

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250373

# 考虑5G基站调控潜力和多资源协同的配电网分层分区有功无功协调优化方法

兰征<sup>1</sup>, 谭仁煜<sup>1</sup>, 杨淳智<sup>1,2</sup>, 王鑫<sup>3</sup>, 李俊豪<sup>3</sup>, 李航<sup>4</sup>, 彭曦<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 国网湖南省电力有限公司怀化供电分公司, 湖南 怀化 418000; 3. 国家电能变换与控制工程技术研究中心(湖南大学), 湖南 长沙 410082; 4. 辽宁荣信兴业电力技术有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:** 5G基站、分布式光伏(distributed photovoltaic, DPV)等分布式资源大规模参与配电网经济与电能质量等多目标优化调度, 致使配电网调控模型决策变量复杂、求解时间慢等问题凸显。为此, 提出一种考虑5G基站调控潜力和多资源协同的配电网分层分区优化方法。首先, 考虑5G基站通信流量波动特性, 建立计及闲置荷电状态(state of charge, SOC)约束的5G基站调控潜力模型。基于此, 再建立配电网分层分区优化模型。上层以配电网综合效益最优为目标进行集中式调度, 从而确定配电网分组投切电容器组、静止无功发生器等自身资源的动作方案。下层为分区调度, 结合电压-功率灵敏度和考虑5G基站通信负荷的源荷不匹配度指标进行配电网物理分区, 建立面向5G基站闲置SOC和DPV剩余容量的配电网分区协调优化模型, 并采用二阶锥规划和同步型交替方向乘法相结合的混合算法进行求解。最后, 以改进的IEEE33节点配电网为算例, 分析验证了所提方法的有效性。结果表明, 所提方法能够提高配电网调控模型的求解能力, 并提升配电网经济性和电压质量。

**关键词:** 5G基站; 后备储能; 无功补偿; 分区协调优化; 源荷不匹配度

## Hierarchical and zonal active-reactive power coordination optimization method for distribution networks considering the regulation potential of 5G base stations and multi-resource coordination

LAN Zheng<sup>1</sup>, TAN Renyu<sup>1</sup>, YANG Chunzhi<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>3</sup>, LI Junhao<sup>3</sup>, LI Hang<sup>4</sup>, PENG Xi<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. State Grid Electric Power Co., Ltd. Huaihua Power Supply Branch, Huaihua 418000, China; 3. National Electric Energy Conversion and Control Engineering Technology Research Center (Hunan University), Changsha 410082, China; 4. Liaoning Rongxin Xingye Electric Power Technology Co., Ltd., Anshan 114000, China)

**Abstract:** With the large-scale participation of distributed resources such as 5G base stations and distributed photovoltaic (DPV) systems in multi-objective optimal dispatch of distribution networks, covering economic performance and power quality, the complexity of decision variables and the computational burden of distribution network control models have become increasingly prominent. To address these challenges, this paper proposes a hierarchical and zonal optimization method for distribution networks considering the regulation potential of 5G base stations and multi-resource coordination. First, considering the fluctuation characteristics of 5G base station traffic, a 5G base station regulation potential model is established, incorporating constraints on the idle state of charge (SOC). On this basis, a hierarchical and zonal optimization model for the distribution network is developed. At the upper layer, centralized dispatch is performed to optimize the overall benefits of the distribution network, thereby determining the operation schemes of intrinsic network resources such as switch capacitor banks and static reactive power generators. The lower level focuses on zonal dispatch: physical partitioning of the distribution network is carried out based on voltage-power sensitivity and a source-load mismatch index that considers the communication load of 5G base stations. A zonal coordinated optimization model is then established, oriented toward the idle SOC of 5G base stations and the residual capacity of DPV systems. This model is solved using a hybrid algorithm that combines second-order cone programming and the synchronous alternating direction method of multipliers. Finally, an improved IEEE 33-bus distribution network is used as a test case to verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the proposed approach enhances the solvability of distribution network control models and improves both the economic performance and voltage quality of the distribution network.

This work is supported by the General Program of Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2025JJ50232).

**Key words:** 5G base station; backup energy storage; reactive power compensation; zonal coordination optimization; source-load mismatch index

**基金项目:** 湖南省自然科学基金面上项目资助(2025JJ50232); 湖南省教育厅科学研究重点项目资助(24A040); 湖南工业大学研究生科研创新项目资助(CX2405)

## 0 引言

随着“新基建”和“双碳”目标的快速推进，分布式光伏(distributed photovoltaic, DPV)和5G基站等多类型源荷广泛接入配电网<sup>[1-6]</sup>。高渗透率的DPV提升了配电网灵活、低碳供电能力，但其随机波动特性也给配电网电压带来巨大冲击。与此同时，5G基站的高能耗和通信流量波动易导致配电网负荷分布不均，且5G基站后备储能(backup energy storage, BES)未充分利用，闲置率高。以上问题给配电网经济调度、电压质量和稳定运行等带来了新的挑战与机遇<sup>[7-8]</sup>。因此，充分利用DPV和5G基站等调控资源，实现配电网有功无功功率补偿，对提升配电网经济性和电压质量具有重要意义。

目前，部分学者对5G基站BES在配电网中的应用展开了研究。文献[9-10]将基站与DPV聚合参与配电网调度，在平抑DPV出力波动的基础上，提升了配电网的电压质量和DPV消纳率。然而，上述文献未考虑5G基站BES荷电状态(state of charge, SOC), BES的输出功率易超过上限，偏离调控实际。为此，文献[11]考虑5G基站BES的SOC计算，通过优化基站的发射功率和储能使用情况降低系统总成本。与此相似的，文献[12]建立基于通信负荷的SOC微积分精准计算模型，提出5G基站与配电网互动优化调度方案，实现系统经济与低碳效益的综合最优。然而，上述文献所提SOC模型未留有足够的安全备电，难以满足5G基站最短供电时间不低于3h的国标要求。针对5G基站BES备用SOC国标要求，文献[13]采用马尔可夫模型作为基站储能的边界约束，保证了5G基站最短供电时间，并降低5G基站BES的闲置率。然而，该研究忽略了5G基站自身通信负荷的不确定性对配电网可能造成的冲击，以及无法保证SOC精准建模等问题，致使5G基站BES的利用过于保守。因此，有必要增加对通信负荷相关的机会约束，以平抑5G基站通信负荷波动，在考虑不确定性基础上建立SOC精准计算模型，充分利用5G基站BES的实际可利用SOC。

值得注意的是，上述文献的调度方法均为集中式优化<sup>[14]</sup>。但实际配电网中DPV和5G基站等可调资源数量众多，决策量的增加易造成集中式计算维数灾难，致使既有集中式优化存在求解时间长、响应速度慢等问题。因此，需通过合适的分区协调优化方法对配电网中的可控资源进行可靠、高效调度<sup>[15-16]</sup>。例如，文献[17]基于随机规划理论建立了配电网分区协调优化模型。但该模型分区过程未参考关于有功、无功功率的配电网指标，难以保证各

分区有充足储备以响应功率补偿。文献[18]以最大模块度函数和分区动态无功储备为衡量指标对配电网进行分区，有效提高分布式资源无功控制效率和精确性。但该研究仅为无功动态分配，未考虑有功负荷需求增加带来的配电网分区后区域内部难以自给自足的问题，致使配电网调控指令响应不全。因此，配电网分区协调优化方法需引入源荷不匹配度为分区指标，保障配电网安全稳定运行。此外，单纯的分区优化还存在信息交互负担大的问题，可能导致配电网自身设备响应调控不全，需将集中式优化和分区优化结合，以保证配电网基本调控需求。

基于此，本文提出一种考虑5G基站调控潜力和多资源协同的配电网分层分区优化方法。首先，考虑5G基站通信流量的波动性和随机性，生成满足机会约束的通信负荷数据，进而计算得到5G基站BES闲置SOC，并建立计及闲置SOC约束的5G基站有功-无功调控模型。接着，针对含DPV和5G基站BES的配电网集中式调控模型求解难的问题，建立配电网分层分区优化模型。其中，上层以配电网综合效益最优为目标进行集中式调度，确定配电网自身资源的动作方案。下层考虑源荷不匹配度和电压功率灵敏度，将配电网分为多个区域，建立面向5G基站和DPV闲置SOC的配电网分区协调优化模型。然后，采用二阶锥规划(second-order conic programming, SOCP)和同步型交替方向乘子法(synchronous alternating direction method of multipliers, SADMM)结合的混合算法对模型进行求解。最后，以改进的IEEE33节点配电网为算例，分析验证了本文方法的有效性与优越性。

## 1 分层分区协调优化框架

5G基站、DPV等分布式资源大规模参与配电网经济与电能质量等多目标优化调度，致使配电网调控模型决策变量复杂、求解时间慢、响应效果差。针对以上问题，本文制定了考虑5G基站调节能力，以及DPV、配电网分组投切电容器组(capacitor banks, CB)和静止无功发生器(static var generator, SVG)等多资源协同的配电网分层分区优化框架，如图1所示。

配电网可直接调控CB、SVG等无功补偿装置，而DPV和5G基站为间接响应资源，其在调控响应形式上存在明显差异。因此，将配电网优化框架分层为两部分。上层为配电网集中式调度，根据不确定性信息得到5G基站通信负荷和DPV有功出力预测值。基于此，建立以配电网综合效益最优为目标的集中式调度模型，并考虑5G基站通信负荷与DPV出力不确定性，在配电网潮流等约束下对CB和SVG

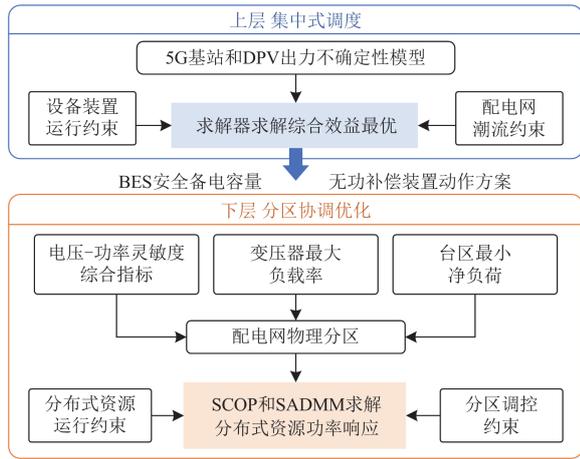


图 1 分层分区总体框架

Fig. 1 General framework for the stratified zoning

的动作方案进行先行决策。

基于上层分层优化结果, 下层采用物理分区的形式对配电网进行分区协调优化, 调控 DPV 和 5G 基站 BES 等分布式资源。首先, 结合电压-功率灵敏度和中压馈线各个台区的变压器负载率、净负荷这两个源荷不匹配度指标, 对配电网进行物理分区。然后, 基于 5G 基站 BES 可利用 SOC 与 DPV 剩余容量, 考虑区域电网潮流约束与分区调控约束, 对 DPV 和 5G 基站进行功率调控, 并采用 SOCP 和 SADMM 结合的混合算法进行求解。最后, 将两部分优化结果整合, 共同构成配电网分层分区优化模型。

## 2 考虑通信负荷不确定性的 5G 基站 BES 调节潜力建模

针对覆盖面广、功耗高的可调控 5G 基站, 本文开展考虑通信负荷不确定性的 5G 基站 BES 建模研究。

### 2.1 计及不确定性的 5G 基站 BES 安全备电 SOC 模型

5G 基站有源天线单元功耗与接入移动用户的通信动态负荷成正比例关系, 且对通信负荷强度十分敏感<sup>[19]</sup>。而室内基带处理单元负荷受移动用户影响较小。基于此, 将 5G 基站的基本负荷近似区分为静态负荷和动态负荷。5G 基站总负荷的线性方程可近似表示为

$$P_{5G,BS,m,t} = \begin{cases} P_{ACT,m,t} = P_{S,m,t} + \alpha P_{D,m,t}, & \varepsilon = 1 \\ P_{SLE,m,t}, & \varepsilon = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{5G,BS,m,t}$  为  $t$  时刻基站  $m$  的总负荷;  $P_{ACT,m,t}$ 、 $P_{SLE,m,t}$  分别为  $t$  时刻基站  $m$  的激活状态负荷和睡眠状态负荷;  $P_{S,m,t}$ 、 $P_{D,m,t}$  分别为  $t$  时刻基站  $m$  静态负

荷和动态负荷;  $\alpha$  为基站  $m$  的负荷尺度因子;  $\varepsilon$  为  $t$  时刻基站的工作标识。

$$P_{D,m,t} = \beta P_{D,max} \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为反映移动用户通信数据的系数;  $P_{D,max}$  为基站动态负荷的预测最大值。

本文对 5G 基站通信负荷预测值进行样本缩减剔除和机会约束处理, 如图 2 所示。

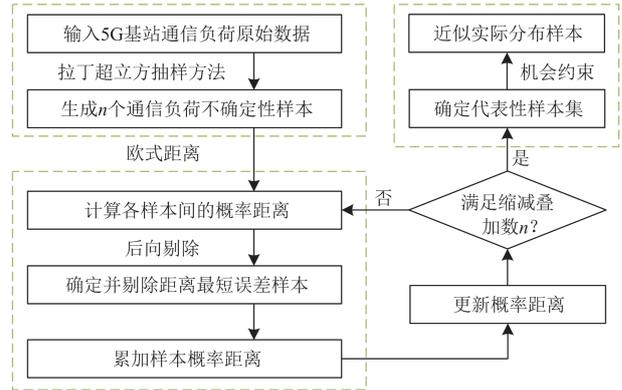


图 2 5G 基站通信负荷预测值处理流程

Fig. 2 Handling process of 5G base station communication load prediction values

首先, 假设 5G 基站通信负荷预测值的误差服从正态分布, 采用拉丁超立方抽样方法<sup>[20-21]</sup>生成  $N$  个不确定性样本。其次, 采用基于概率距离的同步回代法<sup>[22]</sup>将不确定性样本缩减剔除至  $n$  个, 得到 5G 基站通信负荷不确定性样本值集合为  $P_D = \{P_{D,1}, P_{D,2}, \dots, P_{D,n}\}$ 。最后, 采用基于样本均值近似的机会约束法<sup>[23]</sup>将 5G 基站通信负荷上下限软约束转化为式(3), 进而以不确定量的经验分布将其实际分布近似为式(4)。

$$\Pr \{0 \leq P_{D,m,t} \leq P_{D,m}\} \geq \varepsilon_L \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{D,m,t} + z_{D,m,t} M \geq 0 \\ P_{D,m,t} - z_{D,m,t} M \leq P_{D,m} \\ \sum_{m=1}^n z_{D,m,t} P_{D,m} \leq 1 - \varepsilon_L \\ z_{D,m,t} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Pr \{\}$  为随机事件发生的概率;  $P_{D,m}$  表示基站  $m$  通信负荷的不确定性样本值;  $\varepsilon_L$  为 5G 基站通信负荷约束需满足的置信水平;  $z_{D,m,t}$  为机会约束失效指示函数;  $M$  为人为引入的大数值常数。

5G 基站 BES 一般根据满载情况下的负荷进行容量配置, 可分为保障基站高可靠性供电与参与配电网需求响应两部分<sup>[24]</sup>。5G 基站 BES 各个时段的

安全备电 SOC 和闲置 SOC 计算公式为

$$\begin{cases} S_{SUR,t} = \int_t^{t+T_{res,min}} P_{5G,BS,m,t} dt \\ S_{REM,t} = S_{5G} - S_{SUR,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $S_{SUR,t}$  为 5G 基站 BES 在  $t$  时刻需要的安全备电 SOC;  $T_{res,min}$  为 5G 基站 BES 的最短备电时间;  $S_{REM,t}$  为 5G 基站 BES 在  $t$  时刻的闲置 SOC;  $S_{5G}$  为 5G 基站 BES 的总容量。

## 2.2 考虑无功补偿的 5G 基站 BES 功率调控模型

本文采用 5G 基站 BES 闲置 SOC 约束无功功率上下限, 具体如下。

$$\begin{cases} \mu_t^{5G,dis} + \mu_t^{5G,dis} \leq 1 \\ \xi_t^{5G,dis} + \xi_t^{5G,ch} \leq 1 \\ \mu_t^{5G,ch/dis} P_{min}^{5G,ch/dis} \leq P_t^{5G,ch/dis} \leq \mu_t^{5G,ch/dis} P_{max}^{5G,ch/dis} \\ \xi_t^{5G,ch/dis} Q_{min}^{5G,ch/dis} \leq Q_t^{5G,ch/dis} \leq \xi_t^{5G,ch/dis} Q_{max}^{5G,ch/dis} \\ Q_{max}^{5G,ch/dis} \leq Q_{max}^{5G,CAL} \\ Q_{min}^{5G,ch/dis} \geq -Q_{max}^{5G,CAL} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mu_t^{5G,ch/dis}$ 、 $\xi_t^{5G,ch/dis}$  分别为 5G 基站 BES 有功、无功充放标识, 为 0-1 变量;  $P_t^{5G,ch/dis}$ 、 $Q_t^{5G,ch/dis}$  分别为 5G 基站 BES 在  $t$  时刻吸收或释放的有功、无功功率;  $P_{min}^{5G,ch/dis}$ 、 $Q_{min}^{5G,ch/dis}$  分别为其最小值;  $P_{max}^{5G,ch/dis}$ 、 $Q_{max}^{5G,ch/dis}$  分别为其最大值;  $Q_{max}^{5G,CAL}$  为 5G 基站储能无功功率上限, 由闲置 SOC 计算得到, 表示为

$$\begin{cases} Q_{max}^{5G,CAL} = \sqrt{(S_{REM,t})^2 - (P_t^{5G,ch})^2}, P_t^{5G,dis} = 0 \\ Q_{max}^{5G,CAL} = \sqrt{(S_{REM,t})^2 - (P_t^{5G,dis})^2}, P_t^{5G,ch} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

在 5G 基站 BES 的调度过程中, 需保证其在整个周期内不越限。同时, 为便于长期调度, 通常设置 5G 基站 BES 的 SOC 在每个周期的首尾时间段保持一致。5G 基站 BES 在实际的充放电过程中也存在一定电能损耗, 这导致整个周期内 5G 基站 BES 实际充放电功率与其内部功率存在差异。

$$\begin{cases} E_t^{5G,ESS} = E_{t-1}^{5G,ESS} (1 - \delta) + \eta_{t-1}^{5G,ch} P_{t-1}^{5G,ch} - (1/\eta_{t-1}^{5G,dis}) P_{t-1}^{5G,dis} \\ E_{min}^{5G,ESS} \leq E_t^{5G,ESS} \leq E_{max}^{5G,ESS} \\ E_0^{5G,ESS} = E_T^{5G,ESS} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $E_t^{5G,ESS}$  为 5G 基站 BES 在  $t$  时刻的 SOC;  $\delta$  为 5G 基站 BES 的自放电率;  $\eta_{t-1}^{5G,ch}$ 、 $\eta_{t-1}^{5G,dis}$  分别为 5G 基站 BES 的充、放电效率;  $E_{max}^{5G,ESS}$ 、 $E_{min}^{5G,ESS}$  分别为 5G 基站 BES 的最大和最小 SOC;  $E_0^{5G,ESS}$ 、 $E_T^{5G,ESS}$  分别为 5G 基站 BES 在调度周期初始和最终时段的 SOC;  $T$  为一个优化周期。

## 3 考虑 5G 基站调节特性和多资源相协调的配电网分层分区优化模型

本节建立配电网分层分区的协调优化模型, 分层表示配电网集中式调度和分区协调优化两个部分, 分区则表示下层的分区优化。

### 3.1 上层集中式调度

集中式调度层从经济安全供电出发, 最大化配电网综合效益, 目标函数主要由配电网运维成本和配电网平均电压偏差构成。

#### 3.1.1 上层集中调度目标函数

集中式调度目标函数  $f_1$  的表达式为

$$\min f_1 = \lambda_{COS} f_{COS} + \lambda_{SYN} f_{SYN} \quad (9)$$

$$\lambda_{COS} = \frac{\gamma_{COS}}{f_{COS}^0} \quad (10)$$

$$\lambda_{SYN} = \frac{\gamma_{SYN}}{f_{SYN}^0} \quad (11)$$

$$\gamma_{COS} + \gamma_{SYN} = 1 \quad (12)$$

式中:  $\lambda_{COS}$ 、 $\lambda_{SYN}$  分别为配电网运维成本、平均电压偏差两个目标的权重因子;  $\gamma_{COS}$ 、 $\gamma_{SYN}$  分别为两个目标的权重系数;  $f_{COS}^0$ 、 $f_{SYN}^0$  分别为两个目标在优化前的初始值;  $f_{COS}$ 、 $f_{SYN}$  分别为两个目标的实测值; 表示为

$$\begin{cases} f_{COS} = \sum_{i=0}^{N_{BUS}-1} \sum_{j=1}^{N_{BUS}} (c_{LIN,t} I_{ij}^2 r_{ij} \Delta t) + \sum_{h=1}^{n_{UNI}} (c_{UNI,h} A_{UNI,h} \Delta t) \\ f_{SYN} = \frac{1}{N_{BUS}} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_{BUS}} \sum_{t=1}^T \left| \frac{V_{i,t} - V_N}{V_N} \right| \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $N_{BUS}$  为配电网的节点数;  $c_{LIN,t}$ 、 $c_{UNI,h}$  分别为  $t$  时刻单位网损价格、第  $h$  个无功补偿装置的单位运维成本;  $I_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间支路的电流;  $r_{ij}$  为配电网线路电阻;  $n_{UNI}$  为无功补偿装置的数量;  $A_{UNI,h}$  为第  $h$  个无功补偿装置的动作次数;  $\Delta t$  为单个时段的持续时间;  $V_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的节点电压;  $V_N$  为基准电压。

#### 3.1.2 上层集中调度约束条件

1) 电力系统潮流安全约束

$$\begin{cases} p_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - I_{ij}^2 r_{ij}) + g_j V_j^2 \\ q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - I_{ij}^2 x_{ij}) + b_j V_j^2 \\ V_j^2 = V_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \\ I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $V_i$ 、 $V_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的电压;  $p_j$ 、 $q_j$  分别为节点  $j$  的有功、无功功率;  $P_{jk}$ 、 $Q_{jk}$  分别为节点  $j$  向下一节点  $k$  流出的有功、无功功率;  $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  分别为上一节点  $i$  流入节点  $j$  的有功、无功功率;  $g_j$ 、 $x_j$ 、 $b_j$  分别为配电网电抗、电导和电纳。

## 2) 安全性约束

$$\begin{cases} V_{j,\min} \leq V_j \leq V_{j,\max} \\ I_{ij,\min} \leq I_{ij} \leq I_{ij,\max} \\ P_{\text{GRI},\min} \leq P_{\text{GRI},t} \leq P_{\text{GRI},\max} \\ Q_{\text{GRI},\min} \leq Q_{\text{GRI},t} \leq Q_{\text{GRI},\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $V_{j,\max}$ 、 $V_{j,\min}$  分别为节点  $j$  的电压上、下限;  $I_{ij,\max}$ 、 $I_{ij,\min}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  之间支路的电流上、下限;  $P_{\text{GRI},t}$ 、 $Q_{\text{GRI},t}$  分别为上级电网交互的有功、无功功率;  $P_{\text{GRI},\max}$ 、 $Q_{\text{GRI},\max}$  和  $P_{\text{GRI},\min}$ 、 $Q_{\text{GRI},\min}$  分别为上级电网交互有功、无功功率的最大、最小值。

## 3) CB 建模

$$\begin{cases} Q_{\text{CB},h,t} = y_{\text{CB},h,t} Q_{\text{CB},\text{step},h} \\ y_{\text{CB},h,t} \leq Y_{\text{CB},\text{max},h} \\ \sum_{t=1}^T |y_{\text{CB},h,t} - y_{\text{CB},h,t-1}| \leq N_{\text{CB},\text{max},h} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $Q_{\text{CB},h,t}$  为 CB 无功补偿的总功率;  $y_{\text{CB},h,t}$  为投运组数, 为离散变量值;  $Q_{\text{CB},\text{step},h}$  为每组 CB 的补偿功率;  $Y_{\text{CB},\text{max},h}$  为第  $h$  个 CB 投运无功组数的上限;  $N_{\text{CB},\text{max},h}$  为操作次数上限。

## 4) SVG 建模

$$Q_{\text{SVG},\min,h} \leq Q_{\text{SVG},h} \leq Q_{\text{SVG},\max,h} \quad (17)$$

式中:  $Q_{\text{SVG},\max,h}$ 、 $Q_{\text{SVG},\min,h}$  分别为 SVG 无功功率的上、下限;  $Q_{\text{SVG},h}$  为 SVG 无功补偿的总功率。

## 5) 5G 基站约束

上层考虑移动用户接入的波动性和随机性, 采用机会约束法对基站通信负荷进行约束, 5G 基站负荷模型如式(1)一式(4)所示。

## 6) 功率平衡约束

$$\begin{cases} \sum P_{\text{load},i,t} + \sum P_{\text{IN}} + \sum P_{\text{5G},\text{BS},m,t} = \sum P_{\text{GRI},t} + \sum P_{\text{DPV},i,t} \\ \sum Q_{\text{load},i,t} + \sum Q_{\text{IN}} = \sum Q_{\text{GRI},t} + \sum Q_{\text{CB},j,t} + \sum Q_{\text{SVG},j} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{load},i,t}$ 、 $Q_{\text{load},i,t}$  分别为配电网节点  $i$  在第  $t$  时刻的有功、无功负荷;  $P_{\text{IN}}$ 、 $Q_{\text{IN}}$  分别为配电网各节点的注入有功、无功功率;  $P_{\text{DPV},i,t}$  为节点  $i$  装配的光

伏电站在  $t$  时刻的实际出力。

## 3.2 下层分区协调优化

### 3.2.1 考虑源荷不匹配与电压灵敏度的分区方法

下层综合考虑源荷不匹配与电压灵活调控, 提出区域划分综合评价指标  $F$ , 如式(19)所示。

$$F = \omega_1 \chi_1 + \omega_2 \chi_2 \quad (19)$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为源荷不匹配度综合指标和电压-功率灵敏度综合指标对应的权重系数;  $\chi_1$ 、 $\chi_2$  分别为源荷不匹配度综合指标和电压-功率灵敏度综合指标。

### 1) 考虑 5G 基站和 DPV 出力不确定性的源荷不匹配度综合指标

引入考虑 5G 基站接入的源荷不匹配度指标, 以筛选变压器重载和 DPV 出力过剩台区。源荷不匹配度综合指标可表示为

$$\chi_1 = \max \{ \omega_T T_{\text{load},i} + \omega_P P_{\text{pure},i} \} \quad (20)$$

式中:  $\omega_T$ 、 $\omega_P$  分别为台区变压器负载率和台区净负荷权重系数;  $T_{\text{load},i}$ 、 $P_{\text{pure},i}$  分别为节点  $i$  的台区变压器负载率和台区净负荷, 具体如式(21)所示。

$$\begin{cases} T_{\text{load},i} = \max \frac{\sqrt{(P_{\text{load},i,t} + P_{\text{DPV},i,t} + P_{\text{5G},\text{BS},m,t})^2 + (Q_{\text{load},i,t})^2}}{S_T} \\ P_{\text{pure},i} = \min(P_{\text{load},i,t} + P_{\text{5G},\text{BS},m,t} - P_{\text{DPV},i,t}) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $S_T$  为各节点变压器容量。

当  $T_{\text{load},i} > 0.8$  时, 节点  $i$  存在变压器重载情况, 归入集合  $\Phi_{11}$ , 反之归入集合  $\Phi_{12}$ 。当  $P_{\text{pure},i} < 0$  时, 节点  $i$  存在 DPV 出力过剩情况, 归入集合  $\Phi_{21}$ , 反之归入集合  $\Phi_{22}$ 。

### 2) 电压-功率灵敏度综合指标

电压-功率灵敏度综合指标定义参考文献[25]。

所提区域划分方法采用自适应的遗传算法求解最优分区方案, 以配电网区域划分综合评价指标  $F$  为适应度函数寻优, 遗传算法的解即为分区方案。

### 3.2.2 下层分区协调优化目标函数

下层分区协调优化的目的是优化区域效益和 5G 基站收益, 该目标函数  $f_2$  表达式为

$$\min f_2 = f_1 - f_{\text{5G}} \quad (22)$$

式中:  $f_{\text{5G}}$  为 5G 基站收益的归一值, 表示为

$$f_{\text{5G}} = \frac{f_{\text{5G}}^{\text{real}} - f_{\text{5G}}^{\min}}{f_{\text{5G}}^{\max} - f_{\text{5G}}^{\min}} \quad (23)$$

式中:  $f_{\text{5G}}^{\text{real}}$ 、 $f_{\text{5G}}^{\max}$ 、 $f_{\text{5G}}^{\min}$  分别为 5G 基站收益及其在极端情况下的最大和最小值。

### 3.2.3 下层分区协调优化约束条件

#### 1) DPV 无功补偿建模

DPV 无功功率的调节范围由自身的安装容量以及有功功率决定。

$$S_{\text{DPV},j,\min} \leq S_{\text{DPV},j,t} \leq S_{\text{DPV},j,\max} \quad (24)$$

$$|Q_{\text{DPV},j,t}| \leq \sqrt{S_{\text{DPV},j,t}^2 - P_{\text{DPV},j,t}^2} \quad (25)$$

式中:  $S_{\text{DPV},j,\max}$ 、 $S_{\text{DPV},j,\min}$  分别为节点  $j$  装配的光伏电站的容量上、下限;  $S_{\text{DPV},j,t}$  为节点  $j$  装配的光伏电站在  $t$  时刻的预测出力;  $Q_{\text{DPV},j,t}$  为节点  $j$  装配的光伏电站在  $t$  时刻的无功出力。

#### 2) 5G 基站 BES 无功补偿建模

分区协调优化根据上层计算得到的 5G 基站 BES 可调度 SOC, 实现 5G 基站的充分利用。因此, 5G 基站 BES 建模需要考虑的约束如式(5)~式(8)所示。

#### 3) 区域电网功率平衡约束

$$\begin{cases} \sum P_{\text{load},i,t} + \sum P_{\text{IN}} + \sum P_{\text{5G,BS},m,t} = \\ \sum P_{\text{GRI},t} + \sum P_{\text{DPV},i,t} + \sum P_t^{\text{5G,ch}} + \sum P_t^{\text{5G,dis}} \\ \sum Q_{\text{load},i,t} + \sum Q_{\text{IN}} = \sum Q_{\text{GRI},t} + \sum Q_{\text{CB},j,t} + \\ \sum Q_{\text{SVG},j} + \sum Q_{\text{DPV},j,t} + \sum Q_t^{\text{5G,ch}} + \sum Q_t^{\text{5G,dis}} \end{cases} \quad (26)$$

#### 4) 分区调控约束

相邻区域之间的耦合部分为区域边界上的区域, 称之为耦合区域  $e_{ij}$ 。耦合区域集合  $O$  可表示为

$$O := \{e_{ij} | E_a \cap E_b, \forall a, b \in R \text{ 且 } a \neq b\} \quad (27)$$

式中:  $E_a$ 、 $E_b$  分别为区域  $a$  和区域  $b$  的支路集合;  $R$  为配电网分成的有联系的物理区域集合。

耦合区域  $e_{ij}$  状态变量包括支路传输的功率和节点电压的平方。区域  $a$  中耦合区域的状态变量  $X_{a,ij}$  可表示为

$$X_{a,ij} = \{P_{a,ij}, Q_{a,ij}, U_{a,i}, U_{a,j}\} \quad (28)$$

式中:  $P_{a,ij}$ 、 $Q_{a,ij}$  分别为区域  $a$  支路  $ij$  流动的有功、无功功率;  $U_{a,i}$ 、 $U_{a,j}$  分别为区域  $a$  节点  $i$ 、 $j$  的电压。

每个分区的区域潮流计算是独立的求解过程, 但由于相邻分区存在变量之间的联系, 因此相邻区域的潮流计算在边界处的计算结果需相同。因此, 区域  $a$  子问题得到的耦合区域状态变量  $X_{a,ij}$  与相邻区域  $b$  子问题得到的耦合区域状态变量  $X_{b,ij}$  需相等。基于分区协调的分布式功率优化控制耦合约束可表示为

$$X_{a,ij} = X_{b,ij}, e_{ij} \in O \quad (29)$$

### 3.3 模型求解方法

#### 3.3.1 基于 SOCP 的模型凸化

考虑 5G 基站调控潜力和多资源无功补偿的配电网分层分区优化模型中约束式(7)、式(14)、式(25)都为强非凸形式, 属于混合整数非线性规划难题。SOCP 因其搜索空间的光滑性和对称性等特征, 在收敛速度和寻优能力方面具有明显优势<sup>[26]</sup>。因此引入 SOCP 将传统模型转化为混合整数二阶锥模型, 转化后的电力系统潮流约束如式(30)所示。

$$\begin{cases} p_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - \tilde{I}_{ij} r_{ij}) + g_j \tilde{V}_j \\ q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - \tilde{I}_{ij} x_{ij}) + b_j \tilde{V}_j \\ \tilde{V}_j = \tilde{V}_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \tilde{I}_{ij} \\ \left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_j \end{bmatrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_j \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $\tilde{V}_i$ 、 $\tilde{I}_{ij}$  分别为节点  $i$  电压的平方和支路  $ij$  电流的平方。

同时, 将式(7)和式(25)转换为二阶锥形式, 即

$$\begin{cases} \left\| \begin{bmatrix} P_t^{\text{5G,ch}} \\ Q_t^{\text{5G,ch}} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq 2 \frac{S_{\text{REM},t}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_{\text{REM},t}}{\sqrt{2}}, P_t^{\text{5G,dis}} = 0 \\ \left\| \begin{bmatrix} P_t^{\text{5G,dis}} \\ Q_t^{\text{5G,dis}} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq 2 \frac{S_{\text{REM},t}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_{\text{REM},t}}{\sqrt{2}}, P_t^{\text{5G,ch}} = 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$\left\| \begin{bmatrix} P_{\text{DPV},j,t} \\ Q_{\text{DPV},j,t} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq 2 \frac{S_{\text{DPV},j,t}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{S_{\text{DPV},j,t}}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

#### 3.3.2 分层分区模型求解方法

本文所提分层分区模型包括配电网上层集中式调度和下层分区协调优化, 模型求解流程图如图 3 所示。其中, 配电网上层为混合整数二阶锥模型, 可直接采用 CPLEX 商业求解器进行求解, 确定无功补偿装置动作方案并输入下层。对于下层分区协调优化, 根据上层调度结果计算配电网电压-功率灵敏度, 并结合源荷不匹配度指标进行分区, 构建分布式无功优化控制模型。分区优化是一种含多独立目标函数的边界耦合区域线性凸优化模型, 可采用 SADM 进行分布式求解, 实现各分区治理<sup>[27]</sup>。

## 4 算例分析

### 4.1 算例基础数据

本文采用改进的 IEEE33 节点配电系统对所提出的配电网分层分区协调优化方法进行仿真验证, 配电系统结构如图 4 所示。算例中优化周期  $T = 24 \text{ h}$ ,

时间间隔  $\Delta t = 1\text{ h}$ 。节点 4、11、16、22、32 接入 DPV, 节点 9、13 接入 CB, 节点 21、30 接入 SVG, 节点 6、15、19、28 接入 5G 基站系统。同时, 根据文献[28]计算可知 5G 基站最短备电时间取 3 h。

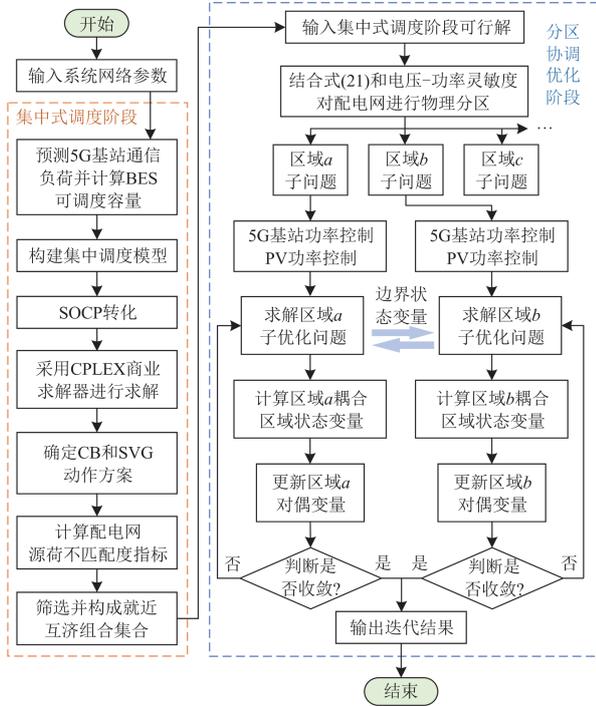


图 3 模型求解流程图

Fig. 3 Model solving flowchart

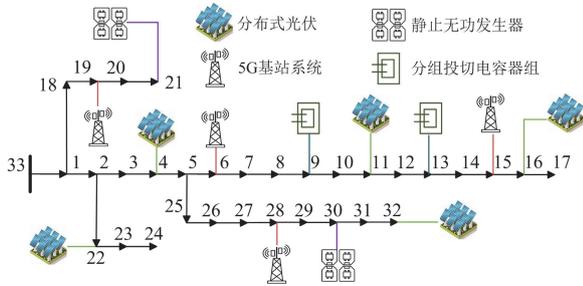


图 4 IEEE33 节点配电网拓扑

Fig. 4 Topology of IEEE33-node distribution network

## 4.2 结果与分析

为验证本文所提方法的有效性和准确性, 设置 4 种规划方法和场景。场景 1: 仅调控 CB、SVG 等配电网自身资源, 即上层优化。场景 2: 在上层的基础上, 下层仅考虑 DPV 的无功调节能力。场景 3: 考虑 5G 基站调控潜力和多资源协同的配电网分区优化方法。场景 4: 本文所提考虑 5G 基站调控潜力和多资源协同的配电网分层分区优化方法。

### 4.2.1 配电网分区结果分析

基于本文方法优化结果得到配电网源荷不匹配

度指标如图 5、图 6 所示, 由此得到集合  $\Phi_{11}$ 、 $\Phi_{12}$ 、 $\Phi_{21}$  和  $\Phi_{22}$ , 从而筛选出变压器重载和 DPV 出力过剩的台区。将重载的变压器所在台区与 DPV 发电过剩的台区进行匹配, 构成台区就近互济组合的集合  $\Omega = \{(3,4)$ 、 $(6,7)$ 、 $(8,9)$ 、 $(13,14)$ 、 $(16,17)$ 、 $(20,21)$ 、 $(23,24)$ 、 $(28,29)$ 、 $(31,32)\}$ 。

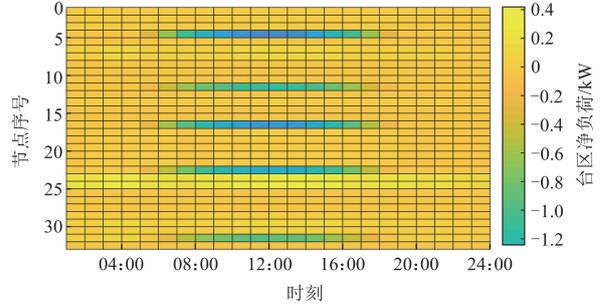


图 5 台区净负荷分布图

Fig. 5 Net load distribution of station area

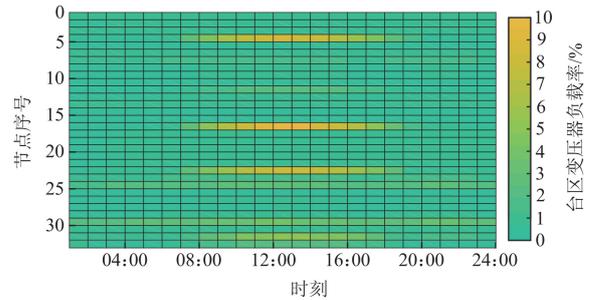


图 6 台区变压器负载率分布图

Fig. 6 Distribution of transformer load ratio of station area

电压-功率灵敏度指标分布如图 7 所示, 节点 17、21、32 位于线路末端, 电压-功率灵敏度指标较大, 功率变化导致的电压变化更大, 因此将节点 17、21、32 依次分在区域 3、1、2 中。

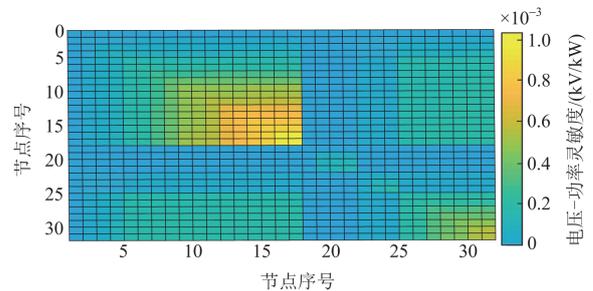


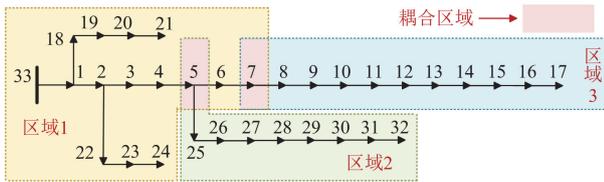
图 7 电压-功率灵敏度指标分布图

Fig. 7 Distribution of voltage-power sensitivity metrics

综合考虑系统源荷不匹配度和配电网电压治理能力, 采用中压馈线各个台区的变压器负载率、净负荷和电压-功率灵敏度对配电网进行分区, 结果

如图 8(a)所示,分别为区域 1{33, 1-7, 19-26}、区域 2{5, 25-32}、区域 3{7-17}。

选择传统仅考虑电压-功率灵敏度的分区方法与本文方法作对比。由传统方法分区结果图 8(b)可知,传统分区方法未考虑区域源荷分布,导致区域 4 内无可匹配的可调控资源,区域自治能力较弱。同时,传统分区方法将本区域可调控资源尽可能用于本区域的需求,将配电网分成较多区域,导致耦合区域过多,增加了耦合区域及其迭代收敛次数,加重了算法求解负担。



(a) 本文方法配电网分区结果示意图



(b) 传统方法配电网分区结果示意图

图 8 配电网分区结果示意图

Fig. 8 Schematic diagram of distribution network zoning results

#### 4.2.2 无功补偿与可控资源响应分析

CB、SVG 与 DPV、5G 基站调控量大且分布分散的特点有所区别,配电网能够对无功补偿装置进行统一集中式调控。图 9 为本文上层得到的无功补偿装置动作方案,计算得到 CB 和 SVG 的动作成本为 1131.4 元,该成本在场景 1、2、4 的综合运行成本中的占比分别为 18.82%、29.41%、31.72%。这说明 5G 基站 BES 参与调控,有效减少了除调控资源动作成本以外的运维成本。

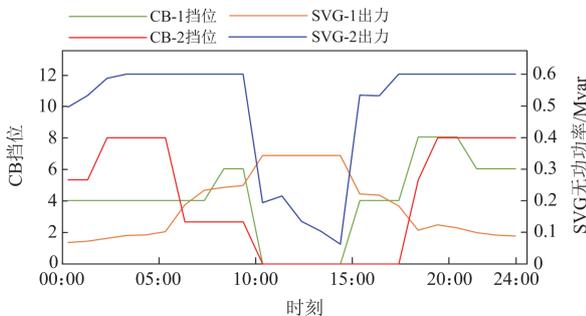


图 9 无功补偿装置动作方案

Fig. 9 Action scheme of reactive power compensation device

图 10、图 11 分别为场景 4 下 DPV 和 5G 基站 BES 的无功响应情况。在 00:00—10:00 和 19:00—24:00 时段,各区域内负荷需求较大,DPV 无法完全支撑台区供电,同时 5G 基站 BES 输出有功功率给配电网负荷供能。DPV 和 5G 基站 BES 在此时段都进行无功补偿,避免中压馈线各个台区电压水平处于较低水平。

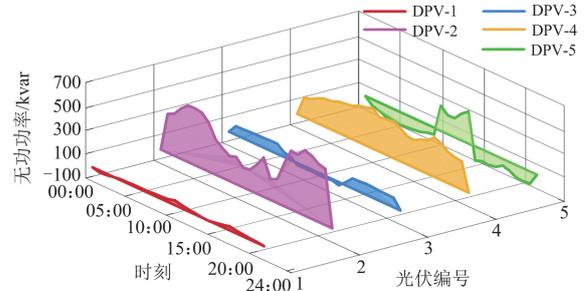


图 10 场景 4 下 DPV 无功补偿情况

Fig. 10 DPV reactive power compensation under scene 4

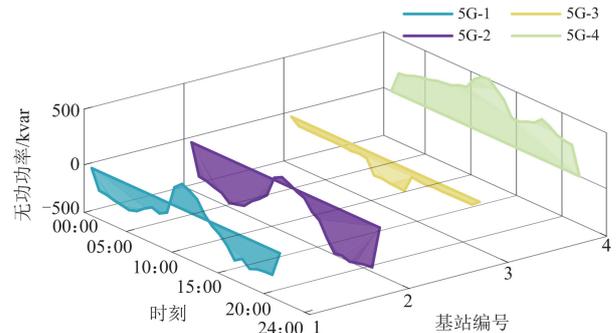


图 11 场景 4 下 5G 基站 BES 无功补偿情况

Fig. 11 5G base station BES reactive power compensation under scene 4

因此,此时 DPV 输出感性无功功率,提升配电网电压水平。在 11:00—18:00 时段,由于阳光充足,DPV 有功出力远远超过了配电网的负荷需求,产生了倒送功率,进而发生电压越限。因此该时段 DPV 输出容性无功,降低了配电网电压水平。同时,5G 基站 BES 通过吸收光伏出力进行充电,并输出无功功率,以满足配电网无功负荷需求。

#### 4.2.3 运行结果对比分析

表 1 为 IEEE33 节点配电网的 4 种场景下各项成本和综合成本对比。在网损优化方面,本文方法调控下的网损值最小,相较于场景 1—场景 3 分别减少 56.81%、22.41%和 5.56%;在综合运行成本方面,本文方法综合成本相较于场景 1—场景 3 分别减少 40.74%、7.27%和 3.99%;在电压偏差方面,本文方法平均电压偏差降至 0.786 p.u.,为各场景最低。因此,本文所提方法具有明显的降损和经济优化效果。

表 1 各场景下的运行结果

Table 1 Running results of various scenarios

场景	网损成本/元	综合成本/元	平均电压偏差/p.u.
1	4878.7	6010.1	$3.331 \times 10^{-3}$
2	2715.7	3847.1	$2.523 \times 10^{-3}$
3	2231.4	3715.6	$0.967 \times 10^{-3}$
4	2107.3	3567.3	$0.786 \times 10^{-3}$

图 12 为不同场景下的网损分布情况。在场景 1 中, 13:00 DPV 进入高发时段, 出现大量功率倒送现象, 引发逆向潮流, 导致线路传输功率骤增, 网损随之攀升至峰值。通过有功无功协同优化, 场景 2—场景 4 的网损最大值分别降至 411.7 kW、275.7 kW 和 268.8 kW。本文所提分层分区优化方法通过调度 5G 基站 BES 与 DPV, 有效缓解 DPV 高发时段配电网局部区域的功率拥堵现象。同时, 利用 5G 基站 BES 与 DPV 的动态无功调节能力, 实现无功功率就地平衡, 大幅减少无功功率跨区域传输损耗。由此证明, 通过本文优化方法可以明显降低配电网网损, 对于实现配电网可持续发展具有重要意义。

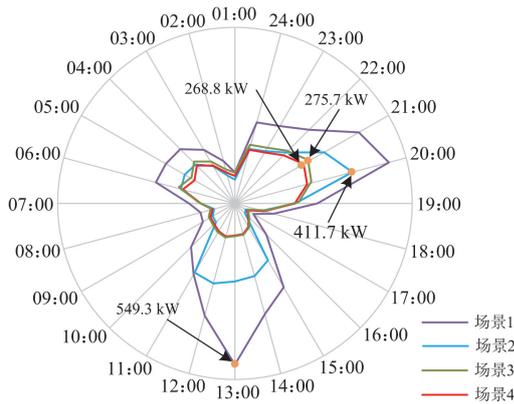


图 12 各场景网损分布情况

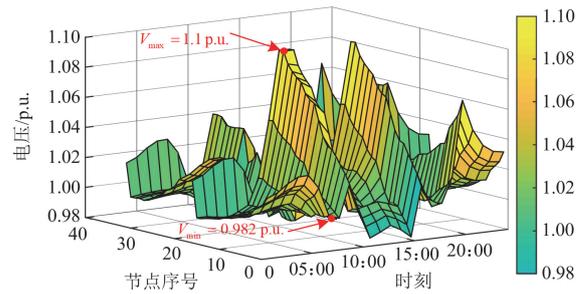
Fig. 12 Distribution of network losses among nodes in various scenarios

表 2 为各场景下的电压分布情况, 图 13 为各场景节点电压分布图。场景 1 中, 配电网电压最大值为 1.1 p.u., 最小值为 0.982 p.u., 整体电压偏差为 26.283 p.u., 不满足国标要求(10 kV 及以下供电电压

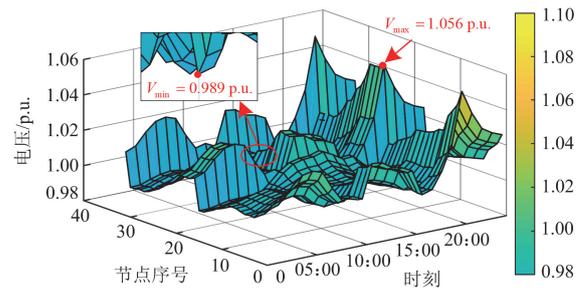
表 2 各场景下的节点电压分布

Table 2 Node voltage distribution of various scenarios

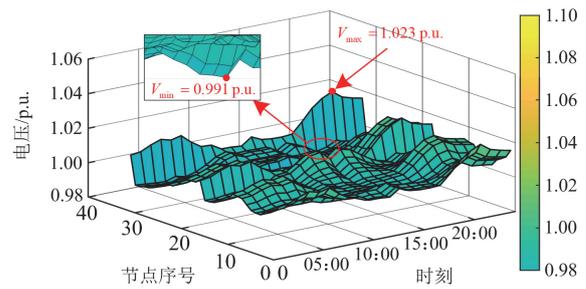
场景	最大电压 $V_{max}$	最小电压 $V_{min}$	整体电压偏差
1	1.1	0.982	26.382
2	1.056	0.989	13.887
3	1.023	0.991	7.658
4	1.014	0.988	6.227



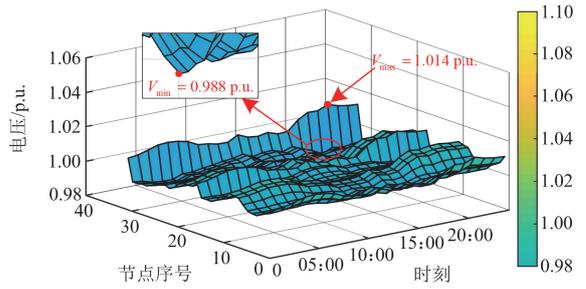
(a) 场景1节点电压分布情况



(b) 场景2节点电压分布情况



(c) 场景3节点电压分布情况



(d) 场景4节点电压分布情况

图 13 各场景节点电压分布情况

Fig. 13 Node voltage distribution of various scenarios

允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ )<sup>[29]</sup>。场景 2 中, 对 DPV 无功功率进行协调控制, 配电网电压最大值降低为 1.056 p.u., 最小值提升至 0.989 p.u., 整体电压偏差较场景 1 降低 47.36%。虽满足国标要求, 但在 DPV 不能完全响应配电网调度时仍存在电压越限风险。

虽然场景 3 中各个区域都有足够的可调资源，电压偏差得到了明显的改善，但其参与的均为配电网局部优化，未发挥无功补偿装置容量大、全局可调等优势；同时，分区优化通信要求较高，若关键资源无法响应，节点电压仍然存在越限风险。相比之下，本文方法充分考虑无功补偿装置和分布式资源在响应时间、位置数量上的特点，配电网整体电压偏差为 6.227 p.u.，相较于场景 1—场景 3 分别降低 76.40%、55.16%和 18.69%，满足国标规定。

#### 4.2.4 求解速度对比分析

为证明本文所提分层分区协调优化模型的有效性，设置集中式方法求解下层分区优化模型为对照组。2 种方法的优化结果如表 3 所示。根据表 3 结果可知，2 种方法的优化结果接近，均实现了 DPV 和 5G 基站 BES 的充分利用。其中，分布式和集中式求解得到的配电网网损成本分别为 2107.3 元和 2108.1 元，其误差为 0.038%。同时，分布式方法节省 69.23%的求解时间，解决了含 DPV 和 5G 基站 BES 等分布式资源的多决策量模型求解速度慢的难题。

表 3 分布式与集中式优化结果对比

Table 3 Optimal results comparison of distributed and centralized methods

对比指标	优化结果	
	本文分层分区方法	集中式方法
网损成本/元	2107.3	2108.1
综合成本/元	3567.3	3565.8
平均电压偏差/p.u.	$0.786 \times 10^{-3}$	$0.791 \times 10^{-3}$
求解时间/s	4872	15 836

## 5 结论

针对 5G 基站等分布式资源大规模参与的配电网集中式调度模型求解难以及响应效果差等问题，本文提出了一种考虑 5G 基站调控潜力和多资源协同的配电网分层分区有功无功协调优化方法，通过算例分析得到以下结论。

1) 在分层分区运行框架方面，本文所提方法节省了 69.23%的求解时间，提高了多决策量模型的求解效率。同时，所提基于综合评价指标的物理分区方法能够避免单一指标分区方法导致的区域内无可调控资源的问题，提高了配电网各分区自治能力。

2) 在经济运行效益方面，本文综合考虑 5G 基站通信负荷不确定性影响，充分利用 5G 基站 BES 闲置 SOC 参与调控，能够有效降低系统网损，进而提升配电网经济性。算例分析表明，本文所提模型网损成本、综合运行成本分别降低了 56.81%和 40.74%。

3) 在电压偏差治理方面，本文方法通过对 DPV

和 5G 基站进行分区分布式功率调节，配电网电压最大值降低为 1.014 p.u.，最小值为 0.988 p.u.，整体电压偏差降低了 76.40%，完全消除了配电网电压越限的情况。

需要指出的是，本文仅以 5G 基站和 DPV 进行分析和说明，对于其他不确定性强、调控数量众多的分布式资源，本文所提方法仍然适用。此外，本文还未考虑“电网-车网-通信网”之间的协调配合问题，未来将针对上述方面进一步开展深入研究。

## 参考文献

[1] 涂春鸣, 王鑫, 杨万里, 等. 考虑台区变压器经济运行区间的智能软开关控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 848-858.  
TU Chunming, WANG Xin, YANG Wanli, et al. Soft open point control strategy considering economic operation area of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 848-858.

[2] 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.

[3] 魏承志, 李俊豪, 涂春鸣, 等. 计及变压器与 SOP 损耗特性的柔性互联配电网优化调控策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 69-78.  
WEI Chengzhi, LI Junhao, TU Chunming, et al. Optimal regulation and control strategy for flexible interconnected distribution network considering loss characteristics of transformers and soft open points[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 69-78.

[4] 黄进, 王虎, 黄辰昊, 等. 考虑通道因素的含分布式电源配电网双层协调规划[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 138-143.  
HUANG Jin, WANG Hu, HUANG Chenhao, et al. Bi-level coordinated planning of distribution network with distributed generation considering channel factor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 138-143.

[5] 王鹤, 刘子悦, 边竞, 等. 面向高比例分布式能源接入的输配网两阶段风险调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 119-129.  
WANG He, LIU Ziyue, BIAN Jing, et al. Research on two-stage risk scheduling for transmission and distribution power grids with high proportion of distributed energy

- access[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(1): 119-129.
- [6] 张禄澳, 范一芳, 王宇轩, 等. 光储式 5G 通信基站集群灵活性聚合与协同调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(2): 101-110.  
ZHANG Luao, FAN Yifang, WANG Yuxuan, et al. Flexible aggregation and coordinated scheduling strategy for renewable powered 5G communication base station clusters[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(2): 101-110.
- [7] 李天麟, 郭祺, 王鑫, 等. 基于四桥臂智能软开关的柔性互联配电网台区三相不平衡与轻重载综合调控策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(10): 4358-4367.  
LI Tianlin, GUO Qi, WANG Xin, et al. A comprehensive control strategy for three phase unbalance and light and heavy load in flexible interconnected distribution stations based on F-SOP[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(10): 4358-4367.
- [8] 康童, 朱吉然, 宁昕, 等. 考虑路网-电网耦合的移动式储能软开关与多资源协同供电恢复策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(10): 4012-4025.  
KANG Tong, ZHU Jiran, NING Xin, et al. ESV-SOP and multi-resource collaborative power supply recovery strategy considering road network grid coupling[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(10): 4012-4025.
- [9] 刘雨佳, 樊艳芳. 计及 5G 基站储能和技术节能措施的虚拟电厂调度优化策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(1): 8-15.  
LIU Yujia, FAN Yanfang. Optimal scheduling strategy for virtual power plant considering 5G base station technology, energy-storage, and energy-saving measures[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(1): 8-15.
- [10] 李金雨, 宋福龙, 马俊杰, 等. 基于 5G 基站可调度潜力与配电网集群划分的储能选址定容方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(18): 151-160.  
LI Jinyu, SONG Fulong, MA Junjie, et al. Siting and sizing method for energy storage based on dispatchable potential of 5G base station and cluster partition of distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(18): 151-160.
- [11] 曾博, 穆宏伟, 董厚琦, 等. 考虑 5G 基站低碳赋能的主动配电网优化运行[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(3): 279-292.  
ZENG Bo, MU Hongwei, DONG Houqi, et al. Optimization of active distribution network operation considering decarbonization endowment from 5G base station[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(3): 279-292.
- [12] 乔锐勋, 王军华, 韦道明, 等. 计及后备储能及空调调  
度潜力的 5G 基站多时间尺度优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(4): 111-120.  
QIAO Ruixun, WANG Junhua, WEI Daoming, et al. Multi-time-scale optimization method for 5G base station considering backup energy storage and air-conditioning scheduling potential[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(4): 111-120.
- [13] YONG P, ZHANG N, HOU Q, et al. Evaluating the dispatchable capacity of base station backup batteries in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 3966-3979.
- [14] 张达, 孙伟卿, 杨文威. 考虑有功无功协调优化的配电网储能与无功补偿配置[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2024, 36(9): 44-50  
ZHANG Da, SUN Weiqing, YANG Wenwei. Energy storage and reactive power compensation configuration of distribution network considering active and reactive power coordinated optimization[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2024, 36(9): 44-50.
- [15] 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.
- [16] 李士丹, 李航, 李国杰, 等. 考虑分区与模仿学习的深度强化学习配电网电压优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(22): 1-11.  
LI Shidan, LI Hang, LI Guojie, et al. Voltage optimization strategy for a distribution network based on deep reinforcement learning considering regionalization and imitation learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(22): 1-11.
- [17] 王斌, 张裕, 罗晨. 高比例光伏接入的配电网分布式运行优化技术[J]. *南方电网技术*, 2024, 18(6): 121-130.  
WANG Bin, ZHANG Yu, LUO Chen. Distributed operation optimization technology for distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(6): 121-130.
- [18] 徐韵, 颜湘武. 含可再生分布式电源参与调控的配电网动态分区实时无功优化方法[J]. *现代电力*, 2020, 37(1): 42-51.  
XU Yun, YAN Xiangwu. Dynamic partitioning real-time reactive power optimization method for distribution network with renewable distributed generators participating in regulation[J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(1): 42-51.
- [19] CHOI Y, SONG D, YOON S, et al. Comparison of factorial and Latin hypercube sampling designs for building heating and cooling load meta-models[J]. *Energies*, 2021, 14(2).

- [20] 胡俊杰, 童宇轩, 刘雪涛, 等. 计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1419-1435.  
HU Junjie, TONG Yuxuan, LIU Xuetao, et al. Multi-time-scale robust optimization strategy for integrated energy system considering the refinement of hydrogen energy use[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1419-1435.
- [21] 曾璧环, 池曦翎, 张佳毅, 等. 海岛输电塔线体系风振响应及易损性分析[J]. 山东电力技术, 2024, 51(1): 24-34.  
ZENG Bihuan, CHI Xiqiang, ZHANG Jiayi, et al. Wind induced vibration response and vulnerability analysis of island transmission tower line system[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(1): 24-34.
- [22] 麻秀范, 孟祥玉, 朱秋萍, 等. 计及通信负载的 5G 基站储能调控策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2878-2887.  
MA Xiufan, MENG Xiangyu, ZHU Qiuping, et al. Control strategy of 5G base station energy storage considering communication load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2878-2887.
- [23] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 85-93.  
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-93.
- [24] 杨淳智, 谭仁煜, 何东. 含 5G 基站的配电台区柔性互联协调规划策略[J]. 电力科学与工程, 2024, 40(12): 33-41.  
YUAN Chunzhi, TAN Renyu, HE Dong, et al. Flexible interconnection coordinated planning strategy for distribution station area containing 5G base stations[J]. Electric Power Science and Engineering, 2024, 40(12): 33-41.
- [25] 徐玉韬, 蔡永翔, 王扬, 等. 考虑跨电压等级电压-功率灵敏度的交直流配电网动态分区方法[J]. 供用电, 2024, 41(7): 29-38.  
XU Yutao, CAI Yongxiang, WANG Yang, et al. A dynamic partitioning method for AC-DC distribution networks considering voltage-power sensitivity across voltage levels[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 29-38.
- [26] 廖小兵, 张敏, 乐健, 等. 考虑循环寿命折损的主动配电网仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 37-49.  
LIAO Xiaobing, ZHANG Min, LE Jian, et al. Affinely adjustable robust optimal operation strategy for an active distribution network considering cycle life loss[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 37-49.
- [27] 刘宇, 朱琼海, 苗璐, 等. 基于同步型 ADMM 的含海上风电场电力系统分布鲁棒无功优化[J]. 广东电力, 2024, 37(6): 21-31.  
LIU Yu, ZHU Qionghai, MIAO Lu, et al. Distributed robust reactive power optimization of power systems with offshore wind farms based on synchronous ADMM[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(6): 21-31.
- [28] GUO L, DING Y, BAO M, et al. A bi-level model for the bidding strategy of an inter-regional electricity trading aggregator considering reliability requirements and transmission losses[J]. IEEE Access, 2021, 9: 13476-13487.
- [29] 成龙, 李国庆, 王翀, 等. 考虑预测误差不确定性和功率互济的配电网直流合环重构[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 97-108.  
CHENG Long, LI Guoqing, WANG Chong, et al. DC loop-closed reconfiguration for distribution networks considering prediction error uncertainty and power complementarity[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 97-108.

收稿日期: 2025-04-08; 修回日期: 2025-07-01

作者简介:

兰征(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为微电网控制、多端口变换器、分布式电源并网技术; E-mail: lanzheng20@foxmail.com

谭仁煜(2001—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化调控技术。E-mail: tanrenyu@stu.hut.edu.cn  
(编辑 许威)