

考虑V2B智慧充电桩群的低碳楼宇优化调度

余苏敏¹, 杜洋², 史一炜¹, 苏浩¹, 冯冬涵¹, 周云¹, 李恒杰^{1,3}

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 国网上海市电力公司 电力科学研究院, 上海 200437;

3. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:建筑减排是实现中国碳达峰和碳中和的重要途径,而丰富的负荷侧调控手段是新型电力系统的发展趋势和要求。提出了一种高比例光伏接入的低碳楼宇电能管理框架,楼宇可控负荷包含电动汽车智慧充电桩群和温控负荷。考虑用户响应度和楼宇用电最大需量约束,建立了基于电动汽车接入楼宇(V2B)技术的电动汽车智慧充电桩群模型和基于舒适度范围的温控负荷模型,以购电费用与激励费用之和最小为目标,求解楼宇的日发用电计划。基于碳减排量,设计了需求侧的环境友好评估指标,用于衡量楼宇的节能效果。以两部制分时电价为背景,选取夏季高温日的办公楼宇为算例,验证所建模型在极端天气下的电能调控能力。结果表明所建模型能有效降低楼宇的月度需量阈值,同时通过空调节能和光伏利用等措施显著降低了楼宇的碳排放量。

关键词:智慧充电;V2B;建筑减排;温控负荷;低碳楼宇;优化调度

中图分类号:TM 734;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109021

0 引言

二氧化碳等温室气体的大量排放将引起全球变暖,世界各国十分重视节能减排和可持续发展议题。2020年9月,我国在第75届联合国大会上提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,2060年前实现碳中和”的目标。我国电力行业的碳排放量占全社会总碳排放量的41%,是实现碳达峰目标的绝对主力。目前,有关电力行业的碳研究大多集中于发电侧,基于碳配额制等市场机制或碳捕集电厂等技术手段实现电力行业的碳减排^[1-2]。然而,电力需求侧同样需要以减少高碳能耗的方式建立清洁低碳社会。因此,对用户侧的碳排放量进行评估具有实际意义。

建筑减排在国家低碳战略中占据重要地位。全国建筑碳排放数据(2000—2016年)分析显示,我国建筑能耗占能源消费总量的比值为20.6%^[3],建筑减排潜力巨大。《绿色建筑评价标准》规定“绿色建筑应采取措施降低部分负荷、部分空间使用下的供暖、空调系统能耗”,即绿色建筑内部必须具备负荷主动调控能力。负荷侧的主动调节能力也正符合新型电

力系统的发展趋势和要求。

电动汽车EV(Electric Vehicle)的迅速发展也为建设低碳社会提供了强大助推。EV替代燃油汽车能大幅减少交通领域的碳排放量。在政策的催化下,EV发展迅速,但同时也为电力系统带来了巨大的压力。以办公或商业楼宇的停车场充电桩群为例,未经管控的EV充电负荷的接入使得楼宇负荷大幅提升,需量电费升高,更有可能造成楼宇配电变压器的负载率超过正常范围,造成配电网资源寿命减损以及升级成本激增等问题^[4]。

针对上述问题,文献[5-6]提出通过允许充电暂停和优化充电开始时间以满足用户充电需求且不超过配电变压器的容量限制。但EV作为需求侧资源,其潜力不限于有序充电,有研究表明在电动汽车入网V2G(Vehicle-to-Grid)技术的支持下,EV作为移动储能单元,能够向电网返送电能并提供辅助服务^[7],但V2G涉及较为复杂的并网模块。因此,现阶段电动汽车接入楼宇V2B(Vehicle-to-Building)^[8]、电动汽车接入住宅V2H(Vehicle-to-Home)^[9]模式更具有可行性。文献[10]以产消者楼宇为研究对象,介绍了V2B模式的详细架构。文献[11]评估了电孤岛、气孤岛情形下EV为楼宇提供常规备用、应急备用的能力。

在低碳建筑中,除EV充电负荷外,通常还存在其他体量不可忽略的可控负荷。以温控负荷为例,文献[12]考虑楼宇热损耗和热容,以电力系统调峰为目标建立了包含空调以及储热罐的楼宇温控负荷最优调度模型;文献[13]研究了含热电联供系统的综合能源楼宇,以运行成本最低为目标建立了经济调度模型,对指导有供暖需求区域的楼宇进行改

收稿日期:2021-04-12;修回日期:2021-07-22

基金项目:上海市青年科技英才扬帆计划项目(19YF1423800);上海恒能泰企业管理有限公司科技项目(2021jj7ZY);上海交通大学新进教师启动计划项目(21X010500727)

Project supported by Shanghai Sailing Program(19YF1423800), the Science and Technology Project of Shanghai Hengnengtai Enterprise Management Co.,Ltd.(2021jj7ZY) and the Startup Fund for Young Faculty at Shanghai Jiao Tong University (21X010500727)

造有借鉴意义;文献[14]计及EV调度成本构建了区域综合能源系统模型,采用改进的混沌粒子群优化(CSPO)算法进行求解,但未考虑车主补贴激励对参与率的影响。综上所述,现有研究存在以下不足:①较少地关注EV与楼宇中其他可控负荷的联合优化调度策略;②较少在楼宇级优化中考虑V2B技术;③较少评估楼宇运行中的环境效益。

为此,本文考虑在低碳楼宇背景下,以最小化楼宇日运行成本(包括购电成本和激励费用)为目标对包括V2B智慧充电桩群和温控负荷在内的楼宇可控负荷进行优化调度,以楼宇为主体实现电力需求侧节能减排目标,同时削减楼宇的最大需量电费,提升变压器的安全裕量。

1 低碳楼宇电能管理架构

本文以办公属性的低碳楼宇为研究对象,楼宇负荷包括照明负荷、设备负荷、温控负荷和EV充电负荷等。楼宇电能管理中心对所有用电设备及发电设备进行实时监测,对可控负荷进行集中优化调度。低碳楼宇的电气结构示意图如图1所示。

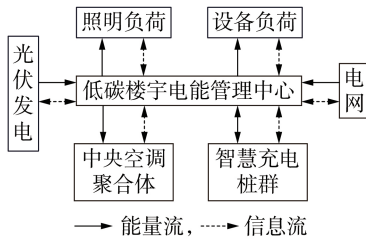


图1 低碳楼宇的电气结构示意图

Fig.1 Electrical structure diagram of low-carbon building

楼宇内的温控负荷使用节能性能优异的变频空调,其承担调节冷负荷与热负荷的双重功能。楼宇通过节能宣传使住户让渡调节室内温度的权利,由电能管理中心统一设定和控制楼宇的温度和空调运行状态。楼宇配置的EV智慧充电桩支持电能双向传输。当待充电EV接入充电桩时,监测装置记录EV的接入时间,同时在屏幕上显示V2B活动说明和激励措施,若用户选择服从楼宇调控,则用户需要上传提车时间及预期充电电量。根据EV信息和充电需求信息,电能管理中心将对EV的充电过程进行优化控制。需要说明的是,V2B充电桩支持电能双向传输,但返送的电能仅供楼宇负荷管理系统所控范围内部使用。楼宇与电网之间只存在单向能量传输,不支持楼宇电能返送电网。

2 考虑V2B的EV智慧充电桩群模型

2.1 V2B充电桩群智慧充放电模型

考虑V2B的单辆EV的充放电过程模型如图2

所示。将充电过程划分为多个等时长的时段,充电桩的控制状态可以在每个时段点进行调整,且在每个控制时段 Δt 内EV的充放电功率和充放电状态保持一致。

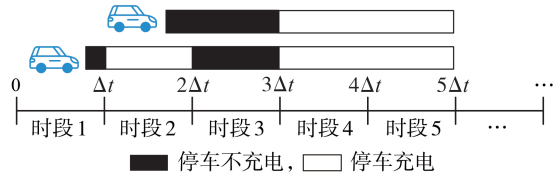


图2 EV智慧充电过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of EV smart charging process

则接受楼宇调度的EV模型可表示为:

$$0 \leq P_{i,t}^{evc} \leq P_{\max}^{evc} x_{i,t}^{ev} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{evd} \leq P_{\max}^{evd} (1 - x_{i,t}^{ev}) \quad (2)$$

$$P_{i,t}^{evc} = 0, P_{i,t}^{evd} = 0 \quad t < t_i^{\text{start}} \text{ 或 } t > t_i^{\text{end}} \quad (3)$$

式中: $P_{i,t}^{evc}$ 、 $P_{i,t}^{evd}$ 分别为时段 t 第 i 辆EV的充电、放电功率; P_{\max}^{evc} 、 P_{\max}^{evd} 分别为V2B智慧充电桩的额定充电功率、放电功率; $x_{i,t}^{ev}$ 为时段 t 第 i 辆EV的充电状态变量,充电时取值为1,放电时取值为0; t_i^{start} 、 t_i^{end} 分别为第 i 辆EV到达、离开充电桩的时间。式(1)和式(2)分别为EV的充电、放电功率约束,式(3)保证了EV未到达时不产生充放电功率。

为了延长动力电池的使用寿命,设定V2B模式下EV的荷电状态约束如式(4)所示。

$$S_{\min}^{ev} \leq S_{i,t}^{ev} \leq S_{\max}^{ev} \quad (4)$$

$$S_{i,t}^{ev} = S_{i,t-1}^{ev} + \frac{\Delta t}{Q_{ev}} \left(P_{i,t}^{evc} \eta^{evc} - \frac{P_{i,t}^{evd}}{\eta^{evd}} \right) \quad (5)$$

式中: $S_{i,t}^{ev}$ 、 $S_{i,t-1}^{ev}$ 分别为时段 t 、 $t-1$ 第 i 辆EV的荷电状态; S_{\min}^{ev} 、 S_{\max}^{ev} 分别为EV荷电状态的最小、最大允许值; Q_{ev} 为EV动力电池的容量; η^{evc} 、 η^{evd} 分别为充电、放电效率。为了保证用户的充电效果,在EV离开充电桩时需保证其荷电状态达到期望值。

记一天内在楼宇充电桩充电的EV数量为 n^{ev} ,则时段 t 智慧充电桩群的总充电功率 P_t^{evc} 、总放电功率 P_t^{evd} 分别为:

$$P_t^{evc} = \sum_{i=1}^{n^{ev}} P_{i,t}^{evc} \quad (6)$$

$$P_t^{evd} = \sum_{i=1}^{n^{ev}} P_{i,t}^{evd} \quad (7)$$

2.2 EV价格激励模型

楼宇通过给予用户补贴的方式激励EV参与统一调控。若将EV提供的电能调控看作一种商品,那么可控负荷即为这种商品的供给方。根据激励价格,用户响应度可以分为3个阶段^[15],示意图见附录A图A1。①阶段1,激励价格较小,在 $[0, a)$ 范围内,未达到用户的心理预期,此时几乎没有用户参与调控;②阶段2,激励价格不断增大(在 $[a, b)$ 范围内),

越来越多的用户选择将控制权交给电能管理中心;③阶段3,由于总存在一定比例的用户有紧急用车需求,不愿意参与楼宇统一调控,此时无论激励价格如何升高,响应用户数量也不会增加。用户响应度 β 与激励价格 ρ 之间的关系如式(8)所示。

$$\beta = \begin{cases} 0 & 0 \leq \rho < a \\ k\rho & a \leq \rho \leq b \\ \beta_{\max} & \rho > b \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为效用系数,表示用户对激励措施的响应程度,效用系数值越大,表明用户对激励价格越敏感; β_{\max} 为用户响应度的极限值。

则参与楼宇统一调控的EV数量 N^{ev} 为:

$$N^{\text{ev}} = \beta n^{\text{ev}} \quad (9)$$

EV总调控费用 C_s 为:

$$C_s = \rho \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{i=1}^{N^{\text{ev}}} (P_{i,t}^{\text{eve}} - P_{i,t}^{\text{evd}}) \quad (10)$$

式中: n_T 为一天的时段总数量。

3 低碳楼宇的可调容量建模

3.1 温控负荷模型

变频空调是具备良好调节性能的需求侧资源。通过集中控制楼宇内的空调资源,可以实现用电合理分配以及节能减排的目标。变频空调的简化热参数模型可表示为^[16]:

$$T_{i+1}^{\text{in}} = T_{i+1}^{\text{out}} - Q_i^{\text{ac}} R_b - (T_i^{\text{out}} - Q_i^{\text{ac}} R_b - T_i^{\text{in}}) e^{-\Delta t / (R_b C_b)} \quad (11)$$

式中: T_{i+1}^{in} 、 T_{i+1}^{out} 分别为时段 $t+1$ 的室内温度、室外温度; R_b 、 C_b 分别为房间的热阻、热容; Q_i^{ac} 为时段 t 空调的制冷量。不同于传统制冷功率为定值的定频空调,变频空调可以连续变换功率以满足不同时刻的制冷需求。相较于定频空调的连续启停调节,变频空调的可调节灵活性更高,其制冷量 Q_i^{ac} 与电功率 P_i^{ac} 之间的关系可表示为:

$$P_i^{\text{ac}} = \frac{C_b}{\delta_i \Delta t} Q_i^{\text{ac}} \quad (12)$$

式中: δ_i 为时段 t 变频空调的能效比。本文假设能效比仅与室外机所处温度相关^[12],则其计算式为:

$$\delta_i = \delta_{T_b} + \frac{\delta_{T_r} - \delta_{T_b}}{T_r - T_b} (t - T_b) \quad (13)$$

式中: T_r 为空调的额定工作温度; δ_{T_r} 为额定工作温度下空调的能效比; T_b 为空调的基准工作温度; δ_{T_b} 为基准工作温度下空调的能效比。

当室内温度保持为 T^{in} ,即 $T_{i+1}^{\text{in}} = T_i^{\text{in}} = T^{\text{in}}$ 时,根据式(11)可得此时变频空调的制冷量为:

$$Q_i^{\text{ac}} = \frac{\Delta t}{R_b C_b} (T_i^{\text{out}} - T^{\text{in}}) \quad (14)$$

当室内温度变化时,时段 t 变频空调的最大制冷

量 $Q_{\max,t}^{\text{ac}}$ 由额定制冷功率 P_{\max}^{ac} 决定,如式(15)所示。

$$Q_{\max,t}^{\text{ac}} = P_{\max}^{\text{ac}} / \delta_i \quad (15)$$

低碳楼宇通常采用隔热性能良好的建筑材料,因此保温、保冷效果往往较好。以此为背景,低碳楼宇可被视为巨型的储热罐。当正常运行时,空调将电能以热能形式存储于所属建筑物中,储能量大小与室内温度成正比。换言之,空调可以通过提前降温,将能量存储于空气中,降低负荷高峰时段空调的用电量,这在一定程度上能起到负荷平移的作用,但该过程存在能量损耗,会带来额外的碳排放。

3.2 光伏建筑一体化模型

光伏建筑一体化BIPV(Building Integrated Photovoltaics)技术是指将光伏组件作为建筑的一部分(屋顶、玻璃幕墙等)与楼宇的用能系统相连,产生清洁电力供楼宇内部负荷使用。目前,普遍装设的屋顶光伏的可利用面积有限,低碳楼宇可以通过装设玻璃幕墙光伏显著提高光伏的配置容量,从而提升楼宇的清洁电能比例。光伏出力模型可表示为:

$$0 \leq P_t^{\text{pv}} \leq P_{\max,t}^{\text{pv}} \quad (16)$$

$$P_{\max,t}^{\text{pv}} = \gamma_t^{\text{pv}} (C_{\text{roof}}^{\text{pv}} + C_{\text{wall}}^{\text{pv}}) / (1 + \varepsilon_{\max}^{\text{pv}}) \quad (17)$$

式中: P_t^{pv} 为时段 t 内BIPV的有功出力; $P_{\max,t}^{\text{pv}}$ 为时段 t 内BIPV的有功出力最大值; γ_t^{pv} 为时段 t 光伏有功出力典型值; $C_{\text{roof}}^{\text{pv}}$ 为屋顶光伏容量; $C_{\text{wall}}^{\text{pv}}$ 为玻璃幕墙光伏容量; $\varepsilon_{\max}^{\text{pv}}$ 为光伏预测功率的最大允许误差。

3.3 最大需量约束

为了降低楼宇的最大需量电费,模型以约束条件形式限制楼宇从电网的购电功率:

$$P_t^{\text{buy}} = P_t^{\text{eve}} - P_t^{\text{evd}} + P_t^{\text{ac}} + P_t^{\text{pv}} + P_t^{\text{regular}} \quad (18)$$

$$P_t^{\text{buy}} \leq \zeta \quad (19)$$

式中: P_t^{buy} 为时段 t 楼宇从电网购电的功率; P_t^{regular} 为时段 t 照明负荷及电梯等设备负荷功率; ζ 为楼宇用电的最大需量阈值。

3.4 优化调度模型

低碳楼宇电能管理中心的优化运行目标函数为:

$$\min \{ C_e + C_s \} \quad (20)$$

$$C_e = \sum_{t=1}^{n_T} P_t^{\text{buy}} \rho_t \Delta t \quad (21)$$

式中: C_e 为从电网购电的费用; C_s 为用户的激励费用; ρ_t 为时段 t 从电网购电的分时电价。

约束条件包括EV相关约束式(1)~(7)、温控负荷相关约束式(11)~(13)、BIPV相关约束式(16)和式(17)、最大需量约束式(18)和式(19)。整体优化调度模型为混合整数线性规划问题。

4 环境友好指标——碳减排量

目前,电网发电侧一般使用二氧化碳排放量作

为电源的环境友好程度评估指标,但用户侧缺乏环境友好程度的量化指标。本文借鉴京都议定书规定的清洁发展机制项目减排量计算方法,测算用户侧的二氧化碳减排量。根据楼宇的运行情况,楼宇的碳减排量由两部分组成:一部分由空调整能产生,另一部分由低碳楼宇自身配备的可再生能源产生。空调的碳减排量可以表示为:

$$E^{\text{ac}} = \lambda W^{\text{ac}} \Delta t \quad (22)$$

$$W^{\text{ac}} = \sum_{t=1}^{n_T} (\bar{P}_t^{\text{ac}} - P_t^{\text{ac}}) \quad (23)$$

$$\lambda = \omega_1 E_{\text{OM}} + \omega_2 E_{\text{BM}} \quad (24)$$

式中: E^{ac} 为空调的日碳减排量; W^{ac} 为空调负荷的日削减量; \bar{P}_t^{ac} 为时段 t 空调负荷基准功率; λ 为单位电量边际排放因子,由电量边际排放因子 E_{OM} 和容量边际排放因子 E_{BM} 加权计算所得,取值采用国家发改委发布的我国区域电网基线排放因子^[17]; ω_1 和 ω_2 为权重值。

光伏发电设备碳减排量 E^{pv} 的计算方法与 E^{ac} 类似,如式(25)所示。

$$E^{\text{pv}} = \lambda \sum_{t=1}^{n_T} P_t^{\text{pv}} \Delta t \quad (25)$$

智慧充电桩群为可平移负荷而非可削减负荷,所以并不是直接碳减排,而是通过以下途径产生间接的环境效益:①通过灵活调控EV充电负荷,使得在高比例光伏接入情况下,楼宇内部的可再生能源能够得到100%消纳,从而提升碳减排效果;②减少空调在负荷高峰前的主动降温行为,提升空调的节能效果;③提供便利的充电基础设施,减少EV用户的里程焦虑,从而助力EV的推广应用,但其碳减排效果无法量化。

5 算例分析

5.1 算例参数

基于Gurobi求解器求解算例模型,将全天划分为96个时段,单位时段时长为15 min。为了分析极端天气下楼宇的调控能力,算例背景设置为高温工作日的低碳办公楼宇。楼宇建筑参数见附录A表A1,楼宇配置了100台空调,用户的舒适调温范围为24~28℃,楼宇内房间的平均热阻为5.56℃/kW,平均热容为0.18kW·h/℃,单台空调的最大用电功率为1500W,正常空调的开机时段为08:00—22:00,开机后达到舒适温度的时间为1h。假设有50%的空调允许延迟开机时间以达到节能减排的效果。选取调控前始终维持室内温度为26℃的空调负荷为温控负荷基线,见附录A图A2。楼宇日均到达30辆EV,EV参数见附录A表A2,基于出行链方法预测^[18]得到EV到达和离开时间的概率分布,见附录A图A3。EV到达时的荷电状态服从均值为0.4、方差

为0.1的正态分布。用户响应度与激励价格之间的关系函数的效用系数取值为3.25。根据楼宇建筑参数,楼宇屋顶光伏容量取为100kW,玻璃幕墙光伏容量取为300kW,光伏出力曲线标准值取自PVoutput.org我国区域项目的实际出力,光伏预测功率最大允许误差为15%。电价数据采用上海市工商业用户两部制电价,电度电价曲线见附录A图A4,最大需量电价为42元/(kW·月)。经测试,楼宇可行最大需量阈值为275kW。

5.2 楼宇统一调度前的结果分析

进行低碳楼宇统一调控前,且楼宇停车场未配置智慧充电桩时,光伏低发、大发情形下楼宇负荷及BIPV的发用电功率结果分别如图3、附录A图A5所示(图中将购电功率、光伏出力均记为负值,负荷记为正值,后同)。由图可知,无论光伏低发或大发,全天购电功率的峰值总出现在09:45左右,这是因为此时上班族涌入办公楼宇,同时极端高温天气使得空调等温控负荷需求高于其他工作日,所以空调启动带来的负荷峰值与EV无序充电的负荷峰值相叠加,造成负荷峰上加峰。分析认为,夏季办公楼宇的月度负荷高峰往往出现在高温光伏低发日,认定该天为月度负荷峰值出现日,计算得到月度需量电费为16359元,该日的购电费用为3067.4元。

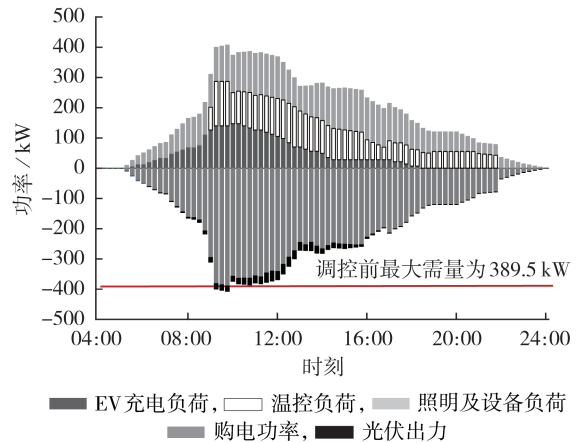


图3 光伏低发情形下的楼宇调度结果

Fig.3 Scheduling results of building in case of low photovoltaic output

5.3 楼宇统一调度的结果分析

以计算月度需量电费的高温光伏低发日为例,经电能管理中心统一调控后,楼宇运行结果如图4所示(图中将EV放电功率记为负值),EV充电负荷与温控负荷曲线如图5所示。

经统一调控后,楼宇负荷峰值被控制在275kW,需量电费为11550元,相比调控前减少了4809元;日购电费用为2546.5元,相比调控前减少了520.9元;而激励费用为109.4元,购电费用与激励费用之

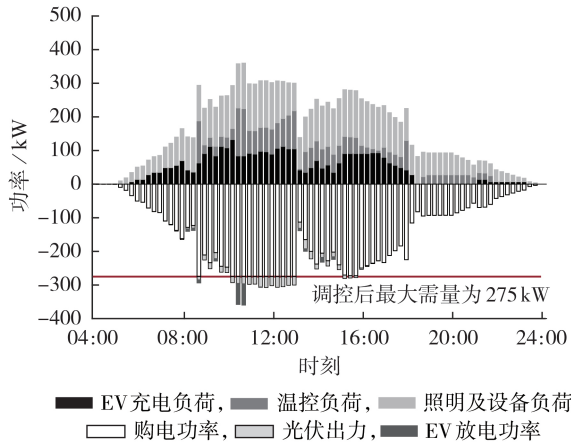


图4 统一调控后楼宇的运行结果

Fig.4 Operation results of building after united regulation and control

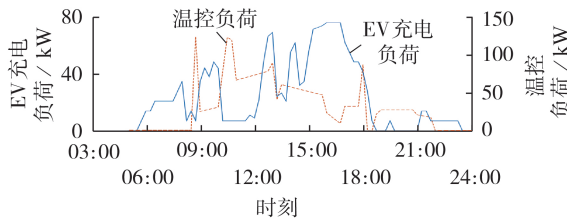


图5 统一调控后的EV充电负荷与温控负荷曲线

Fig.5 EV charging load and thermostatically controlled load curves after united regulation and control

和即总运营费用减少。平均每辆参与调控的EV单次充电可以获得9.1元的补贴,十分可观。观察图5可发现, EV 充电负荷与温控负荷在高峰时段存在一定程度的互补,出现“此消彼长”的现象。

智慧充电桩的V2B功能也为极端天气下的楼宇用电提供了新的解决方案。在楼宇用电高峰时段10:00—11:00,楼宇控制已让渡充电管理权的EV放电,作为光伏发电和电网购电的补充,使得即使在光伏低发情形下,楼宇最大需量也能维持在较低的水平;在非用电高峰时段,V2B功能则类似储能起到峰谷套利的作用,在电价较低时段多充电,在电价较高时段放电供给楼宇其他负荷,使得楼宇的总用电成本减少。在满足用户充电需求的前提下, EV 车群的总放电电量达到48 kW·h。

室内温度和空调制冷功率变化曲线见图6。观察图6可知,室内温度并不会总维持在舒适温度上限,而是随着楼宇中其他负荷和电价的变化而灵活变化。空调会通过平电价时段多消耗电能,降低室内温度,将能量存储于空气中,使得在维持用户舒适度的前提下,在峰电价时段能够适当地减少用电量,节约购电成本。空调的灵活性也保证了在大量EV接入楼宇的情形下峰值功率仍能维持在最大需量阈值以下。

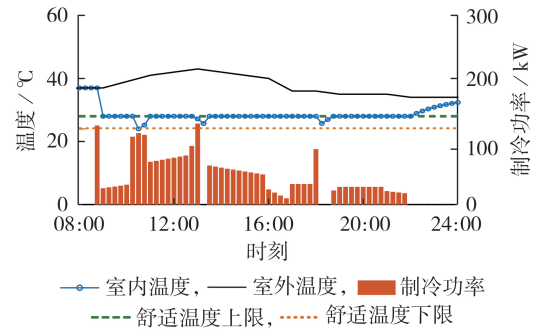


图6 室内温度和空调制冷功率变化曲线

Fig.6 Change curves of indoor temperature and air conditioning's cooling power

5.4 碳减排量分析

取EV的激励价格为0.25元/(kW·h),则不同光伏配置与统一调控情况下的碳减排量结果如表1所示。对比Case 1和Case 2可知,V2B功能能够缓解空调负荷的调节压力,从而产生可量化的环境效益;对比Case 1、Case 3、Case 5可知,配置光伏(尤其是玻璃幕墙光伏)能够显著提升楼宇的碳减排量;Case 5的碳减排量较Case 4有显著提升,说明经统一调控的楼宇通过设定舒适温度范围等手段深度挖掘了空调负荷的节能减排空间。

表1 不同条件下的碳减排量结果

Table 1 Carbon emission reduction results under different conditions

| 条件 | 光伏配置情况 | 是否统一调控 | 是否考虑V2B功能 | 碳减排量/kg |
|--------|-------------|--------|-----------|---------|
| Case 1 | 无光伏 | 是 | 是 | 300.3 |
| Case 2 | 无光伏 | 是 | 否 | 296.8 |
| Case 3 | 屋顶光伏 | 是 | 是 | 475.2 |
| Case 4 | 屋顶光伏+玻璃幕墙光伏 | 否 | 是 | 700.3 |
| Case 5 | 屋顶光伏+玻璃幕墙光伏 | 是 | 是 | 1001.6 |

5.5 EV激励价格变化的影响

当EV激励价格变化时,参与楼宇统一调控的EV数量会随之变化,楼宇降低需量电费的能力也将随之变化。楼宇配置屋顶光伏与玻璃幕墙光伏,取光伏低发的高温日计算最大需量。记每月的工作日天数为22 d,则EV激励价格与月度需量电费间的关系如表2所示。

表2 EV激励价格与月度需量电费间的关系

Table 2 Relationship between EV incentive prices and monthly electricity demand

| EV激励价格/[元·(kW·h) ⁻¹] | 受控EV数量/辆 | 月度激励费用/元 | 最大需量阈值/kW | 月度需量电费/元 |
|----------------------------------|----------|----------|-----------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 347 | 14574 |
| 0.25 | 12 | 2409 | 275 | 11550 |
| 0.30 | 16 | 3041 | 255 | 10710 |
| 0.40 | 23 | 4439 | 225 | 9450 |

由表2可知,当EV激励价格由0.25元/(kW·h)提升至0.30元/(kW·h)时,月度激励费用增加了632元,月度需量电费减少了840元,故总成本降低;但是当EV激励价格由0.30元/(kW·h)提升至0.40元/(kW·h)时,月度激励费用增加了1398元,月度需量电费减少了1260元,总成本增加。不难发现,需量削减量与EV激励价格呈非线性关系,因此,需要合理设置EV激励价格,以达到最小化成本的目标。

6 结论

本文提出了低碳楼宇电能综合管理框架,以削减需量电费和楼宇碳排放量为建模目标,以最小化楼宇日运行成本为管理目标,建立了基于V2B的智慧充电桩群模型和基于舒适度范围的温控负荷模型,并制定了相应的用户激励措施,所得结论如下。

1)在分时电价背景下,本文所提模型能够利用V2B智慧充电桩群的调节弹性与温控负荷的储热效应有效降低楼宇的日用电量费用和月度需量电费。

2)考虑V2B技术的智慧充电桩群有助于楼宇的经济运行,在极端天气情况下,V2B能够缓解楼宇负荷的高峰压力;在日常天气情况下,V2B能够通过调节峰电价和谷电价时段的用电量,降低楼宇的用能成本。

3)EV参与楼宇调控的激励价格会影响楼宇的调节能力,但激励价格与需量削减量呈非线性关系,实际应用中需要合理设置激励价格。

4)配置玻璃幕墙光伏、对温控负荷进行温度限制、考虑V2B等措施能够有效提升楼宇的环境友好程度。未来,碳减排量经核证后参与碳市场交易,能够为楼宇带来实际的经济利益。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 房俊. 基于中国电力行业分区域模型的碳减排机制研究[D]. 北京:清华大学,2017.
FANG Jun. Effects of carbon emission reduction policies on China's power sector[D]. Beijing:Tsinghua University,2017.
- [2] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):61-67.
ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 61-67.
- [3] 中国建筑科学院. 建言“十四五”——中国既有公共建筑节能工作的困境与突围[R]. 北京:自然资源保护协会,2020.
- [4] PANG C, DUTTA P, KEZUNOVIC M. BEVs/PHEVs as dispersed energy storage for V2B uses in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 473-482.
- [5] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):38-43.
XU Zhiwei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 38-43.
- [6] 李秋硕,肖湘宁,郭静,等. 电动汽车有序充电方法研究[J]. 电网技术,2012,36(12):32-38.
LI Qiushuo, XIAO Xiangning, GUO Jing, et al. Research on scheme for ordered charging of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 32-38.
- [7] 郝丽丽,王国栋,王辉,等. 考虑电动汽车入网辅助服务的配电网日前调度策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):35-43.
HAO Lili, WANG Guodong, WANG Hui, et al. Day-ahead scheduling strategy of distribution network considering electric vehicle-to-grid auxiliary service[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 35-43.
- [8] GARCÍA-VILLALOBOS J, ZAMORA I, SAN MARTÍN J I, et al. Delivering energy from PEV batteries: V2G, V2B and V2H approaches[C]//International Conference on Renewable Energies and Power Quality. La Coruña, Spain: [s.n.], 2015: 89-94.
- [9] 邢紫佩,王守相,梅晓辉,等. 考虑电动汽车充放电全程功率变化率和用户舒适度的V2H调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):70-77.
XING Zipei, WANG Shouxiang, MEI Xiaohui, et al. V2H scheduling strategy considering charging and discharging power change rate of electric vehicles and users' comfort level [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 70-77.
- [10] NEFEDOV E, SIERLA S, VYATKIN V. Internet of energy approach for sustainable use of electric vehicles as energy storage of prosumer buildings[J]. Energies, 2018, 11(8): 2165.
- [11] 杨铮,彭思成,廖清芬,等. 面向综合能源楼宇的电动汽车辅助服务方案[J]. 电网技术,2017,41(9):2831-2839.
YANG Zheng, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Ancillary services provided by electric vehicles for building integrated energy system[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2831-2839.
- [12] PEPPANEN J, RENO M J, GRIJALVA S. Thermal energy storage for air conditioning as an enabler of residential demand response[C]//2014 North American Power Symposium (NAPS). Pullman, WA, USA: IEEE, 2014: 1-6.
- [13] 胡鹏,艾欣,杨昭,等. 考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):239-245.
HU Peng, AI Xin, YANG Zhao, et al. Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 239-245.
- [14] 刘洪,陈星屹,李吉峰,等. 基于改进CPSO算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):193-200.
LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional power-heat integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 193-200.
- [15] SABER A Y, VENAYAGAMOORTHY G K. Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1229-1238.
- [16] 杨济如,石坤,崔秀清,等. 需求响应下的变频空调群组削峰方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):44-52.
YANG Jiru, SHI Kun, CUI Xiuqing, et al. Peak load reduction method of inverter air-conditioning group under demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 44-52.
- [17] 中华人民共和国生态环境部. 2019年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. [2021-04-12]. <http://www.mee.gov.cn/ywz/ydqhbh/wsqtkz/202012/W020201229610353340851.pdf>.

- [18] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 216-225.
CHEN Lidan, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.

作者简介:

余苏敏(1998—), 女, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车参与电网的需求响应策略;
杜洋(1986—), 男, 河北藁城人, 高级工程师, 硕士, 主



余苏敏

要研究方向为网源协调及新能源并网技术等;

冯冬涵(1981—), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士, 主要研究方向为智能电网中的策略与风险及电力市场理论与设计等(E-mail: seed@sjtu.edu.cn);

周云(1990—), 男, 江苏丹阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力/综合能源系统应急及用电能效管理等(E-mail: yun.zhou@sjtu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Optimal scheduling of low-carbon building considering V2B smart charging pile groups

YU Sumin¹, DU Yang², SHI Yiwei¹, SU Hao¹, FENG Donghan¹, ZHOU Yun¹, LI Hengjie^{1,3}

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

3. School of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Building emission reduction is an important way to achieve the goal of carbon peak and carbon neutral in China, and abundant load-side regulation measures are the development trend and requirement of new power systems. The low-carbon building energy management framework with high penetration of solar energy is proposed. The controllable load in the building includes the EV (Electric Vehicle) smart charging pile groups and the thermostatically controlled load. Considering the constraints of users' responsiveness and building's maximum electricity demand, the EV smart charging pile group model based on V2B (Vehicle-to-Building) technology and the thermostatically controlled load model based on comfort range are established, with the goal of minimizing the sum of electricity purchase cost and incentive cost, to obtain the daily power generation and consumption plan of building. Based on the carbon emission reduction, a demand-side environmental-friendly assessment index is designed to measure the energy saving effect of buildings. Taking the two-part time-of-use electricity price as the background, an office building on a high temperature day in summer is selected as the example to verify the energy regulation ability of the proposed model under extreme weather. The results show that the model can effectively reduce the monthly demand threshold of the building, and can significantly reduce the carbon emission of the building through measures such as energy saving of air conditioning and photovoltaic utilization.

Key words: smart charging; V2B; building emission reduction; thermostatically controlled load; low-carbon building; optimal scheduling

附录 A

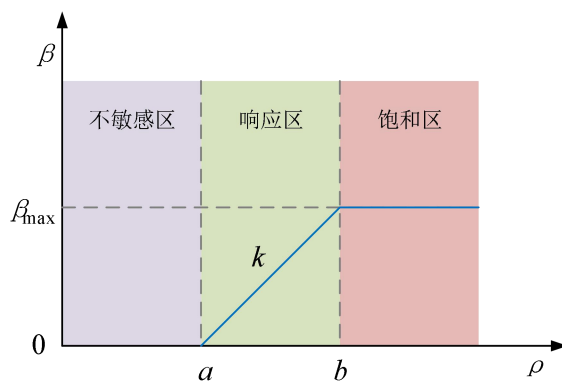


图 A1 用户响应度与激励价格之间的关系

Fig.A1 Relationship between user responsiveness and incentive price

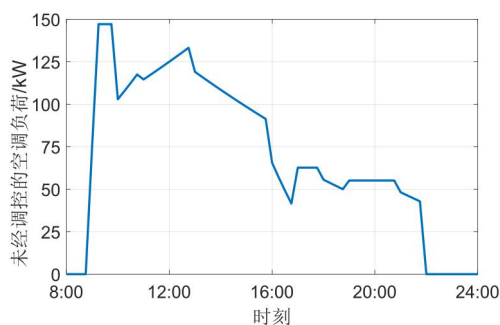


图 A2 空调负荷基线

Fig.A2 Air conditioning load baseline

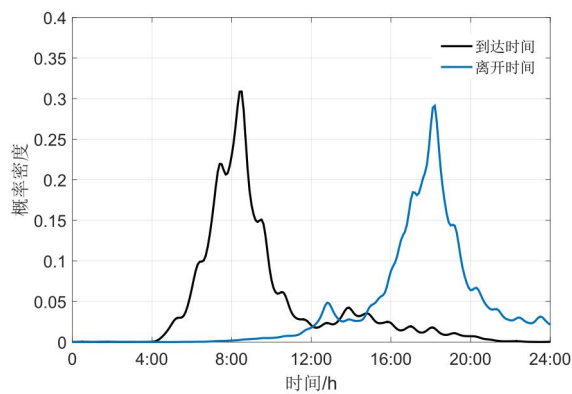


图 A3 EV 离开、到达楼宇时间的概率密度

Fig.A3 Probability density of EVs' departure and arrival time

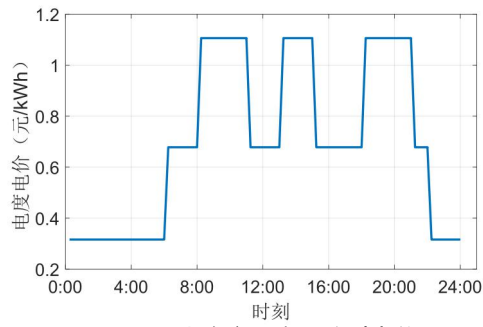


图 A4 上海市工商业分时电价

Fig.A4 TOU electricity price of Shanghai industry and commerce

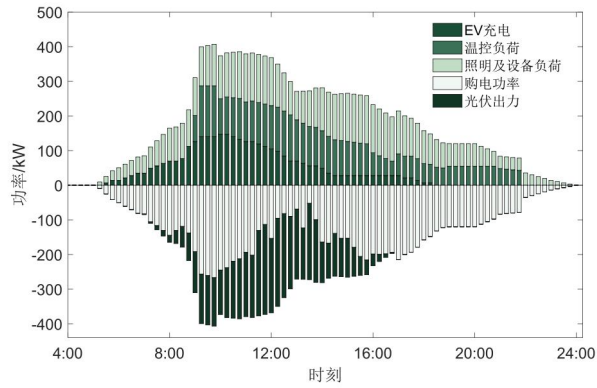


图 A5 光伏大发日的楼宇运行结果

Fig.A5 Operation results of building on high photovoltaic day

表 A1 楼宇建筑参数

Table A1 Building parameters

| 参数 | 取值 |
|---------------------|-------|
| 建筑面积/m ² | 12960 |
| 层数 | 5 |
| 长/m | 108 |
| 宽/m | 40 |
| 高/m | 15 |

表 A2 EV 参数

Table A2 Parameters of EV

| 参数 | 取值 |
|--------------|----|
| 电池容量/(kW·h) | 64 |
| 充(放)电效率/% | 95 |
| 充(放)电功率上限/kW | 7 |
| 荷电状态下限/% | 10 |
| 荷电状态上限/% | 95 |