

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241531

# 计及三相不平衡的电动汽车充电站参与调压辅助服务模型

朱 晗<sup>1</sup>, 汪隆君<sup>1</sup>, 陈志峰<sup>2</sup>, 王 钢<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广州城市理工学院, 广东 广州 510800)

**摘要:** 电动汽车充电站无功支撑能力的挖掘利用可优化配电网运行, 解决配电网负荷、线路参数、新能源出力三相不平衡带来的电压越限问题, 同时为电网节约调压成本。因此, 提出了一种计及三相不平衡的电动汽车充电站参与调压辅助服务模型。首先, 在研究调压辅助服务市场化机制和电动汽车充电行为的基础上, 分别预测慢充充电站和快充充电站的日负荷曲线, 进而评估两种充电站的无功支撑能力。其次, 建立了配电网多时间尺度日前-日内优化调度框架, 日前优化模型以配电网调压成本最低为目标, 以确定日内有载调压档位和电容器组计划。日内以网损和充电站补偿费用最小为目标进行滚动优化, 以修正充电站参与调压辅助服务的无功功率。最后, 通过IEEE33节点系统进行仿真验证。结果表明, 所提模型能够有效降低配电网三相电压不平衡与调压成本。

**关键词:** 充电站; 调压辅助服务; 三相不平衡; 拉丁超立方抽样; 滚动优化; 日前-日内优化

## Voltage regulation ancillary service model for electric vehicle charging station considering three-phase unbalance

ZHU Han<sup>1</sup>, WANG Longjun<sup>1</sup>, CHEN Zhifeng<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. School of Electric Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** Exploring and utilizing the reactive power support capabilities of electric vehicle charging stations can optimize distribution network operation and help mitigate voltage limit violations caused by three-phase unbalances in load, line parameters, and new energy output. Additionally, it can reduce voltage regulation costs for the grid. Hence, this paper proposes a voltage regulation ancillary service model for electric vehicle charging stations while considering three-phase unbalance. First, based on an analysis of the market mechanism for voltage regulation ancillary services and the charging behavior of electric vehicles, the daily load curves of slow and fast charging stations are predicted separately, and their respective reactive power support capabilities are evaluated. Second, a multi-time-scale day-ahead and intra-day optimization framework for distribution networks is established. The day-ahead optimization model aims to minimize the voltage regulation costs of the distribution network, determining the on-load tap changer positions and the scheduling of capacitor banks. The intra-day rolling optimization focuses on minimizing network losses and compensation costs of charging stations by adjusting their reactive power participation in voltage regulation ancillary services. Finally, simulations on the IEEE33-bus system are conducted and the results show that the proposed model can effectively reduce both three-phase voltage unbalance and voltage regulation costs in the distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51307063).

**Key words:** charging station; voltage regulation ancillary service; three-phase unbalance; Latin hypercube sampling; rolling optimization; day-ahead and intra-day optimization

## 0 引言

随着双碳目标的提出, 我国大力发展以风电、

光伏发电为主的新能源<sup>[1-3]</sup>。2023年风电和光伏发电新增装机量在总新增装机量中占比为82%, 并且截至2023年底累计装机量占比已从截至2020年底的24%增加到36%<sup>[4]</sup>。然而, 新能源自身的间歇性和波动性增加了系统调节需求<sup>[5-6]</sup>, 给电网的安全稳定运行带来了风险。另一方面, 配电网三相负荷及线

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51307063); 广东省基础与应用基础研究基金项目资助(2023A1515011035)

路不平衡程度较严重<sup>[7]</sup>, 这将导致系统网损增加, 三相设备过热和损坏, 从而引发跳闸甚至安全事故<sup>[8]</sup>。因此, 如何增强电力系统的调节能力成为亟待解决的问题。

近年来电动汽车销量持续高速增长, 带动充电桩建设稳步推进, 预计到 2035 年欧洲和中国将需要超过 1.5 亿个充电桩和 5.4 万个充电站<sup>[9]</sup>, 可见充电站成为一种灵活的需求侧可控资源<sup>[10]</sup>。充分利用同时具备电源和负荷双向调节能力的充电站, 使其参与辅助服务支撑电网, 不仅可以解决因新能源出力波动性导致的电压越限问题, 还能减小配电网负荷及线路三相不平衡带来的影响<sup>[11]</sup>。此外, 对于充电站, 参与辅助服务还能为其带来额外的收益, 实现电网与充电站的双赢。

现有充电站参与调压辅助服务的文献多以充电站作为载体, 探讨电动汽车(electric vehicle, EV)与电网之间的功率交互, 并从提高电网收益的角度, 围绕网损、电压偏差和运行成本最小化等目标进行优化<sup>[12]</sup>。文献[13]将充电桩的功率因数角作为优化变量, 采用粒子群算法求解考虑 EV 充放电的无功优化模型, 实现配电网与 EV 用户之间的有功和无功功率双向调控; 文献[14]以配电网运营成本最低为目标, 建立了配电网和充电站分层协调的有功和无功优化模型。

上述文献主要通过控制 EV 的有序充放电参与调压, 尽管考虑了 EV 的荷电状态(state of charge, SOC)边界和充电站的容量约束, 但忽略了单个充电桩的有功和无功功率约束, 导致充电站的无功补偿范围变大, 同时 EV 放电会造成电量损失, 影响用户的出行需求。如今充电桩行业快速发展, 快充桩给 EV 充电时, 随着 SOC 的增大, 充电功率逐渐下降, 快充桩因此具备一定的无功容量; 慢充桩充电功率通常保持在额定功率, 但在非充电高峰期, 仍可通过利用空闲的充电桩支撑电网。现有文献中, 仅利用充电桩自身容量参与调压辅助服务, 且不涉及 EV 放电的研究较少, 文献[15]提出一种居民慢充桩参与无功响应的分布式模型预测控制策略, 在光伏跌落时, 通过端对端通信和边缘计算实现充电桩协同控制, 以支撑电网电压并减小偏差; 文献[16]建立了电网-运行商分层调度模型, 以降低电压偏差为目标, 利用慢充桩的剩余容量对电网进行电压-无功补偿; 文献[17]提出了一种考虑日前优化调度和日内优化修正的无功电压优化模型, 日前利用电容和有载调压器来降低网损, 日内利用慢充桩的无功支撑能力实现无功就地补偿和连续调节。

上述文献主要将慢充桩看作无功电源, 利用其

为配电网节点提供无功支撑, 但均未涉及如今广泛应用的快充桩, 而且, 文献[15]并未对充电站的无功支撑能力进行评估量化, 而文献[16]和文献[17]虽然计算出充电站的全天可调度无功容量, 但在优化模型中未对充电站进行经济补偿。此外, 这些文献未考虑配网中三相负荷及线路阻抗不平衡程度较严重的情况, 导致其模型在实际工程应用中可能存在一定的局限性。

针对以上不足, 本文综合考虑电网、充电站和 EV 用户的利益, 提出一种考虑电网线路和负荷三相不平衡情况下, 利用快充站和慢充站共同参与调压辅助服务的优化模型。首先, 建立充电站参与调压辅助服务的市场机制。然后, 建立 EV 充电行为的概率模型, 利用蒙特卡洛法模拟出充电站一天中 EV 充电功率的分布情况, 进而评估出充电站的无功支撑能力。在此基础上, 建立多时间尺度配电网日前-日内优化调度框架, 日前优化模型以配电网调压成本最低为目标, 确定日内离散调节设备的动作计划, 日内以网损和充电站补偿费用最小为目标进行滚动优化, 修正充电站各相所调度无功功率以降低电网电压的三相不平衡度。最后, 算例仿真部分验证了本文模型和方法的有效性。

## 1 充电站参与调压辅助服务的市场机制

电动汽车充电站(electric vehicle charging station, EVS)参与电网调压辅助服务的系统框架如图 1 所示。本文的辅助服务由配电网、电网调度中心、EVS 及其聚合商和电力交易中心参与。其中, 配电网作为辅助服务的用户, 向调度中心提供日前和日内的负荷需求和购电分时电价; 电网调度中心完成对无功调度优化模型的求解, 从而主导 EVS 需调度的无功大小; 聚合商则协助电网调度中心, 评估 EVS 可申报无功容量, 并控制充电桩逆变器的输出功率; 电力交易中心根据 EVS 调度的无功功率向电网收取相应费用并补偿给 EVS。

EVS 参与辅助服务应以自愿为基本原则, 签订辅助服务协议后, 即需要向聚合商上报站内各充电桩 EV 的充电状态和功率信息, 接受电网调度中心的调控指令。

当配电网电压发生严重越限情况时, 调度中心首先采取调整自有变电站的有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)的分接头、投切补偿电容器组(capacitor bank, CB)等调压措施, 如果这些措施仍不能保证电压在允许范围内, 则调用 EVS 充电桩参与调压辅助服务。

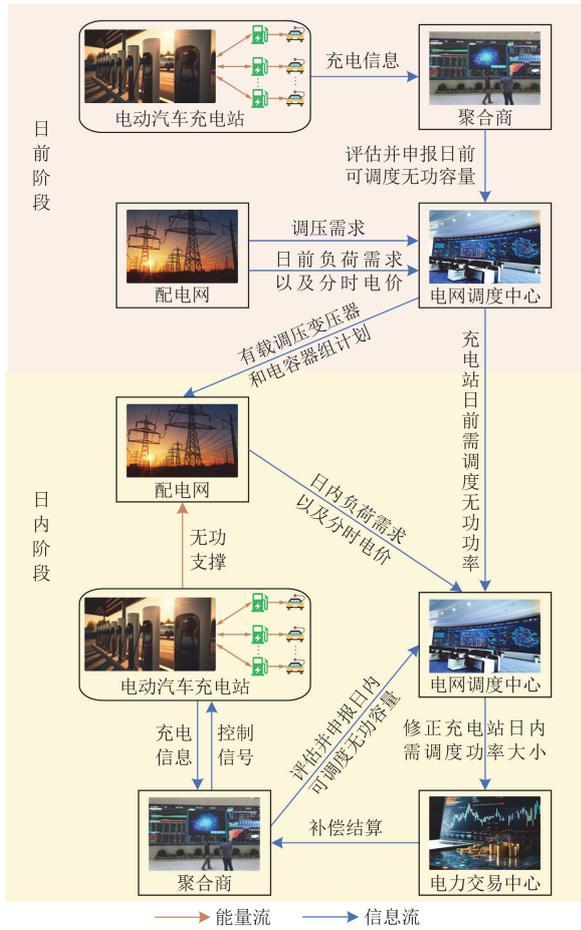


图1 充电站调压辅助服务系统框架

Fig. 1 System framework of charging station in voltage regulation ancillary service

## 2 充电站无功支撑能力评估

### 2.1 充电桩功率建模

本文中设有慢充 EVS 和快充 EVS，分别配置交流慢充充电桩和直流快充充电桩。两种充电桩的充电功率  $P_{cs}$ 、 $P_{cf}$  随 EV 荷电状态  $S_{oc}$  变化的规律分别由式(1)和式(2)表示。

$$P_{cs} = P_{rs}, 0 \leq S_{oc} \leq 1 \quad (1)$$

$$P_{cf} = \begin{cases} P_{rf}, 0 \leq S_{oc} \leq S_{oc,f} \\ P_{rf} \exp[-\chi_f (S_{oc} - S_{oc,f})], S_{oc,f} < S_{oc} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{rs}$ 、 $P_{rf}$  分别为慢充、快充充电桩的额定充电功率； $S_{oc,f}$  为快充充电桩充电功率开始下跌时对应的 SOC 数值； $\chi_f$  为快充充电功率跌落系数<sup>[18]</sup>。

### 2.2 EV 用户充电行为

EV 充电功率通过整体 EV 用户充电行为的概率分布进行建模，包括日行驶里程、起始充电时刻和充电时间等，具体建模如文献[19]第 3.3 节所示。

### 2.3 充电站无功支撑能力评估

1) 当电网三相负荷和线路阻抗不平衡时，假设两种充电桩的充电功率分布在三相，三相功率占 EV 总充电功率的比例分别为  $\omega_a$ 、 $\omega_b$ 、 $\omega_c$ ，定义快充、慢充两种充电桩三相可调度无功容量  $Q_{f,\varphi}$ 、 $Q_{s,\varphi}$  分别为

$$Q_{f,\varphi} = \sum_{i=1}^{N_f} \omega_\varphi \sqrt{S_f^2 - P_{i,c}^2}, \varphi = a, b, c \quad (3)$$

$$Q_{s,\varphi} = \sum_{i=1}^{N_s} \omega_\varphi \sqrt{S_s^2 - P_{i,c}^2}, \varphi = a, b, c \quad (4)$$

式中： $N_f$  为快充 EVS 配置快充充电桩的数量； $N_s$  为慢充 EVS 配置慢充充电桩的数量； $S_f$  和  $S_s$  分别为快充和慢充充电桩的容量； $P_{i,c}$  为每台充电桩提供给 EV 的充电功率。

2) 电网三相负荷和线路阻抗平衡时， $\omega_a$ 、 $\omega_b$ 、 $\omega_c$  均取 1/3。

## 3 多时间尺度配电网日前-日内调度框架

EVS 参与调压辅助服务的配电网日前-日内调度框架如图 2 所示。该框架由 2 个主要部分组成：日前调度和日内调度。日前调度具有计划性和预见性，明确了优化的总体方向<sup>[20]</sup>；日内滚动优化主要是削弱日前阶段难以预料的扰动对无功优化的不利影响<sup>[21]</sup>，对日前 EVS 调度的无功功率进行校验与修正，具体执行步骤如下。

步骤 1：在日前优化阶段，EVS 可从 EV 的历史充电数据库中提取相关信息，包括 EV 类型、电池容量等固有属性信息，当 EV 接入充电桩进行充电时，EVS 可采集其起始充电时刻和初始荷电状态等充电数据，并计算出日行驶里程。

步骤 2：EVS 将收集到的 EV 相关信息上报给聚合商。

步骤 3：聚合商根据 EV 相关参数和数量评估量化 EVS 日前有功功率和剩余无功容量，并以小时为单位上传至电网调度中心。

步骤 4：电网调度中心结合配电网节点负荷需求曲线、OLTC 参数和 CB 参数，在日前建立以配电网调压成本最低为目标的优化模型，考虑全天 24 h 长过程，分辨率为 1 h，在每天 00:00 启动运行，为使调压费用最小，得到每小时内 OLTC 挡位、CB 投切组数和 EVS 所需调度的无功功率。

步骤 5：将日前阶段 OLTC 和 CB 优化结果作为日内优化的参考运行点，以降低日内滚动优化中配电网的调压成本。

步骤 6：日内优化阶段采用模型预测控制滚动

优化, 周期设置为 15 min, 预测周期数设为 16, 控制周期数设为 1。从 00:00—04:00 开始, 考虑 4 h 长过程, 每 15 min 取 1 个点, 共 16 个点, 由调度中心求解日内优化模型, 优化结束后更新 00:00—00:15 期间 EVS 调度的无功功率。以此类推, 不断修正日内 96 个时间段充电站需调度的无功功率。滚动优化时间段内 OLTC 和 CB 按日前优化结果动作。

步骤 7: 电力交易中心根据日内修正后 EVS 调度的无功功率计算补偿费用并交付给聚合商。

步骤 8: 聚合商根据无功出力线性分配原则将费用合理分配给各 EVS, 即支撑电网的无功功率越大, 所获得的补偿费用越高。

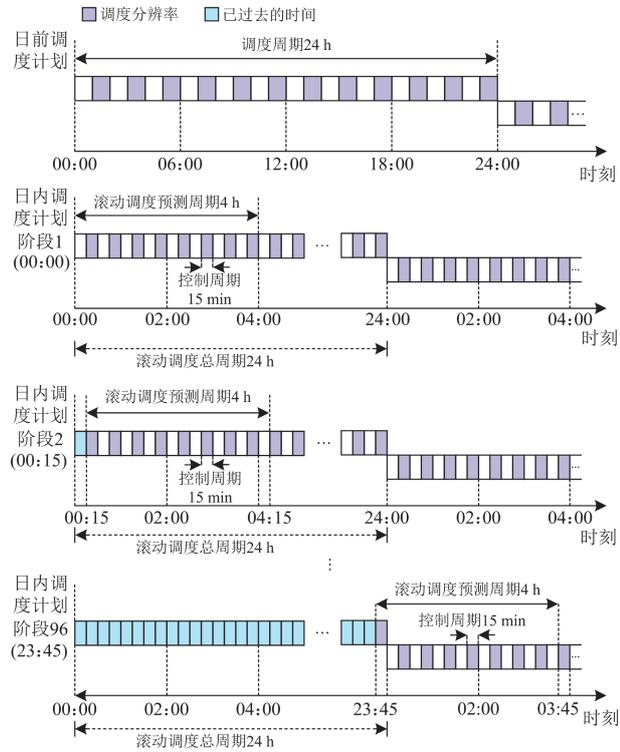


图 2 配电网日前-日内调度框架

Fig. 2 Day-ahead and intra-day scheduling framework of distribution network

## 4 日前优化模型

### 4.1 EVS 充电桩功率约束

1) 三相负荷和线路阻抗不平衡时功率约束为

$$0 \leq P_{cf,\varphi} \leq \omega_{\varphi} P_{rf} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{cs,\varphi} \leq \omega_{\varphi} P_{rs} \quad (6)$$

$$P_{cf,\varphi}^2 + Q_{cf,\varphi}^2 \leq \omega_{\varphi}^2 S_f^2 \quad (7)$$

$$P_{cs,\varphi}^2 + Q_{cs,\varphi}^2 \leq \omega_{\varphi}^2 S_s^2 \quad (8)$$

$$\sum_{\varphi} \omega_{\varphi} = 1, 0 \leq \omega_{\varphi} \leq 1 \quad (9)$$

式中:  $P_{cf,\varphi}$  和  $P_{cs,\varphi}$  分别为快充、慢充充电桩  $\varphi$  相充电功率;  $Q_{cf,\varphi}$  和  $Q_{cs,\varphi}$  分别为快充、慢充充电桩  $\varphi$  相输送给电网的无功功率。

2) 三相负荷和线路阻抗平衡时,  $\omega_a$ 、 $\omega_b$ 、 $\omega_c$  均取 1/3。

### 4.2 配电网潮流约束

本文采用基于 DistFlow 模型<sup>[22]</sup>的配电网三相潮流方程, 并对方程作二阶锥松弛形成潮流约束<sup>[23-24]</sup>, 如式(10)一式(16)所示, 该方法能在配电网电压越限时进行最优潮流计算, 协助电网调度中心调用各类调压设备, 改善电压质量, 同时兼顾配电网运行的经济性。

$$\sum_{i \in m(j)} (P_{ij,t}^{\varphi} - L_{ij,t}^{\varphi} R_{ij}^{\varphi}) + P_{j,t}^{\varphi} = \sum_{k \in n(j)} P_{jk,t}^{\varphi} \quad (10)$$

$$\sum_{i \in m(j)} (Q_{ij,t}^{\varphi} - L_{ij,t}^{\varphi} X_{ij}^{\varphi}) + Q_{j,t}^{\varphi} = \sum_{k \in n(j)} Q_{jk,t}^{\varphi} \quad (11)$$

$$U_{i,t}^{\varphi} = (V_{i,t}^{\varphi})^2, L_{ij,t}^{\varphi} = \frac{(P_{ij,t}^{\varphi})^2 + (Q_{ij,t}^{\varphi})^2}{U_{i,t}^{\varphi}} \quad (12)$$

$$U_{j,t}^{\varphi} = U_{i,t}^{\varphi} - 2(R_{ij}^{\varphi} P_{ij,t}^{\varphi} + X_{ij}^{\varphi} Q_{ij,t}^{\varphi}) + [(R_{ij}^{\varphi})^2 + (X_{ij}^{\varphi})^2] L_{ij,t}^{\varphi} \quad (13)$$

$$P_{j,t}^{\varphi} = P_{j,t}^{\varphi,PV} - P_{j,t}^{\varphi,EVS} - P_{j,t}^{\varphi,Load} \quad (14)$$

$$Q_{j,t}^{\varphi} = Q_{j,t}^{\varphi,PV} + Q_{j,t}^{\varphi,CB} + Q_{j,t}^{\varphi,EVS} - Q_{j,t}^{\varphi,Load} \quad (15)$$

$$\|2P_{ij,t}^{\varphi}, 2Q_{ij,t}^{\varphi}, L_{ij,t}^{\varphi} - U_{i,t}^{\varphi}\|_2 \leq L_{ij,t}^{\varphi} + U_{i,t}^{\varphi} \quad (16)$$

式中:  $m(j)$  为以  $j$  为末端节点的支路的首端节点集合;  $n(j)$  为以  $j$  为首端节点的支路的末端节点集合;  $P_{ij,t}^{\varphi}$  和  $Q_{ij,t}^{\varphi}$  分别为  $t$  时段流经支路  $ij$  的  $\varphi$  相有功和无功功率;  $L_{ij,t}^{\varphi}$  为  $t$  时段流经支路  $ij$  的  $\varphi$  相电流幅值的平方;  $R_{ij}^{\varphi}$  和  $X_{ij}^{\varphi}$  分别为支路  $ij$  的  $\varphi$  相电阻和电抗;  $P_{j,t}^{\varphi}$  和  $Q_{j,t}^{\varphi}$  分别为  $t$  时段注入节点  $j$  的  $\varphi$  相有功和无功功率;  $U_{i,t}^{\varphi}$  为  $t$  时段节点  $i$  的  $\varphi$  相电压幅值  $V_{i,t}^{\varphi}$  的平方;  $P_{j,t}^{\varphi,PV}$  和  $Q_{j,t}^{\varphi,PV}$  分别为  $t$  时段节点  $j$  的  $\varphi$  相光伏注入的有功和无功功率;  $P_{j,t}^{\varphi,EVS}$  为  $t$  时段节点  $j$  的  $\varphi$  相 EV 充电功率总和;  $Q_{j,t}^{\varphi,EVS}$  为  $t$  时段节点  $j$  的  $\varphi$  相 EVS 支撑的无功功率;  $Q_{j,t}^{\varphi,CB}$  为  $t$  时段节点  $j$  的  $\varphi$  相电容器组注入的无功功率;  $P_{j,t}^{\varphi,Load}$  和  $Q_{j,t}^{\varphi,Load}$  分别为  $t$  时段节点  $j$  的  $\varphi$  相有功和无功负荷。

### 4.3 配电网运行安全约束

$$U_j^{\varphi,\min} \leq U_{j,t}^{\varphi} \leq U_j^{\varphi,\max} \quad (17)$$

$$L_{ij,t}^{\varphi} \leq L_{ij}^{\varphi,\max} \quad (18)$$

式中:  $U_j^{\varphi,\max}$ 、 $U_j^{\varphi,\min}$  分别为节点  $j$  的  $\varphi$  相电压幅值

最大、最小值的平方;  $L_{ij}^{\phi, \max}$  为流经支路  $ij$  的  $\phi$  相电流幅值最大值的平方。

对于三相不平衡系统, 还需添加三相电压不平衡约束。

$$U_{j,t}^{\text{ave}} = \frac{U_{j,t}^a + U_{j,t}^b + U_{j,t}^c}{3} \quad (19)$$

$$\left| \frac{U_{j,t}^\phi - U_{j,t}^{\text{ave}}}{U_{j,t}^{\text{ave}}} \right| \leq 5\% \quad (20)$$

式中:  $U_{j,t}^{\text{ave}}$  为  $t$  时段节点  $j$  各相电压幅值平方的均值;  $U_{j,t}^a$ 、 $U_{j,t}^b$ 、 $U_{j,t}^c$  分别为  $t$  时段节点  $j$  的 a 相、b 相、c 相电压幅值的平方。

#### 4.4 OLTC 约束

OLTC 通常被安装在配电网的首端, 以调节整个配电网的电压水平, 本文依据文献[14]提出的方法对 OLTC 作了简化处理, 将变压器模型等效为一个节点处理, 该节点的电压为可调变量, 并且三相电压平衡, 其约束条件如式(21)—式(27)所示。

$$\beta_j^{\min} \leq \beta_{j,t} \leq \beta_j^{\max}, \forall j, \forall t \in S^{\text{OLTC}} \quad (21)$$

$$\beta_{j,t} = \beta_j^{\min} + \sum_k \beta_{j,\Delta k} \gamma_{j,t,k}, \gamma_{j,t,k} \in \{0,1\} \quad (22)$$

$$\sum_k \gamma_{j,t,k} - \sum_k \gamma_{j,t-1,k} \geq \gamma_{j,t}^{\text{IN}} - \gamma_{j,t}^{\text{DE}} p \quad (23)$$

$$\sum_k \gamma_{j,t,k} - \sum_k \gamma_{j,t-1,k} \leq \gamma_{j,t}^{\text{IN}} p - \gamma_{j,t}^{\text{DE}} \quad (24)$$

$$\gamma_{j,t,1} \geq \gamma_{j,t,2} \geq \dots \geq \gamma_{j,t,p} \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^T (\gamma_{j,t}^{\text{IN}} + \gamma_{j,t}^{\text{DE}}) \leq N_j^{\text{OLTC,max}} \quad (26)$$

$$\gamma_{j,t}^{\text{IN}} + \gamma_{j,t}^{\text{DE}} \leq 1, \gamma_{j,t}^{\text{IN}} \in \{0,1\}, \gamma_{j,t}^{\text{DE}} \in \{0,1\} \quad (27)$$

式中:  $\beta_{j,t}$  为  $t$  时段 OLTC 变比的平方, 定义为节点  $j$  电压幅值的平方;  $\beta_j^{\max}$ 、 $\beta_j^{\min}$  分别为 OLTC 变比平方的上下限;  $S^{\text{OLTC}}$  为所有 OLTC 支路的等效节点集合;  $\beta_{j,\Delta k}$  为 OLTC 挡位调节增量, 定义为挡位  $k$  与挡位  $k-1$  变比的平方差;  $\gamma_{j,t,k}$  为  $t$  时段 OLTC 挡位  $k$  的 0-1 标识;  $p$  为 OLTC 最大档位;  $\gamma_{j,t}^{\text{IN}}$  和  $\gamma_{j,t}^{\text{DE}}$  分别为 OLTC 挡位升高和降低的 0-1 标识;  $N_j^{\text{OLTC,max}}$  为  $T$  时段 OLTC 挡位最多允许切换次数;  $T$  为日前优化期间的时段数。

#### 4.5 电容器组投切装置约束

本文假设电容器组每组的补偿功率一定, 且三相补偿的功率相等, 约束条件如式(28)—式(34)所示。

$$0 \leq u_{j,t} \leq u_{j,\max}, \forall j, \forall t \in S^{\text{CB}} \quad (28)$$

$$Q_{j,t}^{\text{CB}} = q_j u_{j,t} \quad (29)$$

$$\sum_v \delta_{j,t,v} - \sum_v \delta_{j,t-1,v} \geq \delta_{j,t}^{\text{IN}} - \delta_{j,t}^{\text{DE}} r \quad (30)$$

$$\sum_v \delta_{j,t,v} - \sum_v \delta_{j,t-1,v} \leq \delta_{j,t}^{\text{IN}} r - \delta_{j,t}^{\text{DE}} \quad (31)$$

$$\delta_{j,t,1} \geq \delta_{j,t,2} \geq \dots \geq \delta_{j,t,r} \quad (32)$$

$$\sum_{t=1}^T (\delta_{j,t}^{\text{IN}} + \delta_{j,t}^{\text{DE}}) \leq N_j^{\text{CB,max}} \quad (33)$$

$$\delta_{j,t}^{\text{IN}} + \delta_{j,t}^{\text{DE}} \leq 1, \delta_{j,t,v}, \delta_{j,t}^{\text{IN}}, \delta_{j,t}^{\text{DE}} \in \{0,1\} \quad (34)$$

式中:  $u_{j,t}$  为  $t$  时段节点  $j$  CB 投运的组数;  $u_{j,\max}$  为投运 CB 最大组数;  $S^{\text{CB}}$  为接入 CB 投切装置的节点集合;  $Q_{j,t}^{\text{CB}}$  为  $t$  时段节点  $j$  CB 每一挡位补偿的无功功率  $q_j$  的总和;  $\delta_{j,t,v}$  为  $t$  时段节点  $j$  CB 挡位  $v$  的 0-1 标识;  $r$  为 CB 最大档位;  $\delta_{j,t}^{\text{IN}}$  和  $\delta_{j,t}^{\text{DE}}$  分别为  $t$  时段节点  $j$  CB 挡位升高和降低的 0-1 标识;  $N_j^{\text{CB,max}}$  为  $t$  时段内 CB 挡位最多允许切换次数。

#### 4.6 目标函数

日前优化模型以 1 h 为时间步长, 以配电网调压成本  $C$  最低为优化目标, 包括离散设备调节成本  $C_1$ 、EVS 无功补偿成本  $C_2$  和网损成本  $C_3$ , 即

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (35)$$

$$C_1 = c_{\text{OLTC}} n_{\text{OLTC}} + c_{\text{CB}} \sum_{t=1}^T \sum_j Q_{j,t}^{\text{CB}} \Delta t \quad (36)$$

$$C_2 = C_{\text{EVS}} \sum_{\phi} \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^{N_F} Q_{i,t}^{f,\phi} + \sum_{j=1}^{N_S} Q_{j,t}^{s,\phi} \right) \Delta t \quad (37)$$

$$C_3 = C_t \sum_{\phi} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{j \in n(i)} R_{ij}^{\phi} L_{ij,t}^{\phi} \Delta t \quad (38)$$

式中:  $c_{\text{OLTC}}$  为 OLTC 每次动作的成本;  $n_{\text{OLTC}}$  为日前  $T$  时段内 OLTC 调节的总次数;  $c_{\text{CB}}$  为电容器组无功补偿成本;  $\Delta t$  表示日前优化的时间步长;  $C_{\text{EVS}}$  为 EVS 单位无功补偿费用;  $N_F$  和  $N_S$  分别为参与调压辅助服务的快充、慢充 EVS 数量;  $Q_{i,t}^{f,\phi}$  为  $t$  时段第  $i$  个快充 EVS  $\phi$  相支撑的无功功率;  $Q_{j,t}^{s,\phi}$  为  $t$  时段第  $j$  个慢充 EVS  $\phi$  相支撑的无功功率;  $C_t$  为配电网单位有功功率的购电分时电价;  $N_B$  为配电网节点数量。

## 5 日内优化模型和节点负荷抽样

### 5.1 日内优化模型建立

#### 1) 目标函数

以一个预测周期 4 h 内网损成本  $f_1$  和 EVS 无功支撑成本  $f_2$  之和  $f$  最小为目标, 即

$$\min f = f_1 + f_2 \quad (39)$$

$$f_1 = C_i \sum_{\varphi} \sum_{t \in \Omega_T} \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j \in n(i)} R_{ij}^{\varphi} L_{ij,t}^{\varphi} \Delta t' \quad (40)$$

$$f_2 = C_{EVS} \sum_{\varphi} \sum_{t \in \Omega_T} \left( \sum_{i=1}^{N_F} Q_{i,t}^{f,\varphi} + \sum_{j=1}^{N_S} Q_{j,t}^{s,\varphi} \right) \Delta t' \quad (41)$$

式中： $\Omega_T$ 为滚动优化时段集合； $\Delta t'$ 为日内优化的时间步长。

## 2) 约束条件

日内优化的约束条件包括充电桩功率约束、潮流约束和运行安全约束，分别如式(5)一式(9)、式(10)一式(16)和式(17)一式(20)所示。除此之外，还应包含日前优化得到的 OLTC 和 CB 动作计划。

## 5.2 节点负荷抽样

使用多场景方法<sup>[25]</sup>描述配电网节点负荷功率的不确定性，假定有功和无功负荷分别服从正态分布  $N(\mu_p, \sigma_p^2)$  和  $N(\mu_q, \sigma_q^2)$ ， $\mu_p$  和  $\mu_q$  分别为预测有功和无功负荷的期望值， $\sigma_p$  和  $\sigma_q$  分别为其波动的百分比，采用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)生成大量服从概率分布的有功和无功负荷场景，并利用基于 Kantorovich 距离的场景削减技术缩减模型<sup>[26]</sup>，导出削减之后的场景作为配电网节点负荷。

## 6 算例

### 6.1 算例场景描述

为验证本文所提模型的有效性，算例采用 MATLAB R2023a-YALMIP 仿真平台，并调用 Gurobi-11.0.1 进行优化求解。本文调压辅助服务考虑两种情况：配电网负荷和线路阻抗三相平衡和三相不平衡。

1) 在配电网负荷和线路阻抗三相平衡的情况下，采用单相处理方法，利用改进 IEEE33 节点系统进行分析，如图 3 所示。该系统电压等级为 12.66 kV，功率基准值为 10 MW，在日前第 1 个时段，有功负荷总和为 3.635 MW，无功负荷总和为 2.265 Mvar。此算例光伏未接入。节点 12 接入快充 EVS，一天内有 100 辆出租车前来充电；节点 27 接入慢充 EVS，一天内有 500 辆私家车前来充电。快充和慢充电桩相关参数如表 1 所示。本文中的快充桩采用文献[19]的拓扑结构，具备双向功率传输功能；慢充电桩通过车载充电机给 EV 提供额定充电功率，无剩余容量，故只能利用空闲的慢充桩支撑电网。因此，本文中的慢充桩配备了无功调节装置<sup>[27]</sup>，以响应调度中心的指令进行无功功率的调节。OLTC 位于节点 1、2 之间，容量为 110 kV/12.66 kV，共 9 个调节档位，初始档位为 5，调节范围为[0.96,1.04] p.u.。节点 18、22、25、33 设有电容器组投切装置，每个节点 5 组，每组大小为 0.1 Mvar。节点电压的限制

为[0.95,1.05] p.u.。EVS 参与调压辅助服务的补偿价格为 150 元/Mvarh，OLTC 挡位和每个电容器组的日调节次数上限均设为 5 次，OLTC 挡位动作成本为 10 元/次，电容器组的费用为 170 元/Mvarh，负荷需求和分时电价如附录 A 图 A1 所示。

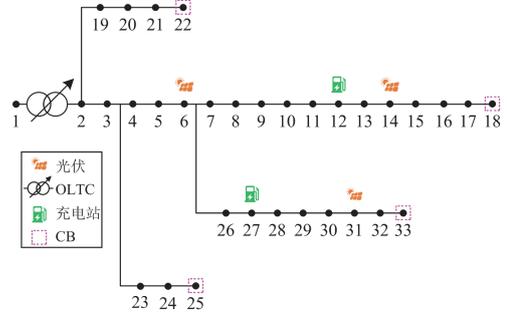


图 3 改进 IEEE33 节点系统拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of improved IEEE33-bus system

表 1 快充和慢充电桩参数

Table 1 Parameters of fast and slow chargers

充电桩类型	容量/kVA	$S_{oc,f}$	$Z_f$	数量/台
快充充电桩	30	0.8	3.56	30
慢充电桩	8	—	—	100

2) 在配电网负荷及线路阻抗三相不平衡的情况下，对 IEEE33 节点单相系统的线路阻抗进行调整：将 IEEE33 节点单相系统的线路阻抗分别增加 2%、保持不变、减少 2%，以表示 IEEE33 节点三相系统 a、b、c 三相线路的阻抗。随后，将调整后的三相线路阻抗均乘以 3，以确保三相不平衡系统的电压水平与单相系统接近。此外，将单相系统抽样后的负荷按照 33.33%、23.33%和 43.33%的比例分配至三相负荷。该数据同时反映了充电桩三相有功功率占 EV 总充电功率的比例，以及三相可调度无功功率占 EVS 总申报容量的比例。

为验证所提模型在新能源出力三相不平衡情况下的适用性，在节点 6、14、31 分别接入峰值为 2 MW、功率因数为 0.95 的分布式光伏系统，且 a 相、b 相、c 相的光伏有功出力分别占总出力的 33.33%、23.33%、43.33%。光伏系统的三相出力情况如附录 A 图 A2 所示。

## 6.2 日前优化分析

### 6.2.1 配电网节点负荷抽样

在配电网负荷和线路阻抗三相平衡的情况下，利用 LHS 抽样出 500 个场景，得到基于 LHS 的日前节点负荷曲线，如附录 A 图 A3 所示；再经 Kantorovich 距离削减至 24 个场景，得到削减后日前节点负荷曲线，如附录 A 图 A4 所示。

在配电网负荷和线路阻抗三相不平衡的情况

下, 将单相系统抽样后的负荷分别按照 33.33%、23.33%、43.33%的比例分配给各节点三相负荷。

### 6.2.2 充电站有功功率及无功支撑能力评估

在配电网负荷和线路阻抗三相平衡的情况下, 采用蒙特卡洛法模拟出日前慢充 EVS 私家车和快充 EVS 出租车的充电功率, 如附录 A 图 A5 所示。利用式(3)和式(4)可分别评估出节点 12 快充 EVS 和节点 27 慢充 EVS 的无功支撑能力, 分别如附录 A 图 A6 和图 A7 所示。对私家车和出租车每 60 min 的充电功率曲线取其平均值, 分别加入到节点 27 和节点 12 日前 24 个时段的有功负荷中; 对每 60 min 的无功容量曲线取其平均值, 作为快充和慢充 EVS 日前 24 个时段的可申报无功容量。

在配电网负荷和线路阻抗三相不平衡的情况下, 可依据充电桩三相有功功率占总充电功率的比例分别计算出充电桩各相的可申报无功容量。

### 6.2.3 日前优化经济性分析

在日前优化阶段, 设置了 2 个案例进行仿真分析。案例 1: 在配电网负荷和线路阻抗三相平衡的情况下, 考虑 OLTC、CB 和 EVS 参与调压; 案例 2: 在配电网负荷和线路阻抗三相不平衡的情况下, 考虑 OLTC、CB 和 EVS 参与调压。各案例的日前调压成本和优化求解时间如表 2 所示。

表 2 日前不同案例调压成本和求解时间

Table 2 Day-ahead voltage regulation costs and solution time in different cases

案例	OLTC 成本/元	CB 成本/元	EVS 补偿成本/元	网损成本/元	总成本/元	求解时间/s
1	10	1819	720.8	2102.2	4652.1	45.72
2	50	340	1089	1985.2	3464.2	40.34

与案例 1 相比, 案例 2 的总成本降低了 1187.9 元。电压在光伏未出力时越下限, 在光伏大发时越上限, 使得 OLTC 动作次数增加了 4 次; 光伏大发时电压较高, 使得网损成本降低 117 元; 且电网需要调用 EVS 而无需调用 CB, 这使得 CB 补偿成本降低 1479 元, EVS 补偿成本增加 368.2 元。

### 6.2.4 OLTC 和 CB 优化结果分析

两种案例 OLTC 挡位优化结果如附录 B 图 B1 所示, 可以看出, 当三相平衡时, 负荷较高, 电压偏低, OLTC 始终维持在最高挡位; 当三相不平衡时, 在光伏未出力阶段, 电压偏低, OLTC 维持在最高挡位; 在光伏大发阶段, 电压过高, OLTC 维持在较低挡位。

案例 1 和案例 2 中 CB 投切组数情况如附录 B 图 B2 所示, 可以看出, 节点 18 和节点 33 的投切组数较多, 这是因为它们位于馈线末端, 电压偏低,

为提升电压并降低网损, 需要提供更多的无功支撑; 相反, 节点 22 和节点 25 的投切组数较少, 虽然它们也位于馈线末端, 但由于距离 OLTC 较近, 仅依靠 OLTC 便能改善其电压水平。与案例 1 相比, 案例 2 中 CB 在白天的投运组数为 0, 这是由于光伏大发提高了馈线末端节点的电压水平。

## 6.3 日内优化分析

### 6.3.1 日内电压滚动优化结果分析

案例 1 中各节点在 96 个时段内的电压分布情况如图 4 所示, 案例 2 各节点在 96 个时段的三相电压分布情况如图 5 所示。可以看出, 所提模型能够降低三相电压的不平衡度, 有效抑制电压越限, 使其保持在合理范围内。

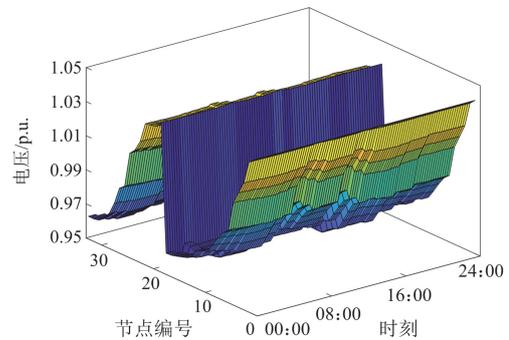
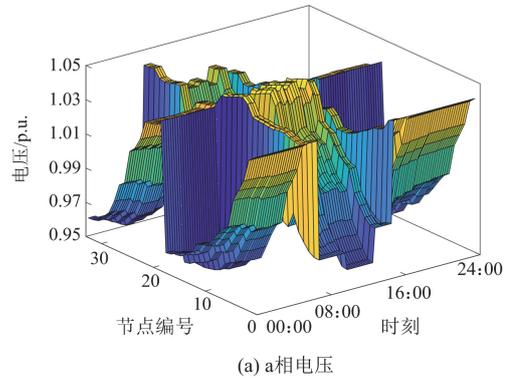
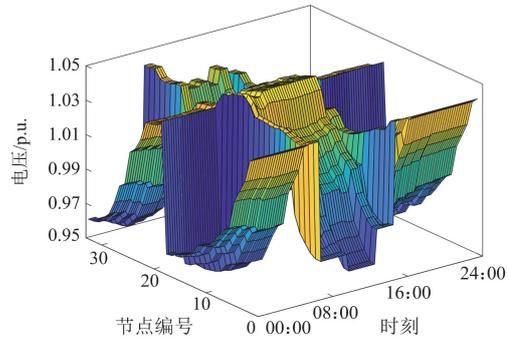


图 4 案例 1 日内节点电压分布

Fig. 4 Intra-day node voltage distribution in case 1



(a) a相电压



(b) b相电压

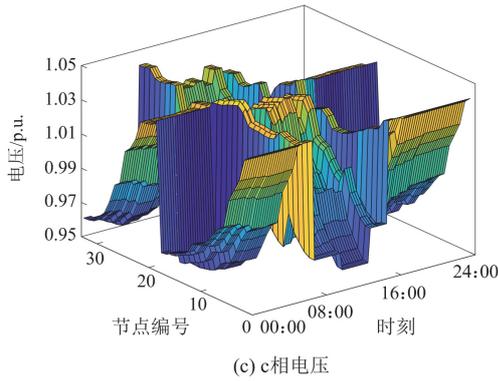


图5 案例2日内节点三相电压分布

Fig. 5 Three-phase voltage distribution of intra-day node in case 2

### 6.3.2 慢充和快充 EVS 无功功率分析

案例1慢充和快充EVS无功功率的优化结果见附录B图B3；案例2慢充和快充EVS无功功率的优化结果分别如图6和图7所示。其中纵坐标为正值时，表示EVS向电网输送容性无功功率；纵坐标为负值时，表示EVS向电网输送感性无功功率。

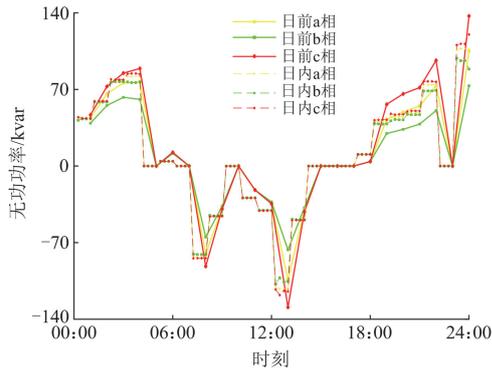


图6 案例2日前和日内节点27慢充EVS无功优化结果

Fig. 6 Day-ahead and intra-day optimized reactive power of slow EVS by node 27 in case 2

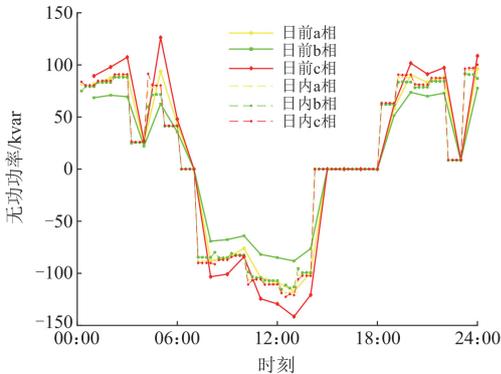


图7 案例2日前和日内节点12快充EVS无功优化结果

Fig. 7 Day-ahead and intra-day optimized reactive power of fast EVS of node 12 in case 2

由附录B图B3可知，在三相平衡时，无光伏接入，负荷较大，导致整个系统电压水平较低，因此慢充EVS和快充EVS仅向电网输送容性无功功率。快充EVS的出力时段明显长于慢充EVS，原因在于快充EVS的充电负荷相比慢充EVS更大。

由图6可知，日前00:00—04:00和18:00—22:00期间，光伏未出力，负荷较大，慢充EVS向电网输送容性无功功率，在23:00—24:00慢充EVS c相出力高达137.10 kvar；而在07:00—09:00和11:00—14:00，由于光伏大发，节点电压过高，慢充EVS向电网输送感性无功功率，在12:00—13:00，慢充EVS c相出力高达129.046 kvar。

由图7可知，日前00:00—05:00和19:00—22:00期间，快充EVS向电网输送容性无功功率，在04:00—05:00，快充EVS c相出力高达126.28 kvar。相比慢充EVS，快充EVS在00:00—04:00期间出力更高，这是因为在此期间出租车充电功率相比私家车更高；而在07:00—14:00，快充EVS向电网输送感性无功功率，在12:00—13:00，快充EVS c相出力高达141.515 kvar。

图6和图7中，EVS c相出力始终高于a相和b相，这是因为c相负荷和光伏出力最高，因此需要更多的无功支撑。在日内滚动优化期间，预测周期数仅为4h，导致日内的三相电压不平衡率小于日前，这使得日内EVS三相出力偏差小于日前的。

为评估案例2中EVS参与调压辅助服务的效果，定义满足式(17)、式(19)一式(20)的节点电压状态数占总状态数的百分比为节点电压合格率。

定义节点电压偏差为

$$J = \sum_{\varphi} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} (V_{i,t}^{\varphi} - 1)^2 \quad (42)$$

本文在日前案例2的基础上设置3个案例进行对比分析。

案例3: 投入OLTC和CB，EVS的无功功率不可注入，目标函数为离散调压设备费用、网损成本之和；案例4: 投入OLTC和CB，EVS的无功功率可注入，但仅以电压偏差为目标；案例5: 投入OLTC和CB，EVS的无功功率可注入，但仅以网损成本为目标。表3为日前不同案例调压效果。

由表3可知，案例3在EVS未参与调压时，电压合格率最低，导致网损成本比案例2高出了549.1元，且电压偏差最大；光伏未出力时由于初始电压过低，CB主要参与了无功支撑，导致CB成本比案例2高出了2346元。案例4电压偏差最低，但总成本最高，比案例2高出23702元，经济性太差。案例

5 网损成本最低, 且电压偏差相比案例 2 减少了 0.2889, 但 EVS 补偿成本比案例 2 高出 2965.8 元。综上, 站在电网调压角度, 选择案例 2 既能以最低的成本改善电压水平, 又可以保证电压合格率 100%。

表 3 日前不同案例调压效果

Table 3 Day-ahead voltage regulation effects in different cases

案例	OLTC 成本/元	CB 成本/元	EVS 补偿成本/元	网损成本/元	总成本/元	电压合格率/%	电压偏差
2	50	340	1089	1985.2	3464.2	100	2.2489
3	40	2686	—	2534.3	5260.3	86.74	2.9807
4	10	5508	4189.3	17459	27166.3	100	1.3534
5	60	1768	4054.8	1638.8	7521.6	100	1.96

## 7 结论

本文在计及配电网负荷和线路参数三相不平衡情况下, 提出了一种基于充电站无功支撑能力评估的配电网日前-日内优化调度模型。通过算例分析, 得出以下结论。

1) 日前优化模型能提供配电网调压成本最小的优化结果, 三相平衡和三相不平衡的情况下分别为 4652.1 元和 3464.2 元, 基于日前优化确定的 OLTC、CB 动作计划和 EVS 的可调度无功容量, 建立日内滚动优化模型, 以修正日内 EVS 需调度的功率。日前和日内优化之间联系紧密, 共同提高了配电网运行的经济性。在 EVS 参与调压辅助服务期间, EV 均能达到预期的满荷电状态, 确保了 EV 的正常出行不受影响。本文所提策略实现了电网、EVS 和 EV 用户利益的协调统一。

2) EVS 向电网注入无功功率后, 电压三相不平衡度有所改善, 电压合格率为 100%, 且调压成本最低; EVS 通过充电桩分担了一部分无功补偿需求, 使得 CB 的投切组数减少, 并且 EVS 具有更高的调度灵活性, 补偿成本也相对较低。

## 附录 A

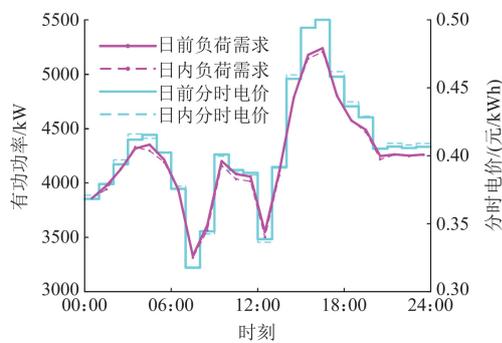


图 A1 负荷需求和分时电价

Fig. A1 Load demand and time-of-use price

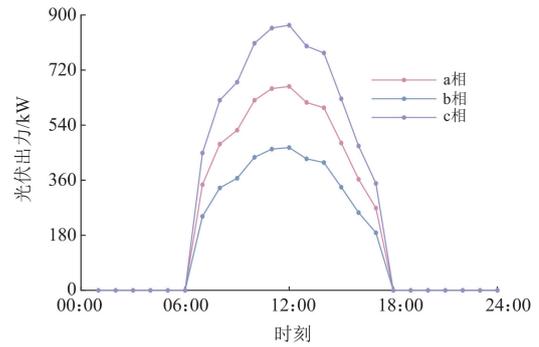
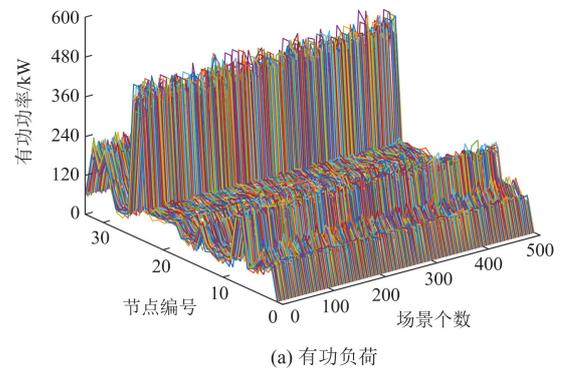
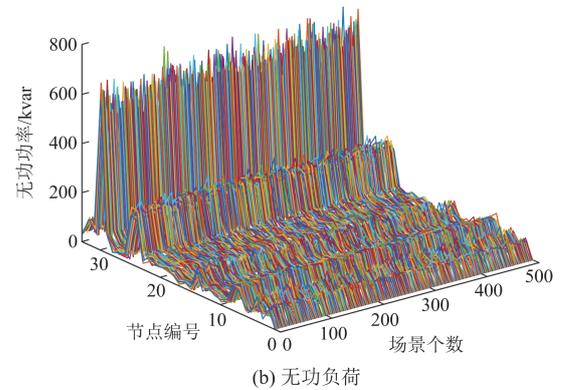


图 A2 分布式光伏三相出力曲线

Fig. A2 Three-phase output curves of distributed photovoltaic



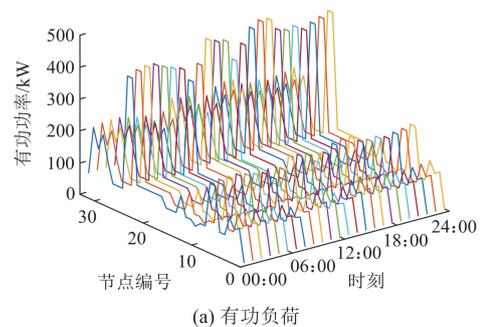
(a) 有功负荷



(b) 无功负荷

图 A3 基于 LHS 的日前节点负荷曲线

Fig. A3 Day-ahead node load curves based on LHS



(a) 有功负荷

附录 B

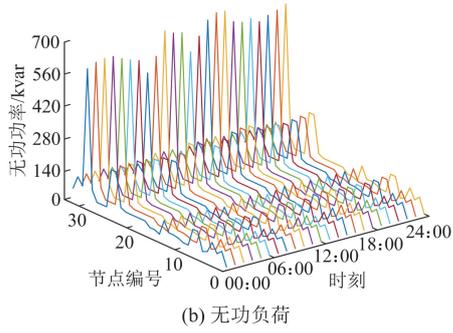


图 A4 削减后日前节点负荷曲线

Fig. A4 Reduced day-ahead node load curves

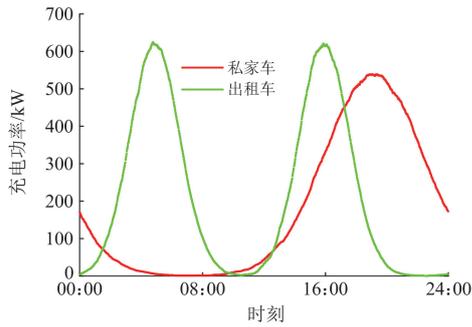


图 A5 快充和慢充 EVs 充电功率

Fig. A5 Charging power of fast and slow EVs

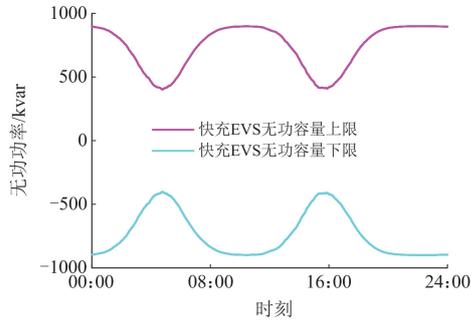


图 A6 快充 EVs 可申报无功容量

Fig. A6 Declarable reactive capacity of fast EVs

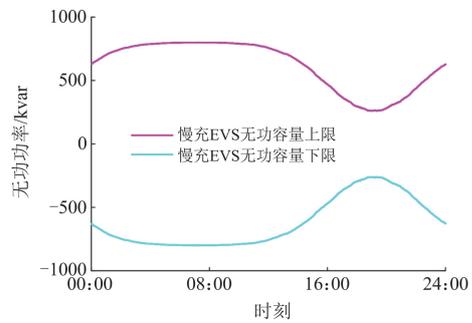


图 A7 慢充 EVs 可申报无功容量

Fig. A7 Declarable reactive capacity of slow EVs

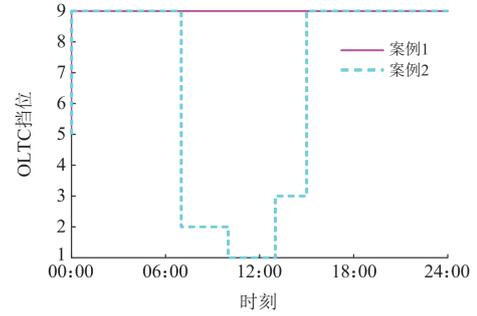
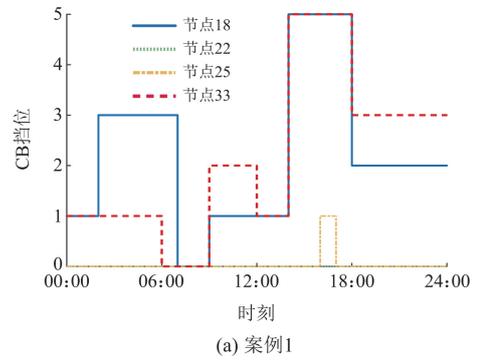
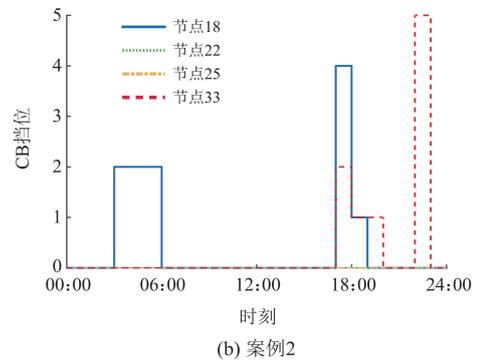


图 B1 两种案例 OLTC 档位优化结果

Fig. B1 Optimized OLTC tap positions in two cases



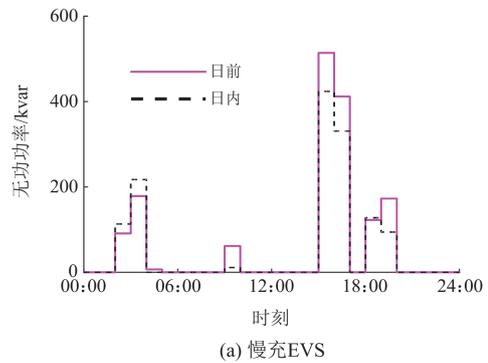
(a) 案例1



(b) 案例2

图 B2 两种案例 CB 投切优化结果

Fig. B2 Optimized CB switching situations in two cases



(a) 慢充EVs

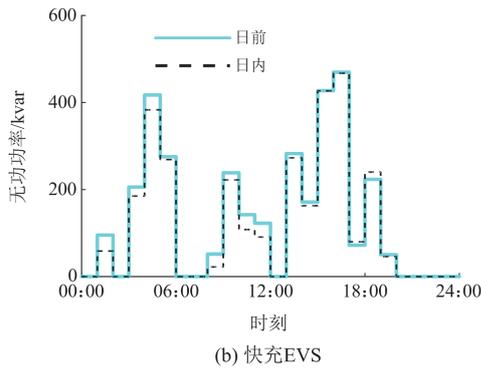


图 B3 案例 1 日前和日内 EVS 无功功率优化结果  
Fig. B3 Day-ahead and intra-day optimized reactive power of EVS in case 1

### 参考文献

- [1] 史昭娣, 朱宁, 李政, 等. 基于分解协调的风光储联合规划分层优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 22-31.  
SHI Zhaodi, ZHU Ning, LI Zheng, et al. Joint planning and hierarchical optimization method of wind photovoltaic storage based on decomposition coordination[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 22-31.
- [2] 崔露, 刘世林, 苗婉, 等. 考虑电转氢和需求响应的风光储综合充电站优化运行策略[J]. 发电技术, 2025, 46(1): 31-41.  
CUI Lu, LIU Shilin, MIAO Wan, et al. Optimized operation strategy of wind-solar-storage integrated charging station considering power-to-hydrogen and demand response[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(1): 31-41.
- [3] 武群丽, 朱新宇. 可再生能源配额制下风光储联合参与现货市场的交易决策[J]. 中国电力, 2024, 57(4): 77-88.  
WU Qunli, ZHU Xinyu. Transaction decision-making of wind/photovoltaic/energy storage joint participation in spot market under renewable portfolio standards[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 77-88.
- [4] 张沥月, 许庆宇, 刘雨菁, 等. 高质量建成新型电力系统 加速发展低零碳灵活性资源[R]. 落基山研究所, 2024.
- [5] 黄弘扬, 张震霄, 解志良, 等. 能源汇集系统中多模式接入储能的协调控制及优化设计方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 159-167.  
HUANG Hongyang, ZHANG Zhenxiao, XIE Zhiliang, et al. Coordinated control and optimal design method of multi-mode access energy storage in energy collection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 159-167.
- [6] 朱晓纲, 于佳琪, 李勇, 等. 基于暂态能量辨识的含规模化储能的新能源电力系统暂态稳定控制方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 82-89.  
ZHU Xiaogang, YU Jiaqi, LI Yong, et al. Transient stability control method for new energy power systems with scaled energy storage based on transient energy identification[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 82-89.
- [7] 张有玉, 郭珂, 周林, 等. 三相三线制系统电压不平衡度计算方法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 123-128.  
ZHANG Youyu, GUO Ke, ZHOU Lin, et al. A method to compute voltage unbalance factor in three-phase three-wire system[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 123-128.
- [8] JALILIAN A, ROSHANFEKR R. Analysis of three-phase induction motor performance under different voltage unbalance conditions using simulation and experimental results[J]. Electric Power Components and Systems, 2009, 37(3): 300-319.
- [9] 周迪, 金军. 电动汽车充电市场展望[R]. 普华永道, 2024.
- [10] 裴振坤, 王学梅, 康龙云. 电动汽车参与电网辅助服务的控制策略综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 17-32.  
PEI Zhenkun, WANG Xuemei, KANG Longyun. Review on control strategies for electric vehicles participating in ancillary services of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 17-32.
- [11] RESTREPO M, CAÑIZARES C A, KAZERANI M. Three-stage distribution feeder control considering four-quadrant EV chargers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3736-3747.
- [12] WEN J, OKTOVIANO G, HAO Q, et al. A multi-agent based integrated volt-var optimization engine for fast vehicle-to-grid reactive power dispatch and electric vehicle coordination[J]. Applied Energy, 2018, 229: 96-110.
- [13] 姚蓝霓, 李钦豪, 杨景旭, 等. 考虑电动汽车充放电支撑的配用电系统综合无功优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 39-47.  
YAO Lanni, LI Qin hao, YANG Jingxu, et al. Comprehensive reactive power optimization of power distribution and consumption system with support of electric vehicle charging and discharging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 39-47.
- [14] 王强钢, 田雨禾, 王健, 等. 计及充电站无功补偿的配电网日前-实时协调优化模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 27-34.  
WANG Qianggang, TIAN Yuhe, WANG Jian, et al. Coordinated day-ahead and real-time optimization model for distribution network considering reactive power

- compensation of charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 27-34.
- [15] 胡金迪, 刘思, 沈广, 等. 基于端对端通信的充电桩无功响应分布式模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 25-35.  
HU Jindi, LIU Si, SHEN Guang, et al. Distributed model predictive control strategy of reactive power response for charging piles based on peer-to-peer communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 25-35.
- [16] 张恺, 尹忠东, 杨啸天, 等. 基于 V2G 无功调度的电网无功补偿[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 40-47.  
ZHANG Kai, YIN Zhongdong, YANG Xiaotian, et al. Reactive power compensation of power grid based on V2G reactive power dispatching[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 40-47.
- [17] 周琪, 安海云, 段梅梅, 等. 计及电动汽车充电桩无功响应能力的电网节能降损控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(5): 129-134.  
ZHOU Qi, AN Haiyun, DUAN Meimei, et al. Energy-saving and loss-reduction control method for power grid considering the reactive power response capability of electric vehicle chargers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(5): 129-134.
- [18] 李丹奇, 郑建勇, 史明明, 等. 电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 75-83.  
LI Danqi, ZHENG Jianyong, SHI Mingming, et al. Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 75-83.
- [19] 朱晗, 汪隆君, 陈志峰, 等. 电动汽车充电站参与辅助服务的无功功率支撑能力评估[J/OL]. 南方电网技术: 1-9[2024-11-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240625.0926.022.html>  
ZHU Han, WANG Longjun, CHEN Zhifeng, et al. Evaluation of reactive power support capability of electric vehicle charging station in ancillary services[J/OL]. Southern Power System Technology: 1-9[2024-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240625.0926.022.html>
- [20] 齐郑, 徐希茜, 熊巍, 等. 基于变时段设计改进多目标差分进化算法的风/光/火/储日前优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 62-71.  
QI Zheng, XU Xiqi, XIONG Wei, et al. An improved multi objective differential evolution algorithm based on variable time period design for a wind/photovoltaic/thermal/storage system day ahead optimization scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 62-71.
- [21] 廖剑波, 陈清鹤, 监浩军, 等. 主动配电网的日前-日内两阶段优化调度[J]. 现代电力, 2020, 37(1): 27-34.  
LIAO Jianbo, CHEN Qinghe, JIAN Haojun, et al. Day-ahead and intraday two-stage optimal dispatch of active distribution network[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1): 27-34.
- [22] 邓衍辉, 李剑, 卢国强, 等. 考虑分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 33-44.  
DENG Yanhui, LI Jian, LU Guoqiang, et al. Charging optimization strategy of electric vehicles guided by the dynamic tariff mechanism of a subregion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 33-44.
- [23] CHEN Jianrun, CHEN Haoyong, LIANG Zipeng, et al. An exergy analysis model for the optimal operation of integrated heat-and-electricity-based energy systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 1-18.
- [24] 祁向龙, 陈健, 赵浩然, 等. 多时间尺度协同的配电网分层深度强化学习电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 53-64.  
QI Xianglong, CHEN Jian, ZHAO Haoran, et al. Day-ahead and intraday two-stage optimal dispatch of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 53-64.
- [25] 南斌, 姜春娣, 董树锋, 等. 计及源荷不确定性的综合能源系统日前-日内协调优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3669-3683.  
NAN Bin, JIANG Chundi, DONG Shufeng, et al. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of integrated energy system considering uncertainties in source and load[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3669-3683.
- [26] 赵书强, 要金铭, 李志伟. 基于改进 K-means 聚类 and SBR 算法的风电场景缩减方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3947-3954.  
ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei. Wind power scenario reduction based on improved K-means clustering and SBR algorithm[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3947-3954.
- [27] 罗潇. 配电网高压无功调节装置的设计及优化探究[J]. 科技创新报, 2019, 16(18): 66-67.

收稿日期: 2024-11-16; 修回日期: 2025-03-18

作者简介:

朱 晗(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: 2270319202@qq.com

汪隆君(1982—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统规划与可靠性. E-mail: epwlj@scut.edu.cn

(编辑 张 颖)