U 、 λ_P 、 λ_Q 分别为电压、有功功率、无功功率的拉格朗日乘子。

在原集群自律优化目标基础上加入惩罚项, 更新目标函数为:

$$f = \begin{cases} f^e + L^{CF} \\ f^s + L^{CF} \end{cases} \quad (36)$$

以集群 K 为例, 基于 ADMM 的群间分布式协同优化的具体步骤为:

(1) 初始化阶段。设定所有集群边缘节点的惩罚项为 0, 各个集群独立运行。

(2) 以式(36)作为目标函数进行日内滚动集群自律优化, 得到的虚拟边缘节点 a_1 电压 U_{a_1} 以及虚拟线路 a_1b 功率 $P_{a_1b}^{(n+1)}$ 和 $Q_{a_1b}^{(n+1)}$, 各集群通过牛拉法计算群间线路 ab 传输的准确功率 $P_{ab,p}^{(n+1)}$ 和 $Q_{ab,p}^{(n+1)}$ 、集群内部边缘节点 a 的准确电压 $U_a^{(n+1)}$, 以及集群内部最高电压 $U_{\max}^{(n+1)}$ 和最低电压 $U_{\min}^{(n+1)}$, 并通过式(37)计算 $U_{\max}^{(n+1)}$ 的电压补偿参数 $\Delta U_{\max}^{(n+1)}$ 和 $U_{\min}^{(n+1)}$ 的电压补偿参数 $\Delta U_{\min}^{(n+1)}$ 。

$$\begin{cases} \Delta U_{\max}^{(n+1)} = \frac{\Delta U_{\max}^{(n)} + U_{\max}^{(n+1)}}{2} \\ \Delta U_{\min}^{(n+1)} = \frac{\Delta U_{\min}^{(n)} + U_{\min}^{(n+1)}}{2} \end{cases} \quad (37)$$

(3) 相邻集群交换集群间边缘数据及其偏差, 基于交互的信息就地更新边缘数据。

$$\begin{cases} x_a^{(n+1)} = \frac{U_a^{(n+1)} + U_{a_1}^{(n+1)}}{2} \\ y_{ab}^{(n+1)} = P_{ab}^{(n+1)} + \frac{P_{a_1b}^{(n+1)} - P_{ab,p}^{(n+1)}}{2} \\ z_{ab}^{(n+1)} = Q_{ab}^{(n+1)} + \frac{Q_{a_1b}^{(n+1)} - Q_{ab,p}^{(n+1)}}{2} \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} x_c^{(n+1)} = U_c^{(n+1)} + \frac{U_{c_1}^{(n+1)} - U_{c,p}^{(n+1)}}{2} \\ y_{cl}^{(n+1)} = \frac{P_{cl,p}^{(n+1)} + P_{c_1l}^{(n+1)}}{2} \\ z_{cl}^{(n+1)} = \frac{Q_{cl,p}^{(n+1)} + Q_{c_1l}^{(n+1)}}{2} \end{cases} \quad (39)$$

式中: $x_a^{(n+1)}$ 为集群对于上游集群的边缘节点 a 电压更新值; $y_{ab}^{(n+1)}$ 、 $z_{ab}^{(n+1)}$ 分别为本集群与上游集群间线路 ab 传输的有功功率更新值、无功功率更新值; $x_c^{(n+1)}$ 为集群对于下游集群的边缘节点 c 电压更新值; $U_c^{(n+1)}$ 为集群对于下游集群的边缘节点 c 电压; $U_{c_1}^{(n+1)}$ 为虚拟边缘节点 c_1 电压; $U_{c,p}^{(n+1)}$ 为集群对于下

游集群的边缘节点 c 准确电压; $P_{cl,p}^{(n+1)}$ 、 $Q_{cl,p}^{(n+1)}$ 分别为群间线路 cl 传输的准确有功功率和无功功率; $P_{c,l}^{(n+1)}$ 、 $Q_{c,l}^{(n+1)}$ 分别为虚拟线路 c,l 传输的有功功率和无功功率; $y_{cl}^{(n+1)}$ 、 $z_{cl}^{(n+1)}$ 分别为本集群与下游集群间线路传输的有功功率更新值、无功功率更新值。

(4) 基于接收的集群间边缘数据, 各集群就地更新边缘数据的拉格朗日乘子。

$$\begin{cases} \lambda_U^{(n+1)} = \lambda_U^{(n)} + \tau(x_a^{(n+1)} - U_{a1}^{(n+1)}) \\ \lambda_P^{(n+1)} = \lambda_P^{(n)} + \tau(y_{ab}^{(n+1)} - P_{ab}^{(n+1)}) \\ \lambda_Q^{(n+1)} = \lambda_Q^{(n)} + \tau(z_{ab}^{(n+1)} - Q_{ab}^{(n+1)}) \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} \lambda_{c,U}^{(n+1)} = \lambda_{c,U}^{(n)} + \tau(U_c^{(n+1)} - x_c^{(n+1)}) \\ \lambda_{c,l,P}^{(n+1)} = \lambda_{c,l,P}^{(n)} + \tau(P_{c,l}^{(n+1)} - y_{cl}^{(n+1)}) \\ \lambda_{c,l,Q}^{(n+1)} = \lambda_{c,l,Q}^{(n)} + \tau(Q_{c,l}^{(n+1)} - z_{cl}^{(n+1)}) \end{cases} \quad (41)$$

式中: $\lambda_U^{(n+1)}$ 为集群对于上游集群的边缘节点电压拉格朗日乘子更新值; $\lambda_P^{(n+1)}$ 、 $\lambda_Q^{(n+1)}$ 分别为本集群与上游集群间线路传输的有功功率拉格朗日乘子更新值、无功功率拉格朗日乘子更新值; $\lambda_{c,U}^{(n+1)}$ 为集群对于下游集群的边缘节点 c 电压拉格朗日乘子更新值; $\lambda_{c,l,P}^{(n+1)}$ 、 $\lambda_{c,l,Q}^{(n+1)}$ 分别为本集群与下游集群间线路 c,l 传输的有功功率拉格朗日乘子更新值、无功功率拉格朗日乘子更新值。

(5) 重复步骤(2)—步骤(4)直至集群边缘数据偏差 $\sigma_K^{(n-1)}$ 、 $\sigma_K^{(n)}$ 和 $\sigma_K^{(n+1)}$ 均小于阈值 σ_d 。其中, 边缘数据偏差 $\sigma_K^{(n)}$ 为集群 K 与其相邻集群间第 n 次迭代的边缘节点电压偏差和群间线路功率偏差的绝对值之和。

5 算例分析

文中选取改进 IEEE 33 节点配电网对所提出策略进行算例仿真, 验证集群优化调控算法。算例的系统如图 3 所示。图 3 中 PV 代表分布式光伏。节点 33 为系统通过 OLTC 与上级网络连接处, OLTC 变比范围为 0.95~1.05, 其分接头的调节挡位共 11 挡。节点 3、节点 8 分别接入皆为 6 个挡位、出力范围为 0~3 Mvar 的 CB1 和 CB2。节点 19、节点 25 分别接入额定容量为 0.5、1 Mvar 的 SVC1 和 SVC2。节点 24、节点 29 分别接入最大充放电功率为 0.2 MW、容量为 3 MW·h 的 ESS1 和 ESS2。节点 12 接入可中断负荷。节点 19 接入可平移负荷。设置参数 $N_{sum,max}^{CB}$ 、 $N_{sum,max}^{tap}$ 均为 5, Q_i^{CB} 为 0.5 Mvar, $N_{i,max}^{CB}$ 为 6 组, $S_{i,min}^{SOC}$ 、 $S_{i,max}^{SOC}$ 分别为 0.3 MW·h 和 3 MW·h, $U_{i,max}$ 、 $U_{i,min}$ 分别为 1.07 p.u. 和 0.93 p.u.。

日前集中式全局优化调控采用 MATLAB 中的 CPLEX 求解器进行求解, 并根据日前优化结果, 通过 K -means 算法进行集群划分。日内滚动集群

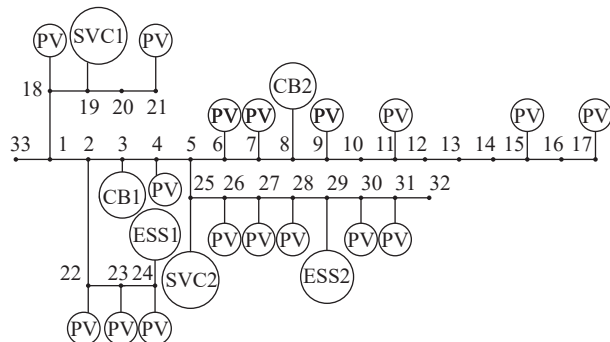


图 3 IEEE 33 节点配电网

Fig.3 IEEE 33-node distribution network

优化调控同样采用 CPLEX 求解器求解, 并通过 ADMM 进行群间协同优化, ADMM 惩罚项系数设为 100 000, 收敛精度设为 10^{-6} 。

根据国家气象局的气候类型划分标准, 文中选取 3 种典型天气类型: 晴天、雨天、多云。由于不同天气条件下的空气湿度、光照强度等因素不同, 导致配电网内部分布式光伏出力不同。以光伏节点 4 为例, 3 种天气情况下光伏出力如图 4 所示, 其中, 日内光伏出力在日前出力的基础上加入 5%~10% 的随机变量, 以确保出力的随机性。

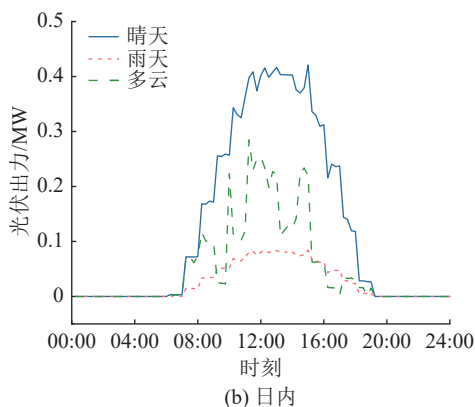
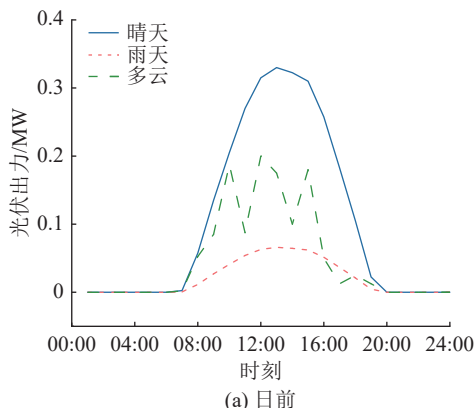


图 4 分布式光伏出力

Fig.4 Output of distributed photovoltaic power

5.1 日前调控结果

通过日前集中式全局优化调控, 确定了各时刻

的可平移负荷量、CB 出力、配电网节点电压情况。日前调控目标函数值如表 1 所示。可平移负荷量如图 5 所示, 在 08:00—16:00 时段, 光伏出力增大, 可平移负荷出力为正, 即增大负荷需求。而 16:00 后, 光伏出力减少, 可平移负荷出力为负, 即减少负荷需求。CB 出力如图 6 所示, 在 08:00—16:00 时段, CB 出力明显增大, 且晴天、多云天气相较于雨天波动幅度明显更大。日前调控后各节点电压分布如图 7 所示, 3 种天气下, 配电网各节点电压均未越限, 但是大多数节点的电压明显偏离基准电压(1.00 p.u.), 特别在光伏出力较大的晴天和多云天气下, 多个节点电压接近电压上限(1.07 p.u.)。

表 1 日前调控目标函数值

Table 1 Values of objective function in day-ahead scheduling

单位: 元

气象场景	光伏售电收益	储能成本	需求侧成本	设备损耗成本
晴天	26 265.44	1 411.20	205.55	14
雨天	3 191.69	132.92	1 360.81	8
多云	9 404.06	122.03	58.08	12

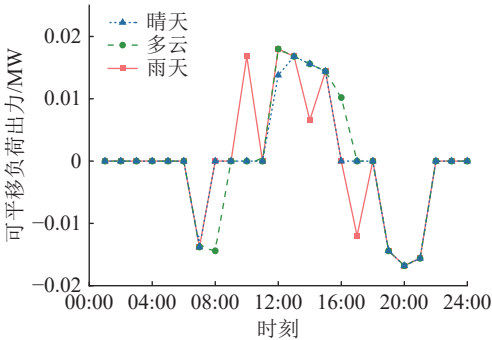


图 5 日前优化后可平移负荷量

Fig.5 Shiftable load dispatch after day-ahead optimization

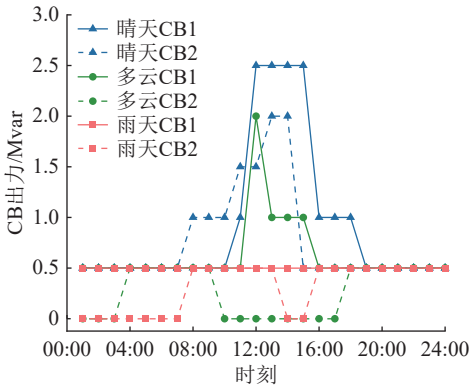


图 6 日前优化后 CB 出力

Fig.6 Outputs of CB after day-ahead optimization

5.2 集群划分结果

根据日前调控结果, 采用 K -means 算法动态划分集群, 得到晴天、雨天、多云 3 种天气情况下的集

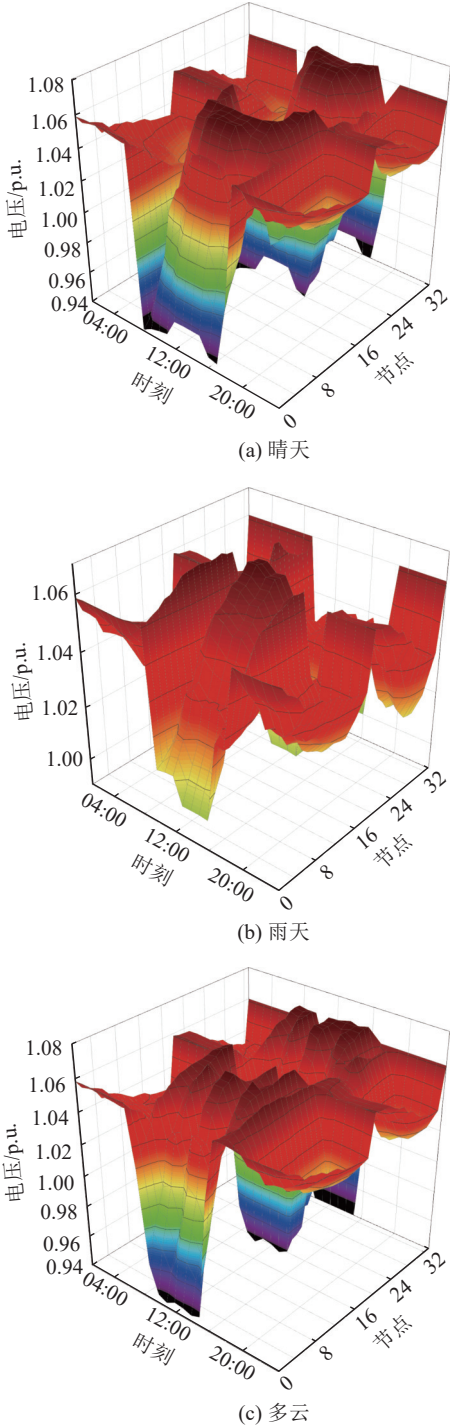


图 7 日前优化后节点电压分布

Fig.7 Node voltages after day-ahead optimization

群划分结果, 如图 8 所示。3 种天气划分集群数量皆为 3 个, 但划分结果存在差异。由于不同天气条件下光伏出力不同, 使得网络内无功装置出力不同。因此网络内部节点近似电压灵敏度不同, 电气距离也随之改变, 最终使得集群划分结果不同。需要说明的是, 当式(26)中无功补偿装置和 ESS 的权重变化时, 会对集群划分综合指标产生一定影响, 进而影响到整个配电网集群划分结果。若 α_3 值增大、 β_3 值减少, 则网络中最小集群电压调控潜力

降低,导致集群划分综合指标 γ 值降低。而 γ 值与集群划分数成负相关,即 γ 值降低时,最佳集群划分数会增加。同理,如果 α_3 值减少, β_3 值增加,会导致集群划分数减少。文中无功补偿装置和 ESS 的电压越限调控能力权重取为相等,即 α_3 、 β_3 均为 0.5。

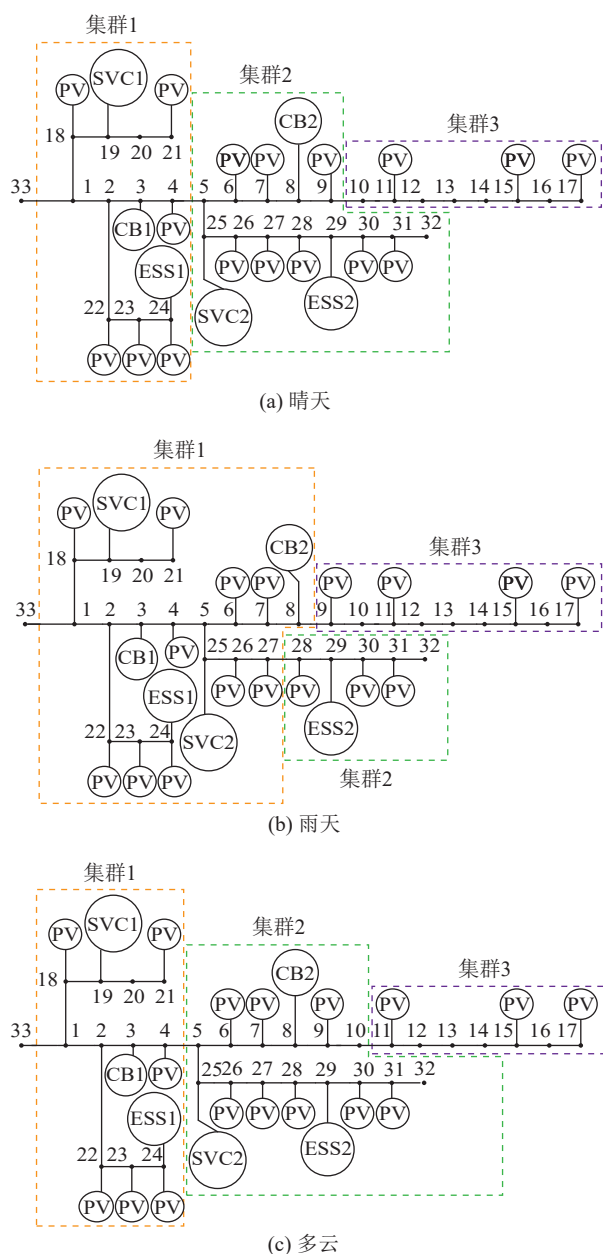


图 8 分布式光伏集群划分结果

Fig.8 Partition result of distributed photovoltaic clusters

5.3 日内调控结果

集群划分后,由于每个集群中分布式电源出力不同、集群内所配置的无功补偿装置不同,每个集群的日内滚动集群优化目标不同。以晴天天气情况为例,集群 1 内部含 SVC、CB、ESS,整体目标函数考虑以网损最小为主的经济性目标。集群 2 与集群 1 类似,同样选择以网损最小为主的经济性目标。集群 3 内部没有无功补偿装置,且位于网络末

端,则考虑以电压偏差最小为主的安全性目标。

在 24 h 内,即 96 个时间颗粒度,通过协调多个无功补偿装置出力来控制电压。其中,CB 用于处理长周期的电压波动,SVC、ESS 则可以快速响应并平抑小幅度的电压波动。以晴天场景为例,经日内集群优化后,SVC、ESS 出力分别如图 9、图 10 所示。结合图 6 所示的 CB 出力情况可以看到,在 00:00—08:00 时段,光伏出力较低,CB 和 SVC 只需要满足负荷侧需求,因此出力并不明显。在 11:00—16:00 时段,光伏出力大幅增加,由于 SVC 自身调节能力有限,主要依靠 CB 出力来解决长周期电压波动问题。在 18:00—23:00 时段,光伏出力下降,且负荷侧需求逐渐降低,CB 和 SVC 出力随之下降。另外,在雨天场景下,由于整日光伏出力低,CB 出力较低,仅靠 ESS 和 SVC 出力即可满足配电网调压需求。而多云场景则与晴天情况相似,但 SVC 和 CB 的出力较晴天略低。

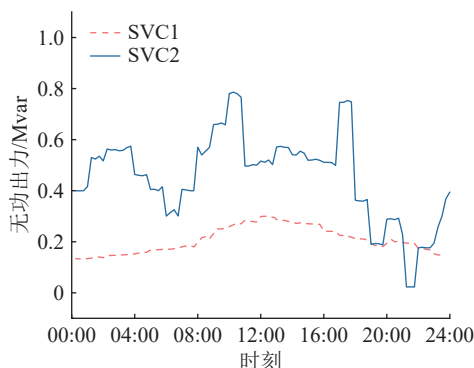


图 9 日内优化后 SVC 出力

Fig.9 Output of SVCs after intra-day optimization

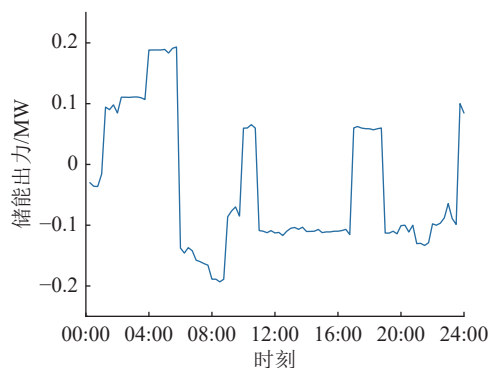


图 10 日内优化后 ESS 出力

Fig.10 Output of ESS after intra-day optimization

以晴天为例,日内滚动集群自律优化调控后,集群之间的传输功率如图 11 所示,与日前优化后结果相比,经过日内优化后,集群 1-集群 2 之间传输功率的波动明显降低,集群 2-集群 3 之间无功功率和有功功率几乎没有波动。经过集群内部自律优化后,集群内已经达到更好的功率平衡。

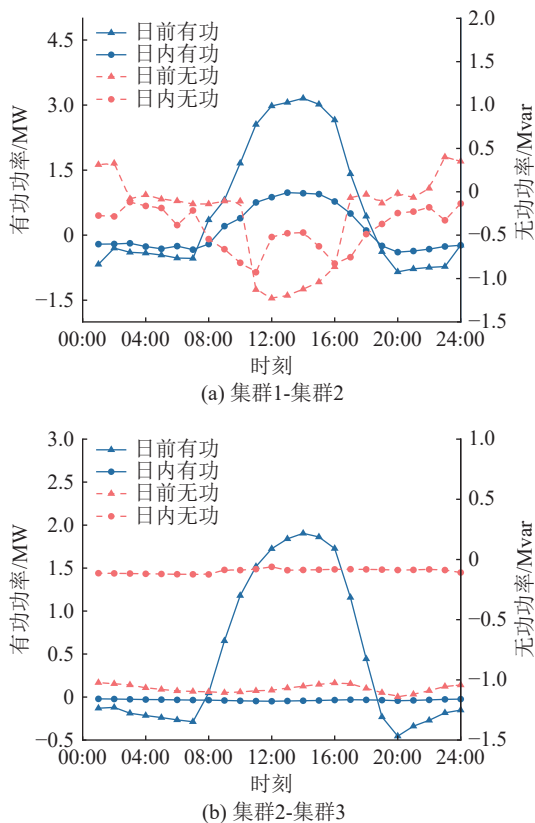


图 11 集群间的传输功率

Fig.11 Transmission power between clusters

5.4 对比分析

为验证所提出的集群优化调度策略有效性, 针对不同的调控场景和调控策略进行对比分析。

(1) 选取晴天、雨天和多云 3 种典型天气情况, 进行日前、日内集群优化调控, 得到日前和日内调控后各个节点的电压数据。在此基础上, 设置 3 种调控场景进行对比分析。

场景 1: 无调控手段。场景 2: 日前集中式全局优化调控。场景 3: 日前集中式全局优化调控以及日内滚动集群优化调控。

以 12:00 为例, 各个节点电压分布如图 12 所示。晴天情况下, 场景 1 中由于缺乏调控手段, 共有 18 个节点电压越上限, 电压最高的节点为节点 17, 达到 1.12 p.u.。场景 2 中通过日前集中优化调控, 虽然所有节点电压均在限值范围内, 但因仅考虑经济性, 在保证整体配电网运行成本达到最低时, 大部分节点电压明显偏离基准电压, 有多个节点电压逼近电压上限值。场景 3 在日内集群调控后, 各节点电压偏移量得到进一步改善, 集群内各节点电压最大偏移量不超过 3%。雨天情况下, 由于光伏出力较低, 整体配网的电压偏移程度较小, 经日内集群调控后, 各节点电压也更为接近参考电压。多云情况下, 与晴天类似, 场景 1 中多个节点

电压也出现较大幅度越限, 最大电压达到 1.10 p.u.。经过日前集中调控后, 仍有部分节点电压逼近上限值。经日内集群调控后, 整体电压偏移量得到明显改善。可见, 在不同天气情况下, 经过日前集中及日内集群优化调控后, 能够明显改善主动配电网的整体电压水平, 提高电压质量。

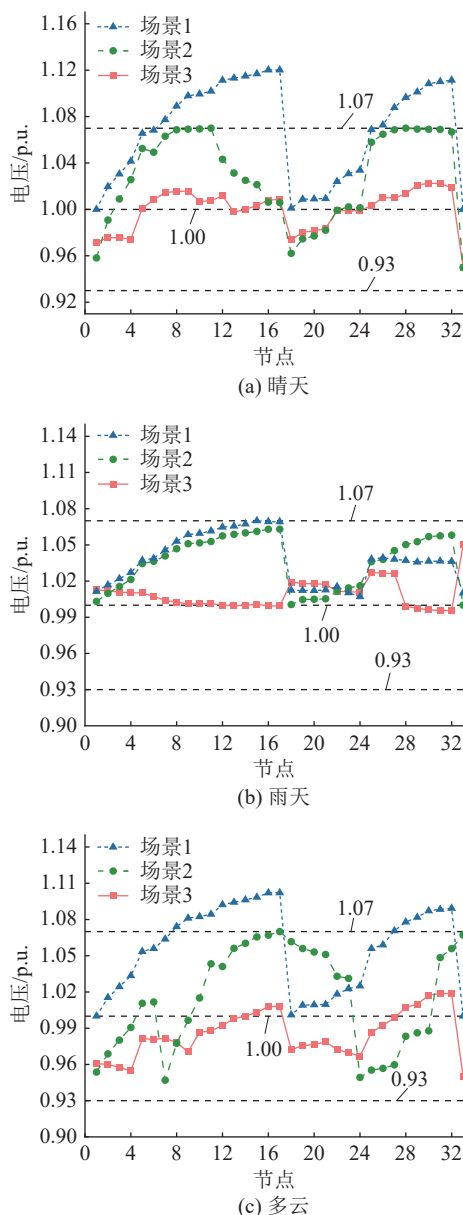


图 12 3 种场景下的节点电压分布

Fig.12 Node voltage distribution in three scenarios

(2) 为验证集群特性的影响效果, 将文中所提的考虑集群特性、采用差异化优化目标的调控策略与不考虑集群特性、统一采用安全性为优化目标的调控策略进行对比。以晴天情况为例, 考虑差异化优化目标时, 集群 1 和集群 2 由于 ESS 和无功补偿设备充足, 采用式(32)的经济性目标函数, 而集群 3 因缺乏 ESS 和无功补偿设备, 采用式(33)的安全性目标函数。在不考虑集群特性时, 集群 1、集群

2 和集群 3 均采用式(33)所示的安全性目标函数。对比结果如表 2 所示,可见集群 1、集群 2 由于采用了差异化的优化目标,其集群内部各个节点的总电压偏差值较于采用安全性目标优化分别增加了 0.081 p.u.和 0.077 p.u.,集群内部最大电压偏移量绝对值较于采用安全性目标优化分别增加了 0.004 9 p.u.和 0.003 1 p.u.,但是网损却较于采用安全性目标优化分别降低了 0.025 MW 和 0.104 MW。这意味着集群内部节点总电压偏差、节点最大电压偏移量绝对值略有增加,但是由于集群具有较好的电压调控潜力,仍可以保持电网电压有较高的质量,且减少了网损,使配电网的经济效益得以提升。集群 3 由于都采用了安全性目标,其集群内部的电压偏差以及网损几乎没有变化。采取差异化的目标函数可以更好地适应不同场景下的电网运行需求,提高了电网的灵活性和适应性。

表 2 不同优化目标的结果对比
Table 2 Comparison results under different optimization objectives

对比参数	集群编号	差异化目标	安全性目标
网损/MW	集群1	0.127	0.152
	集群2	1.568	1.672
	集群3	0.182	0.185
各节点电压偏差绝对值之和/p.u.	集群1	0.382	0.301
	集群2	0.481	0.404
	集群3	0.135	0.136
节点最大电压偏移量绝对值/p.u.	集群1	0.029 9	0.025 0
	集群2	0.018 8	0.015 7
	集群3	0.018 2	0.018 3

5.5 收敛性分析

在集群间协调优化过程中,为验证集群间数据收敛,选取 12:00 时刻的集群 1 与集群 2 边缘节点迭代电压值进行分析,如图 13 所示,可以看到,随着迭代进行,该边缘节点电压收敛至 0.99 p.u.,说明迭代结果收敛。

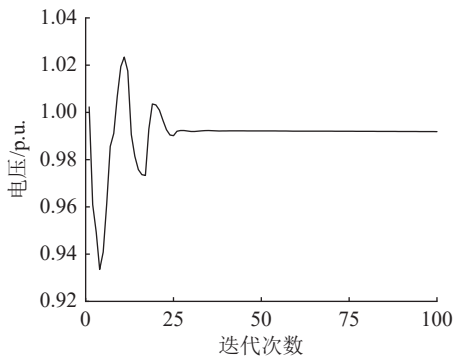


图 13 边缘节点电压

Fig.13 Voltage of edge node

6 结论

文中针对高比例分布式光伏接入配电网引发的电压越限、电压波动幅度大的问题,考虑分布式光伏集群调节特性,提出一种主动配电网分布式光伏集群优化调控策略,该策略包括日前集中式全局优化和日内滚动集群优化两部分。

日前调控以经济性最优为目标函数进行全局调控,并基于优化结果划分集群。日内调控根据每个集群内部特性,分别以经济性或安全性为目标进行滚动集群自律优化,并基于 ADMM 实现群间解耦与协同优化。

在改进的 IEEE 33 节点系统进行算例仿真,结果表明,所提出的优化策略能够使网络各节点电压保持在参考值附近,并使电压偏移量明显降低,验证了策略的有效性。相比于不考虑集群特性的调控策略,考虑集群特性、采用差异化优化目标的调控策略,能够在保证电压质量的同时提高经济性。

在未来的研究中,将进一步研究该策略的工程化应用,包括集群动态划分的通信模式及控制隶属关系变化的实际实现方案。

参考文献:

[1] 李晓萍,袁至,王维庆,等.考虑可再生能源接入的多端 MMC 交直流混合系统协调控制[J].可再生能源,2024,42(5): 675-684.
LI Xiaoping, YUAN Zhi, WANG Weiqing, et al. Coordinated control of multi-terminal MMC AC/DC hybrid system considering renewable energy access[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(5): 675-684.

[2] 和萍,刘鑫,宫智杰,等.高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J].电力系统保护与控制,2024,52(18): 112-122.
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.

[3] 周步祥,蔡宇豪,邱一苇,等.考虑电、氢、氨市场的可再生能源电制氢合成氨系统多主体合作运行策略[J].电力建设,2024,45(11): 50-64.
ZHOU Buxiang, CAI Yuhao, QIU Yiwei, et al. Multi-stakeholder cooperative operation strategy of renewable power to ammonia systems considering the electricity, hydrogen and ammonia markets[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 50-64.

[4] 黄梦旗,李勇汇,曾海燕,等.计及高渗透率分布式电源的韧性配电网数据驱动鲁棒规划方法[J].电力建设,2023,44(6): 79-90.

- HUANG Mengqi, LI Yonghui, ZENG Haiyan, et al. Data-driven robust planning method for resilient distribution networks considering high-permeability distributed generation[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(6): 79-90.
- [5] 陈春, 曹伯仲, 曹一家, 等. 高比例分布式电源接入下基于变分模态分解的励磁涌流辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 94-104.
- CHEN Chun, CAO Bozhong, CAO Yijia, et al. Identification of inrush current based on variational modal decomposition under a high proportion of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 94-104.
- [6] 孙宁言, 陈羽, 徐丙垠, 等. 含高比例分布式电源配电网分布式供电恢复方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(10): 161-170.
- SUN Ningyan, CHEN Yu, XU Bingyin, et al. Distributed power supply restoration method for distribution network with high proportion of distributed generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(10): 161-170.
- [7] 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.
- [8] 徐立超, 杨景崧, 熊泽昊. 基于改进灰色聚类法的配电网供电分区方法[J]. *电工技术*, 2021(13): 81-84.
- XU Lichao, YANG Jingyu, XIONG Zehao. A method of power distribution network classification based on improved grey cluster[J]. *Electric Engineering*, 2021(13): 81-84.
- [9] 于琳, 孙莹, 徐然, 等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(3): 89-95, 128.
- YU Lin, SUN Ying, XU Ran, et al. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in reactive power partitioning of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(3): 89-95, 128.
- [10] 蔡永翔, 唐巍, 张璐, 等. 基于光伏逆变器无功调节的低压配电网多模式电压控制[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 133-141.
- CAI Yongxiang, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-mode voltage control in low distribution networks based on reactive power regulation of photovoltaic inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 133-141.
- [11] 闫丽梅, 丁泽华. 基于谱聚类的主动配电网多时间尺度无功优化策略[J]. *浙江电力*, 2024, 43(2): 58-68.
- YAN Limei, DING Zehua. A multi-timescale reactive power optimization strategy for active distribution networks based on spectral clustering[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(2): 58-68.
- [12] 胡丹尔, 彭勇刚, 韦巍, 等. 多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5034-5045.
- HU Daner, PENG Yonggang, WEI Wei, et al. Multi-timescale deep reinforcement learning for reactive power optimization of distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5034-5045.
- [13] 艾聪林, 何东, 王振忠, 等. 基于 Fisher 最优分割法的配电网多时间尺度无功优化[J]. *电工技术*, 2024(4): 150-154.
- AI Conglin, HE Dong, WANG Zhenzhong, et al. Multi-timescale reactive power optimization of distribution network based on Fisher optimal segmentation method[J]. *Electric Engineering*, 2024(4): 150-154.
- [14] LI W, MONTI A, LUO M, et al. VPNET: a co-simulation framework for analyzing communication channel effects on power systems[C]//2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Alexandria, VA, USA. IEEE, 2011: 143-149.
- [15] 顾晨晓, 顾伟, 陈超, 等. 分布式电源集群控制与电力信息实时仿真研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 64-71.
- GU Chenxiao, GU Wei, CHEN Chao, et al. Distributed power cluster control and research on power information real-time simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 64-71.
- [16] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(19): 4035-4049.
- YANG Jun, HOU Junhao, LIU Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(19): 4035-4049.
- [17] 胡珺如, 窦晓波, 李晨, 等. 面向中低压配电网的分布式协同无功优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(22): 47-54.
- HU Junru, DOU Xiaobo, LI Chen, et al. Distributed cooperative reactive power optimization strategy for medium-and low-voltage distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(22): 47-54.
- [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, 3.
- CHAI Yuanyuan, LIU Yixin, WANG Chengshan, et al. Coordinated voltage control for distributed PVs clusters with incomplete measurements[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2202-2212, 3.
- [19] JIAO W S, CHEN J, WU Q W, et al. Distributed coordinated voltage control for distribution networks with DG and OLTC based on MPC and gradient projection[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(1): 680-690.
- [20] 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.

- [21] LI P, JI J, JI H R, et al. MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(4): 2911-2921.
- [22] 王家武, 赵佃云, 刘长峰, 等. 基于目标级联法的多主体主动配电网自治协同优化[J]. *中国电力*, 2024, 57(7): 214-226.
WANG Jiawu, ZHAO Dianyun, LIU Changfeng, et al. Analytical target cascading based active distribution network level multi-agent autonomous collaborative optimization[J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 214-226.
- [23] 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.
- [24] 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.
ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LIU Shuai, et al. Multitimescale distributed active and reactive power coordinated optimization method of distributed network based on cluster division[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(10): 57-66.
- [25] ZHAO B, XU Z C, XU C, et al. Network partition-based zonal voltage control for distribution networks with distributed PV systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(5): 4087-4098.
- [26] LI P S, ZHANG C, WU Z J, 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.
- [27] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
CHEN Heng. Steady state analysis of power systems[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015.

作者简介:



蒋春容

蒋春容(1983), 女, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与并网控制、主动配电网运行与控制等(E-mail: jiangcr@njit.edu.cn);

朱博汶(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为主动配电网电压优化;

周旭峰(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 从事微电网运行与控制、变电站自动化系统等相关工作。

Voltage optimization strategy for active distribution network based on distributed photovoltaic cluster control

JIANG Chunrong¹, ZHU Bowen¹, ZHOU Xufeng², LU Jiani³, ZENG Aidong¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. ZIT (Nanjing) Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. Jiangsu University Jingjiang College, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: High penetration of distributed photovoltaic causes voltage violation problem in active distribution network. In order to solve this problem, a voltage optimization strategy based on distributed photovoltaic cluster control is proposed for the active distribution network. Firstly, with economic operation as the objective, shiftable load dispatch, the tap positions of on-load tap-changing transformers, and the output of capacitor banks are determined in the day-ahead stage. Subsequently, the approximate voltage sensitivity is calculated based on the day-ahead scheduling results, and clusters are partitioned using the *K*-means algorithm according to a comprehensive clustering index. Finally, in the intra-day stage, the cluster self-regulation is carried out based on the cluster adjustment characteristics, aiming at minimizing the internal network losses or the node voltage deviations. The inter-cluster coordination optimization is then performed based on the alternating direction multiplier method. Deploy this strategy on the IEEE 33-node system, and conduct a comparative analysis of voltage regulation effectiveness under various weather conditions and different scheduling strategies. The results show that after the day-ahead centralized optimization, the node voltages are within the limit range. After the intra-day rolling optimization, the voltage deviation is further reduced, and the deviation does not exceed 3% on sunny days. The case study results verify that the proposed optimization strategy guarantees voltage quality and meanwhile improves operational efficiency of distribution network.

Keywords: distributed photovoltaic; cluster control; cluster self-regulation; inter-cluster coordination; voltage deviation; active distribution network

(编辑 吴昊)