

# 考虑源-荷-储多能互补的 冷-热-电综合能源系统优化运行研究

欧阳斌<sup>1,2</sup>, 袁志昌<sup>2</sup>, 陆超<sup>2</sup>, 屈鲁<sup>2</sup>, 李东东<sup>1</sup>

- (1. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090;  
2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

## Research on Optimal Operation of Cold-Thermal-Electric Integrated Energy System Considering Source-Load-Storage Multi-Energy Complementarity

OYANG Bin<sup>1,2</sup>, YUAN Zhichang<sup>2</sup>, LU Chao<sup>2</sup>, QU Lu<sup>2</sup>, LI Dongdong<sup>1</sup>

- (1. Electric Power Engineering, Shanghai University of Electricity Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;  
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**摘要:** 综合能源系统(integrated energy system, IES)以多能互补和能量阶梯利用为核心, 将大大提高系统的能量利用率, 实现多种能流互补优化。通过建立冷-热-电综合能源系统, 以系统总运行成本最低为目标函数, 考虑设备模型约束和功率平衡约束, 采用日前负荷模拟综合能源系统经济优化运行; 同时考虑到系统在冬、夏季运行工况差异较大, 采用分季调节运行模式, 利用分支界定(branch and bound, B-a-B)算法求解优化模型。仿真结果表明, 系统能量供给平衡, “源-荷-储”互补搭配性强, 系统运行灵活、经济高效, 同时, 系统污染气体排放量少, 有利于环境保护。

**关键词:** 综合能源系统(IES); 多能互补; 源-荷-储; 优化运行; 分季调节; 分支界定

**ABSTRACT:** The integrated energy system (IES) is based on multi-energy complementarity and energy ladder utilization, which will greatly improve the energy utilization of the system and achieve multiple energy flow complementary optimization. A cold-thermal-electric IES was established. The objective function is the lowest total operating cost of the system. Considering the constraints of equipment model and power balance, the daily load is used to simulate the economic optimal operation of the comprehensive energy system. Considering that the operating conditions of the system vary greatly in winter and summer, the operation mode is adjusted by the seasons,

and the branch and bound (B-a-B) was used to solve the optimization model. The simulation results show that the system energy supply balance, "source-load-storage" complementary collocation, the system is flexible, economical and efficient, and at the same time, the system emits less pollutant gas, which is conducive to environmental protection.

**KEY WORDS:** integrated energy system (IES); multi-energy complementarity; source-load-storage; optimal operation; different seasonal adjusts; branch and bound

## 0 引言

能源产业作为支撑日常生活消费、工业生产等活动的关键因素呈现出能源需求量大、能源种类多、能源结构差异性大和能流变化迅速等特点<sup>[1-6]</sup>。现有的能源生产结构大多彼此独立, 且单独运营, 这就容易造成能量转换损失严重, 各个系统彼此耦合关系稀疏, 结构单一; 在能源消费端, 巨大的能量需求和能源消费方式的快速转变不断冲击现有的能源系统结构, 对能源系统的稳定性和安全性带来巨大挑战。

近年来, 有学者针对上述问题, 提出在靠近能源消费终端建立起综合能源系统(integrated energy system, IES)<sup>[7-11]</sup>, 通过实现多种能源互相补充以及能量阶梯利用的原理, 充分消纳吸收分布式能源(distributed energy, DE), 以解决现有的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905105)。

Project Supported by National Key Research and Development Program (2018YFB0905105).

能源“生产-传输-存储-消费”困境。

在对综合能源系统的研究方面，英国曼彻斯特大学开发了电-热-气系统及用户交互平台的综合能源系统，对用户终端实现了用能、节能和需求响应 3 个功能<sup>[12]</sup>。德国通过鼓励 E-Energy 项目建设，侧重于能源和信息系统集成，采用数字网络实现发电的安全供给、高效利用以及气候保护<sup>[13]</sup>。欧盟规划了欧盟电网新计划路线图，致力于融合各国能源系统建设跨欧洲的高效能源系统<sup>[14]</sup>。日本早在 2010 年就成立日本智能社区联盟，专注于智能社区技术与综合能源系统示范工程建设<sup>[15]</sup>。近几年，综合能源系统研究在国内成为潮流，在示范工程方面，广州明珠工业区同构冷-热-电-气的综合能源系统，优化提高能源利用率，积极打造智能工业示范园区<sup>[12]</sup>。北京延庆的“城市能源互联网”示范工程，旨在建设支撑高渗透率的区域综合能源系统<sup>[16]</sup>。张家口张北的“多能互补高效阶梯利用的分布式供能”示范工程<sup>[8]</sup>，综合运用多种能源生产方式、储能设备以及光热化学互补原理，为实现大规模综合能源系统应用和协调控制提供新的发展机遇。

由于综合能源系统耦合了多类异质能流，通过对多种能源生产方式的互补搭配和各个能源设备的协调控制，实现整体系统更高的能源利用率和节能效益，但由于系统本身耦合关系复杂，非线性特征明显，增加了系统在协调运行上的难度。因此，迫切需要对系统进行优化运行。在优化运行方面，文献[17]以 433 座楼宇组成的综合建筑的冷热需求为模型，比较了以热定电和以电定热 2 种运行方式在楼宇中的适应程度以及存在的不足。鉴于以热定电和以电定热方法并不合理，文献[18]提出了分别以运行成本、一次能源消耗(primary energy consumption, PEC)、二氧化碳排放量(carbon dioxide emissions, CDE)最小化为目标的能源调度算法，并指出只要 PEC 和 CDE 达到标准要求，就应该考虑系统的安装运行。文献[19]则提出一种应用于小型冷热电三联供系统的多目标优化函数，综合考虑能源效率、资金消耗、环境效益，并对冷热电三联供系统进行了风险分析。文献[20]提出了一种以运行费用和燃料价格

最低为经济目标的线性规划方法。文献[21]提出了一种光/储/水/柴微网经济调度策略，分 3 层对系统进行控制：经济调度层采用边际成本竞价机制结合水电和光伏补偿策略，安排下一时段的运行计划；稳态控制层中，接收调度层指令并执行；紧急控制层通过备用功率分配、可用功率调整、切负荷等手段维持系统功率平衡，保证系统稳定运行。

综上所述，在综合能源系统优化方面已有较多研究，但对耦合“源-荷-储”的综合能源系统的优化运行以及考虑季节工况差异性方面，特别是季节负荷差异性大可能使系统难以稳定运行方面考虑较少，为此，本文将针对冷-热-电综合能源系统的“源-荷-储”多能互补和分季节优化运行开展研究。

## 1 系统架构及工作原理

### 1.1 系统架构

冷-热-电综合能源系统结构多样，形态多端，系统耦合关系复杂，本文针对冷-热-电综合能源系统优化运行现状分析，基于耦合多种能源生产方式，多种能流互相搭配补充，并且拥有对电、热 2 种能量的储能装置的冷-热-电综合能源系统的通用拓扑结构，建立综合能源系统研究模型。

图 1 中冷-热-电综合能源系统的设备主要包

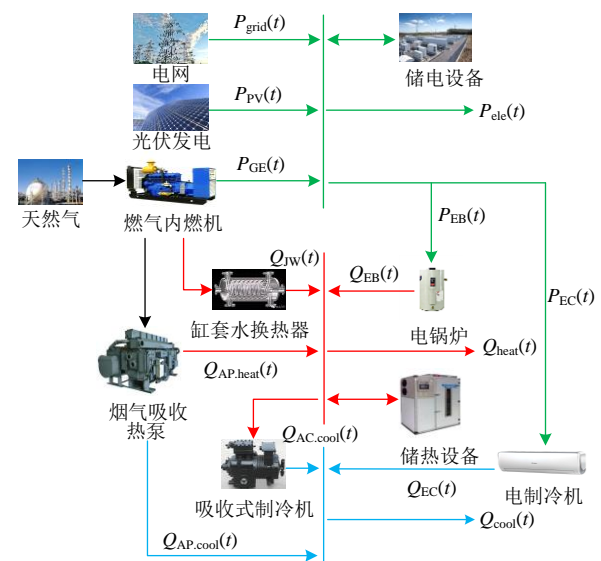


图 1 冷-热-电综合能源系统能流拓扑图  
Fig. 1 Diagram of energy flow of cold-thermal-electricity IES

括燃气内燃机、缸套水换热器、吸收式制冷机、电锅炉、电制冷机以及烟气吸收热泵设备，并且配以储电、储热2种储能设备，系统还接入了光伏发电机组，提高可再生能源的渗透率，并接入电网以保证有充足的电能供电力负荷使用。

## 1.2 工作原理

本文的冷-热-电综合能源系统为微能源网，以燃气内燃机为核心，通过消耗天然气，产出电能直接供给部分电力负荷；燃气内燃机工作时产生的热蒸汽则通过缸套水换热器转化为热水供给热力负荷；同时，天然气燃烧时产生的烟气可以被烟气吸收热泵大部分接收，转化为热能和冷能直接供给用户；为弥补冷能供给不足的情况，可由吸收式制冷机吸收部分热能转化为冷能供给负荷使用。当电能供给充足而供冷或者供热不足时，可以通过电锅炉或者电制冷机工作补充。系统中还加入了储电、储热设备，保证系统有足够的功率容量裕度，稳定系统运行。光伏发电机组的主动接入，增加了系统的环保性和经济效益。当电能负荷需求较大时，系统可与电网交互，同时，为了降低系统与电网的信息通道以及物理通道的建设费用和协调成本，本系统采用“并网不上网”原则，向电网购买电能，以弥补系统的电能缺额，保证系统稳定运行。

## 2 优化运行策略

在对冷-热-电综合能源系统的优化运行方面，本文考虑了系统负荷需求供给平衡约束、各类设备容量约束和设备运行约束，采用同一时间尺度( $\Delta t=1\text{h}$ )进行系统功率调节，以实现系统功率平衡和经济效益最大化。

### 2.1 目标函数

以系统总运行成本最小为目标构建冷-热-电综合能源系统的目标函数，即

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} \{F_{\text{grid}}(t) + F_{\text{gas}}(t) + F_{\text{main}}(t) + F_{\text{poll}}(t)\} \quad (1)$$

式中： $F_{\text{grid}}(t)$ 为系统与电网的购电费用，元； $F_{\text{gas}}(t)$ 为系统购买天然气费用，元； $F_{\text{main}}(t)$ 为系统设备

维护费用，元； $F_{\text{poll}}(t)$ 为污染气体排放治理费用，元。

其中，系统购电费用、购气费用、设备维护费用、污染气体排放治理费用具体表示如下：

$$\begin{cases} F_{\text{grid}}(t) = P_{\text{grid}}(t) \cdot \Delta t \cdot f_{\text{grid}}(t) \\ F_{\text{gas}}(t) = V_{\text{gas}}(t) \cdot \Delta t \cdot f_{\text{gas}}(t) \\ F_{\text{main}}(t) = k_{\text{GE}}[P_{\text{GE}}(t)] \cdot \Delta t \cdot P_{\text{GE}}(t) + \\ \quad k_{\text{AP,cool}}[Q_{\text{AP,cool}}(t)] \cdot \Delta t \cdot Q_{\text{AP,cool}}(t) + \\ \quad k_{\text{AP,heat}}[Q_{\text{AP,heat}}(t)] \cdot \Delta t \cdot Q_{\text{AP,heat}}(t) + \\ \quad k_{\text{AC,heat}}[Q_{\text{AC,heat}}(t)] \cdot \Delta t \cdot Q_{\text{AC,heat}}(t) + \\ \quad k_{\text{batt}}^{\text{dis/cha}}[P_{\text{batt}}^{\text{dis/cha}}(t)] \cdot \Delta t \cdot P_{\text{batt}}^{\text{dis/cha}}(t) + \\ \quad k_{\text{stor}}^{\text{dis/cha}}[P_{\text{stor}}^{\text{dis/cha}}(t)] \cdot \Delta t \cdot P_{\text{stor}}^{\text{dis/cha}}(t) + \\ F_{\text{poll}}(t) = \sum_{i=1}^3 \lambda_i [\alpha_{\text{grid},i} \cdot \Delta t \cdot P_{\text{grid}}(t) + \alpha_{\text{GE},i} \cdot \Delta t \cdot P_{\text{GE}}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{\text{grid}}(t)$ 为系统与电网的购电功率，kW； $f_{\text{grid}}(t)$ 为电网的实时电价，元/kW； $V_{\text{gas}}(t)$ 为系统消耗天然气体积， $\text{m}^3$ ； $f_{\text{gas}}(t)$ 为天然气价格，元/ $\text{m}^3$ ； $k_{\text{GE}}[P_{\text{GE}}(t)]$ 为燃气内燃机在不同输出功率下的维护系数，元/kW； $P_{\text{GE}}(t)$ 为燃气内燃机输出电功率，kW； $k_{\text{AP,cool}}[Q_{\text{AP,cool}}(t)]$ 、 $k_{\text{AP,heat}}[Q_{\text{AP,heat}}(t)]$ 分别为烟气吸收热泵设备的冷、热功率维护系数，元/kW； $Q_{\text{AP,cool}}(t)$ 、 $Q_{\text{AP,heat}}(t)$ 分别为烟气吸收热泵输出冷、热功率； $k_{\text{AC,heat}}[Q_{\text{AC,heat}}(t)]$ 为吸收式制冷机的维护系数，元/kW； $Q_{\text{AC,heat}}(t)$ 为吸收式制冷机吸收的热功率，元/kW； $k_{\text{batt}}^{\text{dis/cha}}[P_{\text{batt}}^{\text{dis/cha}}(t)]$ 、 $k_{\text{stor}}^{\text{dis/cha}}[P_{\text{stor}}^{\text{dis/cha}}(t)]$ 分别为储电设备、储热设备维护系数，元/kW； $P_{\text{batt}}^{\text{dis/cha}}(t)$ 、 $P_{\text{stor}}^{\text{dis/cha}}(t)$ 分别为储电设备、储热设备的交互功率，kW； $i$ 为系统的污染排放物，包括 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ ； $\lambda_i$ 为不同排放物的治理费用，元/ $\text{m}^3$ ； $\alpha_{\text{grid},i}$ 为电网功率对不同排放物的排放系数； $\alpha_{\text{GE},i}$ 为燃气内燃机电功率对不同排放物的排放系数。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 设备模型约束

##### 1) 燃气内燃机模型。

$$\begin{cases} \eta_{GE.elec}(t) = a_3 \left( \frac{P_{GE}(t)}{P_{max}} \right)^3 + a_2 \left( \frac{P_{GE}(t)}{P_{max}} \right)^2 + a_1 \left( \frac{P_{GE}(t)}{P_{max}} \right) + a_0 \\ Q_{GE.heat}(t) = \frac{P_{GE}(t)}{\eta_{GE.elec}(t)} (1 - \eta_{GE.elec}(t) - \eta_L) \\ |P_{GE}(t) - P_{GE}(t-1)| \leq P_{GE.max} \\ V_{gas}(t) = \frac{P_{GE}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{gas} \cdot \eta_{GE.elec}(t) \cdot LHV} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\eta_{GE.elec}(t)$ 为燃气内燃机的发电效率； $P_{max}$ 为燃气内燃机的额定发电功率，kW； $Q_{GE.heat}(t)$ 为燃气内燃机输出的热功率，kW； $\eta_L$ 为燃气内燃机的固有损耗率； $P_{GE.max}$ 为燃气内燃机出力坡度约束，kW； $LHV$ 为天然气的低位热值，kW/m<sup>3</sup>； $\eta_{gas}$ 为燃气内燃机的天然气利用率； $a_3$ 、 $a_2$ 、 $a_1$ 、 $a_0$ 分别为拟合常数。

## 2) 烟气吸收热泵。

$$\begin{cases} T(t) = b_1 \cdot \left( \frac{P_{GE}(t)}{P_{max}} \right) + b_0 \\ C_w(t) = b_3 \cdot T(t) + b_2 \\ COP_{AP}(t) = b_5 \cdot \left( \frac{P_{GE}(t)}{P_{max}} \right) b_4 \\ Q_{AP.heat}(t) = \lambda_{heat}(t) \cdot C_w(t) \cdot (T(t) - T_{heat}) \cdot \\ \quad COP_{AP}(t) \cdot L_{heat}(t) \cdot \eta_{AP.heat} \\ |Q_{AP.heat}(t) - Q_{AP.heat}(t-1)| \leq Q_{AP.heat.max} \\ Q_{AP.cool}(t) = \lambda_{cool}(t) \cdot C_w(t) \cdot (T(t) - T_{cool}) \cdot \\ \quad COP_{AP}(t) \cdot L_{cool}(t) \cdot \eta_{AP.cool} \\ |Q_{AP.cool}(t) - Q_{AP.cool}(t-1)| \leq Q_{AP.cool.max} \\ \lambda_{heat}(t) + \lambda_{cool}(t) = 1 \\ 0 \leq L_{heat}(t) \leq L_{heat.max} \\ 0 \leq L_{cool}(t) \leq L_{cool.max} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $T(t)$ 为烟气吸收热泵的入口温度，℃； $C_w(t)$ 为不同温度的热水比热容，kW/(kg·℃)； $COP_{AP}(t)$ 为烟气吸收式热泵的能效系数； $\lambda_{heat}$ 、 $\lambda_{cool}(t)$ 分别为烟气吸收热泵的烟气制热比例和制冷比例； $T_{heat}$ 、 $T_{cool}$ 分别为热水出口温度和冷水出口温度，℃； $L_{heat}(t)$ 、 $L_{cool}(t)$ 分别为烟气吸收

热泵的热水和冷水流量，kg/h； $L_{heat.max}$ 、 $L_{cool.max}$ 分别为最大制热、制冷流量，kg/h； $\eta_{AP.heat}$ 、 $\eta_{AP.cool}$ 分别为烟气吸收热泵的制热和制冷效率； $Q_{AP.heat.max}$ 为烟气吸收热泵的制热功率出力坡度约束，kW； $Q_{AP.cool.max}$ 为烟气吸收热泵的制冷功率出力坡度约束，kW； $b_5$ 、 $b_4$ 、 $b_3$ 、 $b_2$ 、 $b_1$ 、 $b_0$ 分别为拟合常数。

## 3) 缸套水换热器。

$$Q_{JW}(t) = \eta_{JW} \cdot Q_{GE}(t) \quad (5)$$

式中： $Q_{JW}(t)$ 为缸套水换热器输出热功率，kW； $\eta_{JW}$ 为缸套水换热器的换热效率。

## 4) 吸收式制冷机。

$$\begin{cases} Q_{AC.cool}(t) = COP_{AC} \cdot Q_{AC.heat}(t) \\ Q_{AC.heat.min} \leq Q_{AC.heat}(t) \leq Q_{AC.heat.max} \\ |Q_{AC.cool}(t) - Q_{AC.cool}(t-1)| \leq Q_{AC.cool.max} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $Q_{AC.cool}(t)$ 为吸收式制冷机输出的冷功率，kW； $COP_{AC}$ 为吸收式制冷机的能效系数； $Q_{AC.heat.min}$ 、 $Q_{AC.heat.max}$ 分别为吸收式制冷机吸收的最小、最大热功率，kW； $Q_{AC.cool.max}$ 为吸收式制冷机的出力坡度约束，kW。

## 5) 电锅炉。

$$\begin{cases} Q_{EB}(t) = COP_{EB} \cdot P_{EB}(t) \\ P_{EB.min} \leq P_{EB}(t) \leq P_{EB.max} \\ |Q_{EB}(t) - Q_{EB}(t-1)| \leq Q_{EB.max} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_{EB}(t)$ 为电锅炉输入电功率，kW； $Q_{EB}(t)$ 为电锅炉输出热功率，kW； $COP_{EB}$ 为电锅炉的制能系数； $P_{EB.min}$ 、 $P_{EB.max}$ 分别为电锅炉最小、最大电功率，kW； $Q_{EB.max}$ 为电锅炉的出力坡度约束，kW。

## 6) 电制冷机。

$$\begin{cases} Q_{EC}(t) = COP_{EC} \cdot P_{EC}(t) \\ P_{EC.min} \leq P_{EC}(t) \leq P_{EC.max} \\ |Q_{EC}(t) - Q_{EC}(t-1)| \leq Q_{EC.max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $P_{EC}(t)$ 为电制冷机的输入电功率，kW； $Q_{EC}(t)$ 为电制冷机的输出冷功率，kW； $COP_{EC}$ 为电制冷机的能效系数； $P_{EC.min}$ 、 $P_{EC.max}$ 分别为电制

冷机最小、最大电功率, kW;  $Q_{EC,max}$  为电制冷机的出力坡度约束, kW。

7) 光伏发电机组模型。

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \frac{G_{ING}(t)}{G_{STC}} [1 - k(T_{out}(t) - T_s)] \quad (9)$$

式中:  $P_{PV}(t)$  为光伏发电机组的实时出力, kW;  $P_{STC}(t)$  为光伏发电机组的额定出力, kW;  $G_{ING}(t)$  为实时辐照强度,  $W/m^2$ ;  $G_{STC}$  为光伏发电机组的额定辐照强度,  $W/m^2$ ;  $k$  为光伏发电机组的发电系数;  $T_{out}(t)$  为外界温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_s$  为发电机组的参考温度,  $^{\circ}C$ 。

8) 储电设备模型。

$$\begin{cases} E_{batt}(t+1) = (1 - k_L) \cdot E_{batt}(t) + [\eta_{batt,cha} \cdot P_{batt,cha}(t) - \frac{P_{batt,dis}(t)}{\eta_{batt,dis}}] \cdot \Delta t \\ P_{batt,cha,min} \leq P_{batt,cha}(t) \leq P_{batt,cha,max} \\ P_{batt,dis,min} \leq P_{batt,dis}(t) \leq P_{batt,dis,max} \\ E_{batt,min} \leq E_{batt}(t) \leq E_{batt,max} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $E_{batt}(t)$  为储电设备实时容量, kW·h;  $k_L$  为储电设备的自损耗系数;  $\eta_{batt,cha}$ 、 $\eta_{batt,dis}$  分别为储电设备的充电、放电效率;  $P_{batt,cha}(t)$ 、 $P_{batt,dis}(t)$  分别为储电设备的充、放电功率, kW;  $P_{batt,dis,max}$ 、 $P_{batt,dis,min}$  分别为储电设备最大、小放电功率, kW;  $P_{batt,cha,max}$ 、 $P_{batt,cha,min}$  分别为充电设备最大、最小充电功率, kW;  $E_{batt,max}$ 、 $E_{batt,min}$  分别为充电设备最大、最小储电容量, kW·h。

9) 储热设备模型。

$$\begin{cases} B_{stor}(t+1) = (1 - k_s) \cdot B_{stor}(t) + [\eta_{stor,cha} \cdot Q_{stor,cha}(t) - \frac{Q_{stor,dis}(t)}{\eta_{stor,dis}}] \cdot \Delta t \\ Q_{stor,cha,min} \leq Q_{stor,cha}(t) \leq Q_{stor,cha,max} \\ Q_{stor,dis,min} \leq Q_{stor,dis}(t) \leq Q_{stor,dis,max} \\ B_{stor,min} \leq B_{stor}(t) \leq B_{stor,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $B_{stor}(t)$  为储热设备实时容量, kW·h;  $k_s$  为储热设备的自损耗系数;  $\eta_{stor,cha}$ 、 $\eta_{stor,dis}$  分别为储热设备的吸热、放热效率;  $Q_{stor,cha}(t)$ 、 $Q_{stor,dis}(t)$  分别为储热设备的吸热、放热功率, kW;  $Q_{stor,cha,max}$ 、

$Q_{stor,cha,min}$  分别为储热设备的最大、最小吸热功率, kW;  $Q_{stor,dis,max}$ 、 $Q_{stor,dis,min}$  分别为储热设备的最大、最小放热功率, kW;  $B_{stor,max}$ 、 $B_{stor,min}$  分别为储热设备的最大、最小容量, kW·h。

2.2.2 功率平衡约束

1) 电功率平衡约束。

$$P_{grid}(t) + P_{PV}(t) + P_{GE}(t) + P_{batt,dis}(t) \cdot D_{batt,dis}(t) = P_{batt,cha}(t) \cdot D_{batt,cha}(t) + P_{ele}(t) + P_{EB}(t) + P_{EC}(t) \quad (12)$$

式中:  $D_{batt,dis}(t)$ 、 $D_{batt,cha}(t)$  分别为储电设备的放电、充电变量;  $P_{ele}(t)$  为电力负荷, kW。

2) 热功率平衡约束。

$$Q_{JW}(t) + Q_{AP,heat}(t) + Q_{EB}(t) + Q_{stor,dis}(t) \cdot D_{stor,dis}(t) = Q_{stor,cha}(t) \cdot D_{stor,cha}(t) + Q_{heat}(t) + Q_{AC,heat}(t) \quad (13)$$

式中:  $D_{stor,dis}(t)$ 、 $D_{stor,cha}(t)$  分别为储热设备的放热、吸热变量;  $Q_{heat}(t)$  为热力负荷, kW。

3) 冷功率平衡约束。

$$Q_{AC,cool}(t) + Q_{EC}(t) + Q_{AP,cool}(t) = Q_{cool}(t) \quad (14)$$

式中:  $Q_{cool}(t)$  为冷力负荷, kW。

### 2.3 求解算法和步骤

本优化模型为混合整数非线性规划模型, 其耦合关系复杂、非线性特征明显, 特别是燃气内燃机和烟气吸收热泵设备存在多变量输入、转换, 使得模型表现出强非凸特性, 一般的优化求解器(如 CPLEX、GUROBI 等)和普通算法均无法求解, 因此, 本文采取分支界定法求解该问题。

求解步骤如附录图 A1 所示。分支界定算法通过放宽约束条件, 将原问题分解成众多子问题, 采用求解子问题的最优解的方式, 当所求最优解为原问题可行解时, 该最优解为原问题最优解; 否则, 以最优解的目标函数为原问题上界, 最优解的可行解最大值目标函数为原问题下界, 继续求解该程序, 当上界低于下界时, 则原问题无最优解。

## 3 算例仿真与分析

冷-热-电综合能源系统在季节负荷差异较大时, 特别是冬、夏季对冷、热负荷需求悬殊, 系统工况运行复杂。在系统冷、热、电负荷相互独

立且不确定的情况下，如果对不同季节采用单一工况运行，则存在系统无法满足负荷需求、设备无法运行的情况。此时，应当考虑对系统进行分季运行调节。本文通过调节系统设备参数，改变系统运行工况，调节系统分季运行。其中，冬、夏季部分设备模型参数如表 1 所示。其余部分模型参数可参考文献[22-23]进行设置，详见附录表 A1。

表 1 冬、夏季日前优化部分设备参数

Tab. 1 The tuning parameters of some equipment in summer and winter

参数	夏季	冬季
$T_{\text{heat}}/^{\circ}\text{C}$	80	100
$T_{\text{cool}}/^{\circ}\text{C}$	40	60
$\eta_{\text{TW}}$	0.2	0.8
$\text{COP}_{\text{EB}}$	1.8	2.8
$\text{COP}_{\text{EC}}$	4.1	2.3

采用夏季日前负荷对综合能源系统运行结果分析如下：

夏季日前冷-热-电负荷及各个设备电功率出力情况如图 2、图 3 所示，燃气内燃机输出电功率基本承担了电能负荷的基荷部分；光伏发电设备主动接入系统，且被系统完全消纳，此时系统从电网吸收电功率降低，尤其是在第 9、11 和 12h 用电高峰期 of 0kW，充分体现了系统实现削峰填谷作用；系统中储电设备的充、放电功率较低，储电设备对系统参与度小，有利于提高储电设备寿命，同时也说明系统能够实现自我消纳，系统

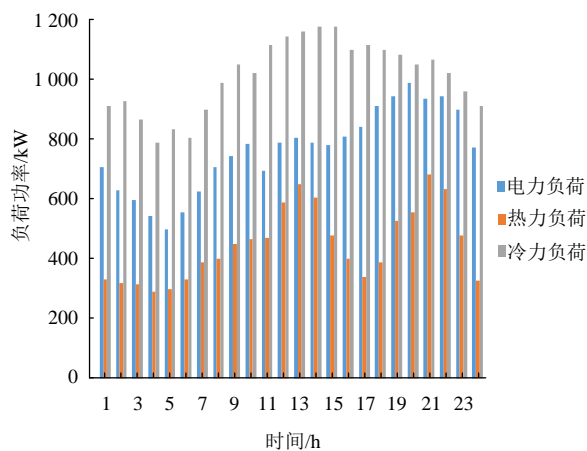


图 2 夏季日前冷-热-电负荷图

Fig. 2 Diagram of summer recently about cool-heat-electricity power load

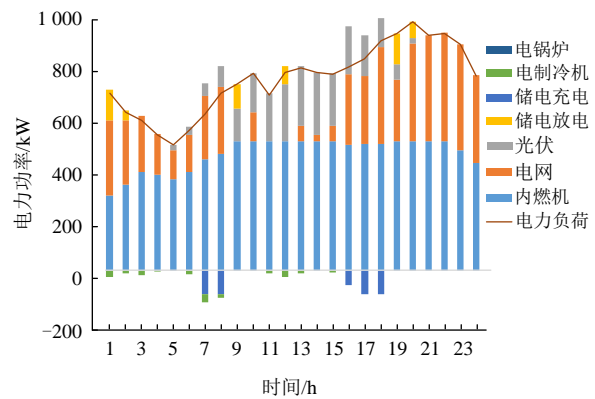


图 3 夏季日前各个设备电功率出力图

Fig. 3 Diagram of summer recently each equipment electricity power output

稳定性好。夏季日前各个设备热功率出力情况如图 4 所示，缸套水换热器输出的热能功率稳定，满足一天的热能负荷基荷。系统的热能负荷在一天内存在 2 个峰荷时段，烟气吸收热泵调节灵活，能够实现对热能输出的“随入随放，随出随停”功能。同时，储热设备通过吸收和放出热量维持热力系统的功率稳定性，有效调节热力系统经济稳定运行。夏季日前各个设备冷功率出力情况如图 5 所示，夏季冷能需求最大，主要由烟气吸收热泵供给冷能负荷，烟气吸收热泵输出冷功率稳定，满足系统冷能负荷平衡。电制冷机灵活运行，在烟气吸收热泵冷功率不足时，提供部分冷能，满足冷力系统负荷缺额，实现“源-荷-储”功率平衡，系统稳定运行。

采用冬季日前负荷对综合能源系统运行结果分析如下：

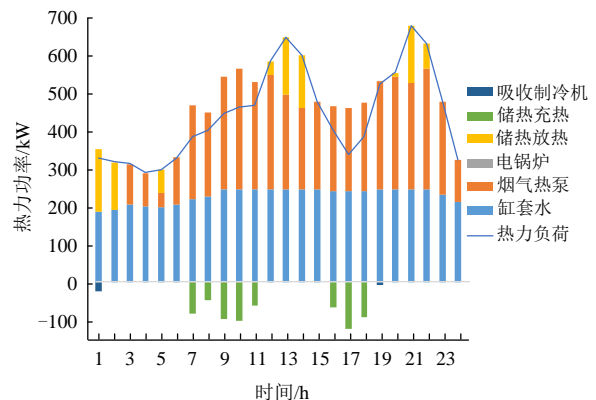


图 4 夏季日前各个设备热功率出力图

Fig. 4 Diagram of summer recently each equipment heat power output

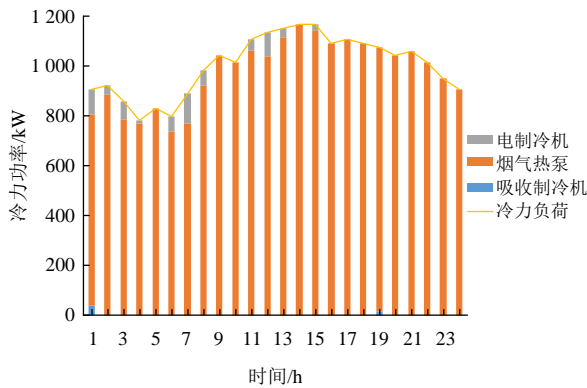


图5 夏季日前各个设备冷功率出力图

Fig. 5 Diagram of summer recently each equipment cold power output

冬季日前冷-热-电负荷情况及各个设备电功率出力情况如图6、图7所示，在电能谷时段(第1—6h以及第24h)燃气内燃机电功率出力较少，此时，电网功率价格低，电网电功率出力大，有利于系统经济运行；在电能峰时段(第7—22h)

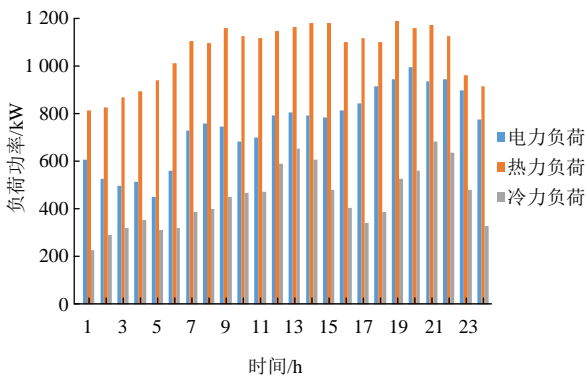


图6 冬季日前冷-热-电负荷图

Fig. 6 Diagram of winter recently about cold-heat-electricity power load

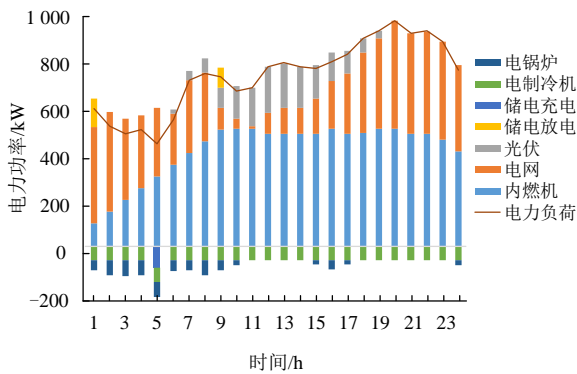


图7 冬季日前各个设备电功率出力图

Fig. 7 Diagram of winter recently each equipment electricity power output

燃气内燃机电功率随电能负荷需求增加而增加，其提供了电能负荷的50%以上，且输出稳定。从第9—17h，光伏发电出力明显，系统能够实现完全消纳光伏电功率，峰时段系统从电网接收的功率降低，特别是在第10、11h，系统几乎不需要从电网吸收电能，能够完全自主发电和消纳，在用电的高峰期(第12—15h)电网电功率较低，实现系统经济性最优。在冬季日前优化中，储电设备的充、放电功率均在较低水平，既减少储电设备的维护费用，又提高设备的使用寿命。冬季日前各个设备热功率出力情况如图8所示，系统通过从缸套水换热器中接纳大量的热能供给负荷使用。当缸套水换热器提供的热功率不足时，系统通过烟气吸收热泵、电锅炉灵活运行，并供给了热能负荷缺额，当热能出力较多时，储热设备投入运行，以储存部分热能或发出部分热能方式调节系统运行，实现热能系统的功率平衡。冬季日前各个设备冷功率出力情况如图9所示，因冬季冷功率需求较低，系统则通过烟气吸收热泵良好

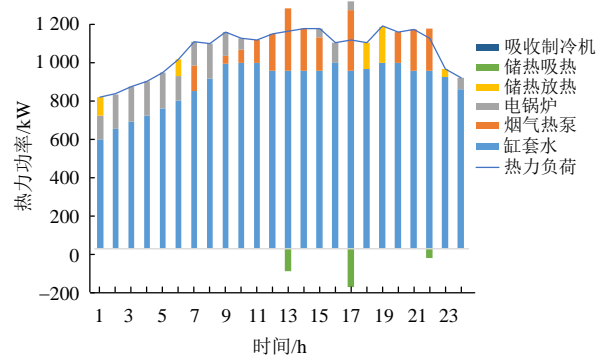


图8 冬季日前各个设备热功率出力图

Fig. 8 Diagram of winter recently each equipment heat power output

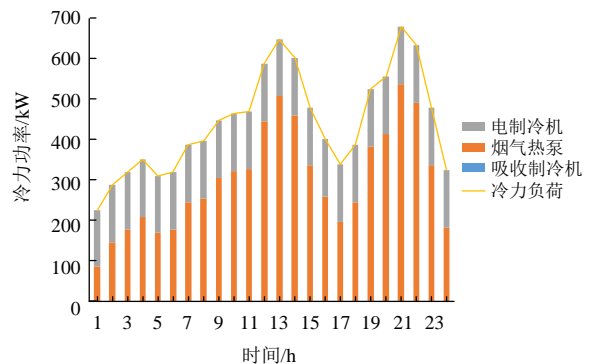


图9 冬季日前各个设备冷功率出力图

Fig. 9 Diagram of winter recently each equipment cold power output

的制冷效应和电制冷机制冷运行实现对冷负荷的全部供应。

在费用方面，将冷-热-电综合能源系统与未添加储能系统进行分析，结果如表 2 所示。

表 2 优化费用对比

Tab. 2 Comparison of optimizing cost

项目	夏季		冬季		元
	费用	总计	费用	总计	
IES	$F_{grid}(t)$	2 325		2 993	
	$F_{gas}(t)$	6 465	10 216	5 876	9 847
	$F_{main}(t)$	1 402		955	
	$F_{poll}(t)$	21		23	
无储能	$F_{grid}(t)$	2 819		3 063	
	$F_{gas}(t)$	6 331	10 491	5 918	9 960
	$F_{main}(t)$	1 317		955	
	$F_{poll}(t)$	23		22	

由表 2 可知，通过添加储能，系统功率存在一个缓冲空间，降低了系统在购电和购买天然气的费用，系统总成本减小。

综上所述，冷-热-电综合能源系统在冬、夏季日前负荷条件下实现需求供给平衡，“源-荷-储”各个设备充分参与系统调节，有效提高了系统的能源利用率，充分消纳、吸收系统中光伏发电功率，大大促进环境保护和系统经济效益。

## 4 结论

1) 基于冷-热-电综合能源系统拓扑，耦合多种能源生产方式，包括燃气内燃机的制电、制冷效应，烟气吸收热泵良好的制冷、制热性能以及众多的能源转换装置，系统中加入光伏发电机组，提高可再生能源的渗透率，为保证系统稳定运行，加入储热/储电设备以增加系统功率的容量裕度，并对系统进行优化运行。

2) 以系统整体运行经济性最优为优化目标，考虑设备模型约束与功率平衡约束，并采用冬、夏季日前负荷参数进行优化计算。由于冬、夏季负荷特性差异较大，系统运行工况复杂，通过调节系统设备参数使其运行在较适宜条件下运行。所建模型为强耦合、非线性和强非凸特征，采用分支界定算法求解模型。仿真结果表明，系统功

率平衡，能够稳定运行，且整体系统具有良好的制电、制热、制冷效应，满足负荷需求，“源-荷-储”的互补搭配极大地提高系统优化运行能力，系统运行方式灵活，能流供给多变，同时，系统所排放污染气体少，治理成本较低，能够实现系统经济效益和环境保护最大化。

## 参考文献

- [1] 杨道, 张李奇, 刘必扬, 等. 分布式冷热电联供系统文献综述[J]. 科技展望, 2016, 26(3): 92-93.
- [2] 齐鹏. 冷热电联供系统技术发展综述[J]. 机电信息, 2015(12): 173-175.
- [3] 解鸣, 任德财, 濮晓宙, 等. 冷热电三联供系统的发展现状和应用综述[J]. 制冷, 2019, 38(1): 63-69.
- [4] Sun H, Zhaoguang P, Guo Q. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8.
- [5] 邓忻依, 艾欣. 分布式光伏储能系统综合效益评估与激励机制[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 30-36.
- [6] 陈麒宇. 泛在电力物联网实施策略研究[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 99-106.
- [7] 贾宏杰, 丹王, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
- [8] Cheng H, Hu X, Wang L, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13.
- [9] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [10] Wang D, Liu L, Jia H, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.
- [11] 李兵, 牛洪海, 陈俊, 等. 多能互补综合能源系统运行优化研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(2): 53-57.
- [12] Qian A, Ran H. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 1-8.
- [13] Wu J. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in europe[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [14] Yiwei Z, Chaojie D, Yong M, et al. Development and experiences of smart grid projects in Europe[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1717-1723.
- [15] 韩宇, 彭克, 王敬华, 等. 多能协同综合能源系统协调控制关键技术研究现状与展望[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 81-87.
- [16] 黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33.
- [17] Amid P, Saffaraval F, Saffar-avval M. Feasibility study of different scenarios of CCHP for a residential complex[C]//2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply. Waltham, MA: IEEE, 2010: 177-183.
- [18] Heejin C, Pedro J M, Rogelio L, et al. Evaluation of CCHP systems performance based on operational cost, primary energy consumption, and carbon dioxide emission by utilizing an optimal operation scheme[J]. Applied Energy, 2009, 86(12): 2540-2549.
- [19] Hoseyn Sayyaadi Gholamhossein A. Application of the multi-objective optimization and risk analysis for the sizing of a residential small-scale CCHP system[J]. Energy and Buildings, 2013: 60-330.
- [20] Wongvisanupong K, Hoonchareon N. Optimal scheduling of hybrid CCHP and PV operation for shopping complex load"[C]//2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Krabi, 2013: 1-6.
- [21] 薛美东, 赵波, 张雪松, 等. 基于分布式控制的独立型光储水柴微网调度策略[J]. 电力系统自动化[J]. 2014, 38(4): 1-7.
- [22] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
- [23] 陈志彤. 多能流型区域综合能源系统经济调度优化运行[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.

附录 A

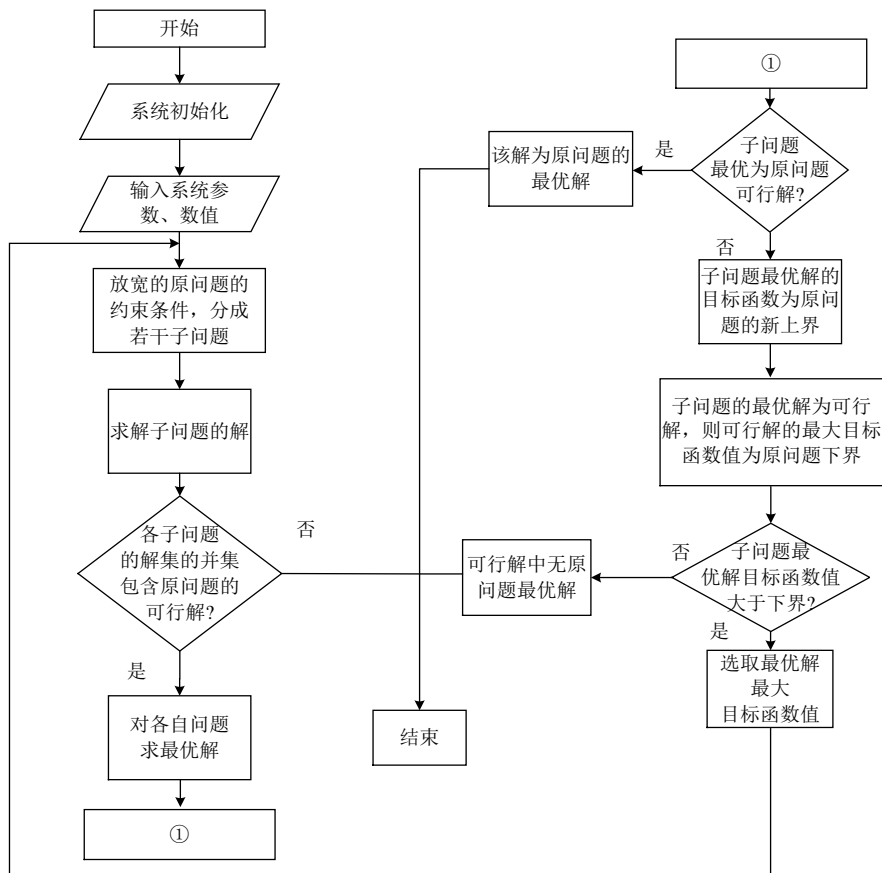


图 A1 求解步骤

Fig. A1 Solving steps

表 A1 综合能源系统设备参数  
Tab. A1 Parameters of integrated energy system equipment

设备	参数名称	夏季	冬季
燃气内燃机	$P_{\max}/\text{kW}$	500	500
	$\eta_L$	0.08	0.08
	$P_{\text{GE,max}} P_{\text{GE,max}}/\text{kW}$	50	50
	$\eta_{\text{gas}}$	0.98	0.98
	$\text{LHV}/(\text{kW}/\text{m}^3)$	9.7	9.7
	$a_3$	0.004 031	0.004 031
	$a_2$	-0.234 5	-0.234 5
	$a_1$	0.472 6	0.472 6
烟气吸收热泵	$a_0$	0.028 44	0.028 44
	$L_{\text{heat,max}}/(\text{t}/\text{h})$	10	10
	$L_{\text{cool,max}}/(\text{t}/\text{h})$	8	8
	$\eta_{\text{AP,heat}}$	0.62	0.62
	$\eta_{\text{AP,cool}}$	0.58	0.58
	$Q_{\text{AP,heat,max}}/\text{kW}$	400	400
	$Q_{\text{AP,cool,max}}/\text{kW}$	500	500
	$b_5$	100	120
	$b_4$	20	60
	$b_3$	0.004	0.004
吸收式制冷机	$b_2$	1.7	1.7
	$b_1$	1.795	1.795
	$b_0$	-0.223 3	-0.223 3
	$\text{COP}_{\text{AC}}$	1.69	1.69
	$Q_{\text{AC,heat,min}}/\text{kW}$	0	0
电锅炉	$Q_{\text{AC,heat,max}}/\text{kW}$	80	80
	$Q_{\text{AC,cool,max}}/\text{kW}$	40	40
	$P_{\text{EB,min}}/\text{kW}$	0	0
电制冷机	$P_{\text{EB,max}}/\text{kW}$	80	80
	$Q_{\text{EB,max}}/\text{kW}$	40	60
	$P_{\text{EC,min}}/\text{kW}$	0	0
光伏发电机组	$P_{\text{EC,max}}/\text{kW}$	60	80
	$Q_{\text{EC,max}}/\text{kW}$	60	60
	$P_{\text{STC}}/\text{kW}$	200	200
	$G_{\text{STC}}/(\text{W}/\text{m}^2)$	1 000	1 000
储电设备	$k$	-0.47%	-0.47%
	$T_s/^\circ\text{C}$	25	25
	$k_L$	0.04	0.04
	$\eta_{\text{batt,cha}}$	0.95	0.95
	$\eta_{\text{batt,dis}}$	0.95	0.95
	$P_{\text{batt,dis,min}}/\text{kW}$	0	0
	$P_{\text{batt,dis,max}}/\text{kW}$	120	120
$P_{\text{batt,cha,min}}/\text{kW}$	0	0	
	$P_{\text{batt,cha,max}}/\text{kW}$	90	90
	$E_{\text{batt,min}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	60	60
	$E_{\text{batt,max}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	270	270

续表

设备	参数名称	夏季	冬季
储热设备	$k_s$	0.02	0.02
	$\eta_{stor.cha}$	0.98	0.98
	$\eta_{stor.dis}$	0.98	0.98
	$Q_{stor.cha.min}/kW$	0	0
	$Q_{stor.cha.max}/kW$	200	200
	$Q_{stor.dis.min}/kW$	0	0
	$Q_{stor.dis.max}/kW$	250	250
	$B_{stor.min}/(kW \cdot h)$	100	100
	$B_{stor.max}/(kW \cdot h)$	450	450

收稿日期: 2019-06-25。

作者简介:



欧阳斌

欧阳斌(1993), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行, 943278423@qq.com;



屈鲁

屈鲁(1987), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为直流电网技术和综合能源技术等, qulu@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 杨阳)