

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208855

计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度^{*}孟国情¹ 邱晓燕¹ 张明珂² 张志荣¹

(1. 四川大学电气工程学院 成都 610065; 2. 国网浙江省电力公司湖州供电公司 湖州 313200)

摘要: 在“碳达峰,碳中和”背景下,未来能源发展将由单一的能源系统向综合能源系统转变。随着电动汽车车网互动技术的发展与应用,柔性负荷占比的显著提升,综合能源系统中的可调度资源将愈加丰富。在此背景下,本文将含电动汽车换电站和多类型柔性负荷的综合能源系统作为研究对象。首先,建立包含风电、储能、热电联产机组、燃气锅炉等设备的综合能源系统模型。其次,在计及电、热、气柔性负荷响应的基础上,将电动汽车换电站的充放电特性考虑到综合能源系统的优化调度中,以系统运行成本最小为目标,构建综合考虑多类型柔性负荷响应和换电站有序调度的综合能源系统优化模型。最后采用 Yalmip 进行建模并调用 Cplex 求解器对模型求解。算例结果表明,调度周期内系统运行成本降低了 13.04%,风电消纳率提高 8.65%,负荷峰谷差降低 24.58%,验证了所提模型在降低系统运行成本、削峰填谷以及消纳风电等方面的有效性。

关键词: 综合能源系统;柔性负荷;换电站;有序充放电

中图分类号: TM731 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Optimal dispatch of integrated energy system considering flexible loads and battery swapping station

Meng Guoqing¹ Qiu Xiaoyan¹ Zhang Mingke² Zhang Zhirong¹

(1. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Huzhou Power Supply Company, Huzhou 313200, China)

Abstract: Under the background of "carbon peak and carbon neutral", the future energy development will be transformed from single energy system to integrated energy system. With the development and application of electric vehicle network interaction technology and the significant improvement of flexible load ratio, the dispatchable resources in integrated energy system will become more abundant. In this context, the integrated energy system including electric vehicle battery swapping station and multi-type flexible load is taken as the research object. Firstly, the integrated energy system model including wind power, energy storage, combined heat and power unit, gas boiler and other equipment is constructed. Secondly, the charging and discharging characteristics of battery swapping station are taken into consideration in the integrated energy system optimization scheduling based on the flexible load responses of electricity, heat and gas. Taking the minimum operating cost of the system as the objective function, the integrated energy system optimization scheduling model considering flexible load and orderly charge and discharge of battery swapping station was established. Finally, the problem is modeled by Yalmip and solved by Cplex. The results show that the system operation cost is reduced by 13.04%, the wind power consumption rate is increased by 8.65%, and the load peak valley difference is reduced by 24.58%. The effectiveness of the proposed model in reducing the system operation cost, peak shaving and valley filling and wind power consumption is verified.

Keywords: integrated energy system; flexible load; battery swapping station; orderly charge and discharge

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,大力发展新能源、

提高能源利用效率、加强可再生能源综合利用是能源发展的必然选择。在此背景下,综合能源系统(integrated energy system, IES)应运而生^[1]。IES以电力为主体,耦合

收稿日期:2022-01-14

* 基金项目:成都市重点研发项目(2019-YF05-02107-SN)资助

冷、热、气多种能源,能够实现多能交互响应和互济互补,满足多元化用能需求,在促进可再生能源消纳、提高能源利用效率等方面发挥着重要作用^[2]。

近年来,随着需求响应技术的发展,柔性资源占比显著提高,柔性负荷响应已经逐渐发展成为 IES 中缓解供需矛盾的重要手段^[3]。文献[4]基于演化博弈理论,提出了一种考虑电、热、冷多种柔性负荷参与优化调度的微能源网-用户博弈模型。文献[5]考虑电、气柔性负荷的平移、转移、削减和替代特性,验证柔性负荷参与调度可以有效降低系统运行成本和促进风电消纳。文献[6]充分挖掘电、热柔性负荷的可调度潜力,构建了综合考虑系统经济性和削峰填谷指标的虚拟电厂电热联合优化调度模型。文献[7]在计及柔性热负荷削减和柔性电负荷转移的基础上,又考虑了电热、电气用能转换,以促进 IES 风电并网消纳。上述文献虽都计及了需求侧柔性负荷响应,但均未考虑电网中日益增长的电动汽车负荷的可调度价值。

随着电动汽车保有率不断提高,电动汽车充电负荷对电网的影响日益显现。目前电动汽车电能补给方式主要分为插充和换电模式^[8-9],其中换电模式不仅可以快速便捷地向车主提供换电服务,还可对电池进行集中充放电管理,避免大规模电动汽车无序充电对电网运行带来的不利影响^[10]。国内外学者针对换电站(battery swapping station, BSS)参与电网优化展开了相关研究。文献[11]以区域电网负荷的填谷为目标,以每个时段充电的电池数为控制量,基于排队论构建 BSS 的有序充电策略。文献[12]为实现 BSS 与微电网分属不同投资主体时微电网运行优化,建立了兼顾双方经济利益的微电网双层经济调度模型。文献[13]在并网型光伏微电网中考虑 BSS 的有序充放电,验证了电动汽车换电站参与优化对负荷削峰填谷、提高光伏消纳等方面的积极作用。文献[14]在微电网模型的基础上融入 BSS、需求响应以及分布式电源,充分挖掘三者参与微网运行调度时的协调能力,并分析了 BSS 的削峰填谷特性。文献[15]利用 BSS 兼具储能与主动负荷的多元效益,通过对 BSS 和风电的协同优化,主动应对风电出力的不确定性。以上文献针对的研究对象都是单一能源的电力系统,鲜有研究讨论 BSS 参与综合能源系统优化调度时, BSS 充放电对系统的影响。

综合以上分析可知,本文以综合能源系统为研究对象,首先,对综合能源系统进行建模,然后计及多类型柔性负荷响应,并考虑 BSS 的可调度价值,在此基础上有序引导 BSS 充放电以参与 IES 的优化调度。最后,以系统运行成本最低为目标,建立考虑柔性负荷和 BSS 有序充放电的综合能源系统优化调度模型,并通过算例验证了所提模型的有效性。

1 含换电站的 IES 结构

IES 的结构如图 1 所示,系统通过热电联产机组

(combined heat and power, CHP)和燃气锅炉(gas boiler, GB)实现电、热、气网的耦合。电源包括上级电力网、风力发电机组(wind turbine, WT)和 CHP 机组。热负荷由 CHP 机组和燃气锅炉供给,CHP 机组采取“以热定电”的方式运行, IES 所需天然气全部由天然气网供给。蓄电池(energy storage, ES)和储热罐(heat storage, HS)作为储能设备实现能量的时空平移。电动汽车换电站可在满足用户换电需求的前提下与 IES 进行双向能量交换。在需求侧,电、热、气负荷由刚性负荷和柔性负荷组成,考虑将柔性负荷引入 IES 的优化调度以改善系统运行。

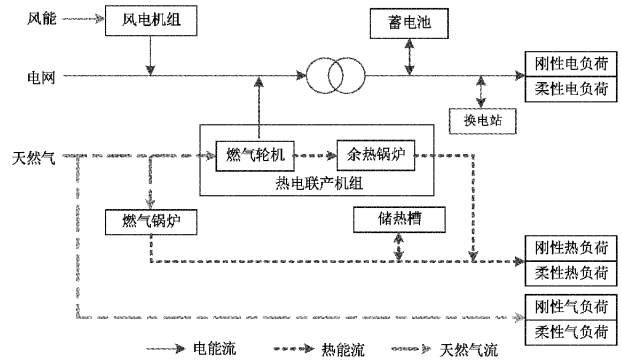


图 1 IES 结构

1.1 CHP 机组

CHP 机组由燃气轮机(gas turbine, GT)和余热锅炉(waste heat boiler, WHB)组成,燃气轮机燃烧天然气同时生产电力和热能,余热锅炉回收燃气轮机排出的高温烟气余热向用户供热,其热电关系为:

$$\begin{cases} H_t^{GT} = P_t^{GT}(1 - \eta_{GT} - \lambda_{loss}) / \eta_{GT} \\ H_t^{WHB} = \gamma_{WHB} H_t^{GT} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_t^{GT} 和 H_t^{GT} 分别为 t 时段燃气轮机输出电功率和排出的烟气余热功率; η_{GT} 、 λ_{loss} 、 γ_{WHB} 分别为燃气轮机发电效率、烟气热量损失率和余热锅炉的产热效率; H_t^{WHB} 为余热锅炉输出热功率。

1.2 燃气锅炉

燃气锅炉可在 CHP 机组供热不足时燃烧天然气满足用户热负荷需求,其数学模型为:

$$H_t^{GB} = \eta^{GB} \lambda_{gas} G_t^{GB} \quad (2)$$

式中: G_t^{GB} 和 H_t^{GB} 分别为 t 时段燃气锅炉的耗气量和热出力; η^{GB} 为燃气锅炉效率; λ_{gas} 表示天然气低热值。

1.3 储能设备

储能设备包括蓄电池和储热罐。储能的容量与充、放能功率之间的关系如下:

$$S_{s,t+1}^{ESS} = (1 - \sigma_s) S_{s,t}^{ESS} + (\eta_s^{ESS,c} P_{s,t}^{ESS,c} - P_{s,t}^{ESS,d} / \eta_s^{ESS,d}) \Delta t \quad (3)$$

式中: σ_s 为储能设备 s 的自损耗率; $S_{s,t+1}^{ESS}$ 、 $P_{s,t}^{ESS,c}$ 和 $P_{s,t}^{ESS,d}$ 分别为储能设备 s 在 t 时段的储能容量及其充、放能功率; $\eta_s^{ESS,c}$ 和 $\eta_s^{ESS,d}$ 分别表示储能设备 s 的充、放能效率。

1.4 BSS 模型

为方便求解,同时又切合换电站运营的实际情况,对 BSS 数学模型做出如下假设^[16]:

- 1) 换电站内电池均为同一规格;
- 2) 规定处于充、放电过程中的电池,仅当其充满或放电后才能进行后续操作;
- 3) 充电机以恒功率对电池进行充、放电。

在站电池经检测后按状态可分为 4 类:满电量电池、空电量电池及处在充电或放电过程的电池。站内各类电池的数量随时间动态变化,进行换电服务时,BSS 与用户交换电池,电池总数不会发生改变,故任意时刻 BSS 电池总量恒为 M 。

BSS 的库存状态平衡方程为:

$$N_t^F + N_t^E + N_t^C + N_t^D + D_t = M \quad (4)$$

式中: N_t^F 、 N_t^E 、 N_t^C 、 N_t^D 分别为 t 时段站内处于满电量、空电量、充电状态以及放电状态的电池库存数; D_t 为 t 时段换电需求量; M 为换电站内电池总量。

处于充电状态的电池应满足数量平衡约束:

$$\begin{cases} N_t^{C,1} + N_t^{C,2} + \dots + N_t^{C,T_c} = N_t^C \\ N_t^{C,1} = N_{t+1}^{C,2}, N_t^{C,2} = N_{t+1}^{C,3}, \dots, N_t^{C,T_c-1} = N_{t+1}^{C,T_c} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_c 为单块电池充满电所需的时间段数; $N_t^{C,1}$ 、 $N_t^{C,2}$ 、 \dots 、 N_t^{C,T_c} 分别为 t 时段处于第 1、2、 \dots 、 T_c 个充电时段的电池数量。

处于放电状态的电池应满足数量平衡约束:

$$\begin{cases} N_t^{D,1} + N_t^{D,2} + \dots + N_t^{D,T_d} = N_t^D \\ N_t^{D,1} = N_{t+1}^{D,2}, N_t^{D,2} = N_{t+1}^{D,3}, \dots, N_t^{D,T_d-1} = N_{t+1}^{D,T_d} \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_d 为单块电池放完电量所需的时间段数; $N_t^{D,1}$ 、 $N_t^{D,2}$ 、 \dots 、 N_t^{D,T_d} 分别为处于第 1、2、 \dots 、 T_d 个放电时段的电池数量。

满电量电池和空电量数量处于动态更新过程中,应满足以下数量平衡约束:

$$N_t^{C,T_c} + N_t^F \geq N_{t+1}^{D,1} + N_{t+1}^F + D_{t+1} \quad (7)$$

$$N_t^{D,1} + N_t^E + D_t = N_{t+1}^E + N_{t+1}^{C,1} \quad (8)$$

式中: $N_{t+1}^{D,1}$ 为 $t+1$ 时段开始放电的电池数量; N_t^{C,T_c} 为 $t+1$ 时段刚好充满的电池数量。

每台充电机在同一时段只能处在充电、放电或闲置 3 种状态的一种,则任一时段站在充、在放电电池数量不能超过充电机总数:

$$N_t^C, N_t^D \leq K^C \quad (9)$$

式中: K^C 为充电机数量。

在得到每个时段的充放电计划后,可得 t 时段 BSS 的充电功率 $P_t^{\text{BSS},c}$ 、放电功率 $P_t^{\text{BSS},d}$ 为:

$$\begin{cases} P_t^{\text{BSS},c} = N_t^C P^c / \eta^{\text{BSS},c} \\ P_t^{\text{BSS},d} = N_t^D P^d / \eta^{\text{BSS},d} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_t^{\text{BSS}} = P_t^{\text{BSS},c} - P_t^{\text{BSS},d} \quad (11)$$

式中: $\eta^{\text{BSS},c}$ 和 $\eta^{\text{BSS},d}$ 为 BSS 的充、放电效率; P^c 和 P^d 分别为单块电池的充、放电功率; P_t^{BSS} 为 BSS 与综合能源系统 t 时段的交互功率。

2 柔性负荷模型

2.1 柔性电负荷模型

1) 可转移负荷

可转移负荷工作时长固定,其工作时间可根据预定计划或系统运行状态灵活改变。负荷转移的数学模型为:

$$\begin{cases} P_t^{\text{in}} = \sum_{k=1}^{N_{SL1}} x_{k,t} P_{k,1} + \sum_{k=1}^{N_{SL2}} \sum_{h=1}^{h_{\max}} x_{k,t-h} P_{k,h+1} \\ P_t^{\text{out}} = \sum_{k=1}^{N_{SL1}} y_{k,t} P_{k,1} + \sum_{k=1}^{N_{SL2}} \sum_{h=1}^{h_{\max}} y_{k,t-h} P_{k,h+1} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_t^{\text{shift}} = P_t^{\text{in}} - P_t^{\text{out}} \quad (13)$$

式中: P_t^{in} 、 P_t^{out} 和 P_t^{shift} 分别为 t 时段转入、转出负荷的功率和可转移负荷功率; N_{SL1} 和 N_{SL2} 分别为设备运行时长等于和大于一个调度时段的可转移负荷数量; h_{\max} 为可转移负荷最大持续工作时长; $x_{k,t}$ 和 $y_{k,t}$ 分别为转入和转出 t 时段的第 k 类负荷设备数量; $P_{k,1}$ 和 $P_{k,h+1}$ 为第 k 类负荷工作在在第 1 个和第 $h+1$ 个时段的设备功率。

转移负荷应满足转移量约束:

$$\begin{cases} x_{k,t} \geq 0, \forall k, t \\ y_{k,t} \geq 0, \forall k, t \\ \sum_{t=1}^T x_{k,t} = \sum_{t=1}^T y_{k,t} \end{cases} \quad (14)$$

负荷转移还应满足时间区间约束:

$$\begin{cases} x_{k,t} \geq 0, t \in T_{k,1} \\ x_{k,t} = 0, t \in T_{k,2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $T_{k,1}$ 和 $T_{k,2}$ 分别为第 k 类负荷允许、不允许转入的时间集合。

2) 可削减负荷

用户根据价格信号或响应系统调度指令对负荷进行削减。可削减负荷模型可以表示为:

$$0 \leq P_t^{\text{cut}} \leq \gamma_t P_t^{\text{cut,max}} \quad (16)$$

式中: γ_t 为 t 时段负荷削减状态指示变量, $\gamma_t = 1$ 表示被削减; $P_t^{\text{cut,max}}$ 为 t 时段可削减负荷的最大削减量。

为减小对用户满意度影响,需限制负荷持续削减时长和最大削减次数。

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\min}-1} \gamma_{\tau} \geq T_{\min} (\gamma_t - \gamma_{t-1}) \quad t = 1, 2, \dots, T - T_{\min} + 1 \quad (17)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\max}} (1 - \gamma_{\tau}) \geq 1, t = 1, 2, \dots, T - T_{\max} \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^T \gamma_t \leq N_{\max} \quad (19)$$

式中: T_{\min} 、 T_{\max} 和 N_{\max} 分别为可削减负荷的最短、最长持续削减时间以及总削减次数上限。

3) 可替代负荷

用户可在不影响生活品质的情况下选择不同类型的能源满足自身等质的用能需求。基于热值等效定理,替代前后设备产生的有效热值应相等,可替代负荷模型为:

$$P_i^{\text{rep}} = -\gamma G_i^{\text{rep}} \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{C_c \eta_c}{C_g \eta_g} \quad (21)$$

$$P_{\min}^{\text{rep}} \leq P_i^{\text{rep}} \leq P_{\max}^{\text{rep}} \quad (22)$$

$$G_{\min}^{\text{rep}} \leq G_i^{\text{rep}} \leq G_{\max}^{\text{rep}} \quad (23)$$

式中: P_i^{rep} 和 G_i^{rep} 分别为 t 时段的电、气替代量; C_c 和 C_g 分别为单位电、气能源的热值; η_c 和 η_g 分别为能源替代设备的电、气利用效率; P_{\min}^{rep} 、 P_{\max}^{rep} 分别为电负荷的最小、最大替代量; G_{\min}^{rep} 、 G_{\max}^{rep} 分别为气负荷的最小、最大替代量。

2.2 柔性热负荷模型

人体对于周围环境温度的小幅度变化在感知上具有一定的模糊度,因此居民采暖负荷具备一定的柔性调节能力。国际上采用 PMV 热舒适模型量化室内热环境指标^[17],数学模型为:

$$\lambda^{\text{PMV}} = 2.43 - \frac{3.76(T_{\text{sk}} - T_i^{\text{in}})}{K(I_{\text{cl}} + 0.1)} \quad (24)$$

式中: K 为人体的代谢率,可取定值 75 W/m^2 ; T_{sk} 为舒适热环境下人体外表面平均温度,取 $33.5 \text{ }^\circ\text{C}$; T_i^{in} 为 t 时段室温; I_{cl} 为服装热阻,取 $0.11(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})/\text{W}$ 。

PMV 指标采用了 7 级分度,当 PMV 指标为 0 时对应人体最佳的舒适状态,当 λ^{PMV} 在区间 $[-0.5, 0.5]$ 内波动时,人体既不会感受到明显的温度变化,也处在较舒适的温度范围,根据 PMV 数学模型计算得此时的室温范围为 $21.2 \text{ }^\circ\text{C} \sim 25.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

为了保证供暖居民满意度,设定一个调度周期内室内平均温度为人体体感最佳的 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由此可得柔性热负荷约束:

$$21.2 \leq T_i^{\text{in}} \leq 25.4 \quad (25)$$

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T T_i^{\text{in}} = 23 \quad (26)$$

$$H_i^{\text{flex}} = S\omega(T_i^{\text{in}} - T_i^{\text{out}}) \quad (27)$$

式中: S 为居民供暖面积,单位为 m^2 ; ω 为建筑物内外温差散热系数,取 $1.037 \times 10^5 \text{ J/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$; T_i^{in} 和 T_i^{out} 为 t 时段室内、外温度; H_i^{flex} 为 t 时段柔性热负荷。

3 计及柔性负荷和换电站的 IES 优化模型

3.1 目标函数

本文以系统运行成本最小为目标,构建考虑柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度模型如下:

$$\min C = C^{\text{OM}} + C^{\text{E}} + C^{\text{G}} + C^{\text{COM}} + C^{\text{BSS}} \quad (28)$$

系统运行成本包括运行维护成本 C^{OM} 、购电成本 C^{E} 、购气成本 C^{G} 、柔性负荷调度补偿成本 C^{COM} 和 BSS 电池放电折旧成本 C^{BSS} 。

1) 运行维护成本

$$C^{\text{OM}} = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{i=1}^M c_i^{\text{CF}} P_{i,t} + \sum_{s=1}^N c_s^{\text{ESS}} |P_{s,t}^{\text{ESS}}| + c^{\text{W}} P_t^{\text{WT}} \right) \quad (29)$$

式中: c_i^{CF} 、 c_s^{ESS} 、 c^{W} 分别为耦合设备 i 、储能设备 s 、风电机组的运行维护成本系数; $P_{i,t}$ 、 $P_{s,t}^{\text{ESS}}$ 分别为耦合设备 i 和储能设备 s 在 t 时段的功率; M 、 N 为耦合设备和储能设备的种类。

2) 购电成本

$$C^{\text{E}} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{E}} P_t^{\text{buy}} \quad (30)$$

式中: c_t^{E} 为 t 时段电价; P_t^{buy} 为 t 时段系统向上级电网的购电量。

3) 购气成本

$$C^{\text{G}} = \sum_{t=1}^T c_t^{\text{G}} G_t^{\text{buy}} \quad (31)$$

式中: c_t^{G} 为 t 时段气价; G_t^{buy} 为 t 时段系统向天然气网的购气量。

4) 柔性负荷调度补偿成本

$$C^{\text{COM}} = \sum_{t=1}^T (c_{\text{shift}} P_t^{\text{out}} + c_{\text{cut}} P_t^{\text{cut}}) \quad (32)$$

式中: c_{shift} 、 c_{cut} 分别为负荷转移及负荷削减补偿成本系数。

5) BSS 电池放电折旧成本

$$C^{\text{BSS}} = \lambda^{\text{BSS}} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{BSS,d}} \quad (33)$$

式中: λ^{BSS} 为 BSS 电池组单位功率放电折旧成本。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{GT}} + P_t^{\text{dch}} + P_t^{\text{buy}} = P_t^{\text{load}} + P_t^{\text{ch}} + P_t^{\text{BSS}} \quad (34)$$

$$P_t^{\text{load}} = P_t^{\text{base}} + P_t^{\text{shift}} + P_t^{\text{cut}} + P_t^{\text{rep}} \quad (35)$$

$$H_t^{\text{WHB}} + H_t^{\text{GB}} + H_t^{\text{dch}} = H_t^{\text{base}} + H_t^{\text{flex}} + H_t^{\text{ch}} \quad (36)$$

$$G_t^{\text{buy}} = G_t^{\text{base}} + G_t^{\text{rep}} + G_t^{\text{CHP}} + G_t^{\text{GB}} \quad (37)$$

式中: P_t^{ch} 和 P_t^{dch} 分别为蓄电池在 t 时段的充电及放电功率; P_t^{load} 为 t 时段柔性负荷响应后的电负荷; P_t^{base} 为 t 时段刚性电负荷; H_t^{base} 、 H_t^{flex} 分别为 t 时段刚性热负荷和柔性热负荷功率; H_t^{dch} 、 H_t^{ch} 分别为 t 时段储热罐放热、蓄热功率; G_t^{CHP} 为 t 时段 CHP 机组的耗气量; G_t^{base} 为 t 时段的刚性气负荷。

2) 耦合设备出力和爬坡约束

$$P_i^{\text{min}} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\text{max}} \quad (38)$$

$$-R_i^{\text{down}} \Delta t \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_i^{\text{up}} \Delta t \quad (39)$$

式中: P_i^{max} 和 P_i^{min} 分别表示耦合设备 i 的最大、最小输出功率; R_i^{up} 和 R_i^{down} 分别为耦合设备 i 的爬坡功率上、下限。

3) 储能约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{s,t}^{ESS,c} \leq \gamma_{s,t}^c P_s^{c,max} \\ 0 \leq P_{s,t}^{ESS,d} \leq \gamma_{s,t}^d P_s^{d,max} \\ 0 \leq \gamma_{s,t}^c + \gamma_{s,t}^d \leq 1 \\ S_s^{ESS,min} \leq S_{s,t}^{ESS} \leq S_s^{ESS,max} \\ S_{s,0}^{ESS} = S_{s,T}^{ESS} \end{cases} \quad (40)$$

式中： $S_s^{ESS,max}$ 和 $S_s^{ESS,min}$ 分别表示储能设备 s 的最大、最小储能； $P_s^{c,max}$ 和 $P_s^{d,max}$ 分别为储能设备 s 的最大充、放能功率； $\gamma_{s,t}^c$ 和 $\gamma_{s,t}^d$ 分别表示储能设备 s 在 t 时段的充能和放能的 0~1 状态变量。

4) 购电、购气功率约束

$$0 \leq P_t^{buy} \leq P_t^{buy,max} \quad (41)$$

$$0 \leq G_t^{buy} \leq G_t^{buy,max} \quad (42)$$

式中： $P_t^{buy,max}$ 、 $G_t^{buy,max}$ 分别为 IES 允许购买的电、气功率上限。

5) 换电站功率约束

$$0 \leq P_t^{BSS} \leq P^{BSS,max} \quad (43)$$

式中： $P^{BSS,max}$ 为换电站与综合能源系统之间的最大交互功率。

3.3 求解方法

本文所建立的计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度模型为 0~1 混合整数线性规划 (MILP) 问题, 在 Matlab 环境下, 采用 Yalmip 进行建模并调用商业求解器 Cplex 求解。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文以图 1 所示综合能源系统构造算例, 验证所提模型的有效性。能源耦合设备、储能设备等参数如表 1 和 2 所示。电、热、气负荷及风电预测出力见图 2。室外温度数据参考文献 [18]。主网采用分时电价, 用电高峰为 10:00~12:00、18:00~22:00 时段, 23:00~24:00、1:00~6:00 时段为用电低谷, 其余时段为平时段。峰、平、谷时段电价分别为 1.22 元、0.8 元和 0.37 元。燃气轮机散热损失系数为 0.15, 余热锅炉余热回收效率为 0.8。天然气价格为 2.5 元/ m^3 , 其低热值取 9.7 $kW \cdot h/m^3$ 。可转移负荷设备参数如表 3。可削减负荷的最短、最长连续削减时长分别为 2 h 和 6 h, 最大削减次数为 8 次。优化前各时段柔性负荷构成如图 3 所示。运营商向用户支付的参与负荷转移、负荷削减的补偿费用分别为 0.2 元/ kWh 、0.35 元/ kWh 。

表 1 能源耦合设备参数

设备类型	效率	最大功率/ kW	爬坡功率/ kW	维护 系数
燃气轮机	0.35	1 200	600	0.06
燃气锅炉	0.9	1 000	600	0.04

表 2 储能系统参数

参数	蓄电池	储热罐
充放效率	0.9	0.95
自耗率	0.001	0.01
最小容量/ kWh	200	100
最大容量/ kWh	800	800
最大充放能功率/ kW	400	400
维护系数	0.05	0.02

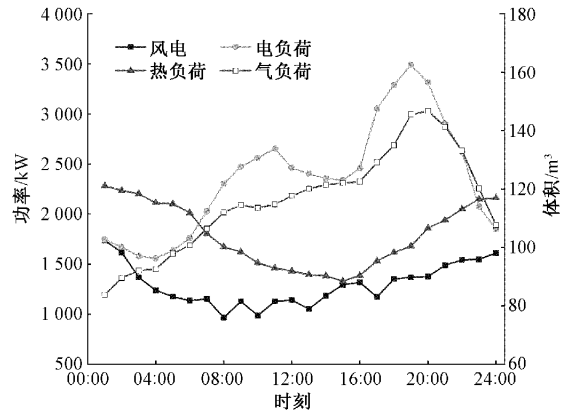


图 2 风电和负荷预测出力

表 3 可转移负荷设备参数

负荷设备 类型	每小时消耗功率/ kW		数量/ 台	调度 区间/h
	1 st Hr	2 nd Hr		
电热水器	2	1.5	210	13~20
洗衣机	0.6	0	396	18~23
洗碗机	1	0	401	19~7
电饭煲	0.8	0	505	3~8

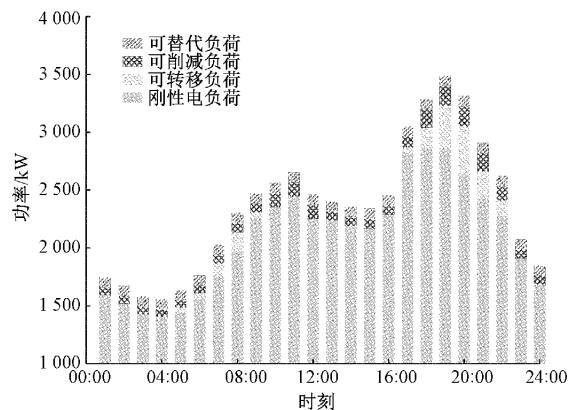


图 3 优化前电力柔性负荷构成

换电站参数如下: 站内共有 40 台充电机, 130 块可租赁的电池, 所有电池容量均相同, 为 40 $kW \cdot h$ 。电池充、放电效率均取 0.95, 每块电池额定充、放电功率分别为 20 kW 和 40 kW , 电池完成一次充、放电分别耗时 2 h 和

1 h。电池放电折旧成本为 0.2 元/kW·h。设定一天内 135 辆支持换电的电动汽车进入换电站换电。根据文献[11]的研究,进入 BSS 换电的电动汽车数量服从参数 $\lambda_1=25, \lambda_2=8$ 的两阶段泊松分布。通常将不考虑电价因素,电动汽车的电池即换即充称为 BSS 的无序充电模式。

4.2 结果分析

为分析综合考虑柔性负荷和 BSS 有序充放电机制对 IES 的影响,设置了以下 5 种场景进行对比分析:场景 1,不考虑柔性负荷, BSS 无序充放电;场景 2,考虑柔性负荷, BSS 无序充放电;场景 3, BSS 有序充放电,但不考虑柔性负荷;场景 4:考虑柔性负荷, BSS 有序充电,但不向系统放电;场景 5:综合考虑柔性负荷和 BSS 有序充放电。

图 4 为不同场景下常规负荷叠加了 BSS 充电负荷的等效负荷曲线。由场景 1 负荷曲线可以看出,若不对柔性负荷和换电站充电负荷进行优化调度,会造成电负荷“峰上加峰”的状态。单一考虑柔性负荷或 BSS 有序充放电后,负荷曲线的平滑性都有所改善。场景 2 将 18:00~21:00 晚高峰时段电负荷转移、削减或替代,场景 3 将日间用电高峰时段 BSS 充电负荷分别转移到 1:00~7:00 电价低谷时段和 13:00~16:00 电价平时段,均起到了一定的削峰填谷作用。场景 5 在综合考虑柔性负荷响应和 BSS 有序充放电后,等效负荷曲线标准差从场景 1 的 636.74 kW 降低到 247.69 kW,负荷平滑性提升了 61.1%。场景 4、场景 5 峰谷差率较场景 1 分别下降 24.25% 和 24.58%,因而场景 5 较场景 4 有着更强的削峰填谷能力。

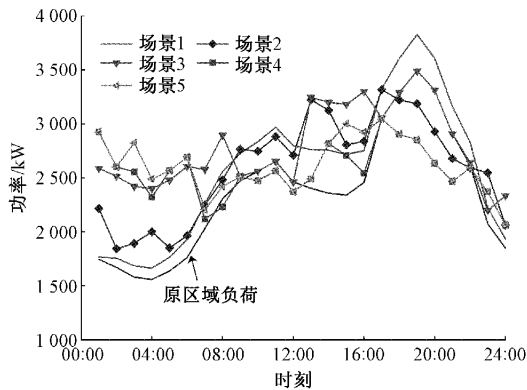


图 4 不同场景等效电负荷优化曲线

图 5 为不同场景下热负荷优化曲线。场景 1、场景 3 不考虑柔性热负荷,因此室内保持恒定温度不变。考虑柔性负荷后,室内温度在 21.2℃~25.4℃ 舒适温度区间内变化,用户热负荷需求更为灵活。通过减小夜间热负荷降低 CHP 机组“以热定电”的电出力,提高夜间风电消纳,通过增大日间热出力,避免 CHP 机组白天供电出现热能盈余。场景 5 中 BSS 在用电高峰时段不仅不会给系统带来额外供电压力,还会向系统放电,进一步提升了 CHP 机组的运行灵活性,因此热出力较场景 2 和场景 4 更平稳。

不同场景下系统运行成本如表 4 所示。相比场景 1,

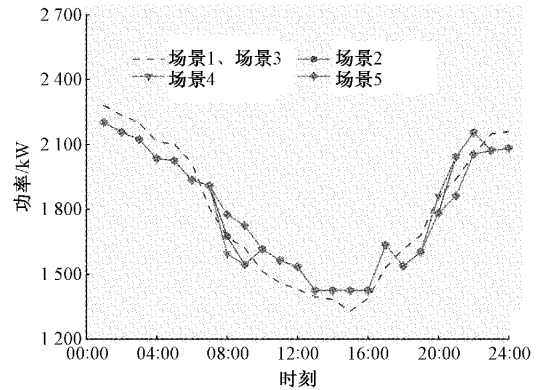


图 5 不同场景热负荷优化曲线

场景 2 购电成本、购气成本分别降低了 19.19%、2.36%,场景 3 购气成本降幅不大,但购电成本降低了 45.37%,证明了考虑柔性负荷和 BSS 有序充放电机制对提高 IES 经济效益的有效性。场景 5 购电成本、购气成本较场景 1 分别降低了 55% 和 3.03%,总成本降低 13.04%。场景 5 在场景 4 的基础上考虑了 BSS 向系统的放电,使得购电成本、购气成本进一步减少,虽增加了 BSS 电池放电折旧成本,但总成本降低了 1.53%。

表 4 不同场景下系统运行成本

成本/元	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5
运维成本	5 140.8	5 245.5	5 275.9	5 249	5 254.8
购电成本	10 856.9	8 773.8	5 931.1	5 733.1	4 885
购气成本	27 245.1	26 603.2	27 240.1	26 484.8	26 419
补偿成本	0	776.5	0	721	750.7
BSS 电池折旧成本	0	0	928	0	296
总成本	43 242.8	41 399	39 375.1	38 187.9	37 605.5

不同场景下弃风曲线如图 6 所示。场景 1 因为不考虑柔性负荷响应且 BSS 无序充电,弃风量较大,风电消纳率仅为 91.35%。单一考虑柔性负荷或 BSS 有序充放电后,场景 2、场景 3 风电消纳率分别提升了 5.5%、8.26%,风电消纳率显著提高,但是仍然有弃风现象存在。场景 4、场景 5 在综合考虑柔性负荷和 BSS 的有序充电后实现了对风电的全额消纳。

以场景 5 为例,对多种柔性电负荷协调优化的结果进行分析。图 7 为考虑柔性负荷和 BSS 有序充放电后的电负荷优化结果,对比图 3 可以看出,优化前的负荷峰谷分布明显。场景 5 在柔性负荷响应后,可转移负荷从 18:00~22:00、7:00~9:00 负荷用电高峰时段转移到 1:00~6:00、23:00~24:00、14:00~15:00 电价谷时和平时多个时段。可削减负荷在满足削减时间约束的基础上,对 17:00~22:00 时段负荷进行了削减,进一步缓解了晚高峰的供电压力。在 1:00~9:00、23:00~24:00 处于电价谷、平时段,

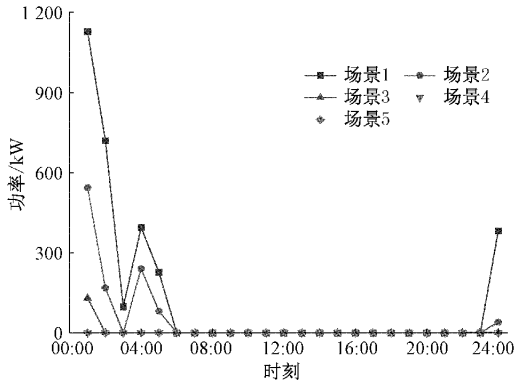


图 6 不同场景下风电弃用曲线

用气成本高于用电成本,天然气用户选择电能满足用能需求,在 10:00~12:00、18:00~21:00 用电高峰时段,用电成本高于用气成本,部分电负荷被天然气负荷替代。可以看出,通过柔性负荷响应使得负荷曲线更加平滑,实现了削峰填谷的效果,进而提高了系统经济性。

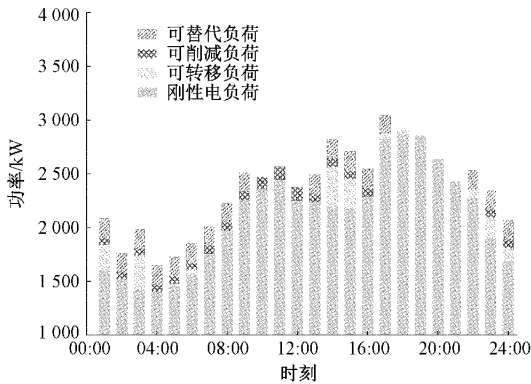


图 7 场景 5 电负荷优化结果

场景 5 电功率、热功率和天然气优化结果如图 8~10 所示。

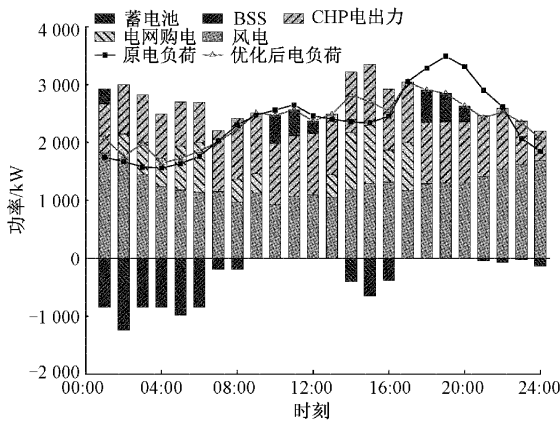


图 8 电功率优化调度结果

由图 8 可知,1:00~6:00、23:00~24:00 电负荷处于低谷,而风电出力较高,BSS 将待充电电池转移到此时段大

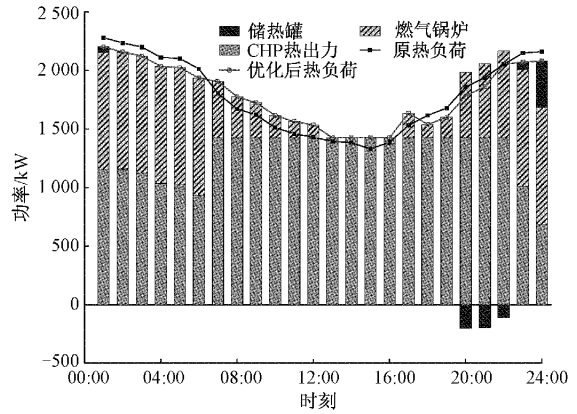


图 9 热功率优化调度结果

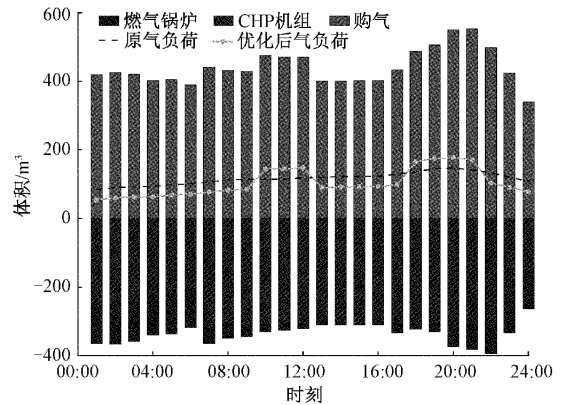


图 10 天然气优化调度结果

规模充电,由于电价较低,缺额电量通过购电进行补充。7:00~9:00 时段,电负荷水平逐渐上升,风电出力却降低,BSS 减小充电功率,此时发电成本小于购电成本,CHP 机组开始增大出力。10:00~12:00 处于电价峰值时段,BSS 在该时段放电,避免 IES 购电量增加使得系统运行成本增大。13:00~17:00 为电价平时段,BSS 为下一阶段用户所需的换电电池充电,在随后的 18:00~20:00 用电高峰时段集中放电。CHP 机组在峰时和平时电价的 7:00~22:00 时段内以最大功率运行,减少 IES 外购电量。蓄電池在电价谷、平时段充电,在电价较高的 10:00~12:00、18:00~20:00 时段放电,实现降低 IES 运行成本和削峰填谷的目的。

由图 9、10 可知,在 1:00~6:00、23:00~24:00 时段热负荷需求较高,此时段通过柔性热负荷响应打破 CHP 机组“以热定电”的运行约束,最大化燃气锅炉供热功率。在 7:00~22:00 时段,系统电负荷水平较高,电价处于峰、平时段,CHP 机组发电成本小于购电成本,通过提高柔性热负荷功率最大化 CHP 机组“以热定电”发电功率,实现 CHP 机组供电时余热的充分利用,此时段热负荷尽量由 CHP 机组供给,缺额热量才调用燃气锅炉满足。储热罐在供热有盈余时储存热能,在热负荷较高时放热。系统通过

电、气负荷之间的替代型响应调整气负荷曲线,通过购气满足气负荷、CHP机组和燃气锅炉的用气需求。对比图8、9可得,优化后的电、热负荷比更加匹配CHP机组的热电比,进一步提升了系统的能源利用效率。

5 结 论

本文在计及多类型柔性负荷响应的基础上,将电动汽车换电站的充放电特性考虑到IES的优化调度中,构建了综合考虑柔性负荷和换电站有序充放电的IES优化调度模型。仿真结果表明:柔性负荷响应和BSS有序充放电机制的有效配合能够有效平滑负荷曲线,提高风电消纳能力,同时使系统的经济性达到最优;BSS同时具有可转移负荷和储能特性,其通过采取合理的充放电策略,能够提升IES的调度灵活性和经济效益。

参考文献

- [1] 杨经纬,张宁,王毅,等.面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J].电力系统自动化,2018,42(4):11-24.
- [2] 朱理,刘龙灿.考虑负荷平移的综合能源系统日前优化运行[J].电子测量技术,2020,43(22):67-71.
- [3] 孙功伟,周克楠,马喆非,等.考虑柔性负荷的智能电网调度策略研究[J].国外电子测量技术,2020,39(3):40-46.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 崔杨,郭福音,付小标,等.供用能转换促进风电消纳的综合能源系统源荷协调优化调度[J/OL].电网技术:1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20210929.1142.002.html>.
- [8] 崔岱,葛维春,赵文广,等.含低负荷场景低碳多源协调调度[J].仪器仪表学报,2019,40(11):155-164.
- [9] 翁菖宏,胡志坚,刘妍,等.计及互联调控的新能源汽车一体化供能站规划[J].智慧电力,2021,49(9):24-31,94.
- [10] 高少希,张达敏,陈伟川,等.计及供需两侧的电动汽车有序充放电优化算法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(11):140-147.
- [11] 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.
- [12] ESMAEILI S, ANVARI M A, JADID S. Optimal operation scheduling of a microgrid incorporating battery swapping stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019(99): 5063-5072.
- [13] 刘君瑶.考虑“源荷储”协调互动的并网型光伏微电网调度策略研究[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [14] 刘柏岩.基于需求响应的含换电站微电网经济调度策略研究[D].吉林:东北电力大学,2021.
- [15] 蒋哲.计及多元效益的电动汽车换电站与风电协同优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [16] 陈思,张焰,薛贵挺,等.考虑与电动汽车换电站互动的微电网经济调度[J].电力自动化设备,2015,35(4):60-69.
- [17] 林俐,顾嘉,王钤.面向风电消纳的考虑热网特性及热舒适度弹性的电热联合优化调度[J].电网技术,2019,43(10):3648-3661.
- [18] 侯健敏,路新梅,周颖,等.考虑柔性电负荷和热负荷的综合能源系统容量优化配置[J].现代电力,2021,38(4):412-426.

作者简介

孟国情,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化运行。

E-mail:1426271307@qq.com

邱晓燕,博士,教授,主要研究方向为电力系统分析与控制、智能电网、分布式电源及微网技术。