

考虑日前预测偏差的虚拟电厂多元柔性资源实时滚动优化修正方法

王佳颖¹, 孙 钢¹, 李亦龙¹, 冯 威²

(1. 国网浙江省电力有限公司 营销服务中心, 杭州 310007; 2. 中国科学院 深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518000)

摘要:虚拟电厂通过聚合和协同调控需求侧可调节资源参与电网需求响应,已成为缓解新型电力系统供需不匹配的重要手段。受不可预测因素影响,空调与电动汽车等资源在执行日前调度计划时会因预测偏差而产生功率响应偏差。为此,提出了一种虚拟电厂多元柔性资源实时滚动优化修正方法。首先,建立电动汽车集群、空调负荷和蓄电池等可调节资源的控制模型,并结合实时更新的气象条件与电动汽车接网信息,准确量化虚拟电厂在执行日前调度计划时潜在的功率偏差。其次,通过引入各类可调节资源的量价关系曲线,分析进一步挖掘资源日内调节裕度所需的价格激励。最后,构建了多元资源实时协同优化修正模型,确定虚拟电厂偏差修正的最优分配策略,以经济性最优的方式实时消除日前预测误差带来的功率偏差。案例分析结果表明,对比传统仅依赖蓄电池作为备用资源的偏差修正策略,所提方法更具经济性,能更充分发挥多元资源的调节潜力,实现虚拟电厂的高效经济运行。

关键词:虚拟电厂;需求响应;功率偏差消除;协同调控;滚动优化

Real-time rolling optimization correction of virtual power plants with multiple flexible resources considering day-ahead forecast errors

WANG Jiaying¹, SUN Gang¹, LI Yilong¹, FENG Wei²

(1. Marketing Service Center, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

2. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Virtual power plants (VPPs), by aggregating and collaboratively controlling flexible demand-side resources, have become an important means to mitigate the supply-demand imbalance in modern power systems. Due to unpredictable factors, resources such as air conditioners and electric vehicles may exhibit power response deviations when executing day-ahead dispatch plans as a result of forecast errors. To address this, a real-time rolling optimization correction method for VPPs with multiple flexible resources is proposed. First, control models for adjustable resources—including electric vehicle clusters, air conditioning loads, and battery storage—are established. Combined with real-time updated weather conditions and electric vehicle connection information, this approach accurately quantifies the potential power deviation of the VPP during the execution of the day-ahead dispatch plan. Second, by introducing the price-quantity relationship curves of various flexible resources, the necessary price incentives for further tapping into their intra-day flexibility are analyzed. Finally, a real-time multi-resource coordinated optimization correction model is constructed to determine the optimal allocation strategy for power deviation correction in VPPs, thereby economically eliminating the power deviations caused by day-ahead forecast errors in real time. Case study results show that, compared with traditional correction strategies relying solely on battery storage as a backup resource, the proposed method is more economical and fully exploits the regulation potential of multiple flexible resources, enabling efficient and economic operation of VPPs.

Key words: virtual power plant; demand response; power deviation correction; coordinated control; rolling optimization

0 背景

高比例可再生能源接入为电力系统低碳化转型提供了有力保障,但可再生能源固有的随机性和

波动性却对电网供给侧和需求侧带来了安全性与稳定性的双重挑战^[1]。通过聚合利用需求侧的可调节资源,使其参与电网需求响应,已成为维持电力系统供需平衡的重要途径。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为一种先进的能源管理系统,可通过聚合和协同分布式电源、储能、可调负荷以及电动汽车等多元化需求侧

收稿日期:2025-10-08;修回日期:2025-12-15

基金项目:国家电网公司科技项目(5400-202419222A-1-1-ZN)

可调节资源,参与需求响应市场^[2]。在需求响应机制的约束下,VPP需在响应日前制定可调节资源的调度策略以及容量申报方案;而在响应日内,按计划完成中标容量,规避响应偏差带来的经济性损失,是VPP运行调控的核心目标^[3]。因此,如何高效利用VPP内部的可调节资源,确定经济高效的调度计划成为当前研究热点。

VPP中包含多类型的可调节资源,能够实现负荷削减、平移、转移等灵活响应效果^[4]。文献[5]建立了VPP运行优化的混合整数线性规划模型,系统地介绍了屋顶光伏、热水器、电池及蓄热等可调节资源的建模方法,为实现VPP的最优日前调度计划提供了模型基础。文献[6]通过引入有源自回归(autoressive eXogenous, ARX)模型,量化了建筑的蓄热能力,并结合空调系统的可调温和可切机的运行特性,拓展了VPP可调节资源的范围。文献[7]将电动汽车(electric vehicle, EV)纳入VPP可调节资源体系,构建了兼顾经济性与环境效益的混合整数二次规划日前调度模型,以响应电网调节需求,实现削峰填谷和综合降碳。文献[8]则聚焦多元资源间的互补协同,提出多资源协同的VPP日前调度优化方法,不仅能够有效响应外部电网的需求响应信号,同时还能降低VPP内部的弃风弃光量,提高了VPP整体运行经济性。文献[9]将研究视角进一步拓展至需求响应市场和碳交易市场,构建了面向双市场的VPP调控优化模型,进一步提高了虚拟电厂的运行收益。

可以看出,当前VPP调控策略的研究主要集中于日前阶段的调度计划优化,重点关注电动汽车、空调和分布式储能等可调资源的建模表征,以及VPP参与多类型市场的前日调度策略优化。然而,受限于电动汽车接网数量、电池接网状态、以及室外温度预测偏差等多种不确定性因素,电动汽车和空调等可调节资源在执行日前调度计划时,其实际执行效果与预期存在较大偏差^[10]。文献[11]提出了时间序列模型与卡尔曼滤波相结合的混合算法,用于预测VPP中的可再生能源出力和负荷需求,通过提高资源可调潜力的预测精度,以有效降低实际响应偏差。文献[12]构建VPP两阶段调度优化框架,在日内调度中利用蓄电池等传统备用资源缓解响应偏差。

在需求响应日内,及时制定并实施功率偏差修正策略,对于弥补日前调度计划与实际调度之间的偏差至关重要^[13]。然而,现有研究在偏差修正策略制定方面,多侧重于依赖传统储能系统作为单一备用资源,导致响应成本较高。经济激励机制是进一

步挖掘柔性资源调节潜力的重要手段。通过在响应日内设置科学合理的价格激励措施,可以有效增大电动汽车与空调等柔性资源的调节裕度,实现多元柔性资源的协同响应,从而以更优的经济性消除日前调度计划带来的功率偏差。

为此,本文针对虚拟电厂中电动汽车与空调在实际执行日前调度计划过程中产生的功率偏差,提出了一种基于实时滚动优化的偏差修正方法。首先构建了电动汽车与空调等调节资源的动态调控模型,并结合实时更新的气象边界与电动汽车接网状态信息,量化了日前调度计划中的潜在功率偏差;其次,通过引入各类可调节资源的量价关系曲线,刻画了进一步挖掘资源调节裕度所需要的价格激励;最后,基于多元资源实时协同优化修正模型,确定了虚拟电厂功率偏差修正的最优分配策略,实现多元资源协同响应,以经济性最优的方式消除日前调度计划所带来的功率偏差。

1 滚动优化调度方法

本文提出了一种考虑日前预测偏差的虚拟电厂多元柔性资源滚动优化调度模型,如图1所示。模型包括两个阶段,第一阶段建立了电动汽车和空调等可调节资源的控制模型,结合实时更新的电动汽车接网数量、接网电池荷电状态以及室外温度等信息,对日前调度计划中的潜在功率偏差进行预演和量化。第二阶段构建了虚拟电厂的实时功率偏差修正优化模型,基于各类可调节资源的量价关系曲线,进一步挖掘资源的日内调节裕度,在以经济性最优为目标的前提下,确定实时修正方案,实现

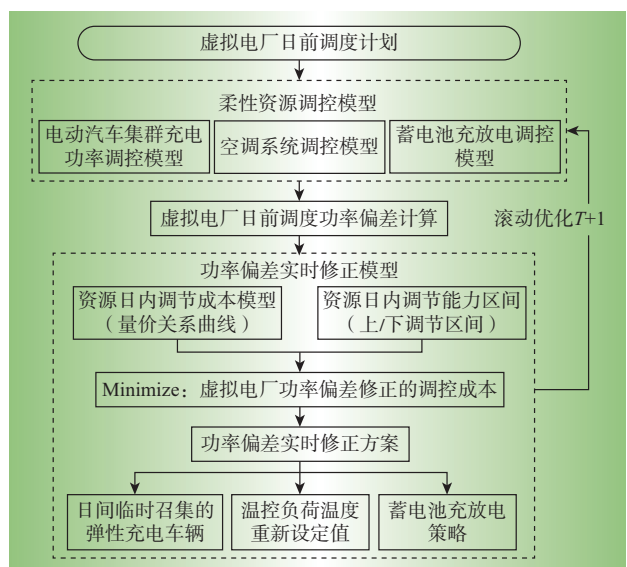


图1 虚拟电厂多元柔性资源滚动优化调度

Fig. 1 Rolling optimization scheduling of multi-flexible resources in VPPs

多元柔性资源对调度偏差的协同消除与动态响应。

1.1 柔性资源控制模型

1.1.1 空调系统调控模型

利用建筑本身的热质蓄热能力,可以有效实现负荷转移与削减。在不影响室内热舒适的前提下,通过适当提升室内空调温度设定值,能够降低冷负荷需求,从而减少空调系统能耗并降低运行成本。准确预测建筑动态负荷是实现建筑蓄热灵活调度的重要前提。本文建立了ARX模型与空调系统模型,用于指导空调资源的调控策略生成。其中,ARX模型用来预测建筑动态冷负荷,如式(1)所示。ARX模型作为一种线性建模方法,具有参数辨识简便、模型结构清晰、对系统动态响应刻画能力强等优势。相比于复杂的非线性或“黑箱”模型,ARX模型不仅能够较好地平衡预测精度与可解释性,还能显著降低优化调度模型的求解难度,提高算法的计算效率^[14]。

$$Q_{HVAC,t} = \sum_{l=1}^6 a_l \cdot Q_{HVAC,t-l} + \sum_{m=0}^3 b_m \cdot U_{t-m}, \quad (1)$$

$$U = \{T_D, R_H, S_R, O_S, E_S, R_{TS}\}$$

式中: $Q_{HVAC,t}$ 为预测的冷负荷, kW; U_{t-m} 为计算当前冷负荷所需要的历史时刻数据。ARX模型所需要输入的历史时刻数据包括干球温度(T_D), 相对湿度(R_H), 太阳辐照度(S_R), 人员占用时刻表(O_S), 设备时刻表(E_S)与室内温度时刻表(R_{TS})。

空调资源的日前调度计划需要确保用户的热舒适不受影响, 因此室内温度设定值需要限制在规定的舒适区间内, 如式(2)所示。而在日内功率偏差修正阶段, 则可以通过为用户提供额外补贴激励, 促使空调用户接受更大的热舒适调节范围, 从而实现更高的空调负荷调节灵活性, 如式(3)所示。

$$\underline{R_{TS,t}} \leq R_{TS} \leq \overline{R_{TS,t}} \quad (2)$$

$$\underline{R_{TS,t}} \leq R_{TS} \leq \overline{R_{TS,max,t}} \quad (3)$$

式中: $\overline{R_{TS,t}}$ 与 $\underline{R_{TS,t}}$ 分别为日前调度阶段空调用户可接受的室内温度调节上限与下限; $\overline{R_{TS,max,t}}$ 为日内偏差修正时, 用户可接受的室内温度上限。

空调系统的首要目标是满足建筑用户的冷负荷需求 $Q_{HVAC,t}$ 。空调系统耗电量 $P_{HVAC,t}$ 的计算需要结合不同工况下的系统性能系数 $C_{OP,t}$ 的变化, 如式(4)所示。空调系统的 $C_{OP,t}$ 需要考虑系统的部分负荷比 $P_{LR,t}$, 具体计算如式(5)和式(6)所示。

$$P_{HVAC,t} = \frac{Q_{HVAC,t}}{C_{OP,t}} \quad (4)$$

$$P_{LR,t} = \frac{Q_{HVAC,t}}{C_{a,HVAC}} \quad (5)$$

$$C_{OP,t} = [n_1 \cdot P_{LR,t}^3 + n_2 \cdot P_{LR,t}^2 + n_3 \cdot P_{LR,t} + n_4] \cdot C_{OP,r} \quad (6)$$

式中: $C_{a,HVAC}$ 为空调系统容量, kW; $C_{OP,r}$ 为空调系统额定制冷系数。

上述空调系统控制模型构建了空调电负荷 $P_{HVAC,t}$ 与室内温度、内扰水平、气象数据的关联关系。

1.1.2 电动汽车集群调控模型

电动汽车集群充电功率控制模型需要考虑多项车辆接网信息, 包括: 电动汽车接网时间 $T_{i,start}$ 和离网时间 $T_{i,end}$ 、接网时电池荷电状态 $S_{OC,i,start}$ 、离网时所需的目标荷电状态 $S_{OC,i,end}$ 以及电池容量 $C_{a,i}$ 。根据车主的充电需求和参与意愿, 电动汽车可分为刚性EV和弹性EV。刚性EV的充电功率是不可调控, 其充电功率大小仅取决于车辆接网所需的充电量与接网时长。相比之下, 弹性EV的充电功率可在一定范围内优化调节。同时虚拟电厂也会根据弹性EV的电池容量和调节能力给予相应的经济激励^[15]。

$$P_{ch,j,t}^s = \frac{(S_{OC,i,end} - S_{OC,i,start})C_{a,i}}{T_{i,end} - T_{i,start}} \quad (7)$$

$$\underline{P_{ch,i,t}} \pi_{i,t} \leq P_{ch,i,t}^f \leq \overline{P_{ch,i,t}} \pi_{i,t} \quad (8)$$

$$S_{OC,i,t} = S_{OC,i,t-1} + \frac{\eta P_{ch,i,t}^f}{C_{a,i}} \quad t \in [1, 2, \dots, h] \quad (9)$$

$$h = \left\lfloor \frac{T_{end} - T_{start}}{\Delta t} \right\rfloor \quad (10)$$

$$S_{OC,i,h} \geq S_{OC,i,end} \quad (11)$$

$$\underline{S_{OC}} \leq S_{OC,i,t} \leq \overline{S_{OC}} \quad (12)$$

式中: $P_{ch,j,t}^s$ 为第 j 辆刚性充电车辆在 t 时刻的充电功率; $P_{ch,i,t}^f$ 为第 i 辆弹性充电车辆在 t 时刻的充电功率, 其值需满足充电功率调节区间 $[\underline{P_{ch,i}}, \overline{P_{ch,i}}]$ 的约束; $\pi_{i,t}$ 为第 i 辆电车在 t 时刻的充电状态, $\pi_{i,t} = 0$ 代表电动汽车接网但未充电, $\pi_{i,t} = 1$ 代表该车辆正在充电; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为底角括号, 代表向下取整。为确保弹性电动汽车在离网时电池荷电状态(SOC)能够达到预期目标, 要求车辆在整个接网时段 ($t \in [1, 2, \dots, h]$) 的电池SOC变化需满足式(9)所示的能量平衡约束。其中, $S_{OC,i,t}$ 为第 i 辆电动车在 t 时刻的电池SOC状态; η 为电车充电的效率。电动汽车在离网时的SOC状态必须满足式(11)的约束。其中 $S_{OC,i,h}$ 代表车辆离网时刻的实际SOC状态。此外, 车辆电池的SOC状态还需满足式(12)所示的容量上下限约束。本文电动车集群充电功率控制模型的时间步长 Δt 为 15 min, 电动汽车的接网时长以 h 表示, 计算见式(10)所示。

在本文中, 蓄电池同样作为虚拟电厂的调控资源。鉴于当前关于蓄电池调控模型的研究已相对成熟, 本文不再赘述, 具体建模方法可参考文献[16]。

1.2 虚拟电厂日前调度功率偏差计算

虚拟电厂在日内需求响应过程中的功率偏差源于日前调度期间对室外气象条件、空调使用行为、电动汽车接网数量和电池容量、以及接网车辆电池荷电状态等因素的预测误差。以日内更新的数据信息为输入,利用空调与电动汽车调控模型,能够准确预演并量化各类资源日前调度策略的功率偏差。

图2展示了虚拟电厂日前调度功率偏差量化流程。对于空调资源而言,以日内实时更新的室外气象条件和空调使用行为作为边界条件,预演日前室温设定方案,得到响应功率 $P_{HVAC,t}^d$ 。并利用式(13)计算预演响应功率与目标响应功率 $P_{HVAC,t}^{ah}$ 之间的偏差。对于电动汽车集群而言,同样是以日内实时更新的车辆接网信息为边界条件,对日前签约的弹性充电车辆进行预演调控。并基于式(14)得到日前策略的响应功率偏差。

$$D_{HVAC,t} = \max[P_{HVAC,t}^d - P_{HVAC,t}^{ah}, 0] \quad (13)$$

$$\min D_{EV,t} = \frac{P_{target} - \sum_i^N P_{ch,i,t}^f + \sum_j^J P_{ch,j,t}^s}{P_{target}} \times 100\% \quad (14)$$

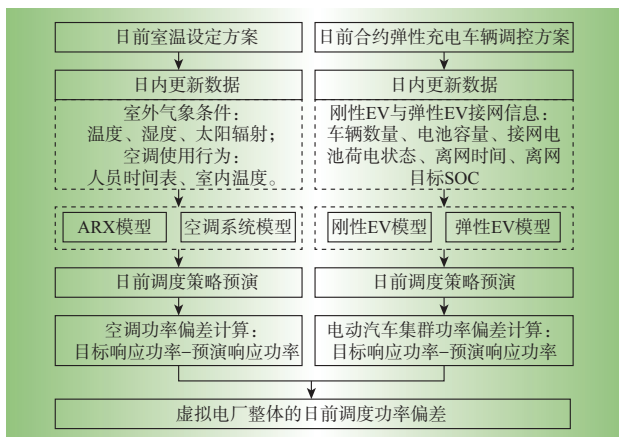


图2 虚拟电厂日前调度功率偏差量化流程

Fig. 2 Flowchart of quantifying day-ahead scheduling deviations of air conditioners and electric vehicles

1.3 虚拟电厂功率偏差实时修正模型

虚拟电厂功率偏差实时修正模型通过综合考虑各类可调节资源的调节成本和可调节功率区间,以经济性最优为目标,可实现功率偏差修正策略的优化分配。式(15)为模型目标函数。式(16)表示各类资源的功率调节总量需满足当前虚拟电厂的功率偏差修正需求。式(17)~式(19)分别描述了空调、电动车和蓄电池资源的量价调节成本。具体而言,受人体热舒适的影响,空调资源的调节容量存在上下限约束,当超过温度舒适区时,需要的激励成本会大幅增加,因此其调节成本采用二次函数进行表征。对于电动汽车,由于选择弹性充电策略的车辆数量会随着激励水

平的提高出现“涌现”效应,即当激励达到某一阈值后,参与响应的车辆数量呈指数级增长,因此电动汽车的调节成本采用指数函数形式。蓄电池的调节价格与调节量呈之间表现为阶梯关系。随着调节量增大,需要调用更多的功率型电池,导致调节成本进一步上升。各类资源的功率偏差修正量需满足其自身的可调节功率区间约束,如式(20)所示。其中,空调的功率可调节范围受到建筑用户的可接受温度区间的限制。对于电动汽车资源,考虑到可以通过提高补贴激励,促使部分车主在日内需求响应过程中改变响应意愿,即将刚性充电模式转为为弹性充电模式。因此,电动汽车集群的实时功率可调节上限受到当前时刻刚性充电车辆的充电负荷的约束。

$$O_{bj} = \min \sum_t [\Delta P_{HVAC,t} \cdot Pr_{HVAC} + \Delta P_{EV,t} \cdot Pr_{EV} + \Delta P_{BS,t} \cdot Pr_{BS}] \quad (15)$$

$$\Delta P_{HVAC,t} + \Delta P_{EV,t} + \Delta P_{BS,t} = D_{HVAC,t} + D_{EV,t} \quad (16)$$

$$Pr_{HVAC} = a \cdot \Delta P_{HVAC}^2 + b \cdot \Delta P_{HVAC} + c \quad (17)$$

$$Pr_{EV} = m + \frac{n}{1 + e^{-k \cdot (\Delta P_{EV} - P_0)}} \quad (18)$$

$$\begin{cases} Pr_{BS} = e \cdot \Delta P_{BS} + f & 0 \leq \Delta P_{BS} \leq P_{BS,1} \\ Pr_{BS} = p \cdot \Delta P_{BS} + q & \Delta P_{BS} \geq P_{BS,1} \end{cases} \quad (19)$$

$$0 \leq \Delta P_{x,t} \leq \Delta P_{x,t}^{up} \quad x \in [HVAC, EV, BS] \quad (20)$$

$$\Delta P_{HVAC,t}^{up} = P_{HVAC,t}^{ah} - P_{HVAC,t}^{min} \quad (21)$$

式中: Pr_{HVAC} 、 Pr_{EV} 、 Pr_{BS} 分别为空调、电动汽车集群、蓄电池调控单位成本,元/kWh; $\Delta P_{HVAC,t}^{up}$ 为空调负荷最大调节量; $P_{HVAC,t}^{min}$ 为响应期间可接受最高温度 $R_{TS,max,t}$ 时对应的空调电负荷。通过上述优化可获得虚拟电厂功率响应偏差实时修正方案,包括空调集群功率最优修正量 $\Delta P_{HVAC,t}$,电动车集群功率最优修正量 $\Delta P_{EV,t}$ 以及蓄电池功率最优修正量 $\Delta P_{BS,t}$ 。

根据功率偏差实时修正结果,可动态调整各类资源的日内运行策略,以消除由于日前预测误差导致的响应功率偏差。以空调系统为例,首先根据空调的最优功率修正量,实时更新其运行功率 $P_{HVAC,t}$ 。随后,通过空调系统控制模型逆向计算,确定能够实现该目标功率的室温设定方案。对于电动汽车资源,需要根据最优功率修正量,并结合当前接网的刚性充电车辆的电池特征,确定需要临时转换为弹性充电模式的最小车辆数量,以满足调节目标。

2 案例研究

2.1 电动汽车信息

算例考虑日前已签约50辆电动车在电网调控时段按照弹性充电的方式接网。调控时段内每15 min

实时新增的刚性充电的电动车数量如图3所示。本文的电动汽车信息由蒙特卡罗随机抽样生成,包括车辆电池容量、接网电池SOC状态、接网时间、预期离网时间、以及离网预期SOC状态。此外,在需求响应过程中,VPP可以向电动车用户推送激励信号,将用户充电意愿从刚性充电转换为弹性充电模式,并在响应后给予用户一定补贴。

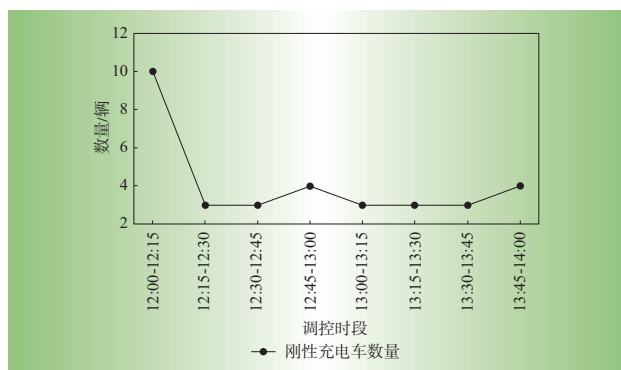


图3 刚性充电的电动汽车数量

Fig. 3 Number of rigid charging electric vehicles

2.2 空调负荷信息

图4展示了日前预测室外温度与日内实际观测温度的对比情况。算例仅考虑日前预测温度低于日内实际温度的场景,其中日前室外温度的预测偏差范围为3%~15%。

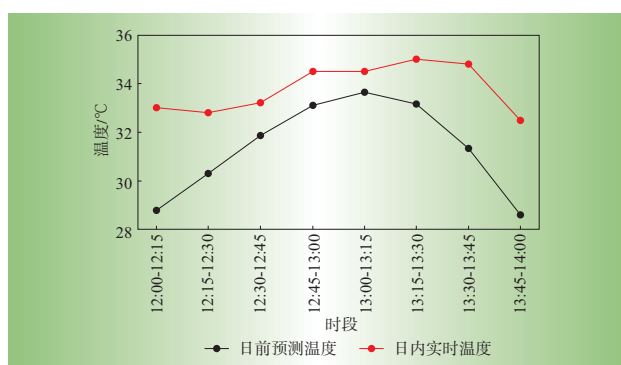


图4 日前预测室外温度与日内实际观测温度对比

Fig. 4 Comparison of day-ahead forecasted outdoor temperature and real-time observed temperature

2.3 电动汽车集群执行日前调度计划的功率偏差

图5展示了电动汽车集群在日前调度下的目标功率曲线、日前签约的弹性调控车辆的充电负荷曲线、以及临时新增的刚性充电车辆的负荷曲线。图6则展示了电动汽车集群在执行日前调度计划时的功率偏差。可以看出在12:00—13:00时段,日前合约的弹性充电车辆的充电负荷逐步降低,以适应调控期间不确定新增的刚性充电车辆带来的额外负荷,从而实现集群整体功率的精确跟踪。这一段内电车集群的整体功率偏差为0。进入调控时段后期

(13:00—14:00),由于不断有新的刚性充电车辆接入,刚性充电负荷持续上升,并超过目标功率值。此时,虽然弹性充电车辆的负荷本应降至最小以减少偏差,但为了确保其在离网时能够达到预期的SOC,弹性充电车辆仍需保持一定的充电功率,导致总功率偏差上升。因此,在不进行日内修正的情况下,电动汽车集群执行日前调度计划的功率偏差如图6所示,即在调控初期,整体功率偏差尚能有效控制在较低水平,而随着调控时段的推进,功率追踪偏差不断扩大,最大偏差可达245%。

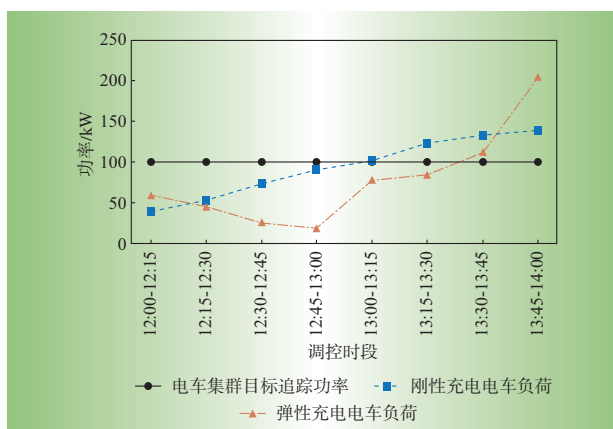


图5 电动汽车集群日前调度预演功率曲线

Fig. 5 Simulated day-ahead dispatch power curves of the electric vehicle cluster

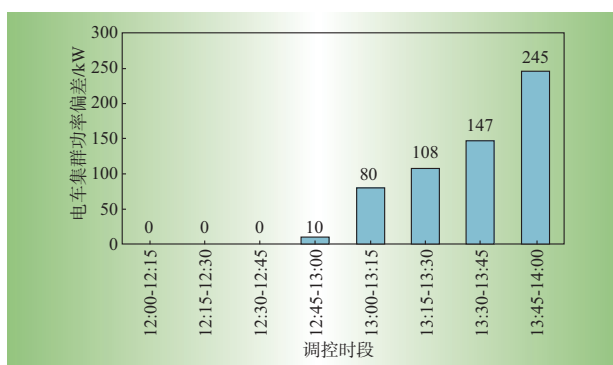


图6 电动汽车集群日前调度功率偏差

Fig. 6 Power deviation of the electric vehicle cluster under day-ahead dispatch

2.4 空调负荷执行日前调度计划的功率偏差

图7展示了空调负荷日前调度的目标功率曲线,以及基于日内最新信息预演得到的实际功率曲线。由于在日前调度阶段低估了日内的室外温度水平,当在响应过程中仍按照日前设定的室内温度策略执行时,冷负荷会相应增加,导致日内空调用电功率高于目标追踪功率。图8进一步反映了空调负荷在执行日前调度计划时出现的功率偏差,受室外温度预测偏差的影响,空调负荷的功率偏差最高可达93 kW,占空调负荷功率的21%。

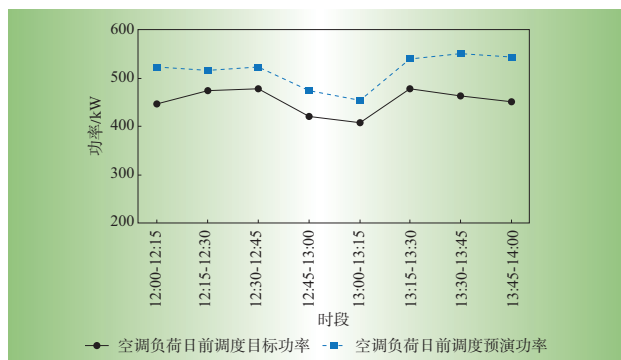


图7 空调负荷日前调度预演功率曲线

Fig. 7 Simulated day-ahead dispatch power curves of air conditioning load

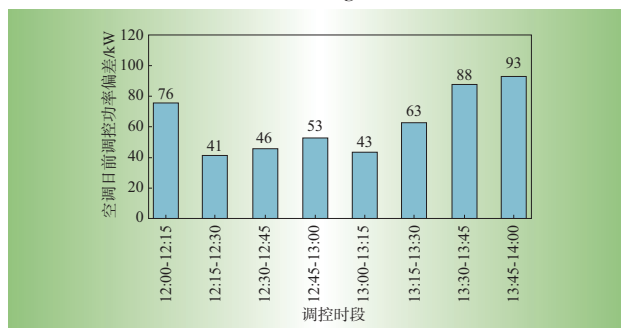


图8 空调负荷日前调度功率偏差

Fig. 8 Power deviation of air conditioning load under day-ahead dispatch

2.5 虚拟电厂偏差实时修正策略

图9展示了虚拟电厂的日内实时偏差修正策略,图10则对应显示了虚拟电厂日内实时偏差修正的调控成本。蓝色柱状图表示虚拟电厂在各调控时段内所需修正的总偏差量;橙色、绿色和红色柱状图分别表示在综合考虑各类资源量价调控成本后,最优分配至电动汽车、空调负荷和蓄电池的日内偏差修正量。以第一个调控时段(12:00—12:15)为例,虚拟电厂执行日前调度计划的整体功率偏差为76 kW,需要进行功率下调。通过实时优化分配,电动汽车集群承担了40 kW的功率下调量,空调负荷需承担36 kW的功率下调量。由于在较小幅度调节时,蓄电池的调控成本较高,因此该时段未调用蓄电池资源

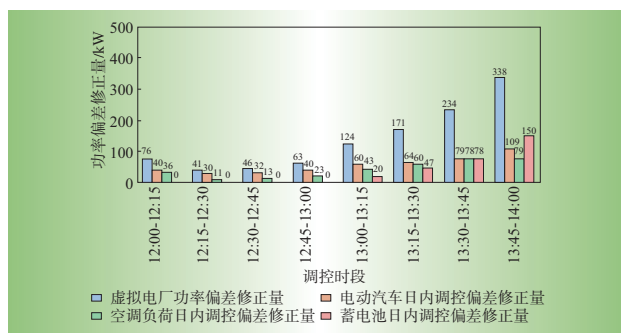


图9 虚拟电厂功率偏差实时最优修正策略

Fig. 9 Real-time optimal correction strategy for power deviation of virtual power plant

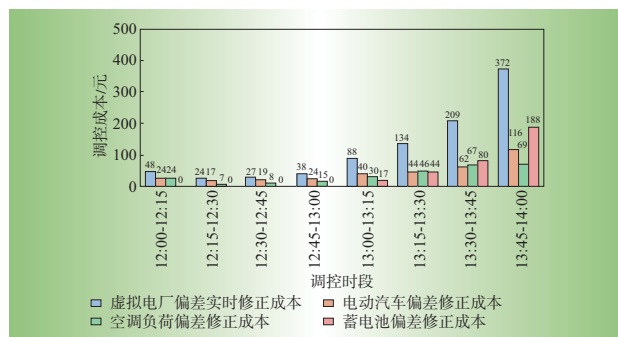


图10 虚拟电厂实时偏差修正的调控成本

Fig. 10 Real-time regulation cost of deviation correction for virtual power plant

参与偏差修正。从图9可以看出,当功率偏差较小时,虚拟电厂优先调控电动汽车和空调负荷资源以消除偏差;而在功率偏差较大时,则优先调用蓄电池和电动汽车等资源进行修正。此外,随着调控时段的推进,虚拟电厂的偏差修正量呈线性增加趋势。这说明,随着调控时间的延长,各类不确定性因素不断叠加,导致虚拟电厂执行日前调度计划的偏差逐步加大,对日内偏差修正的需求也随之增加。

为验证本文所提出的多元资源实时协同优化修正策略的经济性,将其与仅依赖蓄电池作为备用资源的传统修正策略在调控成本方面进行了对比,对比结果如图11所示。可以看出,在每一个时间步,多资源协同修正策略的调控成本均低于传统策略,并且,随着所需修正量的增加,该策略在经济性方面的优势更加显著。

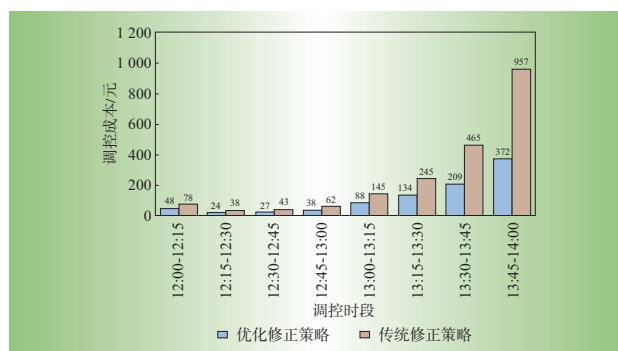


图11 虚拟电厂多元资源实时协同优化修正策略与传统修正策略的调控成本对比

Fig. 11 Comparison of regulation costs between multi-resource real-time coordinated optimization and traditional correction strategies in virtual power plants

3 结束语

本文考虑了电动汽车和空调等资源在实际执行日前调度计划中存在的功率偏差,提出了一种虚拟电厂多元资源实时协同滚动优化修正方法,通过算例分析得到以下结论:

(1) 面向多元柔性资源的日前调度计划在执行过程中,受到多类型不确定性因素的影响,会导致响应效果偏离预期。日前合约电车的实际接网数量、日内随机新增的刚性充电电车数量均会给电车集群的目标功率带来偏差(-50%~350%);室外干球温度预测偏差为3%~15%,造成空调负荷日内响应功率偏差达9%~21%。

(2) 综合考虑各类可调节资源的量价调控成本,并进一步挖掘其在日内响应过程中的调节潜力,通过多资源协同的滚动优化,可实现虚拟电厂功率偏差的经济高效消除。结果表明,当功率偏差量较小时,虚拟电厂更倾向于优先调控电动汽车和空调负荷资源以修正偏差;当功率偏差量较大时,则优先调用蓄电池和电动汽车等资源,实现更大幅度的偏差修正。D

参考文献:

- [1] 江亿,张吉,张涛,等. 电力动态碳排放责任因子[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 7 024-7 038.
JIANG Yi, ZHANG Ji, ZHANG Tao, et al. Dynamic carbon emission responsibility factor of electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7 024-7 038.
- [2] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等. 新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [3] 李鹏,蒋正威,邓一帆,等. 虚拟电厂参与电力市场与调度控制技术研究综述[J]. 浙江电力, 2022, 41(6): 8-14.
LI Peng, JIANG Zhengwei, DENG Yifan, et al. A review of VPP participating in power market and dispatch control technology [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(6): 8-14.
- [4] TANG H, WANG S, LI H. Flexibility categorization, sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings: State-of-the-art and future perspective[J]. Energy, 2021, 219: 119 598.
- [5] TIAN Z, FU F, NIU J, et al. Optimization and extraction of an operation strategy for the distributed energy system of a research station in Antarctica [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119 073.
- [6] NIU J, TIAN Z, ZHU J, et al. Implementation of a price-driven demand response in a distributed energy system with multi-energy flexibility measures [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 208: 112 575.
- [7] 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 in electric vehicles embedded virtual power plants with participation in carbon trading [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 45-52.
- [8] 刘井军,刘涛,周旭,等. 含不确定源荷虚拟电厂参与需求响应优化控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 84-89.
LIU Jingjun, LIU Tao, ZHOU Xu, et al. VPP demand response control method considering uncertainties in source and load [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(4): 84-89.
- [9] 舒征宇,朱凯翔,王灿,等. 考虑碳交易的虚拟电厂日前电力市场竞价策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(5): 58-68, 149.
SHU Zhengyu, ZHU Kaixiang, WANG Can, et al. Virtual power plants participating in day-ahead electricity market bidding strategy considering carbon trading [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 58-68, 149.
- [10] 梁露,李佳承,韩长江,等. 运行风险与资源随机波动影响下的虚拟电厂优化调度方法[J]. 供用电, 2023, 40(12): 22-31.
LIANG Lu, LI Jiacheng, HAN Changjiang, et al. Optimal scheduling method of virtual power plant under the influence of operational risk and random fluctuation of resources [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 22-31.
- [11] 蒋望,赵理,李亦非,等. 基于滚动时域优化和反馈校正的虚拟电厂实时优化调度方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 40-50.
JIANG Wang, ZHAO Li, LI Yifei, et al. A real-time optimal scheduling method of virtual power plants based on rolling time domain optimization and feedback correction [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2022, 38(8): 40-50.
- [12] 贾浩. 计及光伏不确定性的虚拟电厂两阶段优化调度研究[D]. 保定:华北电力大学, 2021.
JIA Hao. Research on two-stage optimal scheduling of virtual power plant considering the uncertainty of photovoltaics [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [13] 蔡黎,杨晨曦,李俊霆,等. 电动汽车接入主动配电网协同储能研究应用综述[J]. 重庆理工大学学报, 2024, 38(19): 212-220.
CAI Li, YANG Chenxi, LI Juntong, et al. Review of research and application on collaborative energy storage for electric vehicles accessed to active distribution network [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2024, 38(19): 212-220.
- [14] NIU J, TIAN Z, LU Y, et al. Flexible dispatch of a building energy system using building thermal storage and battery energy storage [J]. Applied Energy, 2019, 243: 274-287.
- [15] 胡俊杰,陆家悦,马文卿,等. 面向电网调峰的电动汽车聚合商多层级实时控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(22): 84-95.
HU Junjie, LU Jiayue, MA Wenshuai, et al. Multi-layered real-time control strategy for electric vehicle aggregators aimed at grid peak shaving [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(22): 84-95.
- [16] 卫志农,陈好,黄文进,等. 考虑条件风险价值的虚拟电厂多电源容量优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 39-46.
WEI Zhihong, CHEN Yu, HUANG Wenjin, et al. Optimal allocation model for multi-energy capacity of virtual power plant considering conditional value-at-risk [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 39-46.

作者简介:

王佳颖(1994),女,浙江杭州人,工程师,主要从事虚拟电厂、电力需求响应等方面工作;
冯威(1982),男,广东深圳人,研究员,博士生导师,主要从事虚拟电厂、微电网、可再生能源并网等方面工作。

(责任编辑 水 鹤)