

考虑换电站有序充电和碳排放的综合能源系统优化调度

胡 泉¹, 刘 闯¹, 王惠锋², 李佳奇³, 王 凯⁴

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林超高压公司, 吉林 长春 130000;
3. 国网浙江江山供电公司, 浙江 江山 324100; 4. 宿迁三新供电服务有限公司, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 随着电动汽车的普及和换电站的应用, 综合能源系统可调度资源的形式变得更加灵活。首先, 建立包含可再生能源、换电站以及多种耦合设备的综合能源系统, 并具体分析换电站的运行模式。其次, 根据换电站运行模式建立换电站有序充电模型, 并分析该综合能源系统中各设备的碳排放特性。最后, 计及系统的电热负荷响应, 对换电站的储能特性进行具体分析, 充分考虑其调度价值, 并以系统运行成本最低为目标函数, 构建考虑换电站有序充电和碳排放的综合能源系统优化调度模型。算例结果表明, 考虑换电站有序充电和碳排放能有效降低系统运行的总成本和碳排放量, 实现能量的互补互济。

关键词: 综合能源系统; 换电站; 有序充电; 碳排放

Integrated energy system optimization scheduling considering orderly charging and carbon emission of the battery swapping station

HU Xiao¹, LIU Chuang¹, WANG Huifeng², LI Jiaqi³, WANG Kai⁴

(1. School of Electrical Engineering Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. State Grid Jilin EHV Company, Changchun 130000, China; 3. State Grid Zhejiang Province Jiangshan City Power Supply Company, Jiangshan 324100, China; 4. Suqian Sanxin Power Supply Service Co., Ltd., Suqian 223800, China)

Abstract: With the popularization of electric vehicles and the application of battery swapping stations, the form of dispatching resources in the integrated energy system has become more flexible. Firstly, the integrated energy system including renewable energy, the battery swapping station and a variety of coupling equipment is established, and the operation mode of the battery swapping station is analyzed in detail. Secondly, according to the operation mode of the battery swapping station, the orderly charging model of the battery swapping station is established, and the carbon emission characteristics of each equipment in the integrated energy system are analyzed. Finally, considering the electrical and thermal load response of the system, the energy storage characteristics of the battery swapping station are analyzed in detail, its scheduling value is fully considered, and the lowest operation cost of the system is taken as the objective function to build the integrated energy system optimization scheduling model that considers orderly charging and carbon emissions of the battery swapping station. The calculation results show that considering the orderly charging and carbon emission of the battery swapping station can effectively reduce the total cost and carbon emission of the system operation, and realize the energy complementarity and mutual benefit.

Keywords: integrated energy system; battery swapping station; orderly charging; carbon emission

0 引言

由于全球范围内煤、石油等资源的储备日益枯竭和生态环境的不断恶化，因此如何实现能源发展与生态环境的友好共存成为当前亟待解决的问题。综合能源系统（Integrated Energy System, IES）因耦合利用电、气、热、冷等多种能量的特点被广泛关注，是实现不同能源系统协调运行和统一调度，促进能量梯级高效利用，构建环境友好型社会的重要手段^[1-3]。同时随着我国“双碳”目标的提出，能源行业对碳排放量问题也愈加重视，力争实现能源的低碳、零碳供应。在此社会背景下，研究IES的低碳运行和经济调度成为当前的研究热点^[4-5]。

电动汽车由于具有绿色环保、清洁低碳的优点而大力推广，逐步成为当今社会出行的主流。同时其电池本身具有储能特性，对能源行业运行发展的影响也日益显现。目前对电动汽车的供电手段主要有充电和换电两种模式。其中换电模式与充电模式相比，不仅可以快速满足用户的供电需求，还可以通过换电站（Battery Swapping Station, BSS）实现对电池的集中管理分配，从而减小了电动汽车大规模无序充电对电网造成的冲击，提高了系统运行的经济性和稳定性^[6-8]。因此，国内外专家学者针对BSS参与电网调度展开了大量研究。文献[9]基于排队理论构建BSS的有序充电策略，实现系统负荷低谷的有效调节。文献[10]以实现BSS与微电网分属不同主体时微电网的运行目标，构建了同时考虑多方经济利益的微电网双层经济调度模型。文献[11]建立考虑含风电场的BSS多目标优化调度模型，并采用粒子群求解算法对高维、高约束模型进行求解。文献[12]建立光储BSS的数学模型，研究站内现有电池对光储BSS运行的影响，并考虑站内现有电池与换电行为之间的时间耦合，实现了储能的最大化利用。文献[13]在考虑不确定性的基础上，提出了包含燃气轮机、储能、电池充放电设备、风电、光伏等的新型电池充换电站多时间尺度能量管理策略，算例结果表明，该策略能有效兼

顾新型电池充换电站的经济性和鲁棒性。文献[14]建立基于电动汽车分群优化方法的“风-网-站-车”体系调度模型，既提高了电动汽车用户的满意度以及电网的稳定性，又提高了风电消纳的能力。上述研究均说明BSS可以充分利用电池的储能特性实现对新能源的消纳和电网的调节，有效提高了电力系统运行的经济性；但在强调实现系统经济调度和优化运行的同时，却忽视了BSS潜在的可实现系统低碳运行的能力。

为了实现“双碳”目标，如何实现碳减排，是当今能源系统调度运行面临的关键问题。随着碳市场的引入，将碳排放量作为商品参与市场运行的碳交易机制，是减少化石燃料利用、形成绿色低碳经济以及实现人与环境和谐共处的重要手段^[15-16]。在国内外的相关研究中，文献[17]考虑碳交易机制对IES的影响，实现了系统碳排放量的减少，同时提高了系统经济性和环保性。文献[18]对传统碳交易机制进行全面分析，提出更为高效的阶梯型碳交易机制，通过对阶梯碳交易价格和可交易碳排放比例进行合理配置，减少了系统碳排放量，提高了经济效益。文献[19]从电力市场和碳交易市场角度出发，充分考虑可再生能源出力的随机性和价格型需求响应过程的波动性，以一天为调度周期，以系统经济成本和碳交易成本最低为目标进行优化调度。文献[20]考虑阶梯碳价和分时电价对电动汽车充电的影响，并对相关模型进行求解，验证了有奖励的阶梯碳价和自适应分时电价机制能够很好地平抑系统负荷波动，降低系统运行成本。文献[21-22]考虑风电、碳捕集和充换电站三者之间的耦合作用并建立相关模型，通过算例验证了所提模型能够有效实现风电消纳和碳减排目标。上述研究为IES的低碳运行提供了一定的理论依据，对IES的低碳经济调度具有重要意义，但并未将BSS视为碳减排过程中的重要主体。

综上所述，现阶段研究主要针对单一的电力系统中BSS参与运行调度时对系统的影响，以及分析碳排放对IES运行的影响，更加关注通过

管理BSS运行方式来合理安排站内电池的充放电行为,实现“低储高发”,提高系统运行经济性和灵活性。鲜有文章从BSS的储能特性和碳排放特性出发,分析其充放电策略对系统的运行和碳排放的影响。缺少对于含BSS的IES经济性与低碳性综合分析,较少考虑BSS在实现系统清洁低碳运行方面的巨大潜力。本文以含BSS的IES为研究对象。首先,对IES进行建模,并具体分析换电站的运行模式。其次,根据换电站运行模式建立换电站有序充电模型,并分析该IES中各设备的碳排放特性。最后,计及系统的电热负荷响应,对BSS的储能特性进行具体分析,充分考虑其调度价值,并以IES运行成本最低为目标函数,构建考虑BSS有序充电和碳排放的IES优化调度模型,通过对充换电行为的有序调节,实现系统整体的低碳经济运行,并通过算例验证了所提模型能有效降低系统运行的总成本和碳排放量,从而实现能量的互补互济。

1 含BSS的IES架构及运行模式建模

1.1 IES模型

IES主要考虑从上级电网和气网购买一定量的电能 P_{in} 和天然气 G_{in} ,并考虑风电(Wind Turbine, WT)、光伏(Photovoltaics, PV)等可再生能源发电,利用相关耦合设备实现对电、热负荷的可靠供应,最终实现电、热、气网的耦合。相关的耦合设备有热电联产机组(Combined Heating and Power, CHP)、燃气锅炉(Gas Boiler, GB)和热泵(Heat Pump, HP)。其中CHP机组主要由燃气轮机(Gas Turbine, GT)、余热锅炉(Waste Heat Boiler, WHB)和余热发电设备组成。GT通过燃烧天然气产生高温高压气体并带动发电机工作提供电能,在此过程中所产生的热能可进一步加以利用。为了提高能源利用效率,WHB将GT产生的热量进行充分加工并供给热负荷用户使用;余热发电设备将GT产生的余热转化为电能注入电网。GB通过燃烧天然气产生热能;HP消耗电能并产生热能。同时,在该系统中还包含储

能设备蓄电池(Energy Storage, ES)和储热罐(Heat Storage, HS),并将BSS视为广义上的储能形式。由于电池的储能特性,BSS可以在满足用户换电需求的前提下,实现与系统能量的双向流动。该系统基本结构如图1所示。

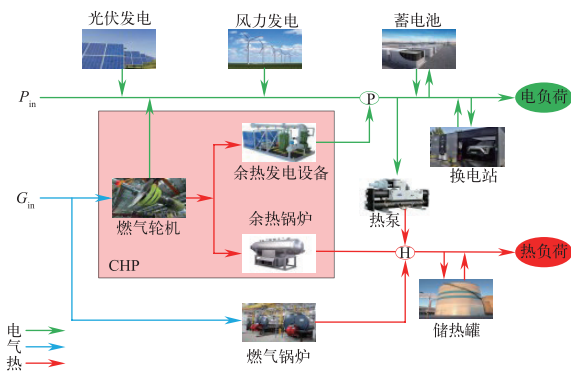


图1 IES结构

Fig. 1 Structure diagram of the IES

BSS是一个提供换电服务的公共服务场所。电动汽车电池可视为系统中的储能元件,能够对系统运行进行调节,从而实现能量的双向流动。因此BSS的运行模式可分为G2B(Grid to Battery)和B2G(Battery to Grid)两种。当系统整体负荷处于低谷时,BSS可以对站内的非满电电池进行整体调度并充电,以满足站内电池电量的要求,这种模式称为G2B模式。此时从系统角度出发,BSS可视为用电负荷,可参与系统调度,同时提高系统机组利用率和可再生能源的消纳。当系统整体负荷处于高峰时,站内的空闲带电电池可视为系统的备用电源,BSS可对站内的空闲带电电池进行整体调度,从而向电网反馈电能,这种模式称为B2G模式。此时从系统角度出发,BSS可视为电源出力,可对系统供电,减小系统的发电成本。

1.2 BSS运行过程

当电动汽车用户将车驶入BSS后,可根据当前站内状态,直接对电池进行换电操作或者排队等待(当站内没有多余的满电电池或者空闲的换电装置时),待实现换电步骤后,用户驾车驶离BSS,更换下来的空闲电池由BSS进行统一管理。BSS运行模式如图2所示。

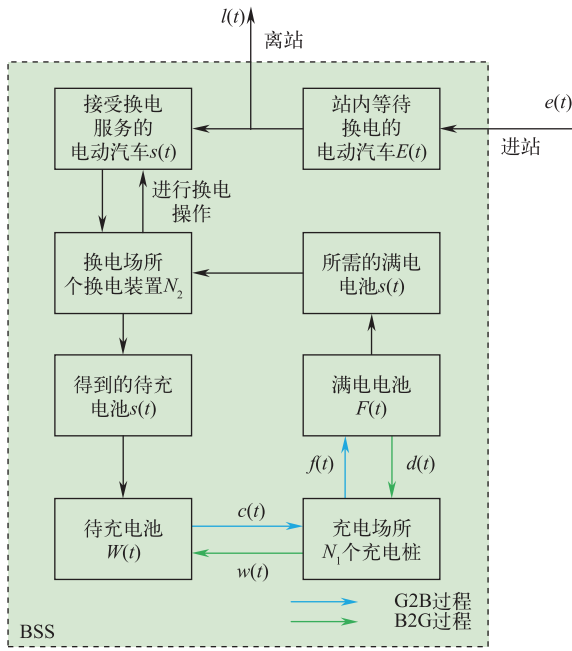


图2 BSS运行模式

Fig. 2 Operating model diagram of the BSS

假设站内可供电池进行充放电操作的充电桩有 N_1 个，提供换电服务的换电装置有 N_2 套，电池总数为 B 块。在 t 时刻，有 $e(t)$ 辆需要进行换电操作的电动汽车进入站内，同时BSS已有 $E(t)$ 辆电动汽车在排队等待换电服务。如果由于队列过长导致等待换电时间过长，部分电动汽车用户会驶离BSS寻求其他可提供换电服务的地方。假设 t 时刻有 $l(t)$ 辆电动汽车放弃换电驶离，则站内实际进行换电操作的电动汽车数量为 $s(t)$ 辆。并假设 t 时刻BSS的电池库中分别有 $F(t)$ 块满电电池和 $W(t)$ 块待充电电池，完成换电服务后，又有 $s(t)$ 块电池离开满电电池组，进入待充电电池组中。而后BSS管理者根据实际情况采取G2B模式或B2G模式，分别使 $c(t)$ 块待充电电池进入充电场所进行充电， $d(t)$ 块满电电池通过充电桩向电网反向供电。在G2B模式下， $f(t)$ 块电池完成充电进入满电电池组中；在B2G模式下， $w(t)$ 块电池完成放电进入待充电电池组中。

2 BSS有序充电模型

2.1 电动汽车用户行为

由于用户使用习惯和生活节奏的不同，使得

针对电动汽车电池的调度具有很大的不确定性和随机性。但是根据大量数据表明，电动汽车用户的换电需求曲线总体上呈现泊松分布的规律。同时，为了使数据更加贴近真实值，本文结合某BSS一天内到站电动汽车数量的真实数据，采用分段式泊松分布对用户行为进行模拟，得出用于描述一天内不同时段到站汽车数量的数列 $e(t)$ 。

2.2 工作模式

在BSS工作过程中，各变量间满足以下条件。

(1) 电池的状态转移条件

电池的状态转移关系如图3所示。

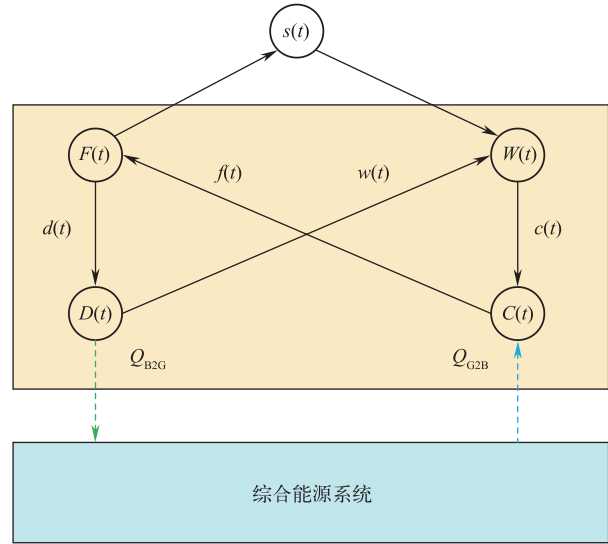


图3 电池的状态转移关系图

Fig. 3 The state transition diagram of batteries

由图3可知，相关表达式为

$$\begin{cases} F(t) = F(t-1) - s(t) - d(t) + f(t) \\ W(t) = W(t-1) - c(t) + s(t) + w(t) \\ C(t) = C(t-1) + c(t) - f(t) \\ D(t) = D(t-1) + d(t) - w(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中， $F(t)$ 、 $W(t)$ 、 $C(t)$ 和 $D(t)$ 分别为 t 时刻满电、待充电、充电和放电的电池数量； $s(t)$ 为 t 时刻结束行程的电动汽车带进系统的待充电电池数量； $f(t)$ 、 $c(t)$ 、 $d(t)$ 和 $w(t)$ 分别为 t 时刻新进的满电状态、充电状态、放电状态和待充电状态的电池数量。

由于在电池的充放电过程中，荷电状态（State of Charge, SOC）是连续变化的，使得准确描述电池的状态转移较为困难。因此，本文采用离散化的方法，将 $\text{SOC} \leq 0.1$ 的电池视为待充电电池，数量为 $W(t)$ ；将 $\text{SOC} \geq 0.9$ 的电池视为满电电池，数量为 $F(t)$ ；并将 $\text{SOC} \in [0.1, 0.9]$ 的区间均匀分成8组，表示充电场所处于过渡状态下不同电量的电池，即 $C(t)$ 和 $D(t)$ 分别为

$$\begin{cases} C(t) = \sum_{i=1}^8 N_{0.1i}^{0.1(i+1)}(t) \\ D(t) = \sum_{i=1}^8 N_{0.1(i+1)}^{0.1i}(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $N_m^n(t)$ 为 t 时刻SOC由 m 转移到 n 的电池数量。

在 t 时刻，BSS实际能提供充放电和换电服务的电动汽车电池数量受充电桩数量、换电装置数量和满电池库存数量等一系列因素影响，实际进行充电和换电的电动汽车电池数量应满足

$$C(t) + D(t) \leq N_1 \quad (3)$$

$$s(t) = \min\{F(t), N_2, E(t)\} \quad (4)$$

式中， N_1 为BSS充电桩的数量； $E(t)$ 为 t 时刻入站等待的电动汽车数量； N_2 为BSS换电装置的数量。

(2) G2B运行条件

$$Q(t) = Q(t-1) + Q_{\text{G2B}}(t) - Q_{\text{EV}}^s(t) + Q_{\text{EV}}^r(t) \quad (5)$$

$$\forall t \in T_{\text{G2B}}$$

$$Q_{\text{G2B}}(t) = \eta_c P^c(t) c(t) \Delta t \quad (6)$$

$$Q_{\text{EV}}^s(t) = C_s(t) \quad (7)$$

$$Q_{\text{EV}}^r(t) = C_s(t) \text{SOC}_0 \quad (8)$$

式中， $Q(t)$ 为BSS的储存电量； $Q_{\text{G2B}}(t)$ 为 t 时刻BSS采用G2B模式进行充电所吸收的电量； $Q_{\text{EV}}^s(t)$ 为BSS满足用户换电需求所提供的电池电量； $Q_{\text{EV}}^r(t)$ 为BSS进行换电操作后所得的非满电电池剩余电量； Δt 为每段的时间间隔； $P^c(t)$ 为站内充电桩的充电功率， $P^c(t) > 0$ ； η_c 为每个充电桩的充电效率； C 为电动汽车电池的容量上限； SOC_0 为反映电动汽车在换电前电池剩余电量的平均SOC； T_{G2B} 为调度周期内BSS处于G2B运行模式的总时刻集合。

(3) B2G运行条件

$$Q(t) = Q(t-1) - Q_{\text{B2G}}(t) - Q_{\text{EV}}^s(t) Q_{\text{EV}}^r(t) \quad (9)$$

$$\forall t \in T_{\text{B2G}}$$

$$Q_{\text{B2G}}(t) = \frac{P^d(t) d(t) \Delta t}{\eta_d} \quad (10)$$

式中， $Q_{\text{B2G}}(t)$ 为 t 时刻电网通过BSS的B2G进程获取的电量； $P^d(t)$ 为充电桩的放电功率， $P^d(t) > 0$ ； η_d 为充电桩的放电效率； T_{B2G} 为调度周期内BSS处于B2G运行模式的总时刻集合。

3 综合能源系统碳排放特性建模

3.1 出力碳排放量

考虑到风电出力和光伏出力均属于可再生能源，具有 CO_2 排放量低的特点，可视为近零碳排放电源，碳排放量可以忽略不计。因此在该系统中，出力碳排放源为GT和GB。系统实际碳排放量 $Em(t)$ 为

$$Em(t) = C_{\text{GT}} [\gamma P_{\text{GT}}(t) + H_{\text{GT}}(t)] + C_{\text{GB}} H_{\text{GB}}(t) \quad (11)$$

式中， C_{GT} 、 C_{GB} 分别为反映GT和GB运行时单位出力产生的 CO_2 排放系数； $P_{\text{GT}}(t)$ 、 $H_{\text{GT}}(t)$ 、 $H_{\text{GB}}(t)$ 分别为 t 时刻GT的电功率、热功率和GB的热功率； γ 为电量的折算系数。

3.2 BSS等效碳排放量

当BSS向电网提供电能时，不产生 CO_2 ，相当于近零碳排放电源；当BSS为电动汽车提供换电服务时，能够变相地减少普通燃油汽车的 CO_2 排放，此时换电站相当于负碳排放电源。将电动汽车经换电服务后所补充的电能可行驶路程与普通燃油汽车行驶路程进行等效，换电站的碳排放量 $Em_s(t)$ 为

$$Em_s(t) = -\rho \varphi (Q_{\text{EV}}^s(t) - Q_{\text{EV}}^r(t)) \quad (12)$$

式中， ρ 为燃油汽车每行驶单位距离因消耗汽油所产生的 CO_2 排放量； φ 为电动汽车每消耗单位电量所行驶的路程。

4 考虑BSS有序充电和碳排放的IES优化调度模型

4.1 目标函数

本文以IES的日运行成本最小为目标。根据

上述分析可知,在不考虑建设成本的前提下,其日运行成本主要由购能成本、运维成本、碳交易成本和电池折旧成本四部分组成。

(1) 购能成本

系统购能成本由购电成本、售电成本和购气成本组成,表达式为

$$F_1 = \sum_{t=1}^T [p_e^b(t)P^b(t) - p_e^s(t)P^s(t) + p_g^b(t)G^b(t)] \quad (13)$$

式中, T 为每个调度周期的时段数; $p_e^b(t)$ 、 $p_e^s(t)$ 分别为 t 时刻的购、售电电价; $P^b(t)$ 、 $P^s(t)$ 分别为 t 时刻从上级电网的购、售电功率; $p_g^b(t)$ 为 t 时刻的天然气管网购气单价; $G^b(t)$ 为 t 时刻从上级气网的购气功率。

(2) 运维成本

系统运维成本为内部各个设备运转过程中的运维成本之和,表达式为

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \left\{ a_1 [P_{\text{CHP}}(t) + H_{\text{CHP}}(t)] + a_2 H_{\text{HP}}(t) + a_3 P_{\text{PV}}(t) + a_4 P_{\text{WT}}(t) + a_5 H_{\text{GB}}(t) + a_6 P_{\text{ES}}(t) + a_7 H_{\text{HS}}(t) \right\} \quad (14)$$

式中, $a_1, a_2, \dots, a_7$ 分别为CHP、HP、PV、WT、GB、ES和HS的运维系数; $P_{\text{CHP}}(t)$ 、 $H_{\text{CHP}}(t)$ 、 $H_{\text{HP}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{ES}}(t)$ 、 $H_{\text{HS}}(t)$ 分别为CHP电功率、CHP热功率、HP热功率、PV实际功率、WT实际功率、ES电功率和HS热功率。

(3) 碳交易成本

政府为了鼓励系统中各用户积极响应碳交易机制,给出系统碳配额量作为碳交易的衡量标准。当用户实际碳排放量低于政府所规定的碳配额时,可以将多余的碳排放量按照市场价格出售给其他需要额外碳排放量的用户。相反,当用户实际碳排放量高于系统碳配额时,需要从市场中购买相应的碳排放权。系统碳交易成本计算时应考虑系统总等效碳排放量与系统碳配额的差值,表达式为

$$F_3 = p_{\text{CO}_2} \sum_{t=1}^T [Em(t) - Em_{\text{av}}(t) + Em_s(t)] \quad (15)$$

$$Em_{\text{av}}(t) = C_{\text{av}} [H_{\text{GT}}(t) + \gamma P_{\text{GT}}(t) + H_{\text{GB}}(t)] \quad (16)$$

式中, p_{CO_2} 为碳交易价格; $Em_{\text{av}}(t)$ 为系统的碳排

放配额; C_{av} 为系统的碳排放系数。

(4) 电池折旧成本

电池折旧成本 F_4 主要由浮充成本 F^{float} 和循环成本 F^{cycle} 构成。浮充成本指的是电池在浮充(保持充满电状态)模式下,由于电池处于长时间静置状态所导致的折旧成本。循环成本是指电池在正常的充放电循环过程中产生的折旧成本。电池折旧成本表达式为

$$F_4 = \max(F^{\text{float}}, F^{\text{cycle}}) \quad (17)$$

$$F^{\text{float}} = \frac{AC}{365T_{\text{float}}} \quad (18)$$

$$F^{\text{cycle}} = \sum_{t=1}^T [Q_{\text{G2B}}(t) + Q_{\text{B2G}}(t)]^{k_p} \frac{AC^{-k_p}}{2N_o} \quad (19)$$

式中, A 为电池的单位容量投资成本; C 为额定容量; T_{float} 为电池浮充寿命; N_o 为基准循环次数; k_p 为电池特性参数。

综上,该IES日运行成本的目标函数为

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (20)$$

4.2 约束条件

除式(1)~式(12)的约束条件外,还包含以下约束条件。

(1) 不等式约束

$$\begin{cases} F(t) \geq 0, W(t) \geq 0, C(t) \geq 0, D(t) \geq 0 \\ Q_{\min} \leq Q(t) \leq Q_{\max} \\ 0 \leq P^c(t) \leq P_{\max}^c \\ 0 \leq P^d(t) \leq P_{\max}^d \\ F(t) + W(t) + C(t) + D(t) \leq B \end{cases} \quad (21)$$

式中, $Q_{\max}$ 为BSS储存电量的设计上限; $Q_{\min}$ 为BSS储存电量的设计下限; $P_{\max}^c$ 为充电桩的充电功率上限; $P_{\max}^d$ 为充电桩的放电功率上限; B 为BSS可提供的电池数量。

(2) SOC约束

$$\begin{cases} \mu_c(t) + \mu_d(t) \leq 1 \\ \text{SOC}(t+1) = \text{SOC}(t) + \frac{\eta_c P^c(t) \mu_c(t) \Delta t}{C} - \frac{P^d(t) \mu_d(t) \Delta t}{\eta_d C} \\ 0.1 \leq \text{SOC}(t) \leq 0.9 \end{cases} \quad (22)$$

式中, $\mu_c(t)$ 、 $\mu_d(t)$ 分别为 t 时刻充电桩的充放电状态; $\text{SOC}(t)$ 为 t 时刻电池的SOC。

(3) 风电、光伏出力约束

$$P_{\text{WT}}(t) \leq P_{\text{WT}}^{\text{pre}}(t) \quad (23)$$

$$P_{\text{PV}}(t) \leq P_{\text{PV}}^{\text{pre}}(t) \quad (24)$$

式中, $P_{\text{WT}}^{\text{pre}}(t)$ 为 t 时刻风电的预测出力; $P_{\text{PV}}^{\text{pre}}(t)$ 为 t 时刻光伏的预测出力。

(4) CHP、GB出力约束

$$\begin{cases} P_{\text{CHP}}(t) = P_{\text{GT}}(t) + P_{\text{ORC}}(t) \\ H_{\text{CHP}}(t) = \eta_{\text{WHB}} \beta(t) H_{\text{GT}}(t) \\ H_{\text{GB}}(t) = \eta_{\text{GB}} V_{\text{g}} G_{\text{GB}}(t) \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{\text{GT}}(t) = \eta_{\text{GT}}^c V_{\text{g}} G_{\text{CHP}}(t) \quad (26)$$

$$H_{\text{GT}}(t) = \eta_{\text{GT}}^h V_{\text{g}} G_{\text{CHP}}(t) \quad (27)$$

$$P_{\text{ORC}}(t) = \eta_{\text{ORC}} \alpha(t) H_{\text{GT}}(t) \quad (28)$$

$$\alpha(t) + \beta(t) = 1 \quad (29)$$

$$0 \leq \alpha(t) \leq 1, 0 \leq \beta(t) \leq 1 \quad (30)$$

式中, $P_{\text{ORC}}(t)$ 为 t 时刻ORC的电功率; $G_{\text{CHP}}(t)$ 、 $G_{\text{GB}}(t)$ 分别为 t 时刻CHP和GB的耗气功率; $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 分别为 t 时刻GT产热分给ORC、WHB的比例; V_{g} 为天然气热值; η_{GT}^c 、 η_{GT}^h 、 η_{ORC} 、 η_{GB} 分别为GT气转电效率、气转热效率、ORC电效率和GB气转热效率; η_{WHB} 为WHB的热效率。

(5) 能量平衡约束

$$\begin{cases} P^b(t) - P^s(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{HP}}(t) + \\ P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{ES}}^d(t) - P_{\text{ES}}^c(t) = P_{\text{L}}(t) \\ H_{\text{GB}}(t) + H_{\text{CHP}}(t) + H_{\text{HP}}(t) + H_{\text{HS}}^d(t) - \\ H_{\text{HS}}^c(t) = H_{\text{L}}(t) \\ G^b(t) - G_{\text{CHP}}(t) - G_{\text{GB}}(t) = 0 \end{cases} \quad (31)$$

(6) 储能约束

$$\begin{cases} \sigma_c(t) + \sigma_d(t) \leq 1 \\ S_{\text{ES}}(t+1) = S_{\text{ES}}(t) + \frac{\eta_{\text{ES}}^c P_{\text{ES}}^c(t) \sigma_c(t) \Delta t}{C_{\text{ES}}} - \\ \frac{P_{\text{ES}}^d(t) \sigma_d(t) \Delta t}{\eta_{\text{ES}}^d C_{\text{ES}}} \\ S_{\text{ES}}(0) = S_{\text{ES}}(T) \\ 0 \leq P_{\text{ES}}^c(t) \leq P_{\text{ES,max}}^c \\ 0 \leq P_{\text{ES}}^d(t) \leq P_{\text{ES,max}}^d \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \omega_c(t) + \omega_d(t) \leq 1 \\ S_{\text{HS}}(t+1) = S_{\text{HS}}(t) + \frac{\eta_{\text{HS}}^c H_{\text{HS}}^c(t) \omega_c(t) \Delta t}{C_{\text{HS}}} - \\ \frac{H_{\text{HS}}^d(t) \omega_d(t) \Delta t}{\eta_{\text{HS}}^d C_{\text{HS}}} \\ S_{\text{HS}}(0) = S_{\text{HS}}(T) \\ 0 \leq H_{\text{HS}}^c(t) \leq H_{\text{HS,max}}^c \\ 0 \leq H_{\text{HS}}^d(t) \leq H_{\text{HS,max}}^d \end{cases} \quad (33)$$

式中, $\sigma_c(t)$ 、 $\sigma_d(t)$ 、 $\omega_c(t)$ 、 $\omega_d(t)$ 分别为 t 时刻ES和HS的充放能状态; $S_{\text{ES}}(t)$ 、 $S_{\text{HS}}(t)$ 分别为 t 时刻ES和HS的储能比值; η_{ES}^c 、 η_{ES}^d 、 η_{HS}^c 、 η_{HS}^d 分别为ES和HS的充放能效率; $P_{\text{ES}}^c(t)$ 、 $P_{\text{ES}}^d(t)$ 、 $H_{\text{HS}}^c(t)$ 、 $H_{\text{HS}}^d(t)$ 分别为 t 时刻ES和HS的充放能功率; C_{ES} 、 C_{HS} 分别为ES和HS的容量; $P_{\text{ES,max}}^c$ 、 $P_{\text{ES,max}}^d$ 、 $H_{\text{HS,max}}^c$ 、 $H_{\text{HS,max}}^d$ 分别为ES和HS的充放能功率上限。

5 算例分析

5.1 算例设置

该系统以华北地区某BSS运行数据为基础, 该区域内的负荷大多为居民负荷。取1 h为一个调度时长, 采用本文提出的模型对该系统的优化调度进行研究。BSS相关参数见表1。

表1 电动汽车换电站相关参数

Tab. 1 Related parameters of the battery swapping station

参数	数值
换电站内电池总数 B /块	600
每块电池容量 C /kW·h	80
换电站内充电桩总数 N_1 /台	60
储存电量设计上限 Q_{max} /kW·h	40 000
储存电量设计下限 Q_{min} /kW·h	6 000
单个充电桩的充电功率上限 P_{max}^c /kW	8
单个充电桩的放电功率上限 P_{max}^d /kW	7
换电站内换电设备总数 N_2 /台	40
电池的充电效率 η_c	0.95
电池的放电效率 η_d	0.9
单位容量投资成本 A /[元/(kW·h)]	1 300
浮充寿命 T_{float} /a	10
基准循环次数 N_0	5 000
特性参数 k_p	1.5

进入换电站的电动汽车数量服从分段式泊松

分布，如图4所示。

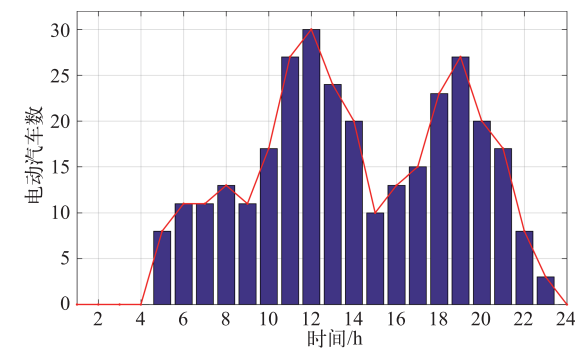


图 4 不同时刻到站的电动汽车数量
Fig. 4 The number of electric vehicles arriving at the station at different times

本文假设每个调度周期的起始时刻站内有满电电池120块，待充电电池有65块。平均荷电状态SOC₀取0.1，燃油汽车行驶单位距离产生的碳排放量 ρ 取190 g/km，电动汽车消耗单位电量所行驶的路程 φ 取2.5 km/(kW·h)，IES运行相关参数见表2。系统向上级电网的购售电价格 $P_e^b(t)$ 、 $P_e^s(t)$ 见表3。

表 2 综合能源系统运行相关参数 Tab. 2 Related parameters of the integrated energy system operation			
参数	数值	参数	数值
碳交易价格 $p_{CO_2}/(\text{元}/\text{t})$	500	系统碳排放系数 $C_{av}/[t/(MW\cdot h)]$	0.57
天然气热值 $V_g/(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3)$	9.88	GT 产热分给 ORC 的比例 $\alpha(t)$	0.5
天然气单价 $p_g^b(t)/(\text{元}/\text{m})$	2.65	GT 产热分给 WHB 的比例 $\beta(t)$	0.5
CHP 的运维系数 a_1	0.085	GT 气转电效率 η_{GT}^e	0.35
HP 的运维系数 a_2	0.035	GT 气转热效率 η_{GT}^h	0.45
PV 的运维系数 a_3	0.02	ORC 发电效率 η_{ORC}	0.8
WT 的运维系数 a_4	0.025	GB 的气转热效率 η_{GB}	0.85
GB 的运维系数 a_5	0.02	WHB 发热转换效率 η_{WHB}	0.8
ES 的运维系数 a_6	0.015	ES 的充能效率 η_{ES}^c	0.95
HS 的运维系数 a_7	0.035	ES 的放能效率 η_{ES}^d	0.9
GT 的碳排放系数 $C_{GT}/[t/(MW\cdot h)]$	0.6101	HS 的充能效率 η_{HS}^c	0.95
GB 的碳排放系数 $C_{GB}/[t/(MW\cdot h)]$	0.6101	HS 的放能效率 η_{HS}^d	0.9
电量的折算系数 γ	2.5	-	-

表 3 不同时刻的购电价格和售电价格
Tab. 3 Electricity purchase and sale prices at different times

时刻	购电价格 $p_e^b(t)/$ [元/(kW·h)]	售电价格 $p_e^s(t)/$ [元/(kW·h)]
峰时刻 11:00—14:00, 18:00—21:00	1.1	1.3
平时刻 08:00—10:00, 15:00—17:00, 22:00	0.75	0.56
谷时刻 00:00—07:00, 23:00—24:00	0.3	0

5.2 结果分析

本文针对以下三种模式进行研究，结果见表4。

模式1：均不计及BSS调节和碳排放对系统的影响。

模式2：仅计及碳排放对系统的影响。

模式3：均计及BSS调节和碳排放对系统的影响。

表 4 不同模式对比结果
Tab. 4 Comparison under different models

模式	总成本 /元	购能成本 /元	运维成本 /元	碳排放 成本/元	碳排放 量/t
1	24 886.816	20 970.672	3 916.144	-	35.277
2	26 012.117	21 107.691	3 934.303	970.122	29.520
3	13 280.862	8 560.993	1 933.120	223.503	6.908

通过对比发现，在计及碳排放对系统的影响后，模式2的总成本与模式1相比上升了4.52%，购能成本、运维成本与模式1相比分别上升了0.65%和0.46%，这是因为模式2需要考虑碳排放对系统的调节，为了尽可能降低系统对环境的影响，各设备出力有所改变，从而使购能成本和运维成本略微上升。通过对各设备出力的调节，系统碳排放量显著减少，下降了16.32%。此时系统的碳排放源为GT和GB。不同模式下的电、热功率供需平衡如图5、图6所示。模式3下BSS有序充电策略如图7所示。模式3不同时刻BSS满电电池数如图8所示。同时对比图5、图6可知，模式2对电负荷设备的出力调节更为明显。在均计及BSS调节和碳排放对系统的影响后，系统的性能显著提升。同时根据图7可以发

现BSS中的电池在1:00—7:00、14:00—15:00大量充电,在8:00—12:00、16:00—24:00大量放电,符合对系统进行削峰填谷的特性。同时根据图4和图8可知,BSS在一个调度周期内可以满足用户需求。模式3与模式2相比,总成本下降了48.94%,购能成本下降了59.44%,运维成本下降了50.86%,碳排放成本下降了76.96%,碳排放量下降了76.60%。这是因为该系统内的负荷主要为居民负荷,总负荷量较小,在该IES中BSS的充电策略起到主导作用。由于BSS可以实现能量的双向流动,因此可通过B2G模式将站内电池的所余电量供给各种电力负荷进行使用,从而降低本系统向上级电网所需的购电量,实现了能量间的互济互补。由于BSS可以作为负碳排放电源,因此系统的碳排放量和碳排放成本大幅降低。

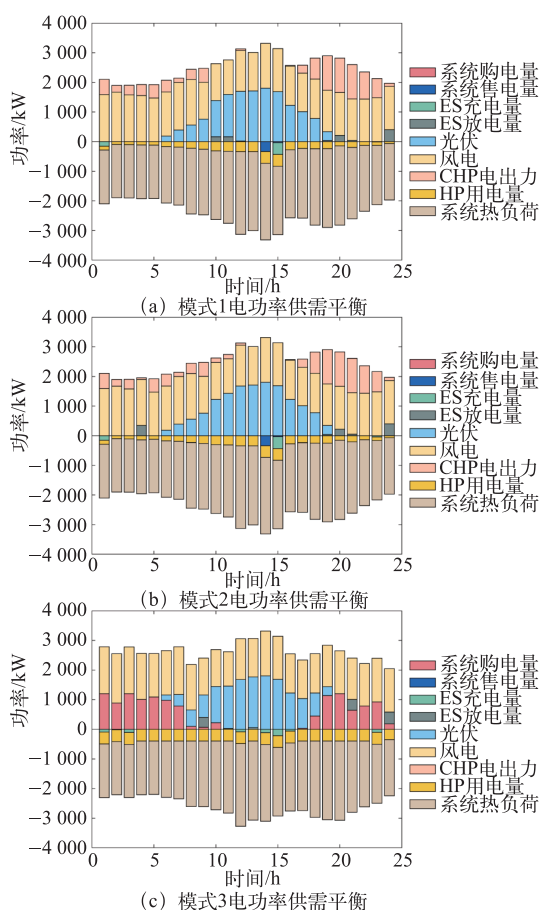


图5 不同模式下的电功率供需平衡

Fig. 5 Electric power supply and demand balance in different modes

根据图5可知,由于BSS的调节作用,模式3与模式2相比,通过向上级电网购电代替CHP机组出力来满足系统的用电需求。这是因为从系统层面考虑,向上级电网购电和CHP出力相比所需成本更低,并减少了CO₂的排放。系统主要在1:00—7:00、18:00—23:00购电,其他时刻购电量较少。这是因为1:00—7:00,BSS大量充电,故所需购电量较大;在峰值时刻11:00—14:00时,由于BSS大量放电可以满足系统用电需要,故几乎不购电;18:00—21:00虽然电价处于峰值且BSS大量放电,但是此时风电和光伏出力小,仅凭BSS放电不足以满足用户用电需求,故购电量较大。模式3并没有向上级电网售电,这是因为HP的耗电量较模式2相比有所增加,系统所剩的电全部被系统自身消纳。

根据图6可知,由于BSS的调节和HP的运行,模式3系统的热负荷主要由HP提供,GB的热出力较模式2相比有所降低,所产生的碳排放量减少。

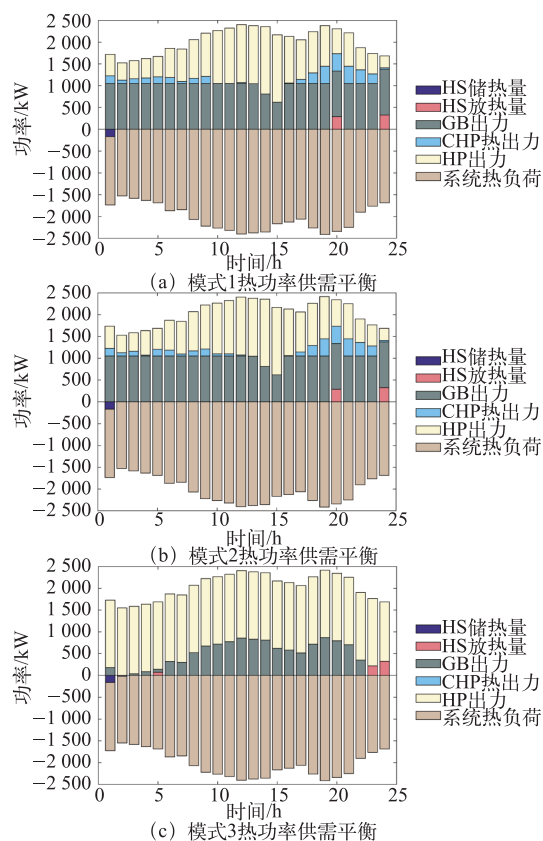


图6 不同模式下的热功率供需平衡

Fig. 6 Thermal power supply and demand balance in different modes

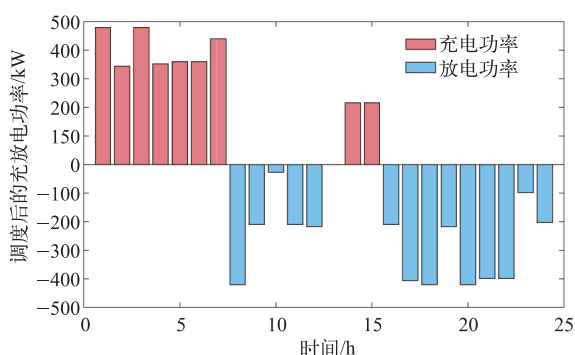


图7 模式3下BSS有序充电策略

Fig. 7 Orderly charging strategy of BSS in mode 3

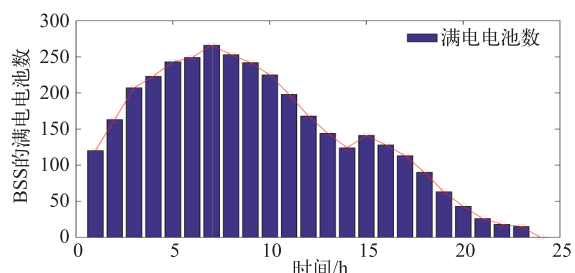


图8 模式3不同时刻BSS的满电电池数

Fig. 8 The number of fully charged batteries of BSS at different times in mode 3

5.3 系统功率供需平衡分析

以模式3的调度结果进行具体供需平衡分析。

在0:00—7:00时，电价较为低廉，系统通过从上级电网大量购电并充分利用风能来满足用户和BSS的用电需求，同时将多余的电能储存在ES中，实现可再生能源消纳。在11:00—14:00和18:00—21:00负荷高峰期，电价较为昂贵，ES放电，减轻系统的供电负担。在参与IES优化运行的过程中，BSS可以有效利用风能和太阳能，并与系统其他设备进行耦合，减少系统的碳排放，进而降低运维成本，使IES运行更加经济和低碳。因此，BSS的参与不仅有助于缓解高峰期供电设备的压力，还增强了系统的灵活性。在用能高峰期，BSS可将电池转移至电价较低的时段进行充电，从而提升系统稳定性并降低购能成本。

在该系统中，热能供给主要由GB和HP提供。在热负荷需求较低的时段，主要由HP提供热量。在满足用户热负荷需求下，HS吸收多余

的热能进行存储，提高了系统的稳定性。

6 结束语

本文基于BSS的运行特点、各类耦合设备的碳排放特性，综合考虑电池状态转换、功率平衡和储能特性等约束，提出考虑BSS有序充电策略和碳排放的IES优化调度模型。并针对不计及BSS调节和碳排放、仅计及碳排放、计及BSS调节和碳排放三种模式进行对比分析。通过算例分析可得出以下结论：BSS参与综合能源系统运行调度时，可以充分利用自身的储能优势对系统进行调节。通过对站内电池进行有序充电，可以有效降低系统运行的总成本和碳排放量，实现能量的互补互济，提高系统运行的经济性和环保性。

此外，当前研究尚有诸多不足之处，如在考虑气网、热网运行的过程中，并未计及管网的动态特性；且在考虑ES和HS的过程中，仅建立电/热储能统一性模型，并未详细分析电/热储能之间的物理差异性，今后将针对上述方面进行研究。

参考文献

- [1] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 低碳多能源系统的研究框架及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4060-4069, 4285.
- [2] 李昊, 刘畅, 苗博, 等. 考虑冷热电互补及储能系统的多园区综合能源系统协调优化调度[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1482-1491.
- [3] 张泰铭. 含光热电站的综合能源系统多时间尺度低碳经济调度[J]. 电气应用, 2022, 41(5): 60-66.
- [4] 陈芳, 王泽, 尉鹏程. 碳交易背景下含P2G-碳捕集的综合能源系统机会模糊优化调度方法研究[J]. 电气应用, 2023, 42(10): 62-69.
- [5] 柴瑞环, 杨昆, 房超运, 等. “双碳”目标下含碳捕集与电转气的综合能源系统优化调度[J/OL]. 电测与仪表, 1-9[2024-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240511.1157.011.html>.
- [6] 耿世平, 牛东晓, 郭晓鹏, 等. 计及多能源柔性

- 负荷调度的微能源网多目标演化博弈[J]. 电力建设, 2020, 41(11): 101-115.
- [7] 赵霞, 冯欣欣, 戴蓉, 等. 考虑负荷柔性及网架调整的电-气联合调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6856-6869.
- [8] 王志南, 张宇华, 黄珂, 等. 计及多种柔性负荷的虚拟电厂热电联合鲁棒优化调度模型[J]. 电力建设, 2021, 42(7): 1-10.
- [9] 黄敏丽, 于艾清. 基于改进布谷鸟算法的电动汽车换电站有序充电策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1075-1083, 1284.
- [10] SAEID E, AMJAD M A, SHAHRAM J. Optimal operation scheduling of a microgrid incorporating battery swapping stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5063-5072.
- [11] 张颖, 容展鹏, 张宇雄, 等. 电动汽车换电站调度优化问题下的约束罚函数[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 24-30.
- [12] 王子奇, 侯思祖, 郭威. 考虑库存电池的光储换电站优化充电策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 142-148, 176.
- [13] 赵显秋, 徐青山, 杨永标, 等. 考虑不确定性的新型电池充换电站多时间尺度能量管理策略[J/OL]. 电网技术, 1-12[2024-06-05]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0057>.
- [14] 刘涛, 朱布博. 基于电动汽车分群的“风-网-站-车”体系调度研究[J]. 机械与电子, 2023, 41(12): 58-64.
- [15] LI X, ZHANG R, BAI L, et al. Stochastic low-carbon scheduling with carbon capture power plants and coupon-based demand response[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1219-1228.
- [16] LI J, WEN J, HAN X. Low-carbon unit commitment with intensive wind power generation and carbon capture power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 63-71.
- [17] 魏震波, 马新如, 郭毅, 等. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 1-9.
- [18] 贡保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
- [19] 李玲, 曹锦业, Nikita Tomin, 等. 计及电动汽车接入的区域综合能源系统双层日前协调优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 23-33.
- [20] 王均, 黄珂然, 许潇, 等. 基于阶梯碳价和自适应分时电价的电动汽车有序充电[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 64-71.
- [21] 李翼成, 赵钰婷, 崔杨, 等. 考虑充放电策略的换电站与风电-碳捕集虚拟电厂的低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6): 27-36.
- [22] 罗红梅, 张祥成, 李媛媛, 等. 考虑充放电策略的风电-碳捕集-充换电站虚拟电厂低碳经济调度[J/OL]. 现代电力, 1-10[2024-06-05]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0032>.

作者简介

胡梹 (1989—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统优化调度、人工智能。

刘闯 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源多形态混合储能系统优化调度。

王惠锋 (1997—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统经济性优化。

李佳奇 (1998—), 男, 硕士, 研究方向为综合能源系统优化调度。

王凯 (1999—), 男, 助理工程师, 研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2024-12-30)