DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 06. 005

# 区域综合能源系统容量配置和调度策略优化 方法研究

Research on optimization method for capacity allocation and scheduling strategy of regional integrated energy systems

黄银恒<sup>1</sup>,李猛<sup>2</sup>,庞毅<sup>1</sup>,梁茵<sup>1</sup>,靳增峰<sup>2</sup>,王金柱<sup>2\*</sup> HUANG Yinheng<sup>1</sup>,LI Meng<sup>2</sup>,PANG Yi<sup>1</sup>,LIANG Yin<sup>1</sup>,JIN Zengfeng<sup>2</sup>,WANG Jinzhu<sup>2\*</sup>

 (1.天津城建大学 控制与机械工程学院,天津 300384; 2.天津泰达滨海清洁能源集团有限公司,天津 300300)
 (1.School of Control and Mechanical Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2.Tianjin Teda Binhai Clean Energy Group Company Limited, Tianjin 300300, China)

摘 要:能源网络快速发展的背景下,综合能源系统可综合利用冷热电气等多种能源,显著提高综合能源利用率, 是目前的研究热点。重点研究了区域综合能源系统容量配置和调度策略的最优化问题,提出一种优化方法。基于 区域综合能源系统结构和能量转换原理,构建区域综合能源系统混合整数线性规划模型,应用求解器即可进行解 算,同时可得到最优配置和调度策略结果。仿真结果表明,所提出的方法在实现区域综合能源系统经济、灵活、高 效运行的同时,可以有效降低运行成本,促进能源供需平衡。

关键词:综合能源系统;容量配置;调度策略;混合整数线性规划;敏感性分析

中图分类号:TK 01 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)06-0034-08

**Abstract:** With the rapid development of energy networks, integrated energy systems significantly improve general utilization rate of energy by making comprehensive use of various energy sources, such as heat, cold energy and electricity. Thus, the system has become the research focus. In view of the capacity allocation and scheduling strategy for regional integrated energy systems, an optimization method is proposed. Based on the structure of the system and the mechanisms of energy conversion, a mixed integer linear programming model is constructed, whose optimal solution for the allocation and scheduling strategy can be obtained simultaneously by the solver. The simulation results show that the proposed method can achieve the economic, flexible and efficient operation of regional integrated energy systems, reduce the operation cost and balance the energy supply and demand.

Keywords: integrated energy system; capacity configuration; scheduling strategy; mixed integer linear programming; sensitivity analysis

# 0 引言

随着化石燃料逐步耗竭、环境污染加剧,全球 能源结构面临严峻挑战,需要进一步调整能源生产 和消费格局,以适应新时代的发展需要。综合能源 系统(Integrated Energy System, IES)由于能够支持 冷、热、电、气等多种能源的有效利用,有效促进可 再生能源的消耗,受到广大研究者的广泛关注,同 时在"双碳"背景下,建立以清洁能源为基础的IES

基金项目:天津泰达滨海清洁能源集团有限公司研发项目 (KHX2021-041)

Tianjin Teda Binhai Group Company Limited R&D Project (KHX2021-041)

具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>。

IES是由能源生产、输送、转换、储存、消费等环 节协调形成的综合系统,可以协调多种类型的分布 式资源和能源负荷,是未来分布式IES的重要发展 方向之一<sup>[2-4]</sup>。

目前,国内外对IES容量配置和调度策略的研究已经取得了一定成果<sup>[5-8]</sup>。文献[9]以经济成本、污染排放量和能源消耗为优化目标,建立了园区微网型的IES模型。文献[10]考虑了不同典型日下的负荷需求和太阳能资源情况,建立考虑典型日经济运行的区域综合能源系统(RIES)容量配置优化模型。文献[11]以经济成本和碳排放为优化目标,建立了考虑运行规则的能源站优化配置模型。文献

[12]考虑系统的初始投资成本,建立了以系统的等 年值成本最小为目标函数的优化模型。文献[13] 考虑太阳能和混合储能,对RIES进行规划。文献 [14]以经济效益最优为目标函数建立了IES混合整 数非线性规划模型。文献[15-16]以IES的经济成 本为优化目标,分别以"以热定电"和"以电定热"方 法在不同负荷场景下进行系统运行结果优化。文 献[17]以能源利用效率和新能源消纳率最大为目 标考虑RIES优化运行的配电网扩展规划的双层优 化模型。文献[18]以各能量成本最小为目标建立 了的系统容量匹配优化和调度策略模型。文献 [19]考虑分时电价和光伏出力不确定性的影响,建 立储能电站的循环充放电寿命模型,进行储能电站 的容量配置与运行策略研究。文献[20]分别以系 统净收益最大和系统运行成本最小为目标,建立了 容量优化配置模型,得到最优配置和调度策略。文 献[21]以用户侧日收益最大为目标函数建立微网 能量优化模型对系统进行容量配置和运行调度。 综上所述,极少数有研究能同时进行 IES 的运行调 度和容量配置优化处理。

本文结合制冷、供热、用电的多类型需求响应 方法,对IES的容量配置和调度策略进行了研究。 建立了一个带有储能设备的IES模型,对其主要设 备进行数学建模,并对RIES有无储能装置进行了仿 真分析。基于系统的能量耦合特性以及储能的动 态约束特性,同时考虑系统的初始投资成本和运维 成本,建立了基于最小化全生命周期成本(TLCC)的 混合整数线性规划模型,使用数学规划求解器进行 求解,并通过基于案例的仿真研究验证了所提出方 法的正确性和有效性。

#### 1 系统结构与模型

#### 1.1 供能结构

IES 结构如图 1 所示。系统包括有光伏 (Photovoltaic, PV)、蓄电池(Storage Battery, STB)、燃 气轮机(Gas Turbine, GT)、燃气锅炉(Gas Boiler, GB)、余热锅炉(Heat Recovery Boiler, HRB)、吸收式 制冷机(Absorption Chiller, AC)、储热罐(Heat Storage Tank, HST)。

本系统负载均为交流负载,母线采用交流母 线,PV通过逆变器接入母线。电负载所需电能主要 由PV和GT提供,多余电能储存在STB中,某时段电 能不足时从电网购电。热负载所需热能主要由GB 和HRB提供,多余热能储存在HST中。冷负荷所需 冷能由AC提供。通过优化本系统的容量配置和调 度策略,从而提高系统的能源利用率和经济效益。



#### 1.2 系统模型

本文研究 IES 的容量配置和调度策略,重点关 注各个设备之间的能量流动,主要涉及功率-能量 方面的模型。

1.2.1 PV电池板

PV电池板在单位时间内产生的能量和电池温度与太阳辐射度有关,单组PV电池组件在t时刻的输出功率模型<sup>[22]</sup>为

$$P_{\rm PV}(t) = P_{\rm PVN} f_{\rm PV} \left(\frac{E(t)}{E_{\rm ref}}\right) \left[1 + \alpha (T_{\rm PV} - T_{\rm ref})\right], (1)$$

式中: $P_{PVN}$ 为单组 PV 发电电池组的额定功率; $f_{PV}$ 为 PV 发电电池组的运行效率;E(t)为t时段的太阳辐 照度; $E_{ref}$ 为参考辐照度; $\alpha$ 为温度系数; $T_{PV}$ 为 PV 电 池运行温度; $T_{ref}$ 为 PV 电池运行参考温度。

1.2.2 GT

GT是系统重要产电设备,GT的数学模型<sup>[23]</sup>为

$$P_{\rm GT}(t) = \eta_{\rm GT} F_{\rm GT}(t) Q_{\rm LHV, GT}, \qquad (2)$$

$$P_{\rm GTN} = \max\left(P_{\rm GT}(t)\right),\tag{3}$$

$$Q_{\rm GTD}(t) = (1 - \eta_{\rm GT}) F_{\rm GT}(t) Q_{\rm LHV, GT}, \qquad (4)$$

式中: $P_{\text{GT}}(t)$ 为GT输出的电功率; $F_{\text{GT}}(t)$ 为GT消耗 天然气量; $\eta_{\text{GT}}$ 为GT的燃烧效率; $Q_{\text{LHV,GT}}$ 为GT消耗 单位天然气的低热值; $P_{\text{GTN}}$ 为GT的额定功率;  $Q_{\text{GTD}}(t)$ 为t时刻GT的排气余热量。

1.2.3 GB

GB是系统重要产热设备,GB的数学模型<sup>[22]</sup>为

$$P_{\rm GB}(t) = \eta_{\rm GB} F_{\rm GB}(t) Q_{\rm LHV, GB}, \qquad (5)$$

$$P_{\rm GBN} = \max\left(P_{\rm GB}(t)\right),\tag{6}$$

式中: $P_{GB}(t)$ 为GB输出的热功率; $F_{GB}(t)$ 为GB消耗 天然气量; $\eta_{GB}$ 为GB的燃烧效率; $Q_{LHV,GB}$ 为GB消耗 单位天然气的低热值; $P_{GBN}$ 为GB的额定功率。

1.2.4 AC

AC的冷功率数学模型<sup>[11]</sup>为

$$P_{\text{AC}_{\text{cool}}}(t) = C_{\text{OP, AC}} \times P_{\text{AC}_{\text{hot}}}(t), \qquad (7)$$

$$P_{ACN} = \max\left(P_{AC\_cool}(t)\right),\tag{8}$$

式中: $P_{AC cool}(t)$ 为t时段AC的输出冷功率; $P_{AC hot}(t)$ 

为t时段AC的输入热功率; $C_{OP,AC}$ 为AC的能效系数;  $P_{ACN}$ 为AC的额定功率。

1.2.5 HRB

HRB将GT所排余热烟气收集重新加热并对外供热。HRB的输出热功率<sup>[23]</sup>与输入余热之间成线性关系,具体可表示为

$$P_{\rm HRB\_out}(t) = \eta_{\rm HRB} P_{\rm HRB\_in}(t), \qquad (9)$$

$$P_{\rm HRBN} = \max\left(P_{\rm HRB\_out}(t)\right), \qquad (10)$$

$$P_{\text{HRB}_{in}}(t) = Q_{\text{GTD}}(t), \qquad (11)$$

式中: $P_{\text{HRB_out}}(t)$ 和 $P_{\text{HRB_in}}(t)$ 分别为t时刻HRB的输 出热功率和输入热功率; $\eta_{\text{HRB}}$ 为GB的集热效率;  $P_{\text{HRBN}}$ 为HRB的额定功率。

1.2.6 HST

t时刻HST内的储热量数学模型<sup>[23]</sup>为

$$Q_{\rm HST}(t) = Q_{\rm HST}(t-1) + (P_{\rm HST_{in}}(t) - P_{\rm HST_{out}}(t)), (12)$$

$$Q_{\text{HST}_{in}}(t) \le Q_{\text{HSTN}} \times \theta(t), \qquad (13)$$

$$Q_{\text{HST}_{out}}(t) \le Q_{\text{HSTN}} \times \mu(t), \qquad (14)$$

$$\theta(t) + \mu(t) \le 1, \tag{15}$$

式中: $Q_{HST}(t)$ 为HST在t时段存储的热量; $P_{HST_{in}}(t)$ 和 $P_{HST_{out}}(t)$ 分别为HST在t时段的输入和输出热功率; $Q_{HSTN}$ 为HST的额定储热量; $\theta(t)$ 和 $\mu(t)$ 为记录HST能量流的二进制变量,表示在每个单位时段t内,只能使用3种HST模式中的一种:存储热量( $\theta(t)=1$ 且 $\mu(t)=0$ ),释放热量( $\theta(t)=0$ 且 $\mu(t)=1$ )或无能量流( $\theta(t)=0$ 且 $\mu(t)=0$ )。

1.2.7 STB

通过能量平衡的方式定义了电池的充电状态:

$$W_{\text{STB}}(t) = (1 - \sigma_{\text{sdr}})W_{\text{STB}}(t - 1) + P_{\text{STB}_{\text{in}}}(t)\Delta t - P_{\text{STB}_{\text{out}}}(t)\Delta t, \qquad (16)$$

式中: $W_{\text{STB}}(t)$ 为t时段STB内的电量; $\sigma_{\text{sdr}}$ 为STB的自放电率; $P_{\text{STB,in}}(t)$ 和 $P_{\text{STB,out}}(t)$ 分别为STB在t时段的输入和输出电功率; $\Delta t$ 为充、放电时长,取1h。

## 2 容量配置和调度策略规划问题建模及求解

本文将系统的容量配置和调度策略优化问题 转化为了数学规划问题,从数学规划的角度建立混 合整数线性规划模型,寻求最优解,配置出系统的 最优容量以及设备在每个时刻的最佳运行功率。

## 2.1 目标函数

为确定系统内各设备的最优容量配置及以1h 为单位时间的调度策略,使系统在能源供应时具有 最好的经济性。以 T<sub>LCC</sub> 为目标函数<sup>[24-27]</sup>,计算公 式为

$$T_{\rm LCC} = C_{\rm I} + \frac{C_{\rm OM}}{f_{\rm CR}} + \frac{C_{\rm R}}{f_{\rm CR}},$$
 (17)

式中: $C_1$ 为IES的初始投资成本; $C_{OM}$ 为IES的运维成

本; $C_{\rm R}$ 为IES的替换成本; $f_{\rm CR}$ 为资本回收系数。

# 各部分具体计算公式为

 $C_{\rm I} = C_{\rm PV} N_{\rm PVN} P_{\rm PVN} + C_{\rm STB} W_{\rm STBN} + C_{\rm GT} P_{\rm GTN} +$ 

 $C_{GB}P_{GBN} + C_{HRB}P_{HRN} + C_{AC}P_{ACN} + C_{HST}Q_{HSTN}$ ,(18) 式中: $C_{PV}$ 为PV电池板的初始投资成本,元/kW; $N_{PVN}$ 为PV电池组个数; $C_{STB}$ 为STB的初始投资成本, 元/kW; $W_{STBN}$ 为STB的额定储电量,kW·h; $C_{GT}$ 为GT的初始投资成本,元/kW; $C_{GB}$ 为GB的初始投资成本,元/kW; 本,元/kW; $C_{HRB}$ 为HRB的初始投资成本,元/kW;  $C_{AC}$ , $C_{HST}$ 分别为AC和HST的初始投资成本,元/kW。

$$C_{\rm OM} = \sum_{t=1}^{T} (C_{\rm OM, PV} N_{\rm PVN} P_{\rm PV}(t) + C_{\rm OM, AC} P_{\rm AC\_cool}(t) + C_{\rm OM, GT} P_{\rm GT}(t) + C_{\rm OM, GB} P_{\rm GB}(t) + C_{\rm OM, HRB} P_{\rm HRB\_out}(t)),$$
(19)

式中: $C_{OM,PV}$ 为PV电池板的运维成本,元/kW; $C_{OM,AC}$ 为AC的运维成本,元/kW; $C_{OM,GT}$ 为GT的运维成本, 元/kW; $C_{OM,GB}$ 为GB的运维成本,元/kW; $C_{OM,HRB}$ 为HRB的运维成本,元/kW。

$$C_{\rm R} = C_{\rm R, AC} + C_{\rm R, PV} + C_{\rm R, GT} + C_{\rm R, GB} + C_{\rm R, HRB} + C_{\rm R, HST} + C_{\rm R, TSB},$$
(20)

式中: $C_{R,PV}$ 为PV电池组的替换成本; $C_{R,AC}$ 为AC的 替换成本; $C_{R,GT}$ 为GT的替换成本; $C_{R,GB}$ 为GB的替 换成本; $C_{R,HRB}$ 为HRB的替换成本; $C_{R,HST}$ 为HST的 替换成本; $C_{R,TSB}$ 为STB的替换成本。

$$f_{\rm CR} = \frac{d \times (1+d)^A}{(1+d)^A - 1},$$
 (21)

式中:d为名义贴现率;A为生命周期年限。

## 2.2 约束条件

IES运行约束包括能量平衡约束、设备运行约 束及购能约束,以保证系统供能与系统安全运行。

 $P_{\text{elec\_load}}(t) = N_{\text{PVN}} P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{GT}}(t) + P_{\text{EW}}(t) + P_{\text{STB\_out}}(t) \times \eta_{\text{STB\_out}} - \frac{P_{\text{STB\_in}}(t)}{\eta_{\text{STB\_in}}}, \qquad (22)$ 

式中: $P_{\text{elec_load}}(t)$ 为t时刻系统的用电功率; $\eta_{\text{STB_in}}$ 和  $\eta_{\text{STB_out}}$ 分别为STB充电和放电效率; $P_{\text{EW}}(t)$ 为t时刻 从电网购电的电功率。

2.2.2 热功率平衡约束

$$P_{\text{hot\_load}}(t) = P_{\text{GB}}(t) + P_{\text{HRB\_out}}(t) - P_{\text{AC\_hot}}(t) + P_{\text{HRB\_out}}(t)$$

$$\eta_{\text{HST}_{out}} \times P_{\text{HST}_{out}}(t) - \frac{P_{\text{HST}_{in}}(t)}{\eta_{\text{HST}_{in}}},$$
 (23)

式中: $P_{hot_load}(t)$ 为t时刻系统的用热功率; $\eta_{HST_{in}}$ 和  $\eta_{HST_{out}}$ 分别为HST的输入和输出效率。

$$P_{\text{cool_load}}(t) = P_{\text{AC_cool}}(t), \qquad (24)$$
式中:  $P_{\text{reol_load}}(t)$ 为t时刻系统的用冷功率。

© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

2.2.4 设备约束

系统的设备约束主要包括设备功率约束和受场地等因素影响的数量约束。

2. 2. 4. 1 GB

GB受场地限制,存在以下限制

 $P_{GB_{min}} \leq P_{GB}(t) \leq P_{GB_{max}},$  (25) 式中: $P_{GB_{min}}, P_{GB_{max}}$ 分别为GB热功率的最小值与最 大值。

2.2.4.2 PV电池组

由于场地限制,PV电池组数量存在以下限制

$$N_{\rm PV\_min} \le N_{\rm PVN} \le N_{\rm PV\_max}, \qquad (26)$$

式中:N<sub>PV\_min</sub>,N<sub>PV\_max</sub>为能放置的PV电池组的最小、 最大数量。

2. 2. 4. 3 STB

STB作为能量存储子系统,被设计为单个等效 电池。STB只储存能量,其性能特征取决于充电和 放电效率。

$$\begin{cases} S_{\text{OC}_{min}} \times W_{\text{STBN}} \leqslant W_{\text{STB}}(t) \leqslant S_{\text{OC}_{max}} \times W_{\text{STBN}} \\ S_{\text{OC}_{min}} \leqslant S_{\text{OC}_{STB}}(t) \leqslant S_{\text{OC}_{max}} \\ W_{\text{STB}}(1) = W_{\text{STB}}(8\ 761) , (27) \\ W_{\text{STBN}_{min}} \leqslant W_{\text{STBN}} \leqslant W_{\text{STBN}_{max}} \\ W_{\text{STBN}} = \max(W_{\text{STB}}(t)) \end{cases}$$

式中: $W_{\text{STBN_min}}$ 和 $W_{\text{STBN_max}}$ 分别为STB的最大和最小储电量; $S_{\text{OC_min}}$ 和 $S_{\text{OC_max}}$ 分别为STB荷电状态值的上、下限; $W_{\text{STBN}}$ 为STB的额定储电量。

2. 2. 4. 4 HST

$$S_{T_{min}} \times Q_{HSTN} \leq Q_{HST}(t) \leq S_{T_{max}} \times Q_{HSTN}$$

$$Q_{HST}(1) = Q_{HST}(8761)$$

$$Q_{HSTN_{min}} \leq Q_{HSTN} \leq Q_{HSTN_{max}}$$

$$Q_{HSTN} = \max(Q_{HST}(t))$$

$$(28)$$

式中: $Q_{\text{HSTN_min}}$ 和 $Q_{\text{HSTN_max}}$ 分别为HST的最小和最大储热量; $S_{\text{T_max}}$ , $S_{\text{T_min}}$ 分别为HST储热状态值的上、下限。

$$P_{\text{HRB}_{\min}} \le P_{\text{HRB}_{\text{out}}}(t) \le P_{\text{HRB}_{\max}}, \qquad (29)$$

$$P_{\rm HRBN} = \max\left(P_{\rm HRB,\,out}(t)\right),\tag{30}$$

式中:P<sub>HRB\_min</sub>,P<sub>HRB\_max</sub>为HRB热出力最小值和最大值。 2.2.4.6 AC

$$P_{\text{AC}_{\min}} \le P_{\text{AC}_{\text{cool}}}(t) \le P_{\text{AC}_{\max}}, \tag{31}$$

$$P_{\text{ACN}} = \max\left(P_{\text{AC\_cool}}(t)\right), \qquad (32)$$

式中:*P*<sub>AC\_min</sub>,*P*<sub>AC\_max</sub>为制冷设备出力最小值与最大值。 2.2.4.7 GT

$$P_{\text{GT}_{\min}} \leq P_{\text{GT}}(t) \leq P_{\text{GT}_{\max}}, \qquad (33)$$

$$P_{\rm GTN} = \max\left(P_{\rm GT}(t)\right),\tag{34}$$

最大值。

## 2.3 模型求解

在优化过程中,不同设备的数量使用不同的变 量类型进行定义,例如 PV 的块数使用整数变量, STB 和 HST 容量使用连续变量,二进制变量定义子 系统运行模式(例如电池充电或放电)之间的逻辑 关系等。

使用 Python 在计算机中进行了优化模型的建 立,并且能够针对特定场景确定混合系统的配置和 能量的调度策略。本文提出的研究路线如图2所 示,使用 Gurobi 作为求解器执行所有优化运行。



Fig. 2 Research route

## 3 结果分析

## 3.1 结构对比

系统有无储能装置的对比结果见表1。可以看 出有 STB 和 HST 装置的 IES 年成本最低,无 STB 和 HST 装置的 IES 年成本最高。

#### 表1 系统有无储能装置对比

Table 1 Comparison on the system with or without energy

storage devices				
项目	本系统	无储能	无HST	无STB
年成本/元	25 295 914	27 216 902	25 648 554	26 935 565
PV数量/个	6 076	6 076	6 076	6 076
电池容量/ (kW・h)	1 820.48	—	1 825.85	_
GB额定功 率/kW	1 880.97	2 595.20	2 658.67	2 595.18
GT额定功 率/kW	514.34	633.92	514.92	633.96
HRB 额定功 率/kW	274.31	338.09	274.62	338.11
AC额定功 率/kW	430.19	430.19	430.19	430.19
HST容量/ (kW・h)	1 692.47	—	—	1 382.24

#### 3.2 太阳能资源和结果分析

2022年每小时的太阳辐射情况如图3所示,每 月的太阳辐射情况如图4所示。月均日太阳辐射在 1.85~5.96 kW·h/(m<sup>2</sup>·d)之间,而年均日太阳辐射为

200

150

100

50

0

2 3 4 5 6 7 8 9

辐射能流/[(kW•h)•m<sup>-2</sup>]

12

10

-11

4.20 kW·h/(m<sup>2</sup>·d)。可以看出一年中大部分时间有 充足的太阳能资源,且5月最高,12月最低。





图4 2022年逐月太阳辐射情况 Fig.4 Monthly solar radiation in 2022 图 5、图 6 可知,在电力方面,PV 贡献最大。24 h的 热能生产-消耗平衡和储热状态的热回路调度策略 结果如图 7 所示。由图 7 可知,HRB 的贡献最大, HST和GB起补充作用。

月份

24 h 电力生产-消耗情况和 STB 荷电状态 (SOC)的电回路调度策略结果如图 5、图 6 所示。由



© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

由此可知,系统在优化调度策略过程中充分利用太 阳能资源可达到节约成本的目的。



Fig. 8 Operation cost of the system varying with solar energy resources

太阳能资源年平均太阳辐射能流不变的情况 下,波动性增大后的系统运行成本对比如图9所示。 原数据的太阳辐射能流的年平均值为175 W·h/m<sup>2</sup>, 方差为62 034,波动性增大后的太阳辐射能流的年 平均值不变,方差增大为62 983。由此可知,太阳能 资源的波动性增大会导致IES的成本增加。



#### 3.4 电能价格的影响

受电能价格影响的系统运行成本变化如图 10 所示。分析可知,系统受电能价格影响时,运行成 本与电能价格呈正比关系,电能价格越低,系统的 运行成本越低,但系统的运行成本变化幅度相对较 小。由此可知,系统在优化调度策略过程中充分考 虑电能价格,以达到节约成本的目的。



#### 3.5 设备初始投资成本的影响

为了评估经济数据对最优系统设计的影响,将 PV,STB,GT,GB,AC,HST,HRB的初始投资成本依 次变化±50%,设备初始投资成本变化对TLCC的影 响如图11所示。分析可知,太阳能资源初始投资成 本和替换成本是系统运行成本变化的主要因素。 这一观测结果与PV作为系统的主要组成部分是一 致的,因为每小时电负荷需求和太阳辐射之间具有 高度的相关性。此外,AC对TLCC的影响不到1%。



Fig. 11 Impact of the equipment initial investment on the TLCC

#### 3.6 负荷变化的影响

冷、热、电负荷影响下的TLCC变化如图12所 示。系统在负荷变化时,运行成本随之变化,说明 系统优化运行过程中,充分考虑了负荷情况。





## 4 结论

本文提出了一种系统的最优配置和调度策略 同时完成的优化方法,构建了基于最小化TLCC的 混合整数规划模型,解决了最优配置和调度策略问 题,体现了所建立的最优化模型的有效性和优势, 达到了经济成本最低的目的。此外,定量分析了系 统配置、经济、天气和负荷因素对TLCC的影响,为 系统设计提供了有效参考。主要结论如下。

(1)分别对4种不同的储能结构系统进行比对 分析,分析结果表明同时包含STB和热储能的系统 比具有更少配置的其他3种构型更合理。

(2)针对本文应用的RIES,采用了基于RIES混 合整数线性规划的优化方法,获得了最优的容量配 置和调度策略方案。此外,实现了IES的协同运行, 实现了小时级的能源供需平衡。

(3)针对本文应用的 RIES 进行敏感性分析,分析结果表明系统配置、经济、天气和负荷因素在 IES 容量配置和调度策略的优化设计中的重要性,为之后的系统设计提供了重要参考。

#### 参考文献:

- [1]中华人民共和国国家发展和改革委员会. 构建绿色低碳 循环发展经济体系是实现碳达峰和碳中和的关键举措 [EB/OL](2021-02-28)[2023-03-24]. https://www.ndrc. gov. cn/fzggw/jgsj/zys/sjdt/202102/t20210228\_1268576. html? state=123.
- [2]JIN X, MU Y, JIA H, et al. Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems [J]. Applied Energy, 2016, 180: 1–13.
- [3]李鹏,王子轩,侯磊,等.基于重复博弈的区域综合能源系 统优化运行分析[J].电力系统自动化,2019,43(14): 81-89.

LI Peng, WANG Zixuan, HOU Lei, et al. Analysis of repeated game based optimal operation for regional integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14):81-89.

- [4]LI P, GUO T, ZHOU F, et al. Nonlinear coordinated control of parallel bidirectional power converters in an AC/ DC hybrid microgrid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 122: 106208.
- [5]程浩忠,胡枭,王莉,等.区域综合能源系统规划研究综述
  [J].电力系统自动化,2019,43(7):2-13.
  CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning [J].
  Automation of Electric Power Systems, 2019,43(7):2-13.
- [6]袁智勇,赵懿祺,郭祚刚,等.面向能源互联网的综合能源 系统规划研究综述[J].南方电网技术,2019,13(7):1-9.
  YUAN Zhiyong, ZHAO Yiqi, GUO Zuogang, et al. Research summary of integrated energy systems planning for energy internet [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13 (7):1-9.
- [7]任娜,王雅倩,徐宗磊,等.多能流分布式综合能源系统容量匹配优化与调度研究[J].电网技术,2018,42(11): 3504-3512.

REN Na, WANG Yaqian, XU Zonglei, et al. Component sizing and optimal scheduling for distributed multi-energy system[J].Power System Technology, 2018, 42(11): 3504– 3512.

[8]王珺,顾伟,陆帅,等.结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J].电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
 WANG Jun,GU Wei,LU Shuai, et al.Coordinated planning

of multi-district integrated energy system combining heating network model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.

[9]周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,等.面向园区微网的综合能源系 统多目标优化设计[J].电网技术,2018,42(6):1687-1697.

ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park - level microgrid [J]. Power System Technology, 2018,42(6):1687-1697.

[10]刘泽健,杨苹,许志荣.考虑典型日经济运行的综合能源 系统容量配置[J].电力建设,2017,38(12):51-59.
LIU Zejian, YANG Ping, XU Zhirong. Capacity allocation of integrated energy system considering typical day economic operation[J].Electric Power Construction,2017, 38(12):51-59.

[11]管霖,陈鹏,唐宗顺,等.考虑冷热电存储的区域综合能 源站优化设计方法[J].电网技术,2016,40(10):2934-2943.

GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2934–2943.

[12]杨艳红,裴玮,屈慧,等.基于广义Benders分解的分布式 热电联供机组规划方法[J].电力系统自动化,2014,38 (12):27-33.

YANG Yanhong, PEI Wei, QU Hui, et al. A planning method of distributed combined heat and power generator based on generalized benders decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (12) : 27-33.

[13]赵达维,张文涛,刘旭娜,等.光伏与混合储能配合的园 区综合能源系统规划[J].电力系统及其自动化学报, 2019,31(10):88-95.

ZHAO Dawei, ZHANG Wentao, LIU Xuna, et al. Planning for park - level integrated energy system based on cooperation between PV and hybrid energy storage [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10):88-95.

[14]金泰,李娜,秦建华,等.基于混合整数非线性规划的综合能源系统优化配置研究[J].热力发电,2021,50(8): 131-140.

JIN Tai, LI Na, QIN Jianhua, et al. Optimization allocation of integrated energy system based on mixed integer nonlinear programming [J]. Thermal Power Generation, 2021,50(8):131-140.

[15]潘华,梁作放,肖雨涵,等.多场景下区域综合能源系统的优化运行[J].太阳能学报,2021,42(1):484-492.

PAN Hua, LIANG Zuofang, XIAO Yuhan, et al. Optimal operation of regional integrated energy system under multiple scenes [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42 (1):484-492.

- [16]NIU H, YU F, LI B, et al. Research on operation optimization of integrated energy system [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, 267(3): 032094.
- [17] 雷霞, 唐文左, 李逐云, 等. 考虑区域综合能源系统优化 运行的配电网扩展规划[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3459-3470.

LEI Xia, TANG Wenzuo, LI Zhuyun, et al. Distribution network expansion planning considering optimal operation of regional integrated energy system [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3459–3470.

[18]任娜,王雅倩,徐宗磊,等.多能流分布式综合能源系统 容量匹配优化与调度研究[J].电网技术,2018,42(11): 3504-3512.

REN Na, WANG Yaqian, XU Zonglei, et al. Component sizing and optimal scheduling for distributed multi-energy system[J].Power System Technology, 2018, 42(11): 3504– 3512.

- [19]张明,路晓敏,周航,等.考虑机会约束的多站融合储能 配置与优化运行策略[J].广东电力,2022,35(2):66-73.
   ZHANG Ming, LU Xiaomin, ZHOU Hang, et al. Multistation integrated energy storage configuration and optimal operation strategy based on chance constraint [J].
   Guangdong Electric Power,2022,35(2):66-73.
- [20]李宇星,鲁宇,李昊,等.基于最小运行成本的储能参与 电网辅助调峰容量配置及优化运行方法[J].电器与能 效管理技术,2021(11):22-29. LI Yuxing,LU Yu,LI Hao, et al.Capacity configuration and

optimal operation method of energy storage participating in grid auxiliary peak shaving based on minimum operating cost[J].Low Voltage Apparatus, 2021(11):22-29.

- [21]江磊,专祥涛.分时电价下直流微网优化运行和容量配置研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):80-87.
  JIANG Lei, ZHUAN Xiangtao.Study on optimal operation and capacity configuration of DC microgrid under time-of-use electricity price[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(1):80-87.
- [22]MALHEIRO A, CASTRO P M, LIMA R M, et al. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems [J]. Renewable Energy, 2015, 83: 646-657.
- [23]方绍凤,周任军,许福鹿,等.考虑电热多种负荷综合需 求响应的园区微网综合能源系统优化运行[J].电力系 统及其自动化学报,2020,32(1):50-57.

FANG Shaofeng, ZHOU Renjun, XU Fulu, et al. Optimal operation of integrated energy system for park micro-grid considering comprehensive demand response of power and thermal loads[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32 (1):50–57.

- [24]MALHEIRO A, CASTRO P M, LIMA R M, et al. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems [J]. Renewable Energy, 2015, 83: 646-657.
- [25]任宝军,高志勇.一种基于边缘计算的分散式站所终端 方案的设计与实现[J].综合智慧能源,2022,44(6): 59-69.

REN Baojun, GAO Zhiyong. Design and implementation of a terminal configuration scheme in a decentralizde distribution station base on edge computing [J]. Intergrated Intelligent Energy, 2022, 44(6): 59–69.

[26]张凯杰,丁国锋,闻铭,等.虚拟电厂的优化调度技术与 市场机制设计综述[J].综合智慧能源,2022,44(6): 60-72.

ZHANG Kaijie, DING Guofeng, WEN Ming. Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plant [J]. Intergrated Intelligent Energy, 2022, 44(6):60-72.

[27]杨晓已,陶新磊,韩立.虚拟电厂技术现状及展望[J].华 电技术,2020,42(5):73-78.

YANG Xiaosi, TAO Xinlei, HAN Li. Status prospect of virtual power plant technology [J]. Huadian Technology, 2020,42(5):73-78.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2023-02-04;修回日期:2023-03-14 上网日期:2023-05-06;附录网址:www.iienergy.cn

#### 作者简介:

黄银恒(1997),男,在读硕士研究生,从事综合能源系统 及其最优化方面的研究,1027010407@qq.com;

李猛(1982),男,工程师,硕士,从事热能工程方面的工作,1484646852@qq.com;

庞毅(1984),男,讲师,博士,从事综合能源系统规划方面的研究,primepang@163.com;

靳增峰(1985),男,高级工程师,硕士,从事能源化工方面的工作,554508398@qq.com;

王金柱\*(1984),男,高级工程师,硕士,从事天然气工艺与相关自动化设备技术方面的工作,38928624@qq.com。

\*为通信作者。