

计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型

周亦洲¹, 孙国强¹, 黄文进², 胡峰², 卫志农¹, 藏海祥¹, 楚云飞¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏省 南京市 210098;

2. 盐城供电公司, 江苏省 盐城市 224002)

Strategic Bidding Model for Virtual Power Plant in Different Electricity Markets Considering Electric Vehicles and Demand Response

ZHOU Yizhou¹, SUN Guoqiang¹, HUANG Wenjin², XU Zheng², WEI Zhinong¹, ZANG Haixiang¹, CHU Yunfei¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;

2. Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224002, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A three-stage bidding process of virtual power plant (VPP) for participating in bilateral contract market, day-ahead market (DAM), real-time market (RTM) and balancing market was presented and a three-phase VPP bidding model consisting of electric vehicle (EV) and demand response (DR) was established. In this model, charging and discharging management for each EV was considered and DR was divided into price-based and incentive-based DRs. In the first stage, bilateral contract is signed and DAM bidding strategy is decided. In the second stage, RTM bidding strategy for each hour of day is decided. In the third stage, output deviation of renewable energy is balanced by balancing market and VPP is charged for it. Simulation results showed that in this model individual EV and DR were controlled effectively and VPP cost was reduced.

KEY WORDS: electric vehicle; demand response; virtual power plant; bidding strategy; different electricity markets

摘要：分析了虚拟电厂(virtual power plant, VPP)同时参与双边合同市场、日前市场(day-ahead market, DAM)、实时市场(real-time market, RTM)和平衡市场的三阶段竞标流程，并以此为依据建立了同时参与多类电力市场情况下计及电动汽车(electric vehicle, EV)和需求响应(demand response, DR)的VPP三阶段竞标模型，该模型考虑单辆EV的充放电管理，并将DR分为基于价格DR和基于激励DR。阶段1，VPP于日前签订双边合同并提交DAM竞标策略；阶段2，VPP逐个时段提交交易日RTM竞标策略；阶段3，VPP完

成电量交易，平衡市场负责消纳可再生能源出力偏差量并向VPP收取费用。仿真算例验证了所构模型的有效性，结果表明：该模型能实现单辆EV和DR的有效控制，并有效降低VPP的运营成本。

关键词：电动汽车；需求响应；虚拟电厂；竞标策略；多类电力市场

DOI : 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2879

0 引言

近年来，分布式电源因其可靠、经济、灵活、环保等特点发展迅速，然而，分布式电源大多为风电、光伏等可再生能源，其出力的随机性和不可控性给电力系统的安全稳定运行带来一定的挑战。而虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术可以很好地解决上述问题，以VPP形式聚合分布式发电机组、储能、可控负荷等分布式能源，通过能量管理系统(energy management systems, EMS)的协调优化控制，VPP可减少风电和光伏机组出力的波动性，从而提高整体的稳定性和参与电力市场时的竞争力^[1-3]。VPP可参与的电力市场包括日前市场(day-ahead market, DAM)、实时市场(real-time market, RTM)、双边合同市场、平衡市场和辅助服务市场等^[4]，同时参与多类电力市场、可控负荷以需求响应(demand response, DR)形式参与电力系统运行^[5]、聚合储能等行为均可提高VPP的灵活性，进而获得更大收益。

VPP中储能可分为传统储能和电动汽车(electric vehicle, EV)。相比于传统储能，EV不需要额外的投资，且EV大多数时候处于停驶状态^[6]，

基金项目：国家自然科学基金项目(51277052)；江苏省 2016 年度普通高校研究生科研创新工程项目(2016B44214)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51277052); The 2016 Ordinary University Graduate Student Scientific Research Innovation Project of Jiangsu Province (2016B44214).

通过对 EV 充放电的有序管理，使其在空闲时段参与到电力市场中，能起到调峰调频、配合风力和光伏发电的作用^[7]。

现有对电力市场的研究多数集中在 DAM^[8-11]。其中，文献[8]以微网形式聚合 EV 和家庭负荷，实现 EV 的有序充电和负荷的需求侧管理。文献[9]验证了以 VPP 形式聚合 EV 能有效降低自身运营成本，并减少污染气体的排放量。文献[10-11]分别考虑了 VPP 中基于激励的可中断负荷和微网中基于电价的可转移负荷。在 VPP 参与多类电力市场方面，文献[12]构建了含 EV 和风电机组的 VPP 参与 DAM 和调节市场的联合竞价优化模型。文献[13]以双边合同市场和 DAM 为背景，建立了含风电机组、光伏机组、燃气轮机和抽水蓄能电站的 VPP 竞标模型。进一步，文献[14]考虑了双边合同市场、DAM 和平衡市场背景下 VPP 的竞标模型。文献[15]提出了同时参与 DAM 和 RTM 情况下聚合风电机组、负荷和传统储能的 VPP 竞标模型。就目前而言，未有同时参与双边合同市场、DAM、RTM 和平衡市场竞争模型的研究。并且，对 VPP 中 EV 的建模大多将所有 EV 简化为一个群体^[12,16]，并未考虑单辆 EV 的充放电情况。在 DR 的研究中，一般也只考虑一种 DR 形式^[10-11]，事实上，用户可同时参与基于激励的 DR 和基于价格的 DR^[17]。

本文在前人研究的基础上，提出了同时参与双边合同市场、DAM、RTM 和平衡市场竞争情况下，聚合风电机组、光伏机组、燃气轮机、EV 和负荷的 VPP 竞标模型，该模型考虑单辆 EV 的充放电管理，并将 DR 分为基于价格 DR 和基于激励 DR。根据电力市场规则，分析 VPP 参与电力市场的 3 阶段竞标流程，并以此为依据建立 VPP 三阶段竞标模型。在此基础上，进一步探究 VPP 行为对自身运营成本的影响以及 VPP 竞标电量、EV 和 DR 的优化情况。

1 基本原理及竞标流程

1.1 VPP 基本原理

本文考虑 VPP 的聚合单元包括燃气轮机、风电机组、光伏机组、EV 和家庭负荷，并由 EMS 进行统一控制管理。通过对电价、风电和光伏出力预测信息，再依据电力市场规则，EMS 制定相应的竞标策略(竞标电价和竞标电量)，并控制燃气轮机出力、EV 充放电、DR 行为和电力市场竞标，从而实现自身运营成本最小化。

1.2 EV 基本原理

本文考虑的 EV 为家用纯 EV。EV 车主根据自

身出行情况设定次日 EV 并网时间、离网时间和每段行程的行驶距离，并与 EMS 共享信息。EMS 根据次日 EV 状态，制定相应的充放电策略。当 EV 接入电网后，由 VPP 负责 EV 充放电，保证 EV 拥有足够的电量满足行驶需求。同时，VPP 需保证参与聚合后 EV 车主获得的收益大于因此造成的损失(如电池损耗)，从而促使合作的形成。

1.3 DR 基本原理

按照响应方式的不同，本文将负荷分为固定负荷、基于电价的可转移负荷和基于激励的可中断负荷。可转移负荷是指根据电价调整运行时段，但运行功率和用电量基本保持不变的负荷。可中断负荷表示为 VPP 运营者和用户签订合同，并在合同中规定可中断负荷量和相应的激励机制，本文考虑的激励机制为中断负荷补偿。

1.4 多类电力市场下 VPP 竞标流程

考虑双边开放的电力市场^[18]，在这种模式下，发电商和用电商均可参与电力市场，电力市场交易按统一出清价结算。VPP 内即有发电机组又有负荷，因而在每个交易时段，VPP 可选择作为发电商或用电商参与竞标。基于 VPP 容量限制，考虑 VPP 作为价格接受者参与电力市场，其报价不会影响到市场电价。当 VPP 作为价格接受者时，可向市场运营机构(market operator, MO)提交较低的售电价格和较高的购电价格，从而保证竞标电量(售电量或购电量)全部中标，而 VPP 只需根据预测的电力市场电价优化自己的竞标电量^[12,15]。VPP 参与的电力市场包括双边合同市场、DAM、RTM 和平衡市场，其竞标流程可分为以下 3 个阶段。

阶段 1：DAM 开启前，VPP 在双边合同市场与 MO 签订双边合同，DAM 在交易日前一天 10 点开启，此时风电和光伏出力、DAM 和 RTM 电价均未知，EMS 通过历史数据预测交易日未知量，从而制定相应的竞标策略，并将 DAM 竞标策略提交给 MO。次日，VPP 需按提交的竞标电量完成 DAM 交易。DAM 于交易日前一天 13 点闭市，MO 在 DAM 闭市后出清 DAM 电价。

阶段 2：交易日，RTM 逐个时段开启，EMS 实时更新并重新预测风电和光伏出力，此时 DAM 电价和竞标电量为已知量，风电和光伏出力预测值更为准确。EMS 重新制定并逐个时段向 MO 提交 RTM 竞标策略。同理，在交易时段，VPP 需按照提交的竞标电量完成 RTM 交易。MO 在 RTM 闭市后出清 RTM 电价。

阶段 3：交易时段，EMS 控制 VPP 内各聚合单

元运行，并完成电能交易，MO 根据 DAM 和 RTM 出清电价与 VPP 结算交易。平衡市场在 RTM 闭市后开启，其负责消纳风电和光伏出力的偏差量并向 VPP 收取平衡电量所需的费用，表现为当实际出力大于计划出力时，VPP 以低于 RTM 统一出清价出售过剩电量，否则，VPP 以高于 RTM 统一出清价购进不足电量^[14]。

VPP 竞标流程简化图如图 1 所示。

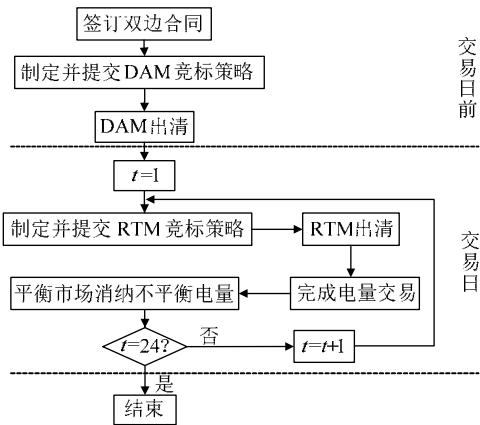


图 1 VPP 竞标流程图

Fig. 1 Flow chart of VPP' bidding process

2 VPP 竞标模型

2.1 VPP 阶段 1 竞标模型

阶段 1，VPP 需向 MO 提交 DAM 竞标策略，然而，DAM 和 RTM 的竞标电量需满足功率平衡约束，导致 VPP 在 RTM 的竞标电量会影响到 DAM 的竞标电量。因此，VPP 需同时制定 DAM 和 RTM 竞标策略，但只需提交 DAM 竞标策略，其竞标模型的目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^T (C_t^m + C_t^{gt} + C_t^{DR} + C_t^{EV}) \quad (1)$$

目标函数包含 4 个部分，分别为 t 时段 VPP 参与双边合同市场、DAM 和 RTM 的成本 C_t^m 、燃气轮机成本 C_t^{gt} 、DR 成本 C_t^{DR} 和 EV 成本 C_t^{EV} ，每部分具体表达式为

$$C_t^m = \lambda_t^{BC} D_t^{BC} + \lambda_t^{DA} (k^p P_t^{DA} - S_t^{DA}) + \lambda_t^{RT} (k^p P_t^{RT} - S_t^{RT}) \quad (2)$$

式中： λ_t^{BC} 为 VPP 与 MO 签订的 t 时段双边合同市场电价； D_t^{BC} 为 t 时段 VPP 在双边合同市场与 MO 的交易电量，为决策变量； λ_t^{DA} 、 λ_t^{RT} 分别为 t 时段 DAM 和 RTM 电价预测值； P_t^{DA} 、 S_t^{DA} 分别为 t 时段 DAM 购电量和售电量，为决策变量； P_t^{RT} 、 S_t^{RT} 分别为 t 时段 RTM 购电量和售电量，为决策变量； k^p 为购电系数，表示购电价格与售电价格之比。

燃气轮机成本包括运行成本、启停成本和环境

成本。其中，环境成本为燃气轮机排放污染气体对应的环境损失和受到的罚款。

$$C_t^{gt} = \sum_i^{n_i} \{(k_i \mu_{i,t}^o + \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} g_{i,j,t}) + (\lambda_i^{su} \mu_{i,t}^{su} + \lambda_i^{sd} \mu_{i,t}^{sd}) + [g_{i,t} \sum_{l=1}^{n_l} Q_{i,l} (V_l + Y_l)]\} \quad (3)$$

$$g_{i,t} = \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} g_{i,j,t} \quad (4)$$

式中： n_i 为燃气轮机数； k_i 为燃气轮机 i 固定成本；布尔变量 $\mu_{i,t}^o$ 、 $\mu_{i,t}^{su}$ 、 $\mu_{i,t}^{sd}$ 分别表示 t 时段燃气轮机 i 是否工作、启动、停止，是则置 1，否则置 0；将常用的燃气轮机二次运行成本函数分段线性化^[14,19]， n_j 为线性化的段数； $k_{i,j}$ 为燃气轮机 i 第 j 段发电成本斜率； $g_{i,j,t}$ 为 t 时段燃气轮机 i 第 j 段出力，为决策变量； λ_i^{su} 、 λ_i^{sd} 分别为燃气轮机 i 启、停成本； $g_{i,t}$ 为 t 时段燃气轮机 i 出力； n_l 为污染气体数量； $Q_{i,l}$ 为燃气轮机 i 第 l 项污染气体排放强度； V_l 、 Y_l 分别为第 l 项污染气体环境价值和罚款数量级。

DR 成本为 VPP 向用户支付的中断负荷补偿费用，考虑到不同中断负荷量对用户的影响程度不同，将中断补偿价格与负荷中断等级挂钩，中断等级越高，补偿价格越高。

$$C_t^{DR} = \sum_{m=1}^{n_m} (\lambda_m^{curt} L_{m,t}^{curt}) \quad (5)$$

式中： n_m 为中断等级数； λ_m^{curt} 为第 m 级中断负荷补偿价格； $L_{m,t}^{curt}$ 为 t 时段第 m 级中断负荷量，为决策变量。

EV 成本为 EV 电池损耗成本，当放电达到一定次数时，需更换 EV 电池，因而可将其表示为

$$C_t^{EV} = \sum_{v=1}^{n_v} \frac{C_v^b}{L_v^c S_v^{EV} d_v^{DOD}} \left(\frac{g_{v,t}^{vd}}{\eta_v^{vd}} + E_v d_{v,t}^{tr} \right) \quad (6)$$

式中： n_v 为 EV 数量； C_v^b 为第 v 辆 EV 的电池购买成本； L_v^c 为第 v 辆 EV 电池生命周期内的充放电循环次数； S_v^{EV} 为第 v 辆 EV 电池容量； d_v^{DOD} 为第 v 辆 EV 可用电池放电深度； $g_{v,t}^{vd}$ 为 t 时段第 v 辆 EV 放电功率，为决策变量； η_v^{vd} 为第 v 辆 EV 放电效率； $d_{v,t}^{tr}$ 为 t 时段第 v 辆 EV 行驶距离； E_v 为第 v 辆 EV 能量需求，表示 EV 单位行驶距离所需消耗的功率。

对上述公式变量补充约束条件为

$$P_t^{DA}, S_t^{DA}, P_t^{RT}, S_t^{RT} \geq 0 \quad (7)$$

VPP 在运行时需要满足如下约束条件。

1) 燃气轮机约束。

$$\mu_{i,t}^o - \mu_{i,t-1}^o \leq \mu_{i,t}^{su} \quad (8)$$

$$\mu_{i,t-1}^o - \mu_{i,t}^o \leq \mu_{i,t}^{sd} \quad (9)$$

$$0 \leq g_{i,j,t} \leq g_{i,j}^{\max} \mu_{i,t}^o \quad (10)$$

$$g_i^{\min} \mu_{i,t}^o \leq g_{i,t} \leq g_i^{\max} \mu_{i,t}^o \quad (11)$$

$$-r_i^d \leq g_{i,t} - g_{i,t-1} \leq r_i^u \quad (12)$$

$$t_i^u \mu_t^{su} \leq \sum_{h=t}^{t+t_i^u-1} \mu_{i,t}^o \quad (\forall t \leq T - t_i^u + 1) \quad (13)$$

$$t_i^d \mu_t^{sd} \leq \sum_{h=t}^{t+t_i^d-1} (1 - \mu_{i,t}^o) \quad (\forall t \leq T - t_i^d + 1) \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^{t_i^u - t_i^{ui}} (1 - \mu_{i,t}^o) = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^{t_i^d - t_i^{di}} \mu_{i,t}^o = 0 \quad (16)$$

式中： g_i^{\max} 、 g_i^{\min} 分别为燃气轮机 i 最大、最小输出功率； $g_{i,j}^{\max}$ 为燃气轮机 i 第 j 段出力上限； r_i^u 、 r_i^d 分别为燃气轮机 i 向上、向下爬坡率； t_i^u 、 t_i^d 分别为燃气轮机 i 最小开、关机时间； t_i^{ui} 、 t_i^{di} 分别为燃气轮机 i 初始开、关机时间。

式(13)–(14)和式(15)–(16)分别为燃气轮机 i 最小开、关机时间和初始开、关机时间约束式。

2) EV 约束。

$$S_v^{EV,min} \leq S_{v,t}^{EV} \leq S_v^{EV,max} \quad (17)$$

$$0 \leq g_{v,t}^{vc} \leq g_v^{vc,max} \mu_{v,t}^{vc} \quad (18)$$

$$0 \leq g_{v,t}^{vd} \leq g_v^{vd,max} \mu_{v,t}^{vd} \quad (19)$$

$$\mu_{v,t}^{vc} + \mu_{v,t}^{vd} = \mu_{v,t}^I \quad (20)$$

$$S_{v,0}^{EV} = S_v^{EV,i} \quad (21)$$

$$S_{v,24}^{EV} = S_v^{EV,f} \quad (22)$$

$$S_{v,t}^{EV} = S_{v,t-1}^{EV} + \eta_v^{vc} g_{v,t}^{vc} - \frac{g_{v,t}^{vd}}{\eta_v^{vd}} - E_v d_{v,t}^{tr} \quad (23)$$

式中： $S_{v,t}^{EV}$ 为 t 时段第 v 辆 EV 蓄电量； $S_v^{EV,min}$ 、 $S_v^{EV,max}$ 分别为第 v 辆 EV 蓄电量上、下限； $g_{v,t}^{vc}$ 为 t 时段第 v 辆 EV 充电功率，为决策变量； $g_v^{vc,max}$ 、 $g_v^{vd,max}$ 分别为第 v 辆 EV 充、放电功率上限；布尔变量 $\mu_{v,t}^{vc}$ 、 $\mu_{v,t}^{vd}$ 分别表示 t 时段第 v 辆 EV 是否处于充、放电状态，是则置 1，否则置 0； $\mu_{v,t}^I$ 表示 t 时段第 v 辆 EV 是否处于接入电网状态，是则置 1，否则置 0； $S_v^{EV,i}$ 、 $S_v^{EV,f}$ 分别为第 v 辆 EV 始、末时段蓄电量； η_v^{vc} 为第 v 辆 EV 充电效率。

式(20)表示 EV 只有处于接入电网状态才能完成充放电，且充放电不能同时进行。

3) DR 约束。

$$0 \leq L_{m,t}^{curt} \leq L_{m,t}^{curt,max} \quad (24)$$

$$L_t^{curt} = \sum_{m=1}^{n_m} L_{m,t}^{curt} \quad (25)$$

$$L_{t-1}^{curt} + L_t^{curt} \leq L^{c,max} \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^T L_t^{shift} = \sum_{t=1}^T L_t^s \quad (27)$$

$$0 \leq L_t^{shift} \leq L_t^{shift,max} \quad (28)$$

式中： $L_{m,t}^{curt,max}$ 为 t 时段第 m 级中断负荷量上限； L_t^{curt} 为 t 时段中断负荷量； $L^{c,max}$ 为连续时间内可中断负荷最大调用量； L_t^{shift} 为 t 时段转移后转移负荷量，为决策变量； L_t^s 为 t 时段可转移负荷量； $L_t^{shift,max}$ 为 t 时段转移负荷量上限。

式(26)防止可中断负荷保持高调用率导致的用户舒适度下降问题；式(27)保证可转移负荷交易日当天所需用电量。

4) 双边合同市场约束。

在双边合同市场中，允许实际交易电量与合同规定电量存在微小偏差，但总交易量必须相等。

$$(1-\alpha)G_t^{BC} \leq D_t^{BC} \leq (1+\alpha)G_t^{BC} \quad (29)$$

$$\sum_{t=1}^T D_t^{BC} = \sum_{t=1}^T G_t^{BC} \quad (30)$$

式中： α 为合同允许的偏差系数； G_t^{BC} 为 t 时段合同规定交易电量。

5) VPP 竞标电量约束。

考虑到 VPP 与主网传输功率限制，VPP 在电力市场的竞标电量需满足如下约束式

$$-G \leq P_t^{DA} - S_t^{DA} \leq G \quad (31)$$

$$-G \leq P_t^{RT} - S_t^{RT} \leq G \quad (32)$$

$$-G \leq P_t^{DA} - S_t^{DA} + P_t^{RT} - S_t^{RT} \leq G \quad (33)$$

式中 G 为电力市场最大竞标电量。

6) VPP 内部功率平衡约束。

$$\begin{aligned} & \sum_{w=1}^{n_w} g_{w,t}^{DA,W} + \sum_{s=1}^{n_s} g_{s,t}^{DA,S} + \sum_{i=1}^{n_i} g_{i,t} + \sum_{v=1}^{n_v} g_{v,t}^{vd} + P_t^{DA} + \\ & P_t^{RT} + D_t^{BC} = L_t + \sum_{v=1}^{n_v} g_{v,t}^{vc} + S_t^{DA} + S_t^{RT} \end{aligned} \quad (34)$$

$$L_t = L_t^{fix} + \sum_{m=1}^{n_m} L_{m,t}^{curt,max} - L_t^{curt} + L_t^{shift} \quad (35)$$

式中 n_w 、 n_s 分别为风电和光伏机组数； $g_{w,t}^{DA,W}$ 、 $g_{s,t}^{DA,S}$ 分别为 t 时段风电机组 w 、光伏机组 s 输出功率日前预测值； L_t 、 L_t^{fix} 分别为 t 时段总负荷量和固定负荷量。

2.2 VPP 阶段 2 竞标模型

阶段 2，VPP 需逐个时段制定 RTM 竞标策略。此时，DAM 出清电价和竞标电量为已知量，风电和光伏出力预测值更为准确，且 t 时段之前的决策变量已知。 t 时段阶段 2 竞标模型为

$$\min \sum_{h=t}^T (C_t^m + C_t^{gt} + C_t^{DR} + C_t^{EV}) \quad (36)$$

$$C_t^m = \lambda_t^{BC} D_t^{BC} + \tilde{\lambda}_t^{DA} (k^p \tilde{P}_t^{DA} - \tilde{S}_t^{DA}) + \lambda_t^{RT} (k^p P_t^{RT} - S_t^{RT}), \quad h \geq t \quad (37)$$

$$\mu_{i,t}^o - \tilde{\mu}_{i,t-1}^o \leq \mu_{i,t}^{su}, \quad h \geq t \quad (38)$$

$$\tilde{\mu}_{i,t-1}^o - \mu_{i,t}^o \leq \mu_{i,t}^{sd}, \quad h \geq t \quad (39)$$

$$-r_i^d \leq g_{i,t} - \tilde{g}_{i,t-1} \leq r_i^u, \quad h \geq t \quad (40)$$

$$S_{v,t}^{EV} = \tilde{S}_{v,t-1}^{EV} + \eta_v^{vc} g_{v,t}^{vc} - \frac{g_{v,t}^{vd}}{\eta_v^{vd}} - E_v d_{v,t}^{tr}, \quad h \geq t \quad (41)$$

$$\tilde{L}_{t-1}^{curt} + L_t^{curt} \leq L^{c,max}, \quad h \geq t \quad (42)$$

$$\sum_{h=1}^{t-1} \tilde{L}_h^{shift} + \sum_{h=t}^T L_h^{shift} = \sum_{h=1}^T L_h^s, \quad h \geq t \quad (43)$$

$$\sum_{h=1}^{t-1} \tilde{D}_h^{BC} + \sum_{h=t}^T D_h^{BC} = \sum_{h=1}^T G_h^{BC}, \quad h \geq t \quad (44)$$

$$-G \leq \tilde{P}_t^{DA} - \tilde{S}_t^{DA} + P_t^{RT} - S_t^{RT} \leq G, \quad h \geq t \quad (45)$$

$$\sum_{w=1}^{n_w} g_{w,t}^{RT,W} + \sum_{s=1}^{n_s} g_{s,t}^{RT,S} + \sum_{i=1}^{n_i} g_{i,t} + \sum_{v=1}^{n_v} g_{v,t}^{vd} + \tilde{P}_t^{DA} +$$

$$P_t^{RT} + D_t^{BC} = L_t + \sum_{v=1}^{n_v} g_{v,t}^{vc} + \tilde{S}_t^{DA} + S_t^{RT}, \quad h \geq t \quad (46)$$

式中： $\tilde{\lambda}_t^{DA}$ 、 \tilde{P}_t^{DA} 、 \tilde{S}_t^{DA} 分别为 t 时段 DAM 出清电价、购电量和售电量，为已知量； $\tilde{\mu}_{i,t-1}^o$ 、 $\tilde{g}_{i,t-1}$ 、 $\tilde{S}_{v,t-1}^{EV}$ 、 \tilde{L}_{t-1}^{curt} 分别为 $t-1$ 时段燃气轮机 i 工作布尔变量、燃气轮机 i 出力、第 v 辆 EV 蓄电量和中断负荷量，为已知量； \tilde{L}_t^{shift} 、 \tilde{D}_t^{BC} 分别为 $1 \sim (t-1)$ 时段转移后转移负荷量和双边合同市场实际交易电量，为已知量； $g_{w,t}^{RT,W}$ 、 $g_{s,t}^{RT,S}$ 分别为 t 时段风电机组 w 、光伏机组 s 输出功率实时预测值。

至此，VPP 阶段 2 竞标模型由公式(3)–(7)、(10)–(11)、(13)–(22)、(24)–(25)、(28)–(29)、(32)、(35)， $h \geq t$ 和公式(36)–(46)表示。

2.3 VPP 阶段 3 竞标模型

阶段 3，MO 按照 DAM 和 RTM 出清电价与 VPP 结算电力市场前两阶段交易，VPP 前两阶段的结算成本 C^{EM} 表达式为

$$C^{EM} = \sum_{t=1}^T (\tilde{C}_t^m + C_t^{gt} + C_t^{DR} + C_t^{EV}) \quad (47)$$

其中，

$$\tilde{C}_t^m = \lambda_t^{BC} D_t^{BC} + \tilde{\lambda}_t^{DA} (k^p \tilde{P}_t^{DA} - \tilde{S}_t^{DA}) + \tilde{\lambda}_t^{RT} (k^p \tilde{P}_t^{RT} - \tilde{S}_t^{RT}) \quad (48)$$

式中： \tilde{C}_t^m 为 t 时段 VPP 在双边合同市场、DAM 和 RTM 的结算成本； $\tilde{\lambda}_t^{RT}$ 、 \tilde{P}_t^{RT} 、 \tilde{S}_t^{RT} 分别为 t 时段 RTM 出清电价、购电量和售电量。

同时，平衡市场负责消纳可再生能源出力偏差量，VPP 需为此支付平衡电量所需的费用， t 时

段 VPP 所需支付的费用 C_t^B 可由表示为

$$C_t^B = \begin{cases} -\lambda_t^S (g_{w,t}^W + g_{s,t}^S - g_{w,t}^{RT,W} - g_{s,t}^{RT,S}), \\ g_{w,t}^W + g_{s,t}^S \geq g_{w,t}^{RT,W} + g_{s,t}^{RT,S} \\ \lambda_t^P (g_{w,t}^{RT,W} + g_{s,t}^{RT,S} - g_{w,t}^W - g_{s,t}^S), \\ g_{w,t}^W + g_{s,t}^S < g_{w,t}^{RT,W} + g_{s,t}^{RT,S} \end{cases} \quad (49)$$

式中： $g_{w,t}^W$ 、 $g_{s,t}^S$ 分别为 t 时段风电机组 w 、光伏机组 s 实际出力； λ_t^P 、 λ_t^S 分别为 t 时段平衡市场的购电价格和售电价格，其与 $\tilde{\lambda}_t^{RT}$ 的关系为

$$\lambda_t^P \geq \tilde{\lambda}_t^{RT} \geq \lambda_t^S \geq 0 \quad (50)$$

VPP 在平衡市场的成本 C^{BM} 和 VPP 实际总成本 C 表示为

$$C^{BM} = \sum_{t=1}^T C_t^B \quad (51)$$

$$C = C^{EM} + C^{BM} \quad (52)$$

3 求解流程和算例分析

3.1 求解流程

为模拟优化日 EV 状态和出行情况，本文根据 EV 出行统计规律，采用蒙特卡罗方法生成每辆 EV 的并网时间、离网时间和每段行程的行驶距离。为提高模型的适应性，EV 的始、末蓄电量在蓄电量上、下限范围内随机生成。采用 GAMS 软件 CPLEX 求解器对所构混合整数线性规划问题进行求解，求解流程如图 2 所示。

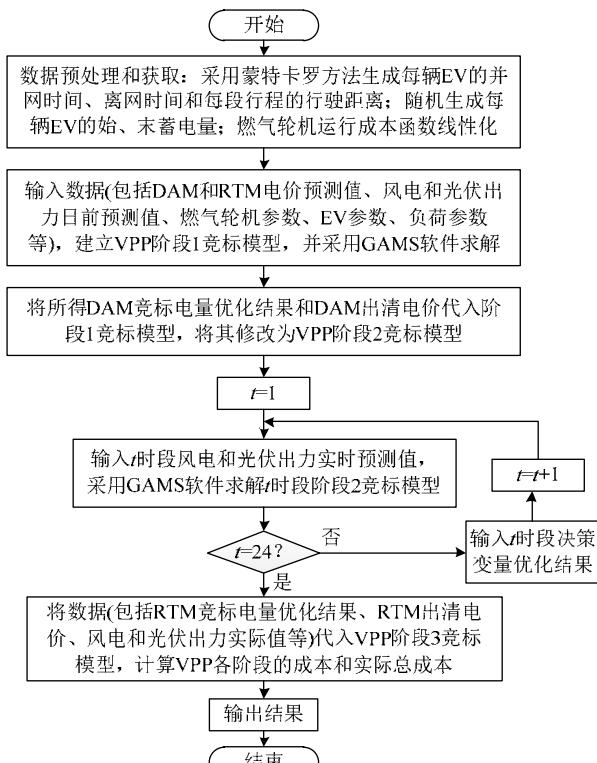


图 2 GAMS 求解流程图

Fig. 2 Flow chart of solution by GAMS

3.2 模型参数

为验证上述模型，本文以一台燃气轮机、一个风电机组、一个光伏机组和4000户家庭构成VPP。燃气轮机采用TAU5670型号^[20]，将其二次运行成本函数分三段线性化，具体数据如附录A表A1所示，考虑燃气轮机排放的污染气体为CO₂、CO、SO₂、NO_x，其排放强度、环境价值、罚款数量级见附录A表A2^[21]。DAM和RTM电价预测值和实际值见附录A图A1^[22]，风电出力、光伏出力预测值和实际值见附录A图A2、A3^[13]。为区分购电价格和售电价格，将购电系数取为1.1。平衡市场中，购电价格和售电价格分别为RTM出清价的1.3和0.8倍。假设4000户家庭拥有尼桑LEAF、比亚迪E6、三菱iMi和宝马MINI E类型EV各1000辆，EV参数见附录A表A3^[23]，并且，EV蓄电池上、下限分别设为电池容量的95%和15%，充、放电功率均为电池容量的20%，充、放电效率均为90%。EV出行规律统计数据见文献[24]。固定负荷量、可中断负荷量和可转移负荷量如附录A图A4所示。可中断负荷分为三级，每级中断负荷补偿价格分别设为45 €/MW·h、50 €/MW·h、55 €/MW·h，可中断负荷量均设为总负荷的10%。

3.3 优化结果及分析

1) VPP行为对利润影响。

为衡量VPP同时参与多类电力市场、聚合EV和DR行为对运营成本的影响，设置5种方案如表1所示。

表1 5种不同的VPP构建方案
Tab. 1 Five different composition of VPP

方案	聚合EV	DR行为	参与双边合同市场	参与DAM	参与RTM
1	√	√	×	√	×
2	√	√	√	√	×
3	×	√	√	√	√
4	√	×	√	√	√
5	√	√	√	√	√

采用GAMS软件CPLEX求解器对上述5种方案进行求解，所得结果如表2所示。

表2 5种方案VPP成本对比
Tab. 2 Cost comparison of VPP among five methods

方案	前两阶段成本/€	平衡市场成本/€	实际总成本/€
1	1 563.23	383.75	1 946.98
2	1 334.15	383.75	1 717.90
3	2 103.94	140.08	2 244.02
4	1 204.35	140.08	1 344.43
5	925.55	140.08	1 065.63

从表2方案1、2、5对比可以看出，方案1，VPP只参与DAM，其实际成本最高。随着VPP参

与电力市场类型的增多，成本逐渐降低。方案5中，VPP同时参与电力市场的类型最多，其实际成本也最低。此外，方案1和方案2中，VPP不参与RTM，其在平衡市场的成本高于其他方案，这是日前风电和光伏出力预测误差更大所致。方案3，VPP不聚合EV，无法对EV充放电进行有效管理，EV在接入电网时开始充放电，直至满足自身需求为止，表中所给的实际成本为VPP运营成本和EV车主所需支付费用(充电成本-放电收益+电池损耗成本)总和，结果显示，方案3的实际成本远大于方案5，说明由VPP控制EV进行有序充放电能显著减少VPP和EV车主的总成本，这也将促使EV车主和VPP的合作。进一步，EV车主将EV并网时段管理权交予VPP后，可与VPP运营者约定收益分配制度，实现双赢。方案4中，用户不参与DR，所有负荷均为固定负荷，其成本也大于方案5。综上所述，VPP同时参与多类电力市场、聚合EV、用户参与DR行为均能有效降低VPP运营成本。

2) DAM和RTM交易情况分析。

图3为VPP在DAM和RTM的竞标电量优化结果。由图可知，1—9时段，电力市场电价低，VPP选择在电价更低的市场(RTM)购电满足自身需求，从下文的分析也可以看出，2—5时段为电价最低时段，EV选择在该时段完成大部分充电，导致该时段VPP的购电量最大。1时段和6时段，VPP对电量的需求不大，且DAM和RTM电价差额大于购售电差价，因而VPP在两个市场通过套利获取更大利润。10—13时段，电力市场电价高，VPP在电价更高的市场售电，并且，11—13时段为电价最高时段，EV选择在该时段完成绝大部分放电，因而此时VPP售电量大于其他时段，此外，在12时段同样存在套利情况；14—24时段，DAM和RTM电价差额小于购售电差价，VPP在电价更低市场购电满足自身需求。

3) EV优化结果分析。

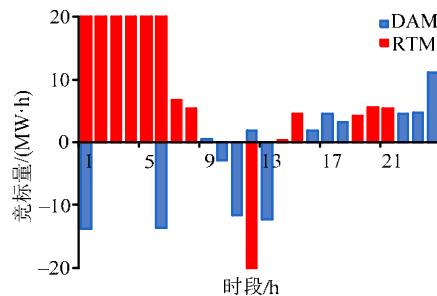


图3 DAM和RTM每时段交易电量
Fig. 3 Electricity purchased or sold in DAM and RTM for each period

为了分析不同EV优化情况，从每种类型的EV中各选取一辆，其参数见附录A表A4，所得优化结果如图4所示。可以看出，虽然每辆EV的优化结果存在相似的特性，如EV充电时间大多集中在2—5时段和24时段，而放电时间集中在11—13时段，但由于每辆EV蓄电量上下限、最大充放电功率、始末蓄电量、行驶规律等参数的不同，优化结果存在差异。当EV初始电量低时(如选取的尼桑LEAF和三菱iMi)，为满足自身行驶需求以及在高电价时段向电网放电，其在2—5时段以最大充电

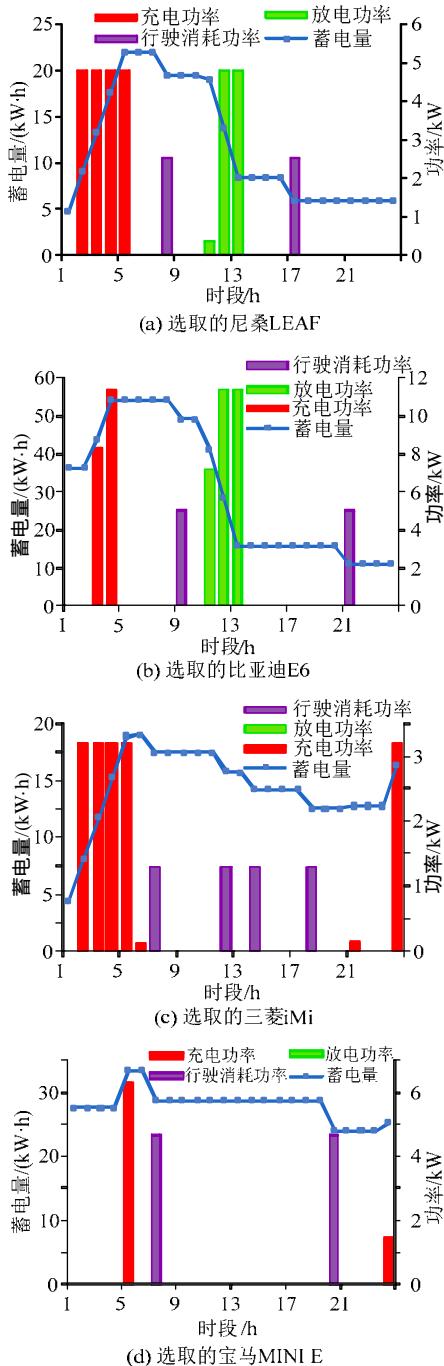


图4 选取的4辆EV每时段优化结果

Fig. 4 Optimization results of four selected EVs for each period

功率充电，直至达到蓄电量上限，而初始电量高的EV(如选取的比亚迪E6和宝马MINI E)仅需少量充电时间即可达到蓄电量上限。并且，当EV末电量低时(如选取的尼桑LEAF和比亚迪E6)，除行驶消耗和所需末电量外，其他电量在高电价时段(11—13时段)放出，而末电量高的EV(如选取的三菱iMi和宝马MINI E)则需在最后时段充电。

4) DR优化结果分析。

每时段负荷量优化结果见图5。从图5可以看出，高电价时段，VPP选择在不影响用户舒适度的前提下，中断部分可中断负荷。同时，可转移负荷从高电价时段转移到了低电价时段。通过可中断负荷和可转移负荷的共同作用，在高电价时段，VPP能够出售更多的电量，从而获得更大的收益。

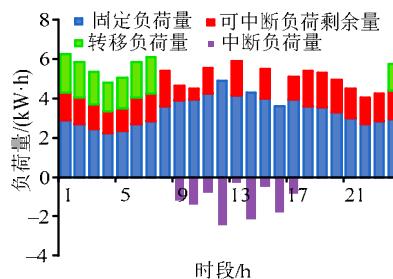


图5 每时段负荷量优化结果

Fig. 5 Optimized results of load data for each period

4 结论

本文建立了同时参与双边合同市场、DAM、RTM 和平衡市场的情况下计及 EV 和 DR 的 VPP 三阶段竞标模型，并通过算例进行了仿真验证，得出结论如下：

- 1) VPP 同时参与多类电力市场、聚合EV、用户参与DR行为均能降低VPP的运营成本。
- 2) 该模型能实现单辆EV的充放电管理。而每辆EV的优化情况随参数的不同存在差异。
- 3) 通过可中断负荷和可转移负荷的共同作用，使得VPP在高电价时段的售电量更多，从而提高了VPP的经济效益。

本文下一步研究工作包括探究EV车主和VPP的收益分配方法，以及考虑VPP面临的不确定性因素。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/column/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 陈春武,李娜,钟朋园,等.虚拟电厂发展的国际经验及启示[J].电网技术,2013,37(8):2258-2263.
Chen Chunwu, Li Na, Zhong Pengyuan, et al. Review of virtual

- power plant technology abroad and enlightenment to China[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2258-2263(in Chinese).
- [2] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.
- Liu Jizhen, Li Mingyang, Fang Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceeding of CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111(in Chinese).
- [3] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
- Wei Zhinong, Yu Shuang, Sun Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9(in Chinese).
- [4] Morais H, Pinto T, Vale Z, et al. Multilevel negotiation in smart grids for VPP management of distributed resources[J]. IEEE Intelligent Systems, 2012, 27(6): 8-16.
- [5] 田世明, 王蓓蓓, 张晶. 智能电网条件下的需求响应关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3576-3589.
- Tian Shiming, Wang Beibei, Zhang Jing. Key technologies for demand response in smart grid[J]. Proceeding of CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589(in Chinese).
- [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 Xifan, Shao Chengcheng, Wang Xiuli, et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceeding of CSEE, 2013, 33(1): 1-10(in Chinese).
- [7] Sortomme E, El-sharkawi M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 351-359.
- [8] Mesaric P, Krajcar S. Home demand side management integrated with electric vehicles and renewable energy sources[J]. Energy and Buildings, 2015, 108(1): 1-9.
- [9] Arslan O, Karasan O E. Cost and emission impacts of virtual power plant formation in plug-in hybrid electric vehicle penetrated networks[J]. Energy, 2013(60): 116-124.
- [10] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.
- Fan Songli, Ai Qian, He Xing. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming[J]. Proceeding of CSEE, 2015, 35(16): 4025-4034(in Chinese).
- [11] 邢龙, 张沛超, 方陈, 等. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.
- Xing Long, Zhang Peichao, Fang Chen, et al. Optimal operation for microgrid using generalized demand side resources[J]. Automation of Electric Systems, 2013, 37(12): 7-12(in Chinese).
- [12] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102.
- Yang Jiajia, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs for plug-in vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Systems, 2014, 38(13): 92-102(in Chinese).
- [13] Pandžić H, Kuzle I, Capuder T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy, 2013(101): 134-141.
- [14] 余爽, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 43-49.
- Yu Shuang, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Systems, 2014, 38(22): 43-49(in Chinese).
- [15] Rahimian M, Baringo L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: price-taker robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2676-2687.
- [16] 段翩, 朱建全, 刘明波. 基于双层模糊机会约束规划的虚拟电厂优化调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 58-67.
- Duan Pian, Zhu Jianquan, Liu Mingbo. Optimal dispatch of virtual power plant based on bi-level fuzzy chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 58-67(in Chinese).
- [17] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
- Zhang Qin, Wang Xifan, Wang Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106(in Chinese).
- [18] Singh S N, Erlich I. Strategies for wind power trading in competitive electricity markets[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 249-256.
- [19] Pandžić H, Morales J M, Conejo A J, et al. Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming [J]. Applied Energy, 2013(105): 282-292.
- [20] Solar Turbines[EB/OL]. [2016-09-01]. <http://mysolar.cat.com/cda/layout?m=41079&x=7>.
- [21] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.
- Qian Kejun, Yuan Yue, Shi Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceeding of CSEE, 2008, 28(29): 11-15(in Chinese).
- [22] EEX[EB/OL]. [2016-08-01]. <http://www.eex.com/en/Market%20Data>.
- [23] Fotouhi A, Auger D J, Propp K, et al. A review on electric vehicle battery modelling: from lithium-ion toward lithium-sulphur[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(56): 1008-1021.
- [24] Lee T, Bareket Z, Gordon T, et al. Stochastic modeling for studies of real-world PHEV usage: driving schedule and daily temporal distributions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1493-1502.



收稿日期：2016-11-04。

作者简介：

周亦洲(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为虚拟电厂, E-mail: hhuzhouyizhou@163.com;

孙国强(1978), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制, E-mail: hhusunguoqiang@163.com。

周亦洲

(责任编辑 徐梅)

附录 A

表 A1 TAU5670 燃气轮机参数

Tab. A1 Parameters of TAU5670 gas turbine

最大/最小输出 功率/(MW·h)	向上/下爬坡率/ (MW·h)	启/停成本/ €	固定成本/ (€MW)
5.67/2.5	3/3	30/30	30
1 段斜率/ (€MW)	2 段斜率/ (€MW)	3 段斜率/ (€MW)	最小开/关 机时间/(h)
40	45	50	2/2
			初始开/关机 时间/(h)
			0/1

表 A2 燃气轮机污染气体参数

Tab. A2 Pollutant emission of gas turbine

污染气体	NO _x	CO ₂	CO	SO ₂
排放量/(kg/MW·h)	0.618 8	184.082 9	0.1702	0.000 928
环境价值/(\$/kg)	1.00	0.002 875	0.125	0.75
罚款数量级/(\$/kg)	0.250	0.001 25	0.020	0.125

表 A3 EV 参数

Tab. A3 Parameters of EV

汽车类型	电池容量/(kW·h)	能量需求/(kW/mile)	电池成本/\$
尼桑 LEAF	24	0.228	9600
比亚迪 E6	57	0.229	22 800
三菱 iMi	16	0.161	6400
宝马 MINI E	35	0.233	14 000

表 A4 选取的 4 辆 EV 输入参数

Tab. A4 Input parameters of four selected EVs

EV 类型	始、末蓄电量/ (kW·h)	出行时段/ h	每个出行时段对应的 行驶距离/(mile)
尼桑 LEAF	4.68/5.86	8,17	11,11
比亚迪 E6	36.42/10.75	9,21	22,22
三菱 iMiEV	3.56/13.06	7,12,14,18	8,8,8,8
宝马 MINI E	27.58/25.22	7,20	20,20

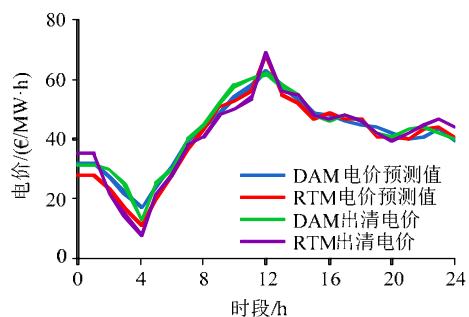


图 A1 每时段电力市场电价

Fig. A1 Electricity market price for each time period

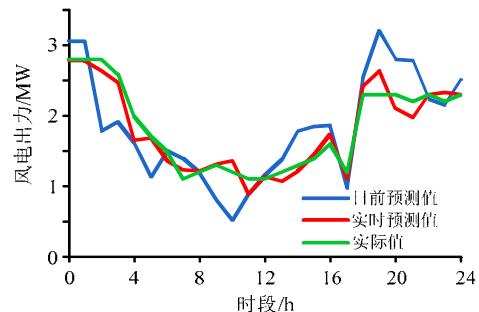


图 A2 每时段风电出力

Fig. A2 Power output of the wind power plant for each time period

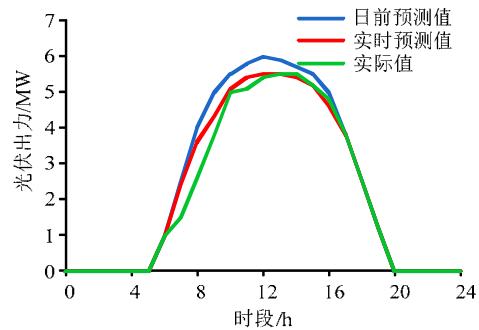


图 A3 每时段光伏出力

Fig. A3 Power output of the photovoltaic power plant for each time period

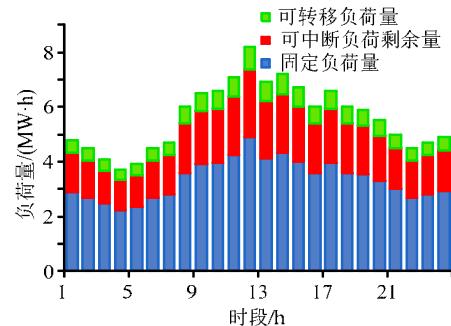


图 A4 每时段负荷量

Fig. A4 Load data for each time period