

分时电价下电动汽车参与虚拟电厂的经济优化调度方法

王世谦¹, 贾一博¹, 白宏坤¹, 王圆圆¹, 华远鹏¹, 卜飞飞¹, 杨平²

(1. 国网河南省电力公司 经济技术研究院, 郑州 450052; 2. 西南交通大学 电气工程学院, 成都 611756)

Economic optimization scheduling method of electric vehicle participating in virtual power plant under time-of-use price

WANG Shiqian¹, JIA Yibo¹, BAI Hongkun¹, WANG Yuanyuan¹, HUA Yuanpeng¹, BU Feifei¹, YANG Ping²

(1. Economic Technology Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

摘要:随着物联网以及智慧电网的迅速发展,供需平衡中需求侧资源的作用逐渐增大。然而,大量无序应用需求响应技术会对配电网的运行可靠性产生影响。针对此类问题,提出了电动汽车基线负荷预测与负荷削减、负荷转移两种激励型需求响应策略相结合的虚拟电厂经济优化调度方法。首先,根据历史数据采用三次指数平滑法完成风/光伏电站出力及电动汽车基线负荷的数据预测,观测电力用户的可调能力;然后,基于分时电价机制以虚拟电厂经济最优为目标,增加功率平衡、风/光新能源预测出力和储能系统运行成本等系统约束条件,建立虚拟电厂经济最优调度模型;最后,以河南郑州某地5个电动汽车充电站和风光电站等实际数据验证所提出方法的精准性和有效性。

关键词:电动汽车;虚拟电厂;负荷预测;需求响应技术;经济最优调度

Abstract: With the rapid development of IoT and smart grid, the role of demand-side resources in supply-demand balance is gradually increasing. However, a large number of disorderly applications of demand response techniques can affect the reliability of distribution networks. To address such problems, a virtual power plant economic optimal scheduling method combining baseline load forecasting with load reduction and load transfer is proposed. Firstly, based on the historical data, the output of wind/optical power station and the baseline load of electric vehicles are forecasted by using the triple exponential smoothing method, and the adjustable capacity of power users is observed. Then, based on the time-sharing tariff mechanism with the objective of virtual power plant economic optimum, system constraints such as power balance, wind/light new energy forecast output and energy storage system operation cost are added to establish the electric virtual. Finally, the accuracy and effectiveness of the proposed method are verified by the actual data of 5 centralized charging stations and wind power stations in Zhengzhou, Henan Province.

Key words: electric vehicle; virtual power plant; load forecasting; demand response technology; economically optimal scheduling

0 引言

近年来,以化石能源为主要原料的传统发电技术暴露出能源短缺及环境污染等问题,世界各地迫切寻求改善电力系统现状的方案,对绿色清洁能源提出了更高的要求^[1-3]。电动汽车(electric vehicles, EV)作为解决能源替代、环境污染等问题的智能交通基础设施,近年来得到快速发展。在此背景下,分布式电源(distributed generator, DG)以其经济、环保等优势受到青睐与应用^[4-5]。由于单一的分布式电源发电具有容量小、不稳定的特性^[6-7],无法直接参

与并网及电力市场运作,故需以聚合商形式将分布式电源整体投入电力系统调度。虚拟电厂^[8-9](virtual power plant, VPP)的概念作为实现该思路的重要方法应运而生。虚拟电厂依托于高速、可靠的通信技术和强大算力的软件系统,将分布式电源、电动汽车、可控负荷、储能系统等多种分布式能源聚合在一起^[10-12],以求扩充容量并稳定出力。

针对VPP而言,文献[13]利用储能系统的储能与供能的特性,在VPP系统中有效平稳了分布式电源发电的不确定性和波动性,并提升了系统的经济效益,但由于其优化的目标调度模型中分布式电源是单一的风力发电,虚拟电厂的概念没有得到充分体现;文献[14]针对可调度的电动汽车数量和风电发力的不确定性,应用鲁棒优化法构建了虚拟电厂的

收稿日期:2023-04-08;修回日期:2023-06-29

基金项目:国网河南省电力公司科研项目(5217L0220007)

优化调度模型,但未考虑光伏发电等其他分布式电源发电的不确定性及其经济性;文献[15]在将风力电源、光伏电源、电转气、EV等分布式能源聚合成虚拟电厂的基础上,建立了多协同市场下含电动汽车虚拟电厂优化调度模型,但未考虑不同类型电动汽车的充电行为;文献[16]根据需求响应的不同机理,分析了需求响应参与激励引导调度对此类VPP运行收益的影响,然而未对VPP聚合的分布式能源建立精细化模型;文献[17]以VPP经济效益最优为目标,在满足各约束条件的前提下,对其进行调度优化策略研究,但未对分布式电源及储能系统可以带来的多方面效益进行分析研究。

基于以上分析,本文提出了分时电价机制下考虑混合类型EV充电行为的电动汽车基线负荷预测与负荷削减、负荷转移两种激励型需求响应策略结合的VPP经济优化调度方法,实现了能源调控及经济效益最大化。首先利用三次指数平滑预测法得到风/光伏电站出力、电动汽车用户基线负荷的预测数据;然后基于预测数据以VPP经济最优为目标建立了考虑激励需求响应的VPP经济最优调度模型;最后基于该模型得出最优解从而实现虚拟电厂的最优经济调度。

1 电动汽车参与的虚拟电厂“源荷”预测方法

1.1 虚拟电厂系统组成单元概述

虚拟电厂系统主要包括发电单元、储能单元及耗能负荷单元,主要作用为满足供需合约、参与市场电力调度,其组成单元如图1所示。

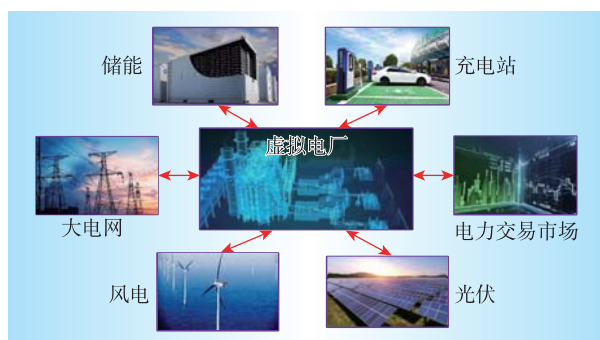


图1 虚拟电厂系统组成单元示意

Fig. 1 Schematic of virtual power plant system component units

风/光伏电站出力不可控,且电动汽车基线负荷具有随机性,因此我们需要选取合适的预测方法对它们实现预测,并利用预测数据完成虚拟电厂的调度策略。

通过对比研究,三次指数平滑法具有样本需求

量小、计算简单、适应性较强与结果较为稳定的特点。由于其具有处理非线性变化趋势的特性,三次指数平滑法很适合应用在隐含周期性、季节性和趋势性变化的电量数据预测上。

1.2 风/光伏电站出力预测

风电、光伏出力主要受环境条件影响,所以关注发电机组外部环境的变化是关键。本文采用三次指数平滑法完成风/光伏电站未来24 h的出力数据预测。

在指数平滑法中,所有历史观测数据均会对当前平滑预测值产生影响,但它们占据的权重比例随着参数幂的增大而逐渐缩减。而三次指数平滑法可同时兼顾时间序列的层次性、趋势性、季节性,可对呈非线性变化趋势的时间序列进行预测。三次指数平滑预测法公式组表示如下

$$N_j = \alpha \frac{P^{j-1}}{S^{j-1}} + (1 - \alpha)(N_{j-1} + T_{j-1}) \quad (1)$$

$$T_j = \beta(N_j - N_{j-1}) + T_{j-1}(1 - \beta) \quad (2)$$

$$S_j = \gamma \frac{P_{j-p}}{N_{j-p}} + S_{j-p}(1 - \gamma) \quad (3)$$

式中: N_j 为层次的预估平滑值; T_j 为趋势的预估平滑值; S_j 为季节的预估平滑值; j 为当前时刻点; P^{j-1} 为前一个时刻点的发电量; α 、 β 、 γ 分别为层次、趋势和季节的平滑因子($0 < \alpha$ 、 β 、 $\gamma < 1$); p 为季节周期; P_{j-p} 为上一个季节周期的发电量。

未来 q 时刻点的发电量预测值为

$$P^{j+q} = (T_j + N_j q) S_{j-p+q} \quad (4)$$

式中: P^{j+q} 为未来 q 时刻点的预测值; q 为预测时刻的点数; p 为季节周期; S_{j-p+q} 为上一个季节周期后的 q 时刻点的预估平滑值。

本文采用三次指数平滑法对风/光伏电站出力完成预测,其分3步完成:①整理分析河南郑州某地提供的光伏电站和典型平原风电站出力历史数据,训练测试得到风力发电的平滑因子 $\alpha=0.6$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.3$ 和光伏发电的平滑因子 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.2$;②利用Jupyter notebook软件将风/光发电出力历史数据及风/光发电的平滑因子代入式(1)一式(3)中求解,得到未来24 h的层次预估平滑值、趋势预估平滑值、季节预估平滑值;③将3类预估平滑值代入式(4)求解得到未来24 h的风/光出力预测数据。

1.3 电动汽车基线负荷预测

用户基线负荷是评判各类不同需求响应实施项目中电力用户响应负荷减少程度及价值的重要标志,同时也是对积极响应调控需求方进行激励经济补偿发放的重要依据。

据电动汽车的不同用途,其分为以下3类:私家车、出租车、公交车。私家电动汽车的市场占有率将越来越高,预计未来将占总车辆数的70%,逐渐成为新能源各类型汽车的主体。本文通过聚合分析,发现电动汽车的实时功率分布与居民的出行时间大致相似,进一步增大了用电峰谷差,且电动汽车负荷具有可削减及转移特性,因此考虑需求响应有利于实现削峰填谷、帮助虚拟电厂获取更大效益。

本文采用三次指数平滑法对电动汽车基线负荷完成预测,其分3步完成:①整理分析河南郑州某地提供的5个集中式充电桩数据,获得电动汽车基线负荷历史数据,训练测试得到电动汽车基线负荷的平滑因子 $\alpha=0.6$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.5$;②利用Jupyter notebook软件将电动汽车基线负荷历史数据及电动汽车基线负荷的平滑因子代入式(1)一式(3)中,求解得到未来24 h的层次预估平滑值、趋势预估平滑值、季节预估平滑值;③将3类预估平滑值代入式(4)求解得到未来24 h的电动汽车基线负荷预测数据。

2 考虑电动汽车参与激励需求响应的虚拟电厂优化调度模型

虚拟电厂聚合协调包括风光发电、储能装置、电动汽车充电可控负荷等分布式能源与大电网进行电力交易,改善电网运行状态。分时电价的实行也将鼓励VPP通过调整发电规划以降低发电成本,参与电网削峰填谷而取得良好的经济效益。

2.1 负荷聚合激励需求响应

需求响应强调了需求侧的可控资源能够替代发电侧供应能源的概念。需求响应分为基于激励的需求响应和基于电价的需求响应。

基于电价的需求响应指用户根据电价信号的变化,相应地调整用电需求,合理控制用电成本的一种参与行为。分时电价作为调控基本条件,通过构建含用电成本的经济效益最优目标函数使得基于电价的需求响应可以直接体现在用电负荷预测中。因此,本文调度策略在分时电价固定不变的情况下仅需要考虑激励的需求响应。

基于激励的需求响应前期,用户上报可调容量与时段,虚拟电厂协调响应指标后签订响应合同,规定负荷削减和负荷转移的时间与容量;用户执行合同,在响应时段内减少用电量或改变用电时间,并获得约定的补偿。

对用户基线负荷在激励合同需求响应项目中的应用进行研究,提出基于需求侧电动汽车负荷削减和负荷转移的需求响应的决策优化方案:VPP作

为各方代表与电力市场约定,然后电动汽车用户按照约定在相应的时间减少用电量或转移用电高峰时段,则可以获得约定激励补偿。根据基线负荷和决策结果的执行情况进行激励结算,以虚拟电厂利润最大化为最终目标决策优化方案。

2.2 目标函数

以虚拟电厂经济最优建立目标函数,本文考虑了电动汽车需求响应激励补偿成本、储能电池和风光发电的运营维护成本、虚拟电厂售电效益及从电网获得的补贴效益等5个方面。

2.2.1 需求响应激励补偿成本

需求响应激励补偿成本主要包括需求响应参与方的负荷转移激励成本和负荷削减激励成本。

需求响应激励补偿成本如下

$$C_t = C_t^{LC} + C_t^{LS} \quad (5)$$

负荷削减成本如下

$$C_t^{LC} = \sum_{r \in N^{LC}} (p_n^{LC0} + p_n^{LC} q_n^{LC} I_n^{LC}) \quad \forall t \in N_T \quad (6)$$

负荷转移成本如下

$$C_t^{LS} = \sum_{r \in N^{LS}} (p_n^{LS0} + p_n^{LS} q_n^{LS} I_n^{LS}) \quad \forall t \in N_T \quad (7)$$

式中: C_t 为需求响应激励补偿成本; C_t^{LC} 和 C_t^{LS} 分别为 t 时段内虚拟电厂应支付需求响应参与方的负荷转移和负荷削减成本; N_T 为实行优化调度的24个时段集合,每个时段为1 h; q_n^{LC} 为第 r 个签订的削减合同规定在 t 时段的负荷削减量; p_n^{LC} 为第 r 个签订的削减负荷合同约定的 t 时段补偿单价; p_n^{LC0} 为第 r 个签订的削减负荷合同在 t 时段应支付的实际初始成本; I_n^{LC} 为削减合同的二进制状态指标,1代表合同被执行,0代表合同未执行; N^{LC} 为负荷削减合同的集合; q_n^{LS} 为第 r 个签订的转移合同规定在 t 时段的负荷转移量; p_n^{LS} 为第 r 个签订的转移负荷合同约定的 t 时段补偿单价; p_n^{LS0} 为第 r 个签订的转移负荷合同在 t 时段应支付的实际初始成本; I_n^{LS} 为转移合同的二进制状态指标,1代表合同被执行,0代表合同未执行; N^{LS} 为负荷转移合同的集合。

2.2.2 储能电池的运营维护成本

储能系统运行维护成本主要考虑储能系统运行增减电量与储能系统的额定功率。

储能系统运行维护成本为

$$C_t^{dy} = b \times P_t^{Ba} + a \times E_t^{Ba} \quad (8)$$

式中: C_t^{dy} 为 t 时段储能系统运行维护成本; b 为储能系统运行成本系数; P_t^{Ba} 为 t 时段储能系统增减电量; a 为储能系统维护成本系数; E_t^{Ba} 为储能系统的额定功率。

2.2.3 风/光发电的运营维护成本

风/光发电站运行维护成本主要考虑风光电站的发电量。

风光发电的运营维护成本为

$$C_t^{\text{sw}} = \lambda_w P_t^{\text{wB}} + \lambda_{\text{pv}} P_t^{\text{pvB}} \quad (9)$$

式中: C_t^{sw} 为 t 时段光伏组件与风电机组的维护成本; λ_w 为风电机组的运行维护成本系数; P_t^{wB} 为 t 时段风电机组的发电量; λ_{pv} 为光伏组件的运行维护成本系数; P_t^{pvB} 为 t 时段光伏发电的发电量。

2.2.4 虚拟电厂的售电效益

虚拟电厂可以通过调度来协调系统各组成单元,为保证电量供需平衡及经济收益,虚拟电厂通过电力交易市场与大电网进行购售电交易。

虚拟电厂的售电效益为

$$f_t^s = -P_t^G C_t^{\text{gs}} + P_t^{\text{pv}} C_t^{\text{gs}} + P_t^{\text{w}} C_t^{\text{gs}} \quad (10)$$

式中: f_t^s 为 t 时段虚拟电厂购售电效益; P_t^G 为虚拟电厂在 t 时段向大电网购电电量; C_t^{gs} 为虚拟电厂在 t 时段购电电价; P_t^{w} 为 t 时段风电机组的发电量; P_t^{pv} 为 t 时段光伏发电的发电量。

2.2.5 虚拟电厂从电网获得的需求响应补贴

为激励虚拟电厂通过需求响应协调调度,实现电力负荷削峰填谷,减轻电网供电压力,电网将给予虚拟电厂一定的需求响应补贴。

需求响应补贴表示如下

$$f_t^e = L_i^{\text{lc}} p_i^r + L_i^{\text{ls1}} p_i^r - L_i^{\text{ls2}} p_i^r \quad (11)$$

式中: f_t^e 为 t 时段虚拟电厂从电网的需求响应补贴效益; L_i^{lc} 为 t 时段负荷削减量; p_i^r 为虚拟电厂在 t 时段执行需求响应的补贴价格; L_i^{ls1} 为虚拟电厂在 t 时段执行负荷转移的电量; L_i^{ls2} 为虚拟电厂执行负荷转移到第 i 时段的电量; p_i^r 为第 i 个时段执行需求响应的补贴价格。

综合上述成本及效益,虚拟电厂经济最优调度模型目标函数为

$$\text{Max } f = \sum_{i=1}^{24} (f_t^s + f_t^e - C_t - C_t^{\text{dy}} - C_t^{\text{sw}}) \quad (12)$$

2.3 约束条件

基于虚拟电厂系统组成单元特性,目标函数需添加风/光发电运行、电力市场交易量、储能系统容量及充放电效率、功率平衡、激励需求响应等约束条件。

2.3.1 风/光发电运行约束

风/光发电运行约束条件主要考虑光伏发电及风力发电的分时发电量有限,因此我们需要考虑风/光发电量的上限值。

风电运行约束为

$$0 \leq P_t^{\text{w}} \leq P_t^{\text{wB}} \quad (13)$$

光伏运行约束为

$$0 \leq P_t^{\text{pv}} \leq P_t^{\text{pvB}} \quad (14)$$

式中: P_t^{w} 为 t 时段风电机组的有效发电量; P_t^{pv} 为 t 时段光伏电站的有效发电量。

2.3.2 向电网购电及储能的电量约束

在不可控分布式电源优先利用原则上,大电网协调分时电价以及发电侧供电情况下的电力市场交易运行。为防止虚拟电厂无限制向电网购电,增加电网负担,虚拟电厂必须约束同一时刻电力交易量,且蓄能系统储存或放出的电量受系统容量及充放电功率限制。

售电最大电量约束为

$$P_{\min}^G \leq P_t^G \leq P_{\max}^G \quad (15)$$

储能最大电量约束为

$$P_{\min}^{\text{Ba}} \leq P_t^{\text{Ba}} \leq P_{\max}^{\text{Ba}} \quad (16)$$

式中: P_t^G 为 t 时段虚拟电厂向电网购电的电量; $P_{\min}^G$ 为虚拟电厂向电网购电的最小电量; $P_{\max}^G$ 为虚拟电厂向电网购电的最大电量; P_t^{Ba} 为 t 时段蓄能系统储存或放出的电量; $P_{\min}^{\text{Ba}}$ 为蓄能系统储存或释放的最小电量; $P_{\max}^{\text{Ba}}$ 为蓄能系统储存或释放的最大电量。

2.3.3 储能系统约束

电池储能系统在电价低谷时购入电能储存,电价高峰时出售电力,不但能够利用峰谷价差获取收益,还能有效实现削峰填谷。但受电池容量及储能系统运行寿命限制,为保护储能电池、防止过充过放,对储能电池的剩余电量必须进行约束。

储能充放电功率约束为

$$-P^{\text{Ba}} \leq P_t^{\text{Ba}} \leq P^{\text{Ba}} \quad (17)$$

储能电池剩余电量为

$$S_{\text{OC}_t} = \frac{E^{\text{Ba}} - \sum_{i=1}^t \lambda P_i^{\text{Ba}}}{E_e^{\text{Ba}}} \quad (18)$$

储能系统约束为

$$S_{\text{OC}_{\min}} \leq S_{\text{OC}_t} \leq S_{\text{OC}_{\max}} \quad (19)$$

式中: P^{Ba} 为储能系统某时刻最大放电功率; S_{OC_t} 为 t 时段储能电池的剩余电量; E^{Ba} 为初始时刻储存的电荷量; λ 为储能系统充放电效率; ΔS_{OC_t} 为 t 时段储能电池的电能变化量; $S_{\text{OC}_{\min}}$ 为储能系统所允许的最小荷电状态,通常设置为0.2,防止储能系统出现过放现象; $S_{\text{OC}_{\max}}$ 为储能系统所允许的最大荷电状态,通常设置为0.9,防止储能系统出现过充现象。

2.3.4 功率平衡约束

系统中可再生能源发电、储能电源以及电网供电的出力总和应与用户侧接入负载总和保持平衡,

表示如下

$$P_t^L = P_t^{PV} + P_t^w + P_t^G + P_t^{Ba} \quad (20)$$

式中: P_t^L 为电动汽车用户接入虚拟电厂的聚合负荷量。

2.3.5 激励需求响应负荷转移约束

虚拟电厂负荷转移约束包括:执行负荷转移的初始成本、转移前后负荷守恒、转移时间、负荷转移执行状态、负荷可转移时段等。

初始成本约束为

$$P^{ls0} \geq \varphi m^{ls} \quad (21)$$

转移负荷守恒约束为

$$\sum_{t=1}^i L_t^{ls1} = \sum_{t=1}^i L_t^{ls2} \quad (22)$$

转移时间约束为

$$\begin{cases} \sum_{t=i}^{i+D_{\min}-1} L_t^{ls1} \geq D_{\min}^{ls} m_i^{ls} \\ \sum_{t=i}^{i+D_{\max}-1} n_t^{ls} \geq m_i^{ls} \end{cases} \quad (23)$$

负荷转移执行状态约束为

$$\begin{cases} m_t^{ls} - n_t^{ls} = I_t^{ls1} - I_{t-1}^{ls1} \\ m_t^{ls} + n_t^{ls} \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

负荷可转移时段约束为

$$I_t^{ls1} = 0 \forall t \notin T^{ls1} \quad (25)$$

式中: P^{ls0} 为执行负荷转移的基础成本; φ 为转移成本系数; m_t^{ls} 和 n_t^{ls} 分别为 t 时段转移合同的起始和结束标志,用1和0表示负荷转移合同执行起始与执行完毕; L_t^{ls1} 、 L_t^{ls2} 分别为 t 时段负荷转移前、后的负荷量; $D_{\min}^{ls}$ 为时间可持续的下限; T^{ls1} 表示负荷高峰,即可转移时段。

2.3.6 激励需求响应负荷削减约束

虚拟电厂负荷削减约束包括:执行负荷削减的初始成本、负荷削减的最大和最小时间、负荷削减执行状态、单日内负荷削减的执行次数。

初始成本约束为

$$P^{le0} \geq \phi m^{le} \quad (26)$$

削减时间约束为

$$\begin{cases} \sum_{t=i}^{i+D_{\min}-1} I_t^{le} \geq D_{\min}^{le} m_i^{le} \\ \sum_{t=i}^{i+D_{\max}-1} n_t^{le} \geq m_i^{le} \end{cases} \quad (27)$$

负荷削减执行状态约束为

$$\begin{cases} m_t^{le} - n_t^{le} = I_t^{le} - I_{t-1}^{le} \\ m_t^{le} + n_t^{le} \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

负荷削减执行次数约束为

$$k_{\min} \leq \sum_{t=1}^{24} m_t^{le} \leq k_{\max} \quad (29)$$

式中: P^{le0} 为负荷削减的初始成本; ϕ 为负荷削减成

本系数; m_t^{le} 与 n_t^{le} 分别为 t 时段削减合同的起始标志和结束标志,用1和0表示负荷削减执行起始与执行完毕; $k_{\min}$ 和 $k_{\max}$ 分别为负荷削减执行最小次数与最大次数。

本文首先整理分析河南郑州某地的风光发电量历史数据与电动汽车充电负荷的历史数据,并采用三次指数平滑法及Jupyter Notebook软件完成24 h的风/光出力数据预测和24 h电动汽车的基线负荷数据预测;其次以虚拟电厂获得最大的经济效益为目标,建立虚拟电厂调度优化模型;最后在Matlab中通过Cplex和Yalmip工具箱计算得到虚拟电厂的最优经济调度最优解。虚拟电厂经济优化调度方法基本流程如图2所示。

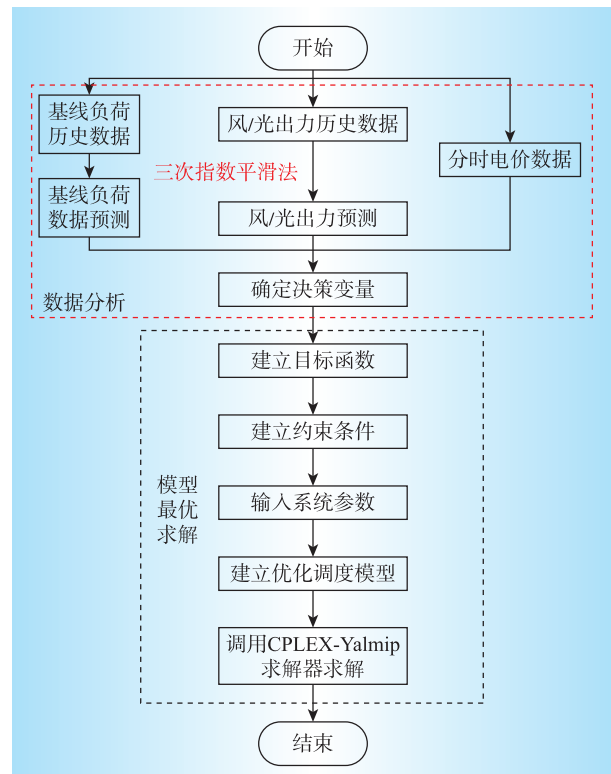


图2 虚拟电厂经济优化调度方法流程

Fig. 2 Flow of economic optimization scheduling method for virtual power plant

3 算例仿真

本文所研究的虚拟电厂以河南郑州某地为背景,以聚合了70%私家车负荷、20%出租车负荷、10%公交车负荷的3 821 KW混合类型电动汽车负荷为调控对象,建立基于分时电价且考虑需求响应的经济最优的虚拟电厂日前调控策略模型,并基于电网最大峰谷差和虚拟电厂运行效益两个评价指标对优化调度策略的可行性和有效性进行分析。

3.1 系统背景及参数

虚拟电厂包括:风/光伏电站出力、电动汽车充电负荷、储能系统和大电网。

设定储能系统的最大存储容量为200 kWh,初始状态条件下储能系统的放电深度为0.2,储能系统其他相关参数设定如表1所示。

表1 储能系统其他参数

Table 1 Other parameters of energy storage system

运行成本系数	维护成本系数	储能系统容量限制/kW		储能系统 S_{oc} 限制	
		上限	下限	上限	下限
0.05	0.009	200	-200	0.9	0.2

表2数据显示,此地区负荷高峰持续时间为3~6 h,借此我们可以设定负荷削减时间的上、下限。

以该地区的负荷峰时段与谷时段来确定转移时段与被转移时段,负荷削减及负荷转移相关参数设定如表2所示。

表2 需求响应参数

Table 2 Demand response parameter

类别	容量/kW	价格/(元·kWh ⁻¹)	启动成本/元	最小执行时间/h	最大执行时间/h	转移时段
负荷削减	40	0.62	40	3	6	
负荷转移	60	0.62	40	2	6	10—13, 18—22

3.2 “源荷”预测结果分析

通过对河南郑州某地2021年6月风/光伏电站光照强度及风速为主要拟合条件,用三次指数平滑法预测出未来24 h风/光伏电站出力情况,风/光出力预测数据如图3所示。

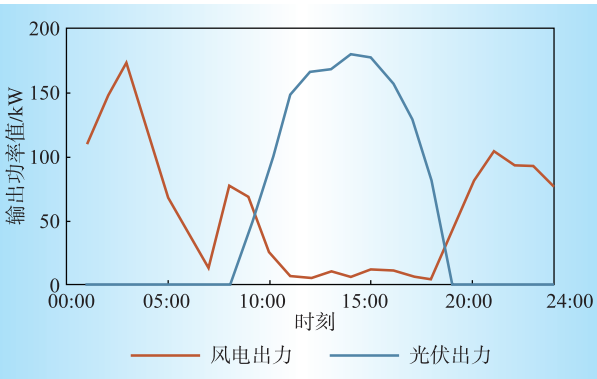


图3 风/光出力预测数据

Fig. 3 Wind / photovoltaic output forecast data

根据电动汽车充电站聚合用电量,用三次指数平滑法预测未来24 h电动汽车基线负荷,电动汽车负荷基线及分时电价如图4所示。

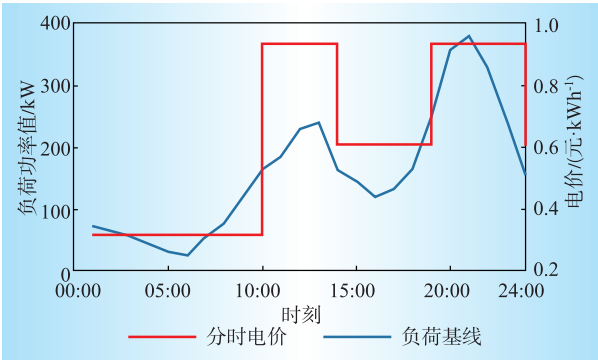


图4 电动汽车负荷基线及分时电价

Fig. 4 Electric vehicle load baseline and time-of-use price

3.3 电动汽车参与的虚拟电厂经济优化调度结果分析

基于预测的电动汽车负荷基线,激励需求响应负荷削减容量如图5所示,负荷削减分别在10:00—13:00与19:00—23:00执行2次,削减容量为40 kW/h,持续时间分别为4 h与5 h,不超过最大持续时间6 h。

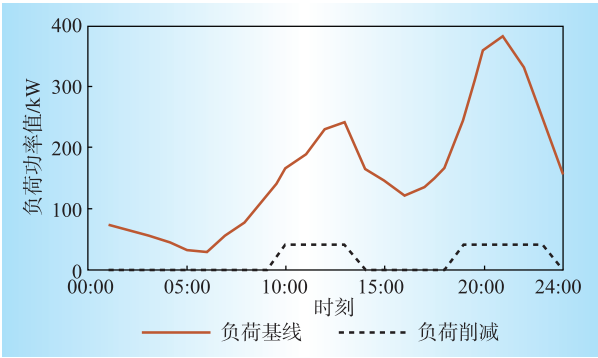


图5 需求响应负荷削减容量

Fig. 5 Demand response load reduction capacity

负荷转移容量如图6所示。负荷转移分别在12:00—13:00与19:00—22:00执行2次,转移容量为60 kW/h,持续时间分别为2 h与4 h,不超过最大持续时间6 h。被转移负荷转移到了电价低且负荷小的01:00—09:00,被转移容量为40 kW/h,转移前后负荷守恒。

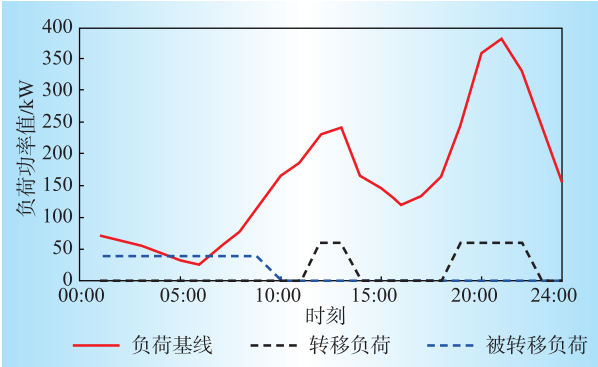


图6 需求响应负荷转移容量

Fig. 6 Demand response load transfer capacity

由优化调度执行效果可得需求响应负荷曲线如图7所示。由图7可知,采用经济调度优化方法前,需求响应负荷峰值为380.8 kW,谷值为26.5 kW,峰谷差为354.3 kW;采用经济调度优化方法后,需求响应负荷峰值为280.8 kW,谷值为66.5 kW,峰谷差为214.3 kW。因此,本文提出的电动汽车参与虚拟电厂经济调度优化方法明显削减了负荷峰值,并成功将可转移负荷调度到了用电低谷时段,起到了削峰填谷的作用。

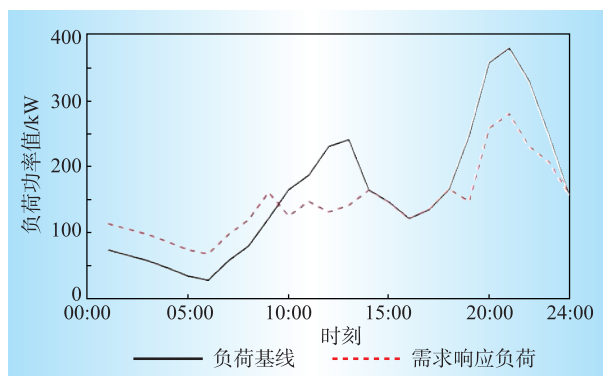


图7 需求响应前后负荷曲线

Fig. 7 Load curves before and after demand response

为延长储能电池使用寿命,防止过充过放现象发生,电池荷电状态及电价曲线如图8所示。结果显示电池荷电状态值在0.2~0.9,且电池在电价低时储能,在电价高时释放电能,用于供给负荷或向电网电力市场出售,提高虚拟电厂效益。

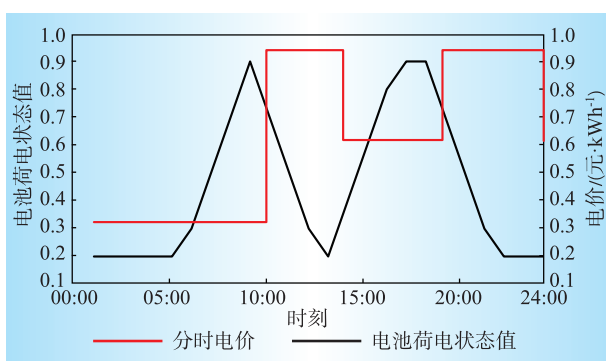


图8 储能电池荷电状态及分时电价

Fig. 8 Energy storage battery SOC and time-of-use electricity price

采用电动汽车参与虚拟电厂经济调度优化方法后,各单元运行状态如图9所示,电网功率的负值表示VPP把电能出售给电网市场,储能功率的负值意味着正在充电。00:00—05:00,VPP把全部可再生能源所发电量销往电网电力市场;05:00—10:00,VPP通过向电网买电为电价高峰储备电量;10:00—19:00,VPP优先利用光伏发电,将多余电量存储或销售电网;20:00—23:00,VPP在电动汽车充电负荷及电

价高峰时将尽力满足负荷需求降低电网供电压力。根据算例所得结果,对比未实施经济优化调度方法,预期总体每周多收益人民币约21 516.53元。

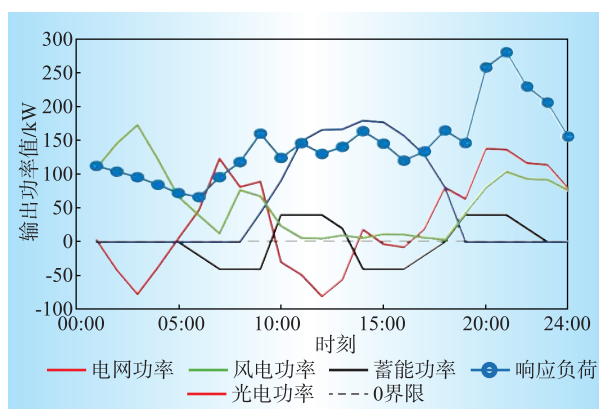


图9 虚拟电厂各单元运行状态

Fig. 9 Operation status of each unit of virtual power

4 结论

针对电力负荷用户上传可调负荷与实际可控能力不一致导致虚拟电厂需求响应不足、调控困难的问题,本文提出了电动汽车基线负荷预测与负荷削减、负荷转移两种激励型需求响应策略相结合的虚拟电厂经济优化调度方法,所得结论如下:

(1) 所提出的经济优化调度方法,与现存调控策略相比可更好地定量评价电动汽车用户参与需求响应的调控程度。

(2) 与经济优化调度模型、多能源协调互动模型等现存虚拟电厂调控模型相比,本文建立的系统混合整数线性规划调度模型,考虑了电动汽车参与虚拟电厂组成结构对经济性的影响。

(3) 基于河南郑州某地实际数据进行算例求解分析,运用此经济优化调度方法后,负荷峰值削减为原峰值的26%,峰谷差仅为原负荷的61%,响应后的负荷曲线更优,极大提高了虚拟电厂整体收益。D

参考文献:

- [1] 李欣民. 清洁能源发电技术及市场现状研究[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(6): 29-32.
LI Xinmin. The study of clean power energy generation technology and market development status [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 29-32.
- [2] 鲁刚, 王雪, 陈昕, 等. 城市能源变革下智慧能源系统建设研究[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(2): 1-4.
LU Gang, WANG Xue, CHEN Xin, et al. Research on smart energy system development for city energy revolu-

- tion[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(2): 1-4.
- [3] 孟明,陈世超,赵树军,等. 新能源微电网研究综述[J]. 现代电力, 2017, 34(1): 1-7.
MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, et al. Overview on research of renewable energy microgrid [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [4] 鲁宗相,王彩霞,闽勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview of microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [5] 杨顺吉,李庆生,明志勇,等. 考虑源荷随机性的配电网多目标概率无功优化[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 125-135.
YANG Shunji, LI Qingsheng, MING Zhiyong, et al. Multi-objective probabilistic reactive power optimization for distribution network considering the randomness of source and load[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 125-135.
- [6] 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): 5 103-5 111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. A review of virtual power plant research [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5 103-5 111.
- [7] 肖云鹏,王锡凡,王秀丽,等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [8] 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.
- [9] 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): 2 258-2 263.
CHEN Chunwu, LI Na, ZHONG Pengyuan, et al. International experience and inspiration of virtual power plant development [J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2 258-2 263.
- [10] VASIRANI M, KOTA R, CAVALCANTE R, et al. An agent-based approach to virtual power plants of wind power generators and electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1 314-1 322.
- [11] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: a price-taker robust optimization approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2 676-2 687.
- [12] 刘祚宇,齐峰,文福拴,等. 含电动汽车虚拟电厂参与碳交易时的经济与环境调度[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 45-52.
LIU Zuoyu, QI Feng, WEN Fushuan, et al. Economic and environmental dispatching of virtual power plants with electric vehicles participating in carbon trading [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 45-52.
- [13] 黄铃燃,边晓燕,李东东,等. 含储能虚拟电厂接入配电网的联合优化调度[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 38-44.
HUANG Lingran, BIAN Xiaoyan, LI Dongdong, et al. Joint optimal dispatch of virtual power plants with energy storage connected to distribution network [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 38-44.
- [14] 孙国强,袁智,耿天翔. 含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 44-50, 79.
SUN Guoqiang, YUAN Zhi, GENG Tianxiang. Robust random optimal scheduling of virtual power plant with electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 44-50, 79.
- [15] 王瑞东,吴杰康,蔡志宏. 多协同市场下含电动汽车虚拟电厂的优化调度[J]. 南方电网技术, 2021, 15(12): 45-55.
WANG Ruidong, WU Jiekang, CAI Zhihong, et al. Optimal dispatch of virtual power plant with electric vehicle in multi collaborative market [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(12): 45-55.
- [16] 牛文娟,李扬,王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3 630-3 637.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response virtual power plant modeling considering uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3 630-3 637.
- [17] Al-AWAMI A T, AMLEH N, MUQBEL A. Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: application for a virtual power plant [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5 051-5 061.

作者简介:

王世谦(1988),男,河南郑州人,硕士,高级工程师,研究方向为能源大数据及能源电力规划;

杨平(1983),女,通信作者,四川成都人,博士,副教授,研究方向为新能源开发及应用。

(责任编辑 水 鹤)