

## 考虑电动汽车充电桩无功响应的优化调度策略

王冠<sup>1,2†</sup>, 刘苏贤<sup>1,2</sup>, 赵浩然<sup>3</sup>, 李波<sup>4</sup>

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东大学 山东省特高压输电变电技术与装备重点实验室, 山东 济南 250061;

3. 国网山东省电力公司枣庄供电公司, 山东 枣庄 277100; 4. 山东大学 山东大学产业集团, 山东 济南 250061)

**摘要:**随着电动汽车的普及,大规模电动汽车入网对配电网造成的影响愈加明显.在该背景下,提出了考虑电动汽车充电桩无功响应能力的充电站实时滚动优化调度策略,充分考虑电动汽车的时空分布特性以及充电站与电网之间的有功无功交互能力,建立双层模型分别从时间和空间上对充电站的有功无功进行优化调度.分别采用二次规划、二阶锥规划对上、下层模型进行求解,最后以改进的 IEEE33 节点配电网系统进行仿真,仿真结果表明该策略可以有效降低系统负荷峰谷差,减小系统网损,改善系统电压水平.

**关键词:**电动汽车;无功响应;时空分布;实时滚动优化

**中图分类号:**TM7

**文献标志码:**A

## Optimal Dispatching Strategy Considering Reactive Response of Electric Vehicle Charging Piles

WANG Guan<sup>1,2†</sup>, LIU Suxian<sup>1,2</sup>, ZHAO Haoran<sup>3</sup>, LI Bo<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of UHV Transmission Technology and Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. State Grid Shandong Electric Power Company Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277100, China;

4. Shandong Shanda Industry Group, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** With the popularity of electric vehicles, the impact of large-scale electric vehicles on the distribution grid will become more apparent. In this context, a real-time rolling optimization strategy for charging stations considering the reactive response capability of charging piles is proposed. The spatial and temporal distribution characteristics of electric vehicles and the active and reactive interaction capability between charging stations and power grids are fully considered. A two-layer model is established to optimize the active and reactive power of the charging station in time and space. The quadratic programming and the second-order cone programming are used to solve the upper and lower models. Finally, the simulation is carried out with the improved IEEE33 node distribution network system, and the simulation results show that the strategy can effectively reduce the load peak and valley difference as well as the active power loss of the system and improve the voltage level of the network.

**Key words:** electric vehicle; reactive power response; temporal and spatial distribution; real-time rolling optimization

\* 收稿日期:2021-01-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577109), National Natural Science Foundation of China(51577109)

作者简介:王冠(1978—),女,山东淄博人,山东大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: guanpallas@sdu.edu.cn

近年来,为应对日益严峻的能源短缺与环境污染问题,光伏发电以及电动汽车受到广泛关注<sup>[1-2]</sup>.间歇性光伏发电的广泛应用导致电网等效负荷峰谷差变大,光伏电源渗透率过高产生的反向功率流导致电网电压越限<sup>[3]</sup>,增加了配电系统的运行压力;电动汽车的大规模入网增加了系统的负荷,导致系统电压下降,网络损耗增加<sup>[4-5]</sup>,也给电网的安全稳定运行带来了巨大的挑战.但如果能将电动汽车作为配电网的可控资源进行合理调度,不仅可以抑制无序充电对配网造成的负面影响,还能够抑制光伏出力波动,丰富系统的控制手段<sup>[6-7]</sup>.

目前,学者就电动汽车充放电调度策略开展了大量的研究,大多数集中在控制有功功率上.文献[8-10]从电动汽车的角度分析,根据各时段的预测充电量,通过实行实时电价的方式引导用户错峰充电,降低用户充电成本.文献[11-15]从微电网的角度分析,通过优化电动汽车各时段有功功率的方式来削峰填谷和降低系统的网损.新的研究证明通过逆变器控制可以实现电动汽车与电网之间的有功及无功交互<sup>[16-19]</sup>.已有学者就电动汽车到配电网(Vehicle-to-grid, V2G)的无功功率进行了研究,通过优化各时段电动汽车的有功及无功或是建立电压无功优化模型来达到降低网络损耗的目的<sup>[20-21]</sup>.但是,文献[20-21]未充分考虑电动汽车的充电需求和不确定性,忽视了用户特性.文献[22]综合考虑实际因素,建立了电压无功优化模型,用于充电协调和 V2G 无功调度.文献[23-24]采用求解速度快的线性规划和非线性规划方法求解模型,以应对快速变化的充电场景.文献[25]采用锥优化的方法进行求解,求解速度快、效果好.然而,已有的有关 V2G 无功方面的研究仅考虑了电动汽车在无功优化方面的作用,却没有把电动汽车作为储能方面的作用(削峰填谷、促进可再生能源消纳等)与之结合起来.

本文考虑了电动汽车充电桩的无功响应能力,充分发挥 V2G 有功及无功的作用,对多个充电站的有功无功充放进行优化调度.首先以负荷峰谷差率最低为目标,利用二次规划方法求取各时段电动汽车的最优充放电功率;在此基础上,以系统网损最低为目标,利用二阶锥规划对本时段各充电站的有功及无功进行优化,并采用滚动优化的方法,加入反馈校正环节,以应对光伏出力及电动汽车充放电的不确定性.

### 1 充电桩无功响应原理

V2G 充电桩一般由 AC-DC 电路和 DC-DC 电路两部分组成.充电桩的无功响应能力来源于双向 AC-DC 变流器<sup>[26]</sup>.

三相桥式 AC-DC 整流/逆变电路如图 1 所示,通过对  $V_1 \sim V_6$  进行正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM),可以控制其基波分量的幅值和相位.

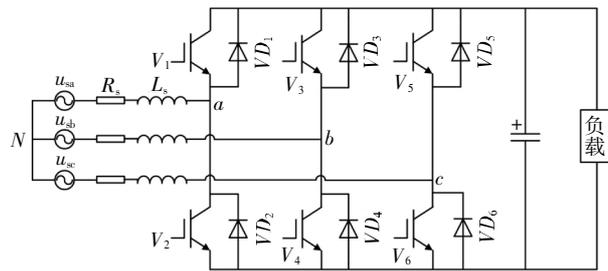


图 1 三相 AC-DC 变流器拓扑结构图

Fig.1 Three-phase AC-DC converter topology diagram

在稳态运行条件下,以 A 相为例

$$\dot{U}_{sa} = j\omega L_s \dot{I}_{sa} + R \dot{I}_{sa} + \dot{U}_{aN} \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_{sa}$ 为电网 A 相相电压基波相量, $\dot{I}_{sa}$ 为 A 相相电流基波相量, $\dot{U}_{aN}$ 为三相桥交流端 A 相相电压.相量图如图 2 所示,电网电压保持不变,通过控制 $\dot{U}_{aN}$ 的幅值和相位可以改变 $\dot{I}_{sa}$ 的幅值和相位,从而实现有功及无功的双向流动.

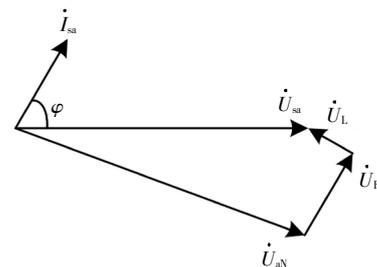


图 2 AC-DC 变流器稳态运行时的基波向量图

Fig.2 Fundamental vector diagram of AC-DC converter that operating in steady state

运行过程中,双向变流器传输的有功及无功受最大视在容量的限制

$$P^2 + Q^2 \leq S_{max}^2 \quad (2)$$

式中: $P, Q$ 分别为变流器中通过的有功、无功功率; $S_{max}$ 为变流器的最大视在容量.

## 2 优化调度架构

充电桩的无功调节能力受变流器最大视在容量  $S_{\max}$  和充放电时有功功率大小的影响. 如图3中运行点1所示, 对电动汽车进行充电, 充电功率为  $P_1$ , 此时, 充电桩可以响应的无功功率范围如图中  $Q_{av}$  所示.

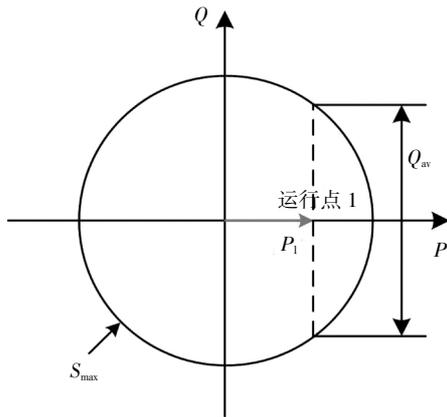


图3 充电桩中有功与无功功率运行区域

Fig.3 Active and reactive power operating area in the charging pile

电动汽车数量庞大, 如果对每一辆电动汽车单独制定调度计划难度较大. 通过在充电站实行合理的分时电价制度, 吸引电动汽车用户在峰、谷电价时段到充电站进行放、充电, 可以实现对电动汽车的分群调度.

采用日前申请机制并借助智能电网相关技术的支持, 实现电动汽车用户、充电站、调度中心之间的信息交互. 电动汽车优化调度的具体步骤如下:

1) 调度中心根据次日负荷预测以及可再生能源发电站申请出力计划制定合理的分时电价并向用户发布;

2) 用户根据次日电动汽车使用情况向任意充电站申请充放电, 申请信息包括: 可参与充放电的时间段、申请充放电量;

3) 各充电站按照峰谷电价区间的划分, 将申请充放电时间段处于同一电价区间的电动汽车归为一类, 并将整理后的信息上传到调度中心;

4) 调度中心根据所获取的信息, 采取一定的调度策略制定各充电站的有功无功充放计划, 并向各充电站下发指令;

5) 各充电站按照调度中心的指令对电动汽车进行充放电, 并将实际充放电情况反馈给调度中心.

对上述调度策略做以下几点说明:

1) 本文仅针对提交申请的电动汽车进行调度, 理论上仅包括在谷电价区间申请充电以及在峰电价区间申请放电的电动汽车. 将其他未提交申请随机充电的电动汽车充电负荷计入传统负荷.

2) 本文按照步骤3中所提原则对电动汽车进行归类, 步骤4中采用的调度策略仅能给出多辆电动汽车总的充放电安排. 每一辆电动汽车的充放电安排在步骤5中由各充电站根据各位用户的申请信息来完成.

3) 步骤5中各充电站根据每一辆电动汽车具体的申请信息进行充放电安排, 该过程需要处理大规模数据, 本文不做具体研究, 仅给出该过程需要遵循的两个原则: 一、各充电站在接收到调度中心下发的充放电计划后, 需按照一定的优先级顺序对各电动汽车进行充放电. 按照申请时段将各充电站内的电动汽车划分为两类: ①当前时段是其申请时段的最后一个时段; ②当前时段不是其申请时段的最后一个时段. 优先级首先按照①>②排列, 然后各类中每辆电动汽车的优先级按照申请时段的长短进行排列, 申请时段越长, 优先级越高; 二、若当前时段是某电动汽车申请时段的最后一个时段, 即使调度中心下发的充放电计划已经达成, 仍对该电动汽车进行充放电, 完成其申请要求.

## 3 优化调度策略

### 3.1 双层模型

#### 3.1.1 实时调度层

在当前时段起始时刻, 结合超短期预测数据对日等效负荷曲线进行校正, 基于校正后的等效负荷曲线, 以降低等效负荷峰谷差为目标, 对未来各时段电动汽车的充放电功率进行优化. 以每小时为单位将一天分成24个时段, 实时调度层优化目标表示如下.

目标函数: 峰谷差最小

$$\min f = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_L(t) - P_{DC}(t) + P_{EV}(t) - \bar{P})^2 \quad (3)$$

式中:  $T$  为总时段数;  $P_L(t)$  为第  $t$  个时段基础负荷所消耗的平均功率;  $P_{DC}$  为分布式电源出力;  $P_{EV}$  为电动

汽车充放电功率,充电为正、放电为负; $P$ 为等效负荷平均值,通过公式(4)计算:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_L(t) - P_{DC}(t) + P_{EV}(t)) \quad (4)$$

目标函数需要满足以下约束条件:

1)系统功率平衡约束

$$P_{DC}(t) + P_{grid}(t) = P_L(t) + P_{loss}(t) + P_{EV}(t) \quad (5)$$

式中: $P_{grid}$ 为联络线传输功率; $P_{loss}$ 为系统有功网络损耗。

2)电动汽车电池容量约束,包括当前时段电池容量约束以及各电价区间内的电池容量约束

$$|P_{EV}(t_c)| \leq \left| \sum_{n=1}^{N_c} C_{EV}(n) \right| \quad (6)$$

$$\left| \sum_{t \in T_{inl}} P_{EV}(t) \right| = \left| \sum_{n=1}^{N_{inl}} C_{EV}(n) \right| \quad (7)$$

式中: $P_{EV}(t_c)$ 分别为当前时段电动汽车的调度功率; $N_c$ 为当前预约信息中申请时段包含当前时段的电动汽车数量; $T_{inl}$ 为某电价区间所包含的所有时段的集合; $N_{inl}$ 为申请时段在该电价区间内的电动汽车数量; $C_{EV}(n)$ 为第  $n$  辆电动汽车的申请充放电量。

3)电动汽车充放电功率约束

$$-P_{disc}^{max} \leq P_{EV}(t) \leq P_{chg}^{max} \quad (8)$$

式中: $P_{chg}^{max}$ 、 $P_{disc}^{max}$ 分别为整个系统中电动汽车的最大充、放电功率。

4)分布式电源出力约束

$$P_{DC}^{min} \leq P_{DC}(i, t) \leq P_{DC}^{max} \quad (9)$$

式中: $P_{DC}^{max}$ 、 $P_{DC}^{min}$ 分别为 DG 有功出力的上、下限值。

5)配电变压器传输功率容量限制

$$P_{grid}^{min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (10)$$

式中: $P_{grid}^{max}$ 、 $P_{grid}^{min}$ 分别为配电变压器传输功率容量的上、下限值。

该模型中,目标函数为二次函数,约束条件均为线性,可以将该模型转化为凸二次规划问题进行求解:

$$\begin{cases} \min f(x) = \frac{1}{2} x^T G x + r^T x, x \in R^n \\ \text{s.t. (5)(6)(7)(8)(9)(10)} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $x$ 为待优化的各时段电动汽车的充放电功率, $G$ 等于 2 倍的单位矩阵, $r$ 是一个常数矩阵,可以通过  $P_L$ 、 $P_{DC}$ 、 $\bar{P}$  得出。

### 3.1.2 功率分配层

根据实时调度层的优化结果可以获取本时段全

系统电动汽车的最优充放电功率,以此为约束,在功率分配层对本时段各充电站有功与无功的输入输出进行优化。功率分配层的优化目标表示如下。

目标函数:系统网损最低

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_b} (r_k I_k(t)^2) \Delta t \quad (12)$$

式中: $r_k$ 为支路  $k$  的电阻; $I_k(t)$ 为  $t$  时段支路  $k$  流过的电流; $\Delta t$ 为时段长度; $N_b$ 为系统支路数目。

目标函数需要满足以下约束条件:

1)实时调度层计划功率约束

$$\sum_{m=1}^{N_{stg}} (P_{stg}(m, t)) = P_{EV}(t) \quad (13)$$

式中: $P_{stg}(m, t)$ 为第  $t$  个时间段充电站  $m$  的有功功率,充电为正、放电为负; $N_{stg}$ 为充电站数量。

2)电池容量约束

$$|P_{stg}(m, t_c)| \leq \left| \sum_{n=1}^{N_{m,c}} C_{EV}(n) \right| \quad (14)$$

式中: $P_{stg}(m, t_c)$ 为充电站  $m$  在当前时段  $t_c$  电动汽车的调度功率; $N_{m,c}$ 为当前充电站  $m$  的预约信息中申请时段包含当前时段的电动汽车数量; $C_{EV}(n)$ 为第  $n$  辆电动汽车的申请充放电量。

3)电动汽车充放电功率约束

$$-P_{m, disc}^{max} \leq P_{stg}(m, t) \leq P_{m, chg}^{max} \quad (15)$$

式中: $P_{m, chg}^{max}$ 、 $P_{m, disc}^{max}$ 分别为充电站  $m$  中电动汽车的最大充、放电功率。

4)双向变流器的通流能力限制即最大视在容量限制

$$P_{stg}^2 \leq Q_{stg}^2 \leq S_{stg, max}^2 \quad (16)$$

式中: $P_{stg}$ 、 $Q_{stg}$ 分别为充电站有的功、无功功率; $S_{stg, max}$ 为变流器的最大视在容量。

5)系统安全约束

$$\begin{cases} V_j^{min} \leq V_j(t) \leq V_j^{max} \\ I_k(t) \leq I_k^{max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $V_j^{min}$ 、 $V_j^{max}$ 分别为节点  $j$  电压幅值上、下限值; $I_k^{max}$ 为线路  $k$  允许传输的最大电流。

6)系统潮流约束

$$\begin{cases} \text{令 } \tilde{I}_{ij}(t) = I_{ij}(t)^2, \tilde{V}_i(t) = V_i(t)^2 \\ \sum_{i \in m(j)} (P_{ij}(t) - r_{ij} \tilde{I}_{ij}(t)) = \sum_{k \in n(j)} P_{jk}(t) + P_j(t) \\ \sum_{i \in m(j)} (Q_{ij}(t) - x_{ij} \tilde{I}_{ij}(t)) = \sum_{k \in n(j)} Q_{jk}(t) + Q_j(t) \\ \tilde{V}_j(t) = \tilde{V}_i(t) - 2(r_{ij} P_{ij}(t) + x_{ij} Q_{ij}(t)) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \tilde{I}_{ij}(t) \end{cases} \quad (18)$$

$$\tilde{I}_{ij}(t) = \frac{P_{ij}(t)^2 + Q_{ij}(t)^2}{\tilde{V}_i(t)} \quad (19)$$

式中: $m(j)$ 和 $n(j)$ 分别是节点 $j$ 为末节点的支路的首端节点集合和以节点 $j$ 为首节点的支路的末端节点集合; $P_{ij}$ 、 $P_{jk}$ 、 $Q_{ij}$ 、 $Q_{jk}$ 为线路上传输的有功无功功率; $P_j$ 、 $Q_j$ 为节点 $j$ 的净有功无功负荷; $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 为线路的电阻、电抗; $I_{ij}$ 为线路上传输的电流; $V_i$ 、 $V_j$ 为节点 $i$ 、 $j$ 的电压。

将式(18)进行松弛得到

$$\tilde{I}_{ij}(t) \geq \frac{P_{ij}(t)^2 + Q_{ij}(t)^2}{\tilde{V}_i(t)} \quad (20)$$

再做一步等价变形转化为标准二阶锥形式

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij}(t) \\ 2Q_{ij}(t) \\ \tilde{I}_{ij}(t) - \tilde{V}_i(t) \end{matrix} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij}(t) + \tilde{V}_i(t) \quad (21)$$

通过二阶锥松弛技术,该模型可以表示为

$$\begin{cases} \min f = \sum_{k=1}^{N_k} (r_k I_k(t)^2) \Delta t \\ \text{s.t. (13)(14)(15)(16)(17)(18)(21)} \end{cases} \quad (22)$$

该模型中,目标函数为凸函数,约束条件(21)的数学形式满足二阶锥的定义,其他约束条件均为线性,该问题是一个二阶锥问题,同时符合凸规划的判定条件<sup>[27]</sup>,可以通过二阶锥规划求解该模型。

### 3.2 滚动优化

一方面,可再生能源出力以及负荷的预测值与实际值存在偏差;另一方面,该策略中对电动汽车进行分群调度,未考虑每一辆电动汽车具体的申请信息,电动汽车实际充放电情况可能偏离调度计划,此外,车主的充放电行为具有主观性,申请信息可能临时出现变动。因此,本文采用滚动优化调度的方法,加入反馈校正环节,具体流程如图4所示。

1)当前时段,结合本日可再生能源出力及负荷需求之前时段、超短期预测及日前预测数据,以及所有车主的预约信息,在实时调度层对本日未来各时段电动汽车的充放电功率进行优化,从而获取全系统当前时段的最优充放电功率。

2)在功率分配层,结合当前各充电站车主预约信息,以实时调度层的优化结果为约束,合理分配各充电站电动汽车充放电功率,同时结合双向变换器的容量限制,对各充电站的无功大小及方向进行优化。

3)下一时段,更新之前时段、超短期预测、日前预测数据;更新各充电站车主预约信息。重复上述步

骤,直到本日所有时段调度完成。

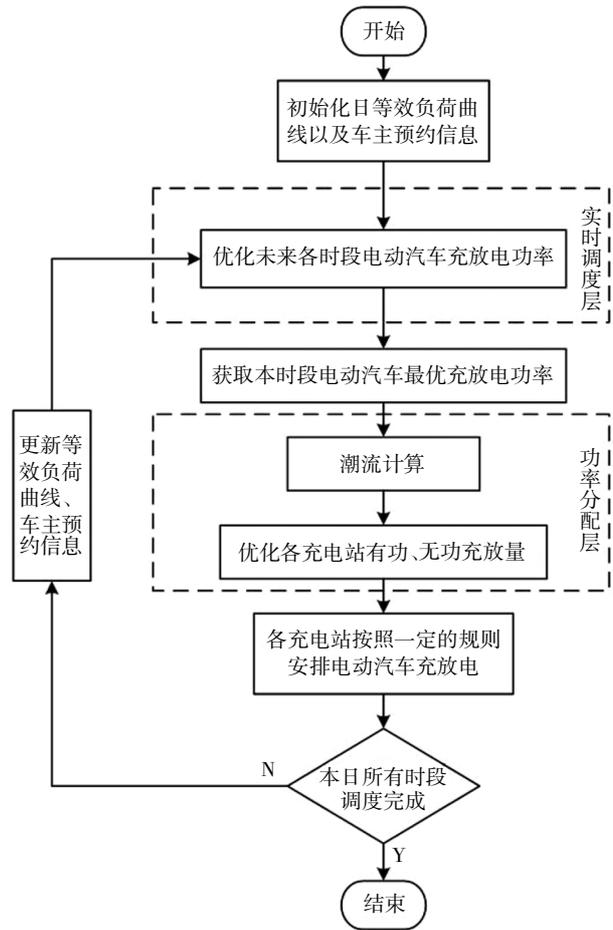


图4 滚动优化的基本流程

Fig.4 Basic flow of rolling optimization

## 4 仿真实例

本文利用 MATLAB 进行编程,选取 IEEE33 节点配电系统进行测试仿真,并对该系统进行改进,系统拓扑如图5所示。光伏电站安装在节点5、18、31,装机容量分别为2.5、2、2.5 MVA,采用恒功率因数控制并网,功率因数为0.95。充电站建立在节点15、23、26,各充电站选用集中式变流器并网,双向变流器最大视在容量为0.6 MVA,充放电效率均为95%。系统基准电压为12.66 kV,基准容量为10 MVA,根节点电压为pu,可以通过改变变压器变比进行调节,其余节点电压允许变化范围为[0.95~1.05]pu,支路最大允许电流为500 A。

某日日前负荷预测数据以及光伏申请出力计划如图6所示<sup>[28]</sup>。

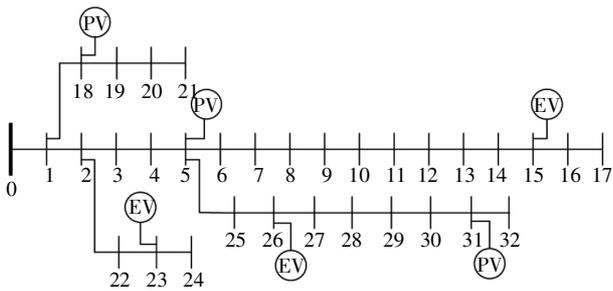


图 5 改进后的 IEEE 33-bus 配电系统结构拓扑图

Fig.5 Improved IEEE 33-bus power distribution system structure topology

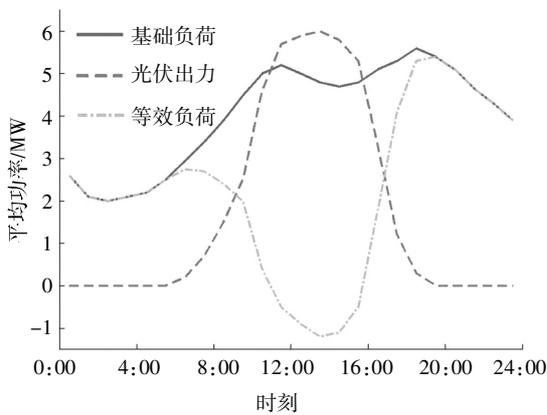


图 6 光伏、负荷功率预测曲线

Fig.6 Photovoltaic and load power prediction curve

据此设定 10:00-17:00 为负荷谷区间,17:00-

24:00 为负荷峰区间,制定峰谷电价并向用户发布.假设车主预约信息汇总后的各时段容量约束及各区间容量约束如表 1、表 2 所示.

#### 4.1 负荷谷时段

在 10:00,开始第一轮的调度,实时调度层的优化调度结果如图 7 所示,得到 10:00-11:00 电动汽车的最优充电功率为 0,功率分配层所求得的各充电站的最优充电功率自然也均为 0.对比图中两条曲线也可以看出,通过合理控制电动汽车的充放电功率能够达到“削峰填谷”的效果,明显改善了系统负荷的峰谷差.

倘若存在申请时段为 10:00-11:00 的用户,为了满足其充电要求,10:00-11:00 各充电站实际充电功率分别为 50、80、70 kW,进入下一时段后,对本时段负荷的实际数据进行校正,如图 8 中第 11 个时段(10:00-11:00)所示.在第 12 个时段(11:00-12:00),原始负荷等于基础负荷减去光伏出力,光伏出力的超短期预测平均功率比日前预测增加了 100 kW,因此原始负荷减少 100 kW.对该时段的负荷曲线校正后重新优化的结果如图 8 中带有方框的实线所示,优化充电功率为原始负荷加上充电负荷,由此得到本时段最优充电功率为 700 kW.

表 1 负荷谷区间(10:00-17:00)申请容量约束

Tab.1 Application capacity constraint of load valley(10:00-17:00)

充电站	各时段容量约束/kW							区间总容量约束/kW
	11	12	13	14	15	16	17	
节点 15	255	735	885	870	810	420	180	1 500
节点 23	195	525	795	840	840	555	255	1 500
节点 26	280	720	860	1 080	1 020	800	360	2 000
合计	730	1 980	2 540	2 790	2 670	1 775	795	5 000

表 2 负荷峰区间(17:00-24:00)申请容量约束

Tab.2 Application capacity constraint of peak load(17:00-24:00)

充电站	各时段容量约束/kW							区间总容量约束/kW
	18	19	20	21	22	23	24	
节点 15	130	390	490	520	470	280	100	1 000
节点 23	140	400	490	580	530	340	160	1 000
节点 26	160	360	510	530	490	380	170	1 000
合计	430	1 150	1 490	1 630	1 490	1 000	430	3 000

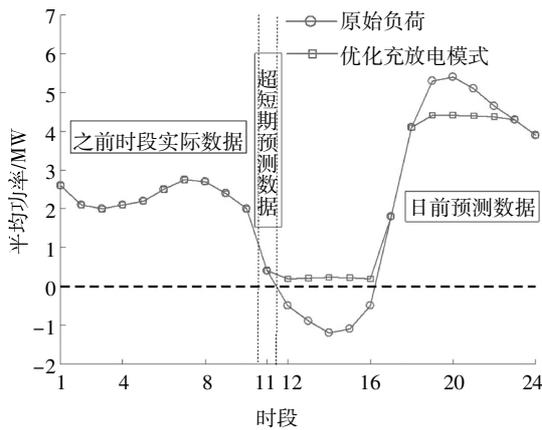


图7 第11个时段等效负荷曲线及优化充放电结果  
Fig.7 Equivalent load curve and optimized results for the 11th period

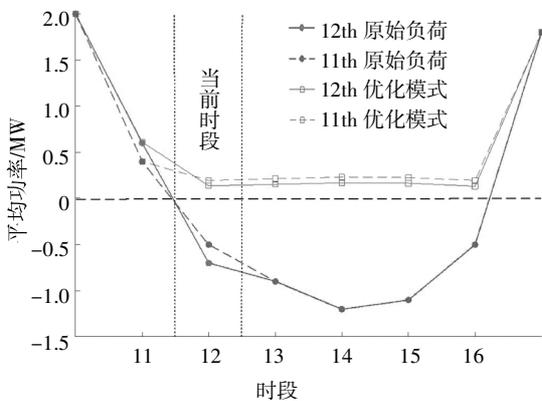


图8 第12个时段的等效负荷曲线及优化充放电结果  
Fig.8 Equivalent load curve and optimized results for the 12th period

为了研究电动汽车充放电调度对电网的影响,选取以下3个方案进行比较:

- 1)初始情况,即无电动汽车接入配网;
- 2)以网损最小为目标,仅对充电站的有功充放电进行优化;
- 3)以网损最小为目标,考虑充电桩的无功响应能力,对充电站的有功无功充放电进行优化.

分别按照方案1~3进行求解, EV调度方案和相应的评价函数值如表3所示.表中节点电压偏移量由式(23)计算

$$\Delta V = \sum_{i=1}^N \left( \frac{V_i(t) - V_i^{spec}}{V_i^{max} - V_i^{min}} \right)^2 \quad (23)$$

式中:  $V_i^{spec}$  为节点  $i$  期望电压幅值;  $V_i^{max}$ 、 $V_i^{min}$  分别为节点  $i$  的电压上、下限;  $V_i(t)$  为节点  $i$  在  $t$  时段的实际电压幅值;  $N$  为配电系统节点数目.

与方案1相比,方案2中充电站的有功优化可

以显著改善系统节点电压水平,但在降低系统网损方面取得的效果不明显;方案3考虑充电桩的无功响应对充电站进行有功无功优化可以显著降低系统网损,并进一步减小了系统节点电压偏差.图9显示了按照方案1~3对EV进行调度后,IEEE33节点配电系统各节点电压幅值变化情况.从该图可以看出,初始情况下,由于光伏渗透率过高出现功率倒送,引起光伏电站附近节点电压过高,若光伏出力进一步增加,很容易造成节点电压越限<sup>[28]</sup>;在方案2中,通过对电动汽车进行充电吸收部分光伏的过剩出力,能够有效降低各节点电压幅值.通过对比,可以发现方案3在调节节点电压偏移方面具有更好的优化效果.

表3 第12个时段充电站各调度方案及优化结果

Tab.3 Scheduling scheme for charging station and optimization result in the 12th period

编号	EV 调度方案						电压偏差	有功网损/kW
	节点 15		节点 23		节点 26			
	有功/kW	无功/kVA	有功/kW	无功/kVA	有功/kW	无功/kVA		
1	—	—	—	—	—	—	1.877	120
2	0	—	130	—	570	—	1.515	118
3	0	-411	130	-586	570	-188	1.498	94

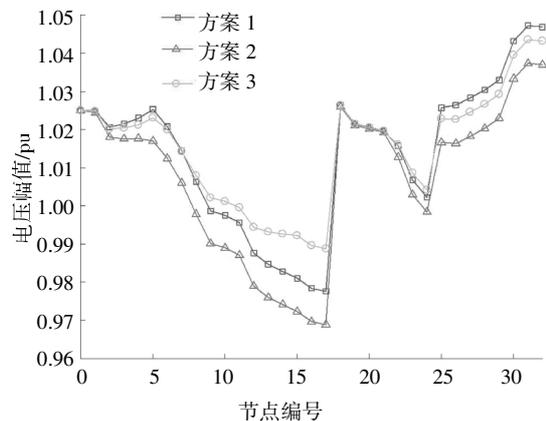


图9 第12个时段 IEEE 33-bus 配电系统各节点电压幅值  
Fig.9 Voltage amplitude of each node in IEEE 33-bus power distribution system in the 12th period

#### 4.2 负荷峰时段

假设第19个时段(18:00-19:00),实时调度层的优化结果与图7相同.电动汽车最优放电功率为937.5 kW.

分别按照前述方案1~3进行求解, EV调度方案和相应的评价函数值如表4所示.对比表3表4数

据,可以发现在负荷峰时段,系统有功网损及节点电压偏移都要比谷时段更加严重.与初始情况相比,电动汽车有序放电可以减小节点电压偏差和网络有功损耗,若考虑电动汽车充电桩的无功响应能力,则可以进一步降低节点电压偏差及系统网损.图 10 显示了按照方案 1~3 对 EV 进行调度后,IEEE 33 节点配电系统各节点电压幅值的变化情况.由图可知,初始情况下,由于负荷过重,多个节点出现了不同程度的越限,电动汽车储能的接入可以有效提高电压质量较差节点处电压的幅值.对比方案 2 与方案 3 可以看出,当考虑充电桩的无功响应时,通过无功优化即可以降低系统有功网损,也能够有效减少电压幅值变化范围,从而使得系统各节点电压幅值更接近根节点电压,系统电压分布更加均匀.

表 4 第 19 个时段充电站调度方案及优化结果  
Tab.4 Scheduling scheme for charging station and optimization result in the 19th period

编号	EV 调度方案						电压 偏差	有功 网损/ kW
	节点 15		节点 23		节点 26			
	有功/ kW	无功/ kVA	有功/ kW	无功/ kVA	有功/ kW	无功/ kVA		
1	—	—	—	—	—	—	7.687	406
2	-390	—	-187.5	—	-360	—	4.220	297
3	-390	-456	-187.5	-570	-360	-480	2.611	221

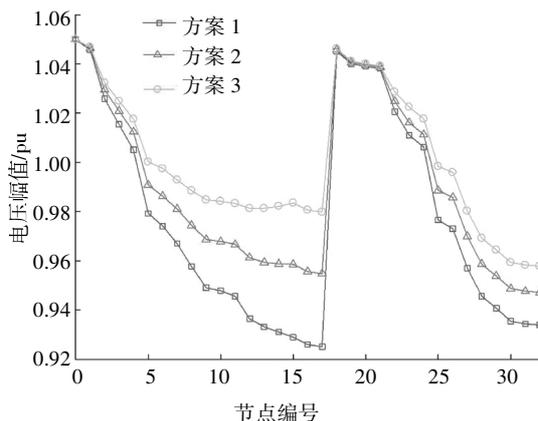


图 10 第 19 个时段 IEEE 33-bus 配电系统各节点电压幅值  
Fig.10 Voltage amplitude of each node in IEEE 33-bus power distribution system in the 19th period

### 5 结论

本文考虑了电动汽车充电桩的无功响应能力,提出了电动汽车充电站的有功及无功调度策略;充

分考虑了电动汽车的充放电需求及不确定性,采用了实时滚动优化调度方法,同时考虑了电动汽车充放电的时空分布特性,建立了双层优化模型,并分别采用二次规划、二阶锥规划求解模型.仿真结果表明,本文所采用的算法可以快速获得全局最优解,所提调度策略可以有效降低负荷峰谷差,降低系统网损,减小节点电压偏差等.

### 参考文献

- [1] 孟军,徐先勇,方璐,等.光伏发电逆变并网系统复合控制策略[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(4):87-93.  
MENG J,XU X Y,FANG L,*et al.* Hybrid control strategy of photovoltaic generation inverter grid-connected operating system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(4):87-93. (In Chinese)
- [2] 李万路,汪泉弟,李景红,等.无线充电系统耦合器自感与互感的非线性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(10):76-85.  
LI W L,WANG Q D,LI J H,*et al.* Study on nonlinearity of self-inductance and mutual inductance for couplers of wireless charging systems [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2020,47(10):76-85. (In Chinese)
- [3] 许晓艳,黄越辉,刘纯,等.分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J].电网技术,2010,34(10):140-146.  
XU X Y,HUANG Y H,LIU C,*et al.* Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology,2010,34(10):140-146. (In Chinese)
- [4] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等.电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J].电力系统自动化,2011,35(14):2-10,29.  
ZHAO J H,WEN F S,YANG A M,*et al.* Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):2-10,29. (In Chinese)
- [5] CLEMENT-NYNS K,HAESEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.
- [6] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等.电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J].中国电机工程学报,2013,33(1):1-10.  
WANG X F,SHAO C C,WANG X L,*et al.* Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):1-10. (In Chinese)
- [7] 孔祥玉,吕鑫鹏,董旭柱,等.基于负荷分类评估的配电网可靠性分析方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(4):104-111.  
KONG X Y,LÜ X P,DONG X Z,*et al.* Reliability analysis method of distribution network based on load classification evaluation [J].

- Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45 (4): 104—111. (In Chinese)
- [8] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17—23.  
TONG J J, WEN J Q, WANG D, *et al.* Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (1): 17—23. (In Chinese)
- [9] 颜湘武, 李艳艳, 张合川, 等. 基于变权分析方法的电动汽车充电设备性能综合评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 86—93.  
YAN X W, LI Y Y, ZHANG H C, *et al.* Comprehensive evaluation of EV charging equipment performance based on variable weights analysis method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(5): 86—93. (In Chinese)
- [10] 赵玉, 徐天奇, 李琰, 等. 基于分时电价的电动汽车调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 92—101.  
ZHAO Y, XU T Q, LI Y, *et al.* Research on electric vehicle scheduling strategy based on time-shared electricity price [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 92—101. (In Chinese)
- [11] 许翔泰, 张仰飞, 陈光宇, 等. 计及光伏发电的电动汽车充电优化调度研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 44—50.  
XU X T, ZHANG Y F, CHEN G Y, *et al.* Optimal scheduling of charging for electric vehicle considering photovoltaic power generation[J]. New Energy, 2019, 47(10): 44—50. (In Chinese)
- [12] 李媛媛, 葛愿, 徐正伟, 等. 计及电动汽车充电排队的微电网优化调度研究[J]. 安徽工程大学学报, 2020, 35(6): 26—32.  
LI Y Y, GE Y, XU Z W, *et al.* Research on optimal dispatching of electric vehicles charging queue in microgrid [J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2020, 35(6): 26—32. (In Chinese)
- [13] 占恺峤, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 11—18, 213.  
ZHAN K Q, SONG Y H, HU Z C, *et al.* Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 11—18, 213. (In Chinese)
- [14] MASOUM A S, DEILAMI S, MOSES P S, *et al.* Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimization considering voltage regulation [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 877—888.
- [15] 张谦, 刘超, 周林, 等. 计及可入网电动汽车最优时空分布的双层经济调度模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 40—45.  
ZHANG Q, LIU C, ZHOU L, *et al.* A bi-level economy dispatch model considering temporal and spatial optimal distribution of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (20): 40—45. (In Chinese)
- [16] KISACIKOGLU M C, OZPINECI B, TOLBERT L M. Reactive power operation analysis of a single-phase EV/PHEV bidirectional battery charger [C]// 8th International Conference on Power Electronics - ECCE. Korea (South): IEEE, 2011: 585—592.
- [17] KISACIKOGLU M C, OZPINECI B, TOLBERT L M. Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation [C]// 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Palm Springs, CA, USA: IEEE, 2010: 458—465.
- [18] FASUGBA M A, KREIN P T. Gaining vehicle-to-grid benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers [C]// 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago, IL, USA: IEEE, 2011: 1—6.
- [19] EHSANI M, FALAHI M, LOTFIFARD S. Vehicle to grid services: potential and applications[J]. Energies, 2012, 5(10): 4076—4090.
- [20] NAFISI H, AGAH S M M, ASKARIAN ABYANEH H, *et al.* Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of PHEVs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1268—1276.
- [21] MANBACHI M, FARHANGI H, PALIZBAN A, *et al.* A novel volt-var optimization engine for smart distribution networks utilizing vehicle to grid dispatch [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016; 74: 238—251.
- [22] ZHANG W J, GANDHI O, QUAN H, *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.
- [23] TAGHAVI R, SEIFIFI A R, SAMET H. Stochastic reactive power dispatch in hybrid power system with intermittent wind power generation[J]. Energy, 2015, 89: 511—518.
- [24] SOLER E M, ASADA E N, DA COSTA G R. Penalty-based nonlinear solver for optimal reactive power dispatch with discrete controls [J]. IEEE Transaction Power System, 2013; 28(3): 2174—2182.
- [25] JABR R A. Optimal placement of capacitors in a radial network using conic and mixed integer linear programming [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(6): 941—948.
- [26] 赵彪, 于庆广, 王立雯, 等. 用于电池储能系统并网的双向可扩展变流器及其分布式控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(S1): 244—251.  
ZHAO B, YU Q G, WANG L W, *et al.* Bi-directional extensible converter and its distributed control strategy for battery energy storage grid-connected system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31 (S1): 244—251. (In Chinese)
- [27] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575—2583.  
LIU Y B, WU W C, ZHANG B M, *et al.* A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575—2583. (In Chinese)
- [28] 柴园园, 郭力, 王成山, 等. 含高渗透率光伏的配电网分布式电压控制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 738—746.  
CHAI Y Y, GUO L, WANG C S, *et al.* Distributed voltage control in distribution networks with high penetration of PV [J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 738—746. (In Chinese)