

控制与决策

Control and Decision

考虑共享电池站和温控负荷响应的综合能源系统优化调度

杨婕, 王伟强, 马锴, 住安湖, 焦宗旭

引用本文:

杨婕, 王伟强, 马锴, 等. 考虑共享电池站和温控负荷响应的综合能源系统优化调度[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 370–378.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1111>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度

Preemptive maintenance process scheduling under complex human resource constraints

控制与决策. 2022, 37(2): 393–400 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1250>

计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度

Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints

控制与决策. 2022, 37(1): 97–107 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0913>

数据驱动的综合能源系统运行优化方法研究综述

Review of research of data-driven methods on operational optimization of integrated energy systems

控制与决策. 2021, 36(2): 283–294 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0725>

铁路集装箱中心站资源分配与作业调度联合优化

Integrating optimization of resource allocation and handling scheduling in railway container terminal

控制与决策. 2021, 36(12): 3063–3073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0597>

基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

控制与决策. 2021, 36(1): 143–151 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

考虑共享电池站和温控负荷响应的综合能源系统优化调度

杨 婕¹, 王伟强¹, 马 锴^{2†}, 住安湖¹, 焦宗旭¹

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对区域综合能源系统协同优化调度问题, 构建基于能量枢纽 (energy hub, EH) 的分层能量管理框架, 充分考虑新能源电厂、气-电、电-气能源转换装置调节能力, 以共享电池站 (shared battery station, SBS) 替代传统储能电站, 为能源系统提供电能存储功能, 采用温控负荷为能源系统提供需求侧响应, 保障异质能源供需实时平衡. 基于区域能源系统相关数据及美国 PJM 电力市场数据, 构建考虑多元分布式设备的区域综合能源系统成本函数, 采用遗传算法求解该混合整数规划问题. 仿真结果表明, 在所提出的能量管理框架下, 可以实现综合能源系统的供需动态平衡, 保障系统的高效经济运行.

关键词: 区域综合能源系统; 优化调度; 需求响应; 共享电池站; 温控负荷

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2020.1111

引用格式: 杨婕, 王伟强, 马锴, 等. 考虑共享电池站和温控负荷响应的综合能源系统优化调度 [J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 370-378.

Optimal scheduling of integrated energy system considering response of shared battery station and thermostatically controlled loads

YANG Jie¹, WANG Wei-qiang¹, MA Kai^{2†}, ZHU An-hu¹, JIAO Zong-xu¹

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at the optimal scheduling problem of integrated energy systems, this paper proposes a hierarchical energy management framework based on energy hubs, which fully considers the adjustment effect of new energy power plants, gas-electricity and electricity-gas energy conversion devices. The traditional energy storage stations are replaced with shared battery stations to provide energy storage function. For guaranteeing real-time energy balance between supply and demand, the temperature control load is used to provide demand response. Based on regional energy system data and PJM power market data, the cost function of the regional integrated energy system is established considering multi-distributed equipments. The genetic algorithm is used to solve the mixed integer programming problem. The simulation results show that under the proposed energy management framework, the comprehensive utilization efficiency of energy can be improved and the integrated energy system runs efficiently and economically.

Keywords: regional integrated energy system; optimal scheduling; demand response; shared battery station; thermostatically controlled loads

0 引言

随着环境污染、能源安全和能源危机等问题的日益严峻, 能源领域结构及特征也随之不断革新与发展^[1-3]. 一方面, 在能源需求侧, 用户的能源需求不再局限于传统电力能源, 而是向多元化趋势发展, 气、冷、热等其他能源的需求量日益增多, 并将在相当长的时间段内保持快速增长的趋势^[4-5]. 另一方面, 在能

源供给侧, 新能源所占比重迅速增长. 然而, 其波动性、间歇性的特征以及当前能源系统灵活资源的稀缺化对系统的稳定性、经济性提出了巨大挑战. 打破各个能源系统之间独立设计、独立运行的运营模式, 构建多种能源间深度耦合、协同优化的综合能源系统, 是促进能源领域变革、提高能源供应质量与效率、缓解能源供需紧张问题的重要手段^[6-7].

收稿日期: 2020-08-10; 录用日期: 2020-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973264); 河北省杰出青年科学基金项目 (F2020203026); 中央引导地方科技发展资金项目 (216Z1601G).

†通讯作者. E-mail: kma@ysu.edu.cn.

国内外学者在综合能源系统优化调度方面做出很多研究,通过设计合理的运行规划策略,调度异质能源在时间和空间多重约束下转化、存储和消费过程,实现区域能源系统内部供需两侧的动态平衡,有效提升了能源综合利用效率^[8-9].文献[10]提出基于能源枢纽的日前和实时调度两阶段优化调度策略,有效提高可再生能源的消纳能力,实现了高比例可再生能源渗透下的综合能源系统稳定运行.文献[11]考虑能量枢纽(energy hub)的结构优化和能源网络的拓展优化问题,基于有向无环图建立数学模型,实现了从省级至园区层面的综合能源联合管控.文献[12]提出了一种基于energy hub以及能源系统构成要素之间的能量流的建模方法,用于短期24小时调度能源枢纽,在保障楼宇用户的日常生活中冷、热、电需求的情况下,降低其能源支出成本.

此外,在综合能源系统中,为了提供更加灵活的调节能力,提高能源的综合利用效率,储能设施的建设尤为重要.储能设施打破了能源生产与消费的异步特性,实现能源在时空上的转移,为异质能源的综合利用提供了物质基础^[13-15].目前,在电力系统中,建设大型抽水蓄能电站和储能电站为主要储能设施,储能设施作为能源供给侧与电力需求侧之间的缓冲器,可提供灵活的削峰填谷、频率调节等能力,实现电能供需两侧的动态平衡.然而,抽水蓄能电站受地理环境和气候条件制约明显,储能电站建设成本巨大,尚未在能源系统中广泛应用^[13].随着新能源比例的日益增长,储能设备建设和营运成本不断提高,储能设备的负荷负担不断增大,能源系统巨大储能的需求与储能设施数量、运营能力之间产生了矛盾,难以提供满意的储能服务;与此同时,现有的储能设施储能容量小、响应速度慢、安全性不理想以及经济成本偏高等问题日益凸显^[15].然而,需求侧响应可充分利用综合能源用户具有产销特性的设备(共享电池站、电动汽车、空调、燃气取暖炉、热水器等),引导供需两侧的能源互动,在一定程度上替代传统储能设施的作用,减缓储能设施的建设完全替代部分储能设施的能力.文献[16]对储能单元和需求响应负荷进行调度,对可再生能源产能预测的误差进行处理,求解微网最优调度策略.文献[17]提出了含冷热电联供及储能的区域综合能源系统,可以通过储能设备有效解耦其热电运行约束,优化机组出力组合,提高能源利用效率.文献[18]以提高园区运营商的收益和风电消纳利用率为目标,设计了一种不影响用户舒适度的用户互补聚合响应策略.文献[19]通过考虑需求响应的

水火电优化调度,可降低消费者对电能的需求,进而降低火电站的煤耗成本.文献[20]以多能协同综合能源系统的供暖用暖体系为研究主体,分析需求侧用户用能行为,提出供给侧与需求侧的系统优化的区域能源系统管控调度方法.目前,电动汽车充电方式以充电桩快速充电为主,但快充对电池损害大,大大缩短电池的使用寿命,而且充电电流大容易带来安全隐患.文献[21]通过对电动汽车分时租赁,实现租赁站、消费者和电动汽车车队交互模拟,可以有效地缓解交通压力,降低环境污染.同时,文献[22]结合电动汽车能量回收的优点,设计了多源信息融合框架下的制动力分配策略.此外,充电桩设施数量和运营水平难以满足日益增长的能源需求.电动汽车无序充电引起的尖峰负荷会影响电网的稳定性,降低电能质量.文献[23]通过将电动汽车动力电池作为分布式储能的重要组成部分,研究电动汽车作为分布式储能参与储能汇聚复用的可行性和有效性,以参与辅助电网平抑区域负荷波动.共享电池组可以实现电动汽车与电池在时空上的剥离,通过慢充、统一管理、优化调度等手段,在满足用户需求的基础上大大减少负面效应,并为电网与相关企业提供辅助服务^[24-25].

综上所述,本文通过建立基于energy hub的分层管理框架,协同优化多能源投标功率、异质能源转换功率、储能功率以及需求侧响应功率.以共享电池站替代传统储能电站提供储能服务,采用温控负荷用户提供需求侧响应.energy hub通过日前规划制定电气投标量、电气转换量以及储能计划,并在实时调度过程中管控温控负荷运行的调节量,实现区域综合能源系统供需两侧能源动态平衡,降低运营成本.

1 分层能量管理模型

1.1 基于energy hub的分层能量管理框架

energy hub是用来描述综合能源系统中不同能源之间转换关系的输入-输出端口模型^[11].在本文提出的能量管理模型中,将energy hub作为区域能量管理中心,负责管控区域能源系统内部异质能源的购买、存储、转换以及需求侧响应过程,实现区域能源系统内部能源供需的动态平衡,降低运营成本.

针对区域综合能源系统优化调度问题,综合考虑多种分布式设备(包括多元负荷、多种能源转换设施以及储能设备)的运行特性,建立基于energy hub的分层能量管理框架.其中,energy hub完成区域能源系统的日前能量规划与实时能量调度,实现区域综合能源系统内部多能源交易、多能源供应、多能源转化互补、可再生能源消纳以及需求侧响应等过程的协同

优化管理. 基于energy hub的分层能量管理框架如图1所示, 由能源供给层、能量管理层和能量消费层3层构成.

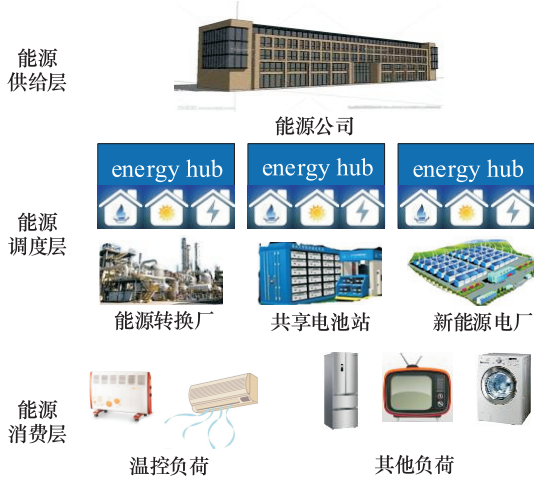


图1 基于energy hub的分层能量管理框架

能源供给层负责为区域能源系统提供外部电和气能源, 通过energy hub协同优化内部源网荷运行状态, 获取区域能源系统energy hub最优的日前分时能源投标策略. 能量管理层负责为区域能源系统内部异质能源的存储、转换以及需求侧响应等过程下发调度指令, 控制内部能源转换设备、共享电池站以及温控负荷调度, 实现区域综合能源系统供需的动态平衡. 能量消费层为energy hub提供综合需求侧响应能力, 使温控负荷用户在合理的舒适度范围内, 并给予energy hub一定的调节能力, 以解决能量管理过程中面临的双边扰动问题.

1.2 能源转换厂特性模型

能源转换厂利用能源转换设备可以实现电气能源的双向转换^[7], 能源转换采用效率转换模型如下:

$$\begin{aligned} P_{gt} &= \eta_{et} \times P'_{et}, \\ P_{et} &= \eta_{gt} \times P'_{gt}. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: P'_{et} 、 P'_{gt} 分别为转换前电、气能源输入功率, P_{et} 、 P_{gt} 分别为转换后电、气能源输出功率, η_{et} 、 η_{gt} 分别为电-气、气-电转换效率.

1.3 共享电池站负荷特性模型

共享电池站(shared battery station, SBS)(见图2)作为一种集电动汽车电池充放电、交换功能于一体的服务设施, 通过设计分区控制的调度策略可以有效实现共享电池充放电全过程管控, 在保障电动汽车用户能源补充需求的基础上, 利用SBS产销者特性, 提供多种削峰填谷、功率调节、后备储能对内业务, 提高SBS的经济效益和社会福利^[19].

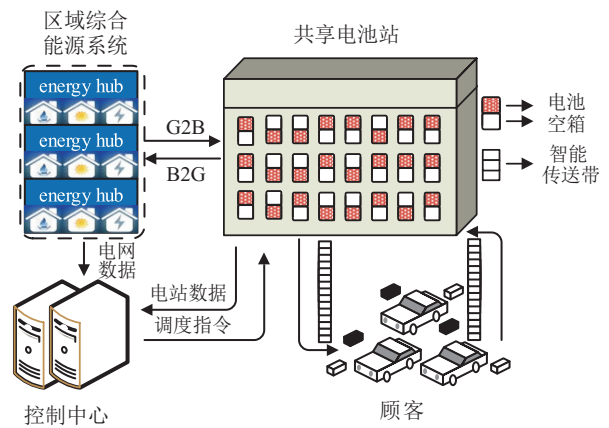


图2 共享电池站模型

电动汽车用户可以通过官方APP发出换电申请, 如果用户无特殊需求, 则控制中心默认将指定SBS中电容量(SOC)最高的电池编号分配给该用户, 用户也可以通过APP选择指定SOC的电池. 在换电过程中, 通过智能传送带将低电量的电池送入相应编号的电池空箱中, 付费交易完成后, 高电量电池从电池箱中弹出, 经智能传送带送入电动汽车. 依据电池SOC差额与满意度评估规则进行收费. 此外, 站内电池在SBS与用户之间不断地循环使用, 由于用户的过度放电等不正当使用行为和站内电池的不断充放电, 对电池的折损无可避免, 站内有效电池数量随着时间的推移也相应发生变化. 有如下表达式:

$$P_s = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{s,i,j} \times I_{s,i,j}; \quad (2)$$

$$E_{s,i,j+1} = E_{s,i,j} + P_{s,i,j} \times A_{s,i,j} \times \eta \times t; \quad (3)$$

$$I_{s,i,j} = \begin{cases} 1, & \text{充电;} \\ -1, & \text{放电;} \\ 0, & \text{待机.} \end{cases} \quad (4)$$

其中: P_s 代表SBS为区域综合能源系统提供的储能功率, P_s 为正数代表SBS储能, 为负数代表SBS放电; $P_{s,i,j}$ 为*i*时刻电站中第*j*块电池的充放电功率; η 为充放电效率; t 为1个调度时间段的长度; $I_{s,i,j}$ 表示电池状态(充电、放电或待机); $E_{s,i,j}$ 为*i*时刻第*j*块电池的SOC.

1.4 新能源电厂运行特性模型

根据风力发电系统的特征, 结合区域的风力资源情况, 建立风力发电的函数模型如下:

$$P_{wp} = \begin{cases} 0, & v < v_{in}; \\ P_{wp,N} \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_N^3 - v_{in}^3}, & v_{in} \leq v < v_N; \\ P_{wp,cap}, & v_N \leq v < v_{out}; \\ 0, & v \geq v_{out}. \end{cases} \quad (5)$$

其中: P_{wp} 为风力发电机输出功率, $P_{wp,N}$ 为风力发电机的额定输出功率, $P_{wp,cap}$ 为风力发电机标准峰值功率, v 、 v_{in} 、 v_{out} 和 v_N 分别表示当前、切入、切除以及额定风速大小。

基于所在区域的光照强度及光伏面板的特性建立光伏发电的函数模型^[15]为

$$P_{pv} = f_{pv} P_{pv,cap} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \left[1 + \alpha_p (T_{cell} - T_{cell,STC}) \right]. \quad (6)$$

其中: P_{pv} 为光伏电站出力, f_{pv} 为光伏阵列的功率损耗因数, $P_{pv,cap}$ 为标准峰值功率, G_T 、 $G_{T,STC}$ 分别表示实际状态以及标准状态下的光照强度, α_p 为功率温度系数, T_{cell} 和 $T_{cell,STC}$ 分别为光伏面板的实际状态以及标准状态下的温度。

1.5 温控负荷运行特性模型

用户 k 的温控负荷运行特性及控制方式^[21] 可以描述为

$$T_k(t+1) = a \times T_k(t) + (1-a) \times (T_a(t) + u_k(t) \times R_k \times P_{AC}(t)), \quad (7)$$

$$a = \exp(-\Delta t/RC). \quad (8)$$

其中: T_k 、 T_a 、 u_k 、 R_k 、 P_{AC} 分别表示室内温度、室外环境温度、空调开关状态、等效热阻和能量传递速率, R 为房间的等效热阻, C 为房间的等效热容. 对于含有 Q 个空调用户区域综合能源系统而言, 其整体的功率消耗可表示为

$$P_{AC}^T(t) = \sum_{k=1}^Q \frac{s_k(t)}{\eta_{AC}} P_{AC}, \quad (9)$$

其中 η_{AC} 是房间 k 中空调负荷的效率系数。

2 优化调度问题

基于 energy hub 的分层能量管理框架, 整合能源投标、新能源发电、异质能源转换、共享电池站调度以及温控负荷需求侧响应数学模型及相应复杂约束, 建立以优化调度区域综合能源系统综合效益最大为目标的效用函数, 即

$$\max_{m_b, m_s, m_c} \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} (V(E_{s,i,j}, E_{sc,i,j}, P_{s,i,j}) - C(m_t^i, m_s^i, m_b^i) - Q \times \Gamma). \quad (10)$$

其中: $C(m_t^i, m_s^i, m_b^i)$ 为能源转换、能源存储以及能源购买成本模型, $V(E_{s,i,j}, E_{sc,i,j}, P_{s,i,j})$ 为 SBS 效益模型, Γ 为温控负荷用户不满意度成本模型. 基于优化结果, energy hub 发送多能源投标量、异质能源转换量、共享电池站储能量的控制指令, 管控能源系统内

部各元素的运行状态. 在日前调度量确定的条件下, 考虑新能源电厂及能源用户多元负荷波动引起的双边扰动问题, 通过 energy hub 调度温控负荷, 在保障用户满意度的基础上提供需求侧响应, 保障区域综合能源系统供需两侧动态平衡以及系统安全稳定运行. 令

$$m_c = \begin{bmatrix} P_{ec} \\ P_{gc} \end{bmatrix}, m_n = \begin{bmatrix} P_{ne} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$m_s = \begin{bmatrix} P_s \\ 0 \end{bmatrix}, m_b = \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix}, m_t = \begin{bmatrix} P_{et} \\ P_{gt} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

其中: m_c 为日前规划确定的各时段的电、气能源投标功率, 该能源由外部电网、管网输送到区域综合能源系统; m_n 为新能源发电输出功率矩阵; m_s 为共享电池站储能功率矩阵; 共享电池站作为产销者, 利用其剩余容量可以组成灵活的能源存储系统, 在功能上替代传统储能电站, 其功率矩阵元素为正时表示该时段共享电池站充电消耗电能, 功率为负时表示共享电池站放电为系统提供电能; m_b 为用户实际的电、气负荷功率矩阵; m_t 为异质能源转换元件的功率耦合矩阵; P_{ec} 、 P_{gc} 分别为日前规划确定的各时段电、气能源投标功率; P_{ne} 为新能源供电功率矩阵; P_{et} 、 P_{gt} 分别为电-气、气-电转换功率矩阵; P_s 为共享电池站储能功率矩阵; P_e 、 P_g 分别为综合能源系统的用户实际电、气负荷功率矩阵。

需求侧响应后综合能源系统需求侧负荷为

$$\begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_e - P_{de} \\ P'_g - P_{dg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_e - \sum_{i=1}^M P_{de}(i) \\ P'_g - \sum_{i=1}^M P_{dg}(i) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中: P'_e 、 P'_g 分别为提供需求侧响应前电、气能源消耗功率, P_{de} 、 P_{dg} 为提供的需求侧响应功率, M 为提供需求侧响应用户总数。

考虑共享电池站的运营成本与收益, 建立其效益模型如下:

$$V(E_{s,i,j}, E_{sc,i,j}, P_{s,i,j}) = \sum_{j=1}^N (-P_{s,i,j} \times I_{i,j} \times t + L_{i,j} \times (d \times (E_{s,i,j} - E_{sc,i,j}) + h \times \log_2(E_{s,i,j} + 1))). \quad (14)$$

$$I_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{充电;} \\ -1, & \text{放电;} \\ 0, & \text{待机.} \end{cases} \quad (15)$$

$$L_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{换电;} \\ 0, & \text{不换电.} \end{cases} \quad (16)$$

其中: $E_{s,i,j}$ 、 $E_{sc,i,j}$ 分别为交换前后电池的SOC; $I_{i,j}$ 、 $L_{i,j}$ 均为整数变量, $I_{i,j}$ 表示在 i 时段共享电站内第 j 块电池的状态, $L_{i,j}$ 表示 i 时段共享电站内第 j 块电池是否发生交换动作. 共享电池站效益函数包含两个部分, 即租赁电池收益以及电池损耗成本和充电成本. 租赁收益是一个关于交换电池核电状态差值与用户满意度的函数, 购能成本为购电电价与充电速率之积, 即

$$C(m_t^i, m_s^i, m_b^i) = p_1^i \times m_b^i \times t + p_2^i \times m_s^i \times t + p_3^i \times m_t^i \times t, \quad (17)$$

其中 p_1^i, p_2^i, p_3^i 分别表示 energy hub 从能源公司购买电、气的价格矩阵, 能源转换价格矩阵和能源存储价格矩阵. 储能的电池损耗成本可表示为关于充放电速率的二次函数^[26], 电气转换成本可表示为关于转换功率的二次函数^[12], 有

$$p_2^i = a_2 P_{s,i,j}^2 + b_2 P_{s,i,j} + c_2, \quad (18)$$

$$p_3^i = a_3 P_{s,i,j}^2 + b_3 P_{s,i,j} + c_3. \quad (19)$$

为了评估温控负荷用户室内热舒适参数, 采用 Fanger 热舒适模型来评估室内的热舒适度. 预测平均投票值 (predicted mean vote, PMV) 模型综合考虑了多种人体因素和环境因素, 描述给定区域内一群人的平均热感, 代表着绝大多数人在该环境下的热舒适度. 预测不满意百分数 (PPD) 模型表示对于给定环境的不满意人群的百分比^[27], 即

$$\text{PPD}(T_i) = 100 - 95e^{-(0.03353\text{PMV}^4(T_i) + 0.2179\text{PMV}^2(T_i))}, \quad (20)$$

采用下式描述用户的不舒适成本:

$$\Gamma(T_i) = \sigma_i \text{PPD}(T_i). \quad (21)$$

另外, 为保证优化问题存在最优解, 采用二次拟合方法处理函数的非凸问题^[28], 可得到

$$\Gamma = \sigma_i (\theta_i^1 T_i^2 + \theta_i^2 T_i + \theta_i^3). \quad (22)$$

其中: σ_i 为常数, $\theta_i^1, \theta_i^2, \theta_i^3$ 为曲线拟合系数参数, T_i 为室内温度^[28].

为了保障区域综合能源系统内各类机组储能设备以及需求侧响应系统优化下系统内部各元素正常运行, 需满足以下约束条件: 区域综合能源系统需满足多能源产消动态平衡条件

$$m_c = Am_t + Bm_n + Cm_s + m_b, \quad (23)$$

即

$$\begin{bmatrix} P_{ec} \\ P_{gc} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} P_{et} \\ P_{gt} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} P_{ne} \\ 0 \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} P_s \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix}. \quad (24)$$

其中: A 为异质能源转换效率矩阵, B 为新能源供电效率矩阵, C 为共享电池站储能效率矩阵.

电-气转换、气-电转换机组输出功率, 以及共享电池站提供的储能功率均需满足相应机组或设施的容量约束, 即

$$\begin{aligned} P_{gt}^{\min} &\leq P_{gt} \leq P_{gt}^{\max}, \\ P_{et}^{\min} &\leq P_{et} \leq P_{et}^{\max}, \\ P_s^{\min} &\leq P_s \leq P_s^{\max}. \end{aligned} \quad (25)$$

日前的电、气能源投标功率需保持在合理范围内

$$\begin{aligned} P_g^{\min} &\leq P_g \leq P_g^{\max}, \\ P_e^{\min} &\leq P_e \leq P_e^{\max}. \end{aligned} \quad (26)$$

温控负荷提供需求侧响应需在用户不舒适度在能够承受的范围内, 超出范围将严重影响用户的生活, 不能为系统提供需求侧响应.

$$Q = \begin{cases} 0, & \Gamma \geq \Gamma_{\text{threshold}}; \\ 1, & \Gamma < \Gamma_{\text{threshold}}. \end{cases} \quad (27)$$

$Q = 0$ 表示温控负荷用户不为区域综合能源系统提供需求侧响应, $Q = 1$ 表示温控负荷用户为区域综合能源系统提供需求侧响应.

3 仿真算例

3.1 参数设置

本文选取文献[12]中区域综合能源网络作为研究对象. 区域综合能源网络相关数据如表1以及图3和图4所示. 调度周期为24h, 调度指令每小时更新一次. 采用分时电价和固定天然气价格, 能源购买价格如表1所示, 其中Mu为货币单位^[12]. 该区域综合能源系统中含有气-电转换机组额定功率20MW、电-气转换机组额定功率20MW, 新能源电厂额定功率35MW, 共享电池站共80个, 每个电站配备2000块

表1 电气价格

序号	时间段	电价 Mu/(kW·h)	气价 Mu/(kW·h)
1	0~6	40	50
2	6~11, 15~19, 22~24	60	50
3	11~15, 19~22	80	50

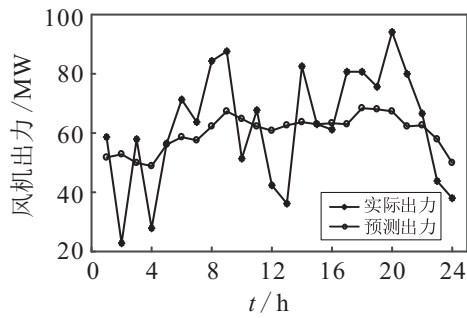


图3 风机出力情况

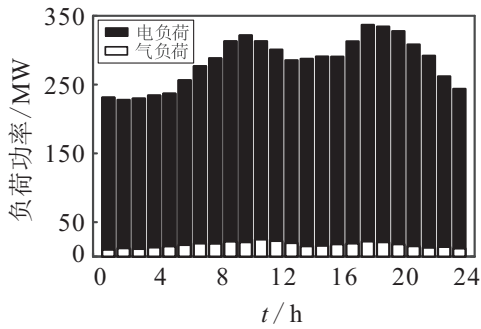


图4 电、气负荷功率

电池,温控负荷用户10000户.在置信度为0.95的情况下预测风机机组出力情况如图3所示,该地区电、气能量消耗量^[10]如图4所示.

3.2 算例分析

由于优化问题中存在大量的决策、控制变量以及约束条件,传统优化算法难以解决这样的多变量混合整数规划问题.相比于其他启发式算法,遗传算法(GA)以从种群而不是个体开始搜索,具有良好的全局搜索能力,可以快速地将解空间中的全体解搜索出,而不会陷入局部最优解的快速下降陷阱,并且利用它的内在并行性可以方便地进行分布式计算,加快求解速度.因此,为了验证数学模型及分层能量管理框架的有效性,基于算例中典型的综合能源系统数据,采用遗传算法对所提出的数学模型进行求解.文中所使用的参数如表2所示.

表2 参数表

参数名称	数值	参数名称	数值
电-气转化效率	0.75	$a_2/(\text{kW}\cdot\text{h})^2$	0.002 16 Mu
气-电转化效率	0.75	$a_3/(\text{kW}\cdot\text{h})^2$	0.001 20 Mu
不舒适度参数	1	$b_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$	0.906 25 Mu
新能源并网效率	0.85	$b_3/(\text{kW}\cdot\text{h})$	0.110 00 Mu
SBS充放电功率/kW	3	c_2	16.560 00 Mu
SBS充放电效率	0.95	c_3	0.021 00]Mu
电池容量/(kW·h)	24	θ_i^2	34.58
时间段数	24	θ_i^3	406.4

电能日前规划状况如图5所示, P_{ec} 为日前电能投标量, P'_e 为预测的用户电能需求量, P_e 为区域能源

系统实际的电能供给量.由于电-气转换、气-电转换、新能源发电和需求侧响应等环节,实际供给量与用户需求不完全一致,存在双边扰动问题,需要通过实时调度实现供需两侧能源的动态平衡.天然气日前规划状况如图6所示,气-电、电-气转换功率如图7所示.

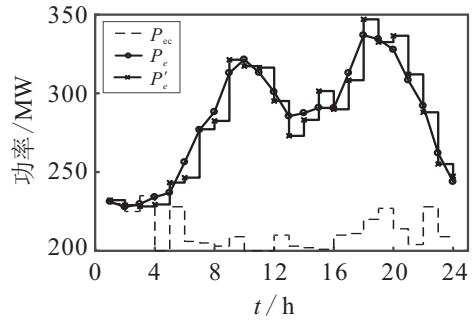


图5 电能日前规划状况

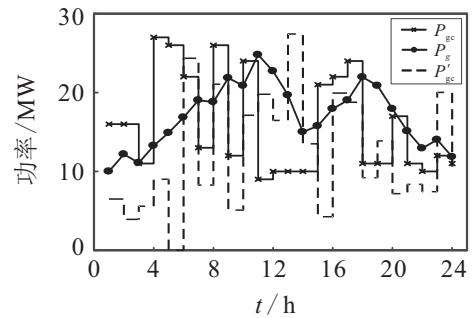


图6 天然气日前规划状况

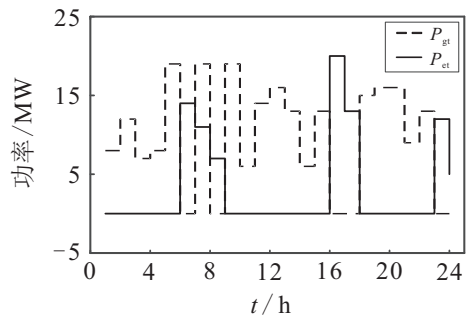


图7 气-电、电-气转换功率

图5~图7所示的电-气能源变化情况具有以下规律:在电价较高时,电能投标量较低,通过电气转换与需求侧响应,补充部分电能,减少了区域能源系统高昂的电能成本支出;在电能成本较低时,通过电气转化,为用户提供气能,大大减少了气能成本支出.通过异质能源转换以及需求侧响应相互协同,缓解了综合能源系统使用电、气能源高峰,降低了综合能源系统购能成本.

与电能的日前规划相似,在气能购买成本高于电-气转换成本时,通过电-气转换来补充电能,从而降低了电能的购买成本,保障气能供需平衡.

SBS日前规划提供储能功率如图8所示.在调度

周期内,SBS可以在保障电动汽车用户需求的基础上为综合系统提供系统所需的储能功率.

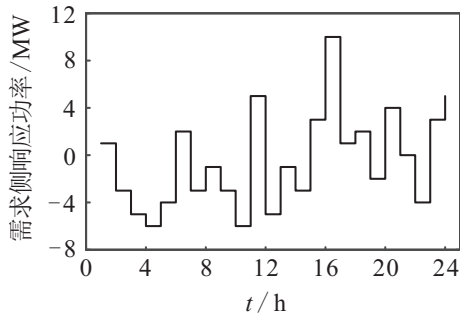


图8 SBS储能功率日前规划状况

为了验证共享电池站的储能以及供给电池效果,对80个共享电池站的实时调度过程进行仿真.同时考虑可用容量对优化效果的影响,站内总电池2000块,设置站内电池按照200块依次递减,对比分析站内2000、1800、1600、1400、1200和1000块电池对系统收益的影响.

在调度周期内,储能效果如图9所示, P_s 为日前规划的储能功率, P_{ss} 为实时调度过程中实际提供的储能功率,SBS实际提供储能功率在大部分时间能够满足综合能源系统的储能需求.供给用户电池的SOC如图10所示,大部分供给电池的SOC集中在0.75~1之间,可以保障电动汽车用户的能源补充需求.

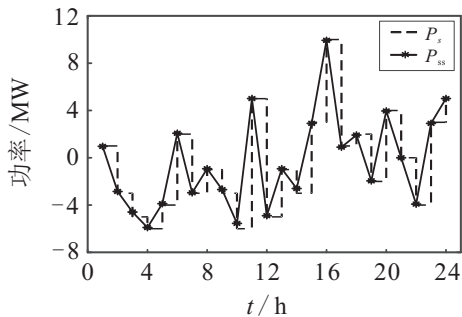


图9 SBS储能功率实时调度状况

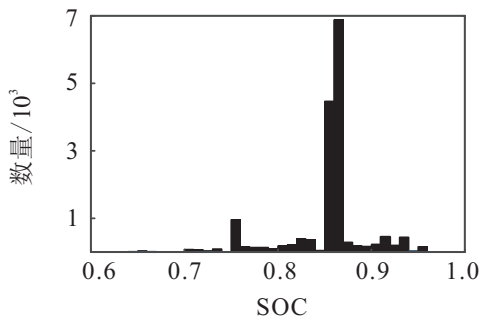


图10 供给电池SOC

此外、可用容量对优化效果的影响如表3所示,电池规模减少,其系统总收益也相应减少.当电池规模下降50%时,系统总收益下降6.6%,可见电池规模

对优化效果的影响不容忽略.综上,SBS利用剩余电池组成一种调度灵活的储能系统,可以满足综合能源系统的储能需求.

表3 可用容量对优化收益的影响状况

电池数/块	2000	1800	1600	1400	1200	1000
收益/Mu	25 569	25 528	25 168	24 906	24 581	23 875

AGC信号是一系列正负变化的功率信号,代表供电量与需求量之间的有功功率偏差.为了模拟实时调度过程中空调负荷提供需求侧响应运行过程,采美国PJM电力市场^[29]中AGC信号进行仿真,仿真结果如图11所示.可见,在区域综合能源系统中,每4s更新一次AGC信号,通过energy hub调度温控负荷可以提供需求侧响应,保证能源系统的供需平衡.

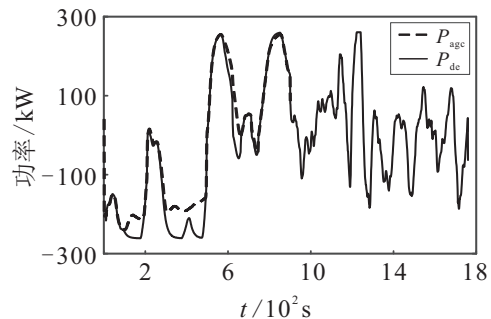


图11 供给电池SOC

4 结论

本文构建了基于energy hub的区域能源管理框架,协同优化能源投标功率、异质能源转化功率、储能功率以及需求侧响应功率,实现了综合能源系统安全稳定运行.

使用共享电池站替代传统储能电站,克服了传统储能电站建设成本高、环境制约性强的缺点,利用温控负荷提供需求侧响应,保障了能源供需两侧的实时平衡.

电-气、气-电转化设施通过异质能源相互转化,减少了价格尖峰时的能源采购量,有效降低了运营成本.

区域能源系统的规划调度仍有许多问题有待研究,本文针对优化能源投标、异质能源转化以及综合需求侧响应各部分功率进行优化,没有考虑能源输送过程中的潮流问题,未来工作将在考虑能源潮流的基础上研究所提出的区域综合能源系统优化调度问题.

参考文献(References)

[1] Wang J X, Zhong H W, Ma Z M, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.

- [2] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.
(Zhou X X, Zeng R, Gao F, et al. Development status and prospects of the energy internet[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2017, 47(2): 149-170.)
- [3] 曾鸣, 程俊, 王雨晴, 等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3672-3681.
(Zeng M, Cheng J, Wang Y Q, et al. Primarily research for multi-module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681.)
- [4] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7108-7120.
(Wang W L, Wang D, Jia H J, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7108-7120.)
- [5] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1316.
(Gu W, Lu S, Wang J, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1316.)
- [6] Zhou Z, Liu P, Li Z, et al. An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 53(2): 387-396.
- [7] Zhang X P, Shahidepour M, Alabdulwahab A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [8] Xu X D, Jin X L, Jia H J, et al. Hierarchical management for integrated community energy systems[J]. Applied Energy, 2015, 160: 231-243.
- [9] 陈胜, 卫志农, 孙国强, 等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6331-6340.
(Chen S, Wei Z N, Sun G Q, et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6331-6340.)
- [10] 李珂, 柴守亮, 张超, 等. 综合能源并网CPS模型及信息化安全防护方案研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(6): 68-73.
(Li K, Chai S L, Zhang C, et al. Research on integrated energy system CPS model and information security protection scheme[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(6): 68-73.)
- [11] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5425-5437.
(Huang W J, Zhang N, Dong R B, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437.)
- [12] Moghaddam I G, Saniei M, Mashhour E. A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building[J]. Energy, 2016, 94: 157-170.
- [13] 刘柳, 王丹, 贾宏杰, 等. 广义多源储能系统综合建模与能量优化分析[J]. 电力建设, 2017, 38(12): 2-11.
(Liu L, Wang D, Jia H J, et al. Integrated modeling and energy optimization analysis of generalized multi-source energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 2-11.)
- [14] 谈金晶, 李扬. 多能源协同的交易模式研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6483-6497.
(Tan J J, Li Y. Review on transaction mode in multi-energy collaborative market[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6483-6497.)
- [15] 孔飞飞, 晁勤, 袁铁江. 基于电网调度的风电场蓄电池储能技术[J]. 电源技术, 2012, 36(6): 912-914.
(Kong F F, Chao Q, Yuan T J. Wind farm battery energy storage technology based on power dispatching[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(6): 912-914.)
- [16] 曹知奥, 汪晋宽, 韩英华, 等. 基于交叉-变异人工蜂群算法的微网优化调度[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2059-2069.
(Cao Z A, Wang J K, Han Y H, et al. Crossover-mutation based artificial bee colony algorithm for optimal scheduling of microgrid[J]. Control and Decision, 2020, 35(9): 2059-2069.)
- [17] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120.
(Liu D C, Ma H R, Wang B, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120.)
- [18] 徐业琰, 彭思成, 廖清芬, 等. 考虑用户互补聚合响应与热能传输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 152-163.
(Xu Y Y, Peng S C, Liao Q F, et al. Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 152-163.)

- [19] 沈艳军, 杨鑫, 刘允刚. 考虑需求响应的水火电优化调度改进型花朵授粉算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1645-1653.
(Shen Y J, Yang X, Liu Y G. An improved flower pollination algorithm for hydrothermal scheduling incorporating demand response[J]. Control and Decision, 2019, 34(8): 1645-1653.)
- [20] 王琪鑫, 刘涤尘, 吴军, 等. 计及用户行为分析的多能协同综合能源系统供需双侧综合优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 179-185.
(Wang Q X, Liu D C, Wu J, et al. Comprehensive optimization including user behavior analysis for supply and demand sides of IES-MEC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 179-185.)
- [21] 王丽丽, 田俊峰, 杨磊. 基于多Agent仿真的电动汽车分时租赁[J]. 控制与决策, 2018, 33(8): 1489-1496.
(Wang L L, Tian J F, Yang L. Multi Agents based simulation of electric vehicle's car-sharing[J]. Control and Decision, 2018, 33(8): 1489-1496.)
- [22] 朱波, 吴迪, 张农, 等. 基于滚动优化和能量回收的V2I电动汽车决策[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 956-964.
(Zhu B, Wu D, Zhang N, et al. Decision-making research of V2I electric vehicle based on rolling optimization and energy recovery[J]. Control and Decision, 2020, 35(4): 956-964.)
- [23] 陈渊睿, 徐铭康, 曾君, 等. 基于平行CPSS的电动汽车参与储能汇聚复用建模与分析[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2428-2437.
(Chen Y R, Xu M K, Zeng J, et al. Modelling and analysis of electric vehicles participating in the convergence and multiplexing of energy storage system based on parallel CPSS[J]. Control and Decision, 2019, 34(11): 2428-2437.)
- [24] Yang J, Wang W Q, Ma K, et al. Optimal dispatching strategy for shared battery station of electric vehicle by divisional battery control[J]. IEEE Access, 2019, 7: 38224-38235.
- [25] Yang J, Wang W Q, Ma K. Cooperative and optimal dispatch for shared battery stations[C]. IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). Edinburgh, 2019: 1332-1336.
- [26] Tan X Q, Qu G N, Sun B, et al. Optimal scheduling of battery charging station serving electric vehicles based on battery swapping[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1372-1384.
- [27] Fabbri K. The indices of feeling-predicted mean vote PMV and percentage people dissatisfied PPD[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 75-125.
- [28] Ma K, Yu Y Q, Yang B, et al. Demand-side energy management considering price oscillations for residential building heating and ventilation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4742-4752.
- [29] PJM normalized dynamic and traditional regulation signals[EB/OL]. [2014-05-04]. <http://www.pjm.com/markets-and-operations/ancillary-services/mktbased-regulation/fast-respons-regulation-signal.aspx>.

作者简介

杨婕(1983—), 女, 副教授, 博士生导师, 从事电力系统经济调度与优化等研究, E-mail: jyangysu@ysu.edu.cn;

王伟强(1993—), 男, 助理工程师, 硕士, 从事电动汽车换电调度的研究, E-mail: wwqww123@163.com;

马锴(1983—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源系统调度与优化等研究, E-mail: kma@ysu.edu.cn;

住安湖(1992—), 男, 硕士, 从事电动汽车换电调度研究, E-mail: zhu1875654635@163.com;

焦宗旭(1993—), 男, 硕士, 从事温控负荷研究, E-mail: 253775887@qq.com.

(责任编辑: 李君玲)