

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305379

# 耦合风光储及热泵的 CCHP 系统 集成优化与运行特性研究

姬锋军<sup>1</sup>, 宋举星<sup>1</sup>, 刘权<sup>2</sup>, 葛艺<sup>2</sup>, 韩吉田<sup>2</sup>

(1.山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;

2.山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

**[摘要]** 为提高可再生能源的有效利用和冷热电联供系统的综合性能, 在天然气冷热电联供系统中引入光伏电池、风力发电、地源热泵和储能单元, 构建一种耦合可再生能源的天然气冷热电联供 (wind-solar-storage and heat pump, combined cooling, heating and power, WSSH-CCHP) 系统, 利用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 建立考虑能效、经济及环境性能的综合评价指标, 采用混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 算法, 对该系统进行设备选型、容量配置及运行策略协同优化, 以分供系统 (separate production, SP) 为参照系统, 以济南市某能源中心为例, 分析该系统集成优化效果及其运行特性。研究结果表明, 该系统的综合指标优化结果相比 SP 系统提高 37.8%, 具有较好的综合性能, 为耦合风光储及热泵天然气 CCHP 系统的发展及其集成优化与运行特性研究提供了参考。

**[关键词]** 可再生能源; 冷热电联供系统 (CCHP); 混合整数线性规划算法; 集成优化

**[引用本文格式]** 姬锋军, 宋举星, 刘权, 等. 耦合风光储及热泵的 CCHP 系统集成优化与运行特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 103-112. JI Fengjun, SONG Juxing, LIU Quan, et al. Research on integrated optimization and operation characteristics of CCHP system with wind-solar-storage and heat pump[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 103-112.

## Research on integrated optimization and operation characteristics of CCHP system with wind-solar-storage and heat pump

JI Fengjun<sup>1</sup>, SONG Juxing<sup>1</sup>, LIU Quan<sup>2</sup>, GE Yi<sup>2</sup>, HAN Jitian<sup>2</sup>

(1.Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;

2.School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** A new combined cooling, heating and power system is proposed based on solar photovoltaic, wind power, ground-source heat pump and energy storage unit (WSSH-CCHP) to improve the efficient utilization of renewable energy resources and the entire system energy efficiency. The comprehensive evaluation indexes are developed by using the analytic hierarchy process to account for the system performance of energy efficiency, economy and environment. The mixed integer linear programming (MILP) algorithm is employed to perform the optimization on the selection of equipment types, capacity allocation and system operation stratagem. A case study on an energy center in Jinan city is conducted to explore the optimal performance and operation characteristics of WSSH-CCHP. The obtained results indicate that the proposed system comprehensive performance is much better than the separate production system, which provide useful information for the development of CCHP system with wind-solar-storage and heat pump and the study on its integrated optimization and operation characteristics.

**Key words:** renewable energy resources; CCHP; mixed integer linear programming; integrated optimization

作为分布式能源的主要形式之一, 天然气冷热电联供 (combined cooling, heating and power, CCHP)

系统是将供热 (采暖和供热水)、制冷和发电过程集成一体的多联供系统, 可实现能源的梯级有效利

修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金国际 (地区) 合作交流项目 (41761144067)

Supported by: International Cooperation and Exchange Project of National Natural Science Foundation of China (41761144067)

第一作者简介: 姬锋军 (1980), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电厂汽水系统设计, jifengjun@sdepci.com.

用,具有综合能源利用效率高、污染物排放低、占地面积小、运行安全可靠等优点,受到了世界各国的普遍关注和重视,已成为我国实现能源领域节能减排和双碳目标的有效途径之一<sup>[1-3]</sup>。

我国具有丰富的太阳能等可再生能源,将可再生能源与CCHP系统相结合,发展耦合可再生能源的CCHP系统,可以实现可再生能源的有效利用和化石能源的优势互补,对于提高联供系统的综合能源利用效率和稳定运行、减少碳排放具有非常重要的意义<sup>[4-5]</sup>。国内外对耦合可再生能源CCHP系统设计与优化配置已开展了较为深入的研究。Rosiek等人提出了一种太阳能辅助CCHP系统,将不同配置形式的太阳能CCHP系统与传统分供系统的性能进行了比较。研究表明,该系统的一次能源消耗比传统分供系统减少了61%,具有显著的节能潜力<sup>[6]</sup>。王志贺等建立了综合考虑系统总成本与CO<sub>2</sub>排放的CCHP系统容量配置规划模型,比较了采用不同原动机驱动的CCHP系统性能和不同经济性权重对系统容量配置的影响<sup>[7]</sup>。Ge等人提出了一种耦合光伏与储能的天然气CCHP系统<sup>[8]</sup>,建立了考虑设备的变负荷性能和以年总成本最小为优化目标的混合整数非线性规划模型(mixed integer nonlinear programming, MINLP)。研究表明,光伏和储能装置可有效提高天然气CCHP系统的一次能源利用效率和经济性。蒋润花等提出了一种集成太阳能集热器的中低温太阳能冷热电联供系统,相比于常规CCHP系统其全年节能率提高了6.5%<sup>[9]</sup>。

系统配置和运行策略对耦合可再生能源CCHP系统的综合性能具有重要影响,而CCHP系统配置与运行策略是密切相关的<sup>[10]</sup>。因此,CCHP的系统配置与运行策略的协同优化对于耦合可再生能源CCHP系统的发展应用具有重要意义。丁泽宇等建立了由太阳能集热场、储热系统和热电联供机组构成的太阳能辅助热电联供机组运行优化模型,利用GAMS软件包和CPLEX求解器,对基于线性规划的太阳能辅助热电联供机组进行了运行优化研究<sup>[11]</sup>。谭钧元等构建了耦合太阳能的冷热电联供系统双层优化模型,利用KKT条件将其转换为一般的单层模型进行求解,对耦合太阳能的冷热电联供系统双层运行优化配置设计进行了研究,发现在系统综合成本最低条件下,该模型提高了供能的灵活性和可靠性<sup>[12]</sup>。Jayasekara等人提出了一种协同优化联供系统运行策略与最佳配置的两阶段粒子群算法<sup>[13]</sup>,该算法特别适用于能源价

格波动大的场合。Lu等人建立了基于双层模型的耦合光伏及地源热泵的CCHP系统配置与运行优化模型,提出了一种基于序列控制配置、二次规划算法和反馈修正机制的求解方法<sup>[14]</sup>。研究表明,该系统与传统分供系统相比具有显著的经济效益。赵峰等提出了一种考虑设备选型、容量配置和运行策略的三级协同优化方法,实现了CCHP系统的整体协同优化<sup>[15]</sup>。研究表明,以该方法优化后的系统比采用“以热定电”和“以电定热”运行策略设计的CCHP系统更节能、环保和经济。余小兵等提出了一种回收内燃机余热的冷热电联供系统,利用建立的数学模型研究了关键参数对系统性能的影响,在最大输出功和制冷量模式与最大净输出功和供热量模式2种不同运行模式下对系统的最佳性能进行了研究,为基于内燃机的CCHP系统设计和运行优化提供了依据<sup>[16]</sup>。

已有研究表明,构建耦合可再生能源的天然气冷热电联供系统,研究系统的设备选型、容量配置和运行策略协同优化及运行特性具有重要的理论意义和工程应用价值。但当前研究中涉及的可再生能源较单一,耦合多种可再生能源的CCHP系统也较少。此外,已有研究很少考虑不同设备品牌、型号导致的性能参数与价格差异<sup>[17]</sup>,在一定程度上制约了其在解决实际工程问题中的应用。

本文提出一种将太阳能光伏、风力发电、地源热泵及储能设备集成于一体的CCHP系统(wind-solar-storage and heat pump CCHP, WSSH-CCHP),综合考虑能效、环保和经济性评价指标<sup>[8]</sup>,以济南市某能源中心为例,通过调用自建的包含不同品牌和设备参数信息、可满足用户多样化个性需求的设备数据库利用混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)对所建立系统进行优化分析<sup>[17-18]</sup>,为耦合多种可再生能源和储能装置的分布式供能系统的优化配置与运行管理提供参考。

## 1 CCHP 系统简介

图1为本文提出的耦合风光储及热泵的CCHP系统(WSSH-CCHP)和参照系统的流程。参照系统是传统的冷热电分供(separate production, SP)系统,电网、燃气锅炉和冷水机组分别为用户提供电、热和冷负荷。在WSSH-CCHP系统中,光伏电池、风力发电与燃气内燃机发电为用户提供电负荷,过量的电可储存到蓄电装置中,不足部分可由电网或蓄电装置补充。用户的冷、热负荷由内燃机的烟气

和缸套水余热回收装置（溴化锂吸收式制冷机组）和地源热泵一起提供，不足部分由冷水机组或燃气

锅炉分别补足，蓄冷和蓄热装置将在输出能量不足或过量时释能或储能。

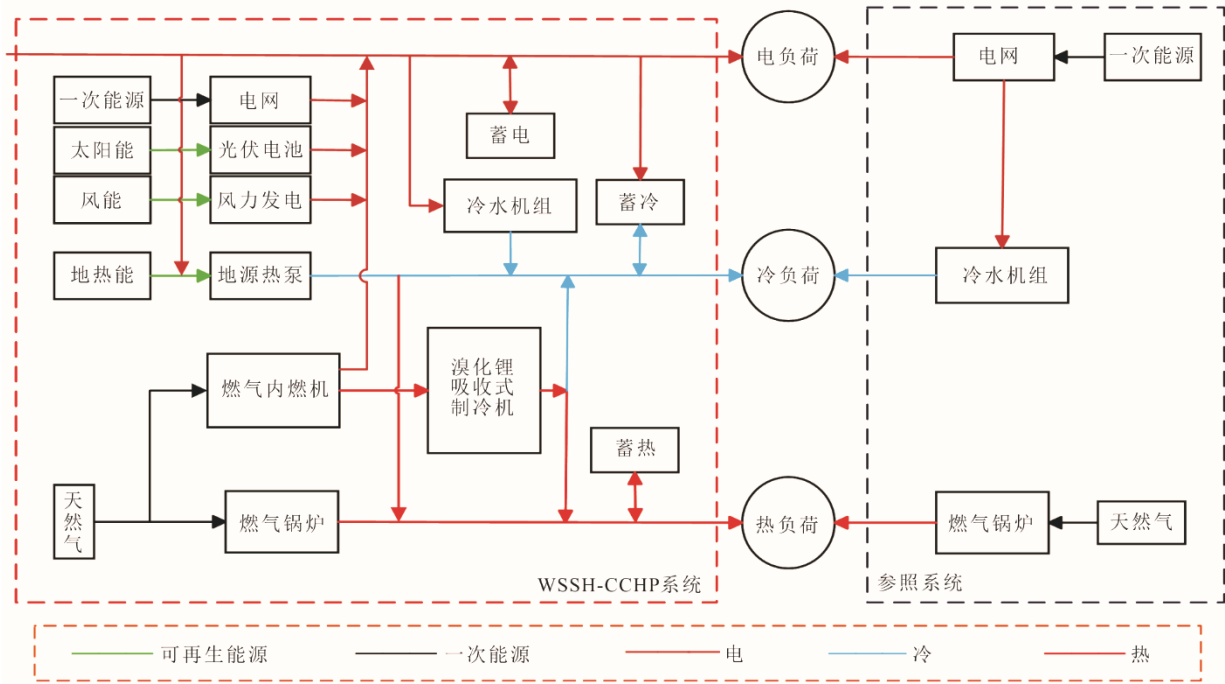


图 1 WSSH-CCHP 系统和参照系统结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of WSSH-CCHP system and reference system

## 2 数学模型

CCHP 系统的数学模型主要包括逐时冷热电能量平衡模型、设备模型及系统运行约束条件。

### 2.1 能量平衡

系统中输出的电、热、冷功率应满足用户的逐时负荷需求。根据上述系统描述中设备的运行准则，可得到系统的逐时电、热、冷平衡公式如下：

$$P_{GE,d,t} + P_{PV,d,t} + P_{WT,d,t} + P_{grid,d,t} + P_{PS,d,t} = P_{E,d,t} + P_{HP,d,t} + P_{EC,d,t} + P_{HC,d,t} \quad (1)$$

$$Q_{GB,d,t} + Q_{AC,H,d,t} + Q_{HP,H,d,t} + Q_{HS,d,t} = Q_{H,d,t} \quad (2)$$

$$Q_{EC,d,t} + Q_{ACC,d,t} + Q_{HP,C,d,t} + Q_{HC,d,t} = Q_{C,d,t} \quad (3)$$

式中： $P$  为设备的电功率； $Q$  为设备的热/冷量；下标  $d$ 、 $t$  分别代表  $d$  天  $t$  时刻，下标 PV、WT、GE、PS、HP、EC、HC、GB、AC 和 HS 分别代表太阳能光伏发电、风力发电、内燃机、蓄电池、热泵、电制冷机、储冷装置、燃气锅炉、吸收式机组和蓄热槽，下标 E、C、H 分别表示电、冷、热。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 光伏发电

太阳能光伏电池通过利用太阳辐射输出电功

率，设备模型为<sup>[19]</sup>：

$$P_{PV} = N_{PV} \xi_{PV} P_{PV,r} \frac{D}{D_s} (1 + \alpha_T (T - T_s)) \quad (4)$$

式中： $N_{PV}$  为光伏电池板块数； $\xi_{PV}$  为输出功率修正系数； $P_{PV,r}$  为光伏电池额定输出功率； $D$  和  $T$  分别为太阳辐照度和周围环境温度； $D_s$  和  $T_s$  分别为标准太阳辐照度和环境温度， $D_s$  取  $1\ 000\ W/m^2$ ， $T_s$  取  $25\ ^\circ C$ ； $\alpha_T$  为光伏组件的功率温度系数。

#### 2.2.2 风力发电

风力发电机组的输出功率取决于空气密度、叶片半径、风速等因素：

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho_{air} \pi R^2 V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

式中： $P_{WT}$  为风机输出功率； $\rho_{air}$  为空气密度； $R$  和  $V_{wind}$  分别为风机叶片半径和叶尖风速； $C_p(\lambda, \beta)$  为风能利用率，其中  $\lambda$  为叶尖速比， $\beta$  为桨距角。

#### 2.2.3 动力装置与制冷机

为研究方便，将 CCHP 系统中设备的转换效率设定为常数，燃气内燃机、燃气锅炉和电制冷机的输出功率模型可表示为：

$$P_{\{GE,GB\}} = \eta_{\{GE,GB\}} Q_{gas\{GE,GB\}} \quad (6)$$

$$Q_{EC} = \eta_{EC} P_{EC} \quad (7)$$

式中： $\eta$ 为设备的转换效率； $Q_{gas}$ 为内燃机和燃气锅炉通过燃烧天然气得到的能量。

### 2.2.4 吸收式制冷机组/地源热泵

吸收式制冷机组和地源热泵分别由内燃机余热和电驱动，有制热和制冷2种运行模式，其数学模型为：

$$\begin{cases} Q_{AC} = (\mu_C \eta_{COP,C} + \mu_H \eta_{COP,H}) Q_{in,AC} \\ Q_{HP} = (\mu_C \eta_{COP,C} + \mu_H \eta_{COP,H}) P_{HP} \\ \mu_C + \mu_H \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\mu_C$ 和 $\mu_H$ 为控制吸收式机组/地源热泵运行状态的逻辑变量， $\mu_C, \mu_H \in \{0,1\}$ ； $\eta_{COP,C}$ 和 $\eta_{COP,H}$ 分别为制冷与制热性能系数； $Q_{in,AC}$ 为驱动吸收式机组的热量。

### 2.2.5 储能设备

为解决系统输出与用户需求不匹配的问题，可以在CCHP系统中引入储能设备调节系统的冷、热、电输出负荷。

储能设备模型为：

$$E_{d,t+1} = E_{d,t}(1 - \varepsilon) + \left( \mu_{in,d,t} \gamma_{in} P_{in,d,t} - \frac{\mu_{out,d,t} P_{out,d,t}}{\gamma_{out}} \right) \Delta t \quad (9)$$

式中： $E_{d,t+1}$ 、 $E_{d,t}$ 分别为 $d$ 天的 $t+1$ 时刻与 $t$ 时刻储能设备中的储能量； $\varepsilon$ 为储能设备损耗率； $\mu_{in,d,t}$ 和 $\mu_{out,d,t}$ 分别为设备充放能状态的逻辑变量， $\mu_{in,d,t}$ 、 $\mu_{out,d,t} \in \{0,1\}$ ； $P_{in,d,t}$ 和 $P_{out,d,t}$ 为设备的充放能功率； $\gamma_{in}$ 和 $\gamma_{out}$ 分别为设备充放能效率。

储能设备的循环周期为1天，其运行约束为：

$$\begin{cases} \mu_{in,d,t} + \mu_{out,d,t} \leq 1 \\ E_{min} \leq E_{d,t} \leq E_{max} \\ E_{d,1} = E_{d,24} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $E_{min}$ 和 $E_{max}$ 分别为设备允许的最小和最大储能量。

### 2.2.6 运行约束

设备在每一时刻的运行出力应满足小于额定功率（最大功率）或最大容量的条件：

$$0 \leq P_{d,t} \leq P_{max} \quad (11)$$

$$0 \leq Q_{d,t} \leq Q_{max} \quad (12)$$

式中： $P_{max}$ 和 $Q_{max}$ 分别为设备的最大功率和容量。

## 2.3 评价指标

本文将能效、经济及环保性能作为系统的综合

评价指标<sup>[20]</sup>，对WSSH-CCHP系统和参照的SP系统进行优化和性能比较。

### 2.3.1 能效

以年一次能源节约率（primary energy savingrate, PESR）作为系统的能效指标，表示CCHP系统相比于SP系统一次能源消耗量减少的比率：

$$I_{PESR} = \frac{K_{SP,PESR} - K_{CCHP,PESR}}{K_{SP,PESR}} \quad (13)$$

$$K_{PESR} = Q_{gas} + \frac{P_{grid}}{\alpha_{grid} \times (1 - \phi_{grid})} \quad (14)$$

式中： $I_{PESR}$ 为年一次能源节约率； $K_{SP,PESR}$ 和 $K_{CCHP,PESR}$ 分别为SP系统及CCHP系统的一次能源消耗量； $\alpha_{grid}$ 和 $\phi_{grid}$ 分别为电网输送线损及电厂平均发电效率。

### 2.3.2 经济性

选取年总成本节约率作为系统的经济性能评价指标，比较CCHP系统的年总成本费用（annual total cost, ATC）相比于SP系统的节约率：

$$I_{AOE} = \frac{C_{SP} - C_{CCHP}}{C_{SP}} \quad (15)$$

式中： $I_{AOE}$ 为年总成本节约率； $C_{CCHP}$ 和 $C_{SP}$ 分别为CCHP系统和SP系统的年总成本费用。

年总成本费用 $C_{ATC}$ 包括初投资费用 $C_{cap}$ 、土建安装费 $C_a$ 、设备维护费用 $C_{om}$ 、燃料消耗费 $C_{fuel}$ 和电网购电费 $C_{grid}$ ：

$$C_{ATC} = C_{cap} + C_{om} + C_{fuel} + C_{grid} + C_a \quad (16)$$

各项费用的表达式如下：

$$\begin{cases} C_{cap} = \sum_{i=1}^N c_{cap,i} P_{max,i} R \\ R = \frac{r(1+r)^{L_i}}{(1+r)^{L_i} - 1} \\ C_{om} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N c_{om,i} P_{d,t,i} \\ C_{fuel} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d \sum_{t=1}^T F_{fuel,d,t} \mu_{fuel,d,t} \\ C_{grid} = \sum_{d=1}^{N_d} M_d \sum_{t=1}^T F_{grid,d,t} \mu_{grid,d,t} \\ C_a = C_{cap,i} \sigma_{a,i} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $c_{cap,i}$ 和 $c_{om,i}$ 分别为系统设备 $i$ 的单位功率的投资和维护费用； $P_{max,i}$ 为设备 $i$ 的额定功率； $R$ 为资金回收系数； $r$ 为年利率，取10%； $L_i$ 为设备 $i$ 的生命周期； $M_d$ 为典型日 $d$ 代表的实际天数； $F_{fuel,d,t}$ 和 $F_{grid,d,t}$ 为系统在 $d$ 天 $t$ 时刻消耗的天然气体积及电量； $\mu_{fuel,d,t}$ 、 $\mu_{fuel,d,t}$ 和 $\mu_{grid,d,t}$ 为天然气价及电价； $\sigma_{a,i}$ 为设备 $i$ 的土建成本系数。

2.3.3 环保性

以 CO<sub>2</sub> 与 NO<sub>x</sub> 的减排率作为 CCHP 系统的环境性能评价指标:

$$R_{CDE} = \frac{R_{SP,CDE} - R_{CCHP,CDE}}{R_{SP,CDE}} \quad (18)$$

$$R_{NDE} = \frac{R_{SP,NDE} - R_{CCHP,NDE}}{R_{SP,NDE}} \quad (19)$$

式中: R<sub>CDE</sub> 和 R<sub>NDE</sub> 分别为年 CO<sub>2</sub> 减排率和年 NO<sub>x</sub> 减排率; R<sub>SP,CDE</sub> 和 R<sub>CCHP,CDE</sub> 分别为 SP 系统和 CCHP 系统中的 CO<sub>2</sub> 排放量; R<sub>SP,NDE</sub> 和 R<sub>CCHP,NDE</sub> 分别为 SP 系统和 CCHP 系统中的 NO<sub>x</sub> 排放量。

2.4 目标函数

为了综合考虑不同性能评价指标对系统的影响, 本文利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP) 计算不同指标的权重<sup>[21-22]</sup>, 得到如图 2 所示的综合指标层次结构。

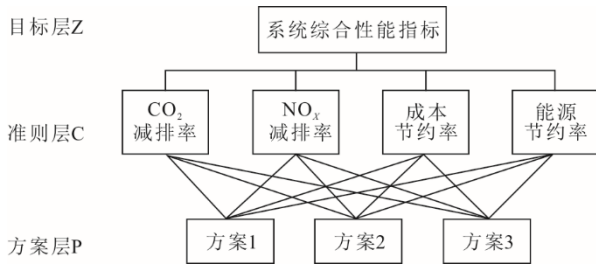


图 2 综合指标层次结构

Fig.2 Comprehensive indicator hierarchy

根据不同指标的权重, 可建立考虑不同评价指标影响的综合目标评价模型如下<sup>[23]</sup>:

$$Z_{max} = \omega_1 R_{CDE} + \omega_2 I_{AOE} + \omega_3 I_{PESR} + \omega_4 R_{NDE} \quad (20)$$

式中: Z<sub>max</sub> 为综合性能指标; ω<sub>1</sub>、ω<sub>2</sub>、ω<sub>3</sub> 和 ω<sub>4</sub> 分别为 CO<sub>2</sub> 年减排率、年总成本节约率、一次能源节约率和 NO<sub>x</sub> 年减排率的权重系数, 且 ω<sub>1</sub>+ω<sub>2</sub>+ω<sub>3</sub>+ω<sub>4</sub>=1。

显然, CCHP 系统的综合性能指标 Z<sub>max</sub> 值越大, 则 CCHP 系统的综合性能相比于 SP 系统越好。

层次分析法依据重要程度对评价指标进行打分。为了综合考虑 CCHP 系统能效、经济成本和环保性能, 本文设 R<sub>NDE</sub> 和 I<sub>PESR</sub> 为 3 级指标, 重要性参数设为 1; R<sub>CDE</sub> 为 2 级指标, 重要性参数设为 3; I<sub>AOE</sub> 为 1 级指标, 重要性参数设为 5。因此, 可得判断矩阵 A 为<sup>[24]</sup>:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 1 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 3 & 1 & 1/2 \\ 5 & 5 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

通过计算可得到各指标对应的权重依次为 ω<sub>1</sub>=0.098 931, ω<sub>2</sub>=0.098 931, ω<sub>3</sub>=0.283 85, ω<sub>4</sub>=0.518 29。

3 参数信息

以济南市某能源中心为例对 WSSH-CCHP 系统和 SP 系统进行优化配置与运行管理分析。选取 4 个典型日分别代表春、夏、秋、冬 4 个季节, 每个典型日的代表天数见表 1。

表 1 典型日持续时长  
Tab.1 Duration of a typical day

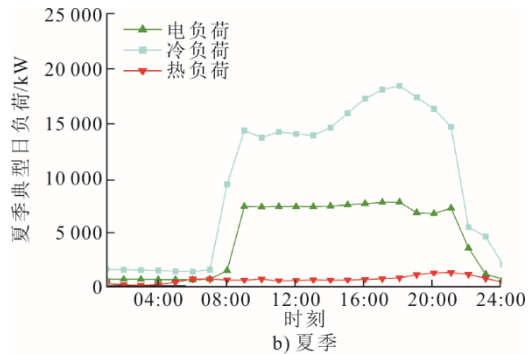
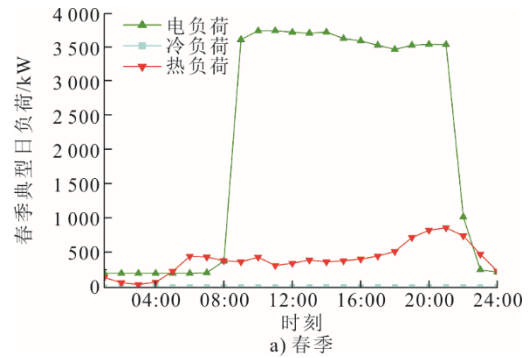
季节	春季	夏季	秋季	冬季
天数	60	90	60	150

济南市的电价和气价见表 2, 其中购电实行阶梯电价政策。

表 2 济南市能源价格  
Tab.2 Energy prices in Jinan City

项目	时段	价格
电价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	高峰段 (08:30—11:00, 14:30—21:00)	0.900
	平时段 (07:00—08:30, 11:00—12:00, 13:00—14:30, 21:00—23:00)	0.609
	低谷段 (12:00—13:00, 23:00—07:00)	0.318
气价 (标况)/(元·m <sup>3</sup> )	全天	2.600

图 3 为该能源中心的典型日逐时冷热电负荷, 图 4 与图 5 分别为济南市的典型日太阳辐照度、温度及风速。该能源中心采用“屋顶光伏”的安装方式, 可利用面积 14 000 m<sup>2</sup>, 风电装机最大容量 2 342 kW。



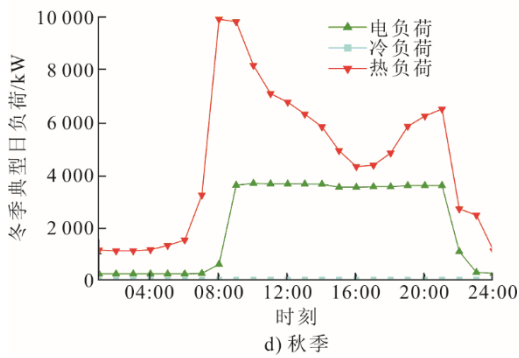
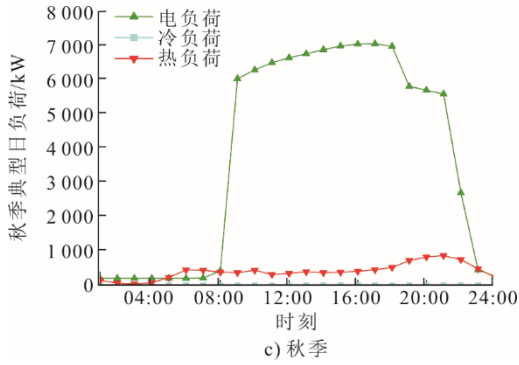


图3 典型日逐时冷热电负荷曲线  
Fig.3 Hourly heating and cooling load of typical daily

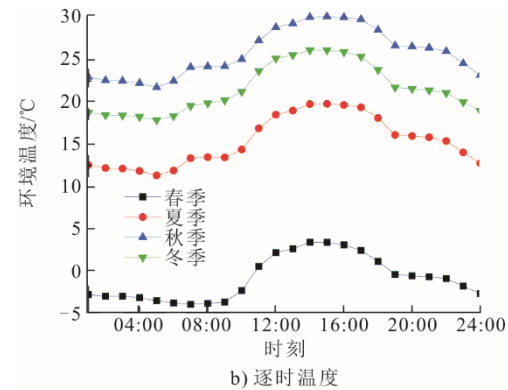
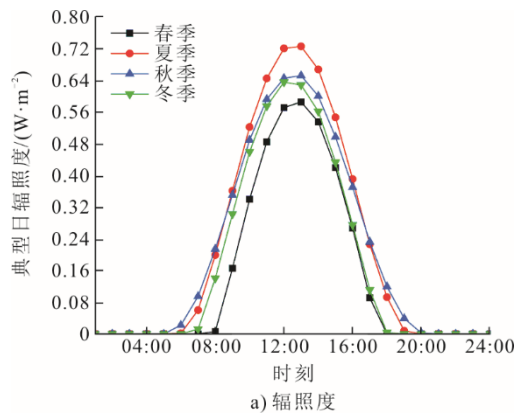


图4 典型日太阳光辐射度及逐时温度  
Fig.4 Solar radiation intensity and hourly temperature of typical daily

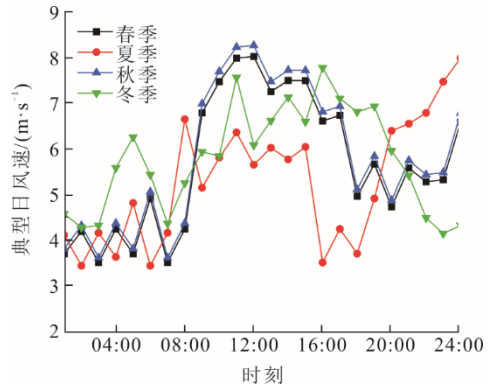


图5 区域典型日风速  
Fig.5 Regional typical daily wind speed

表3—表6<sup>[14]</sup>分别为系统设备数据库中各台数优化设备的品牌参数信息,表7为容量优化型设备的参数信息。

表3 燃气内燃机(颜巴赫)参数  
Tab.3 Gas internal combustion engine parameters

型号	额定功率/kW	效率/%	单位成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	维护费/(元·kW <sup>-1</sup> )
J312GS	635	40	3 975	0.02
J316GS	835	43	3 950	0.02
J412GS	889	43	3 900	0.02
J416GS	1 191	43	3 875	0.02
J420GS	1 487	44	3 825	0.02
J616GS	2 679	43	3 775	0.02
J620GS	3 352	41	3 750	0.02
J624GS	4 029	41	3 725	0.02

表4 燃气锅炉(郑锅)参数  
Tab.4 Gas boiler parameters

型号	额定功率/kW	效率/%	单位成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	维护费/(元·kW <sup>-1</sup> )
WNS0.7	700	97	229	0.02
WNS1.4	1 400	97	157	0.02
WNS3.5	3 500	97	149	0.02
WNS4.2	4 200	97	148	0.02
WNS7	7 000	97	114	0.02

表5 吸收式制冷机组(远大)参数信息  
Tab.5 Absorption chiller parameters

型号	额定功率/kW	$\eta_{COP,C}$	单位成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	维护费/(元·kW <sup>-1</sup> )
BHE-30	349	1.31	2 522	0.01
BHE-50	582	1.31	2 165	0.01
BHE-75	872	1.31	1 824	0.01
BHE-100	1 163	1.31	1 607	0.01
BHE-150	1 745	1.31	1 358	0.01
BHE-250	2 908	1.31	1 100	0.01
BHE-300	3 489	1.31	1 046	0.01
BHE-400	4 652	1.31	957	0.01
BHE-500	5 815	1.31	905	0.01
BHE-600	6 978	1.31	849	0.01
BHE-800	9 304	1.31	751	0.01

表 6 电制冷机组 (格力) 参数信息  
Tab.6 Electric chiller parameters

型号	额定功率/kW	$\eta_{COPC}$	单位成本/ (元·kW <sup>-1</sup> )	维护费/ (元·kW <sup>-1</sup> )
LSQBLX G1000	1 000	5.3	1 500	0.01
LSQBLX G1800	1 800	5.32	1 475	0.01
LSQBLX G2400	2 400	5.36	1 450	0.01
LSQBLX G2800	2 800	5.69	1 425	0.01
LSQBLX G3400	3 400	5.74	1 400	0.01
LSQBLX G4000	4 000	5.82	1 250	0.01
LSQBLX G5200	5 200	5.84	1 200	0.01
LSQBLX G6400	6 400	5.94	1 175	0.01

表 7 容量优化型设备经济参数

Tab.7 Capacity-optimized equipment economic parameters

设备	设备费用/(元·kW <sup>-1</sup> )	维护费用/(元·kW <sup>-1</sup> )
光伏电池	7 500	0.013
风力发电	6 000	0.015
地源热泵	2 000	0.026
蓄电池	1 879	0.011
蓄热槽	98	0.044
冰蓄冷	98	0.044

## 4 结果与讨论

### 4.1 选型优化

基于该能源中心的逐时冷、热、电负荷和能源价格,按照“并网不上网”的运行模式,以综合性能指标  $Z_{max}$  最大为优化目标,基于燃气内燃机智慧能源系统优化设计软件平台,采用 MILP 算法对 SP 系统及 WSSH-CCHP 系统进行系统配置和运行管理优化<sup>[17,19]</sup>,得到的最优配置结果见表 8 和表 9。由表 8 和表 9 的优化配置结果可以看出,SP 系统电和制冷负荷由电网和冷水机组提供。由于能源中心的冷负荷需求大,其容量配置较高。WSSH-CCHP 系统中引入了风光储设备,承担了部分发电负荷,减少了电网购电及内燃机的发电功率。此外,燃气锅炉的数量减少了,降低了天然气燃烧的污染物排放,提高了系统的节能环保性能。系统中未选择蓄电池调节电力输出,主要是考虑到储电设备的成本较高而没有设置储电设备。

表 8 SP 系统配置结果  
Tab.8 Configuration results of SP system

设备类型	型号	台数	容量/kW
冷水机组	LSQBLX G4000	3	12 000
	LSQBLX G5200	2	10 400
燃气锅炉	WNS3.5	1	3 500
	WNS7	1	7 000

表 9 WSSH-CCHP 系统配置结果  
Tab.9 Configuration results of WSSH-CCHP system

设备类型	型号	台数	容量/kW
光伏发电			3 900
风力发电			2 342
内燃机	J412GS	1	889
	J420GS	3	4 461
吸收式制冷机	BHE-250	3	8 724
冷水机组	LSQBLX G1000	6	6 000
燃气锅炉	WNS1.4	1	1 400
地源热泵	定制	1	5 153
蓄热槽	定制	1	9 510
蓄冷空调	定制	1	16 442

### 4.2 评价指标优化

以综合性能指标为优化目标,得到了表 10 所示的系统指标的优化结果。

表 10 评价指标优化结果  
Tab.10 Evaluation index of optimization results

指标	SP	WSSH-CCHP
综合指标 $Z_{max}$	0	0.378
总成本/(万元·a <sup>-1</sup> )	3 061	2 730
$I_{AOE}/\%$		10.8
$S_{CDE}/t$	31 809	11 650
$R_{CDE}/\%$		63.4
$S_{NDE}/kg$	82 280	11 479
$R_{NDE}/\%$		86.1
$P_{EC}/(MW \cdot h)$	107 400	49 826
$I_{PESR}/\%$		54.0

由表 10 可知:WSSH-CCHP 系统的年总成本节约率  $I_{AOE}$  为 10.8%,表明系统的年总费用与 SP 系统相比减少了 331 万元,经济效益显著;一次能源节约率  $I_{PESR}$  为 54.0%,说明 WSSH-CCHP 系统对化石能源的依赖更小;CCHP 系统的  $CO_2$  年排放量  $S_{CDE}$  和  $NO_x$  年排放量  $S_{NDE}$  分别为 11 650 t 和 11 479 kg,相比于 SP 系统的  $CO_2$  年减排率与  $NO_x$  年减排率分别为 63.4%与 86.1%,表明 WSSH-CCHP 系统的污染物排放少,环保性能好。因此,WSSH-CCHP 系统的综合性能指标  $Z_{max}$  相较分供系统提升了 37.8%,经济、能效和环保性能都明显优于分供系统。

不同能源系统各项费用对比如图 6 所示。由图 6 可见,SP 系统的年总成本为 3 061 万元,在相同负荷需求下其成本最高,其绝大部分成本在于电网购电,购电成本  $C_{grid}$  占比达 72.0%。由表 10 可知,其各项性能指标均低于 WSSH-CCHP 系统。WSSH-CCHP 系统引入风光设备承担部分电力负荷,使系统购电成本大幅下降,仅占年总成本的

8.0%，明显提高了系统应对电价波动的能力。

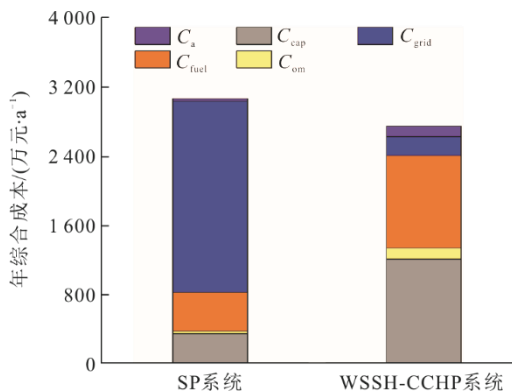


图6 不同能源系统各项费用对比

Fig.6 Comparison of various costs of two energy systems

### 4.3 系统运行特性

图7和图8分别给出了WSSH-CCHP系统与SP系统4个典型日的设备出力及能量管理策略。图中春季为00:00—24:00时段，夏季为24:00—48:00时段，秋季为48:00—72:00时段，冬季为72:00—96:00时段。

由图7可见，WSSH-CCHP系统利用光伏、风电、内燃机J420GS、J412GS共同发电来满足用户、热泵及电制冷机组的电负荷，不足部分由电网购电补充。光伏发电仅在07:00到18:00间，风力发电在08:00至15:00间出力较大，这与太阳能及风能的自然规律有关。此外，由于风电及光伏配置受自然气候影响，且其所产电力不可储存，故会出现如23:00生产电量大于电负荷的情况，但大部分时刻的负荷匹配良好。

夏季电负荷需求量大，内燃机、风力发电及光伏机组共同发电满足用户电负荷、热泵和电制冷机的电负荷，不足电量由电网购电补充。凌晨低谷电价时，电负荷主要由电网购电及风力发电提供，此时电制冷机也会优先运行满足系统冷负荷，从而提高系统经济性；08:00以后系统冷负荷增大，电网电价较高，此时系统优先利用内燃机发电，并利用其余热驱动溴化锂机组制冷，与热泵及电制冷机LSQBLX和G1000共同满足用户电和冷负荷。

由图7可知，由于WSSH-CCHP系统引入了蓄热装置，风力发电产生的多余电量可驱动热泵制热并利用蓄热装置存储，在合适情况下释放，从而可以更经济地平衡系统负荷。

冬季，风电、光伏发电及内燃机J420GS共同满足用户电和热泵制热电负荷。由图8可以看出，SP系统电网购电主要用于2部分：一部分用于满足

区域建筑用户电负荷需求；另一部分用于驱动电制冷机组，满足用户夏季的冷负荷需求。

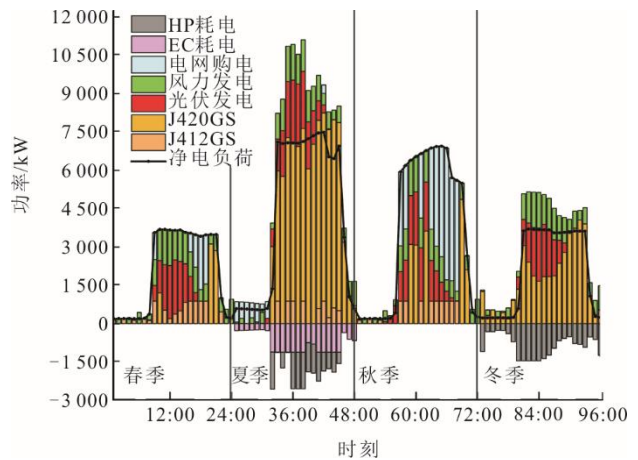


图7 WSSH-CCHP系统典型日供电管理策略

Fig.7 WSSH-CCHP electricity management strategy of the typical day

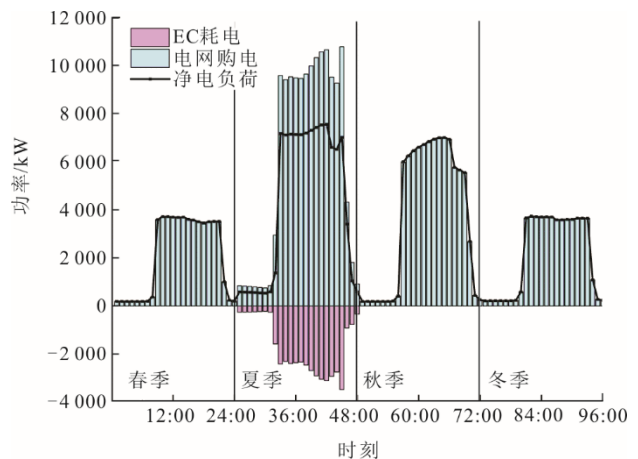


图8 SP系统典型日供电管理策略

Fig.8 SP electricity management strategy of the typical day

图9与图10给出了WSSH-CCHP系统与SP系统四季典型日的供热管理策略。SP系统热负荷均由燃气锅炉供应，WSSH-CCHP系统中，大部分总热负荷由地源热泵及燃气锅炉提供，并采用蓄热装置进行负荷调节。在冬季，终端用户的供暖需求和设备输出保持平衡，在夜晚电价低谷时，蓄热设备利用地源热泵来制热并存储，在白天供热不足时释放存储的热量。由于区域建筑在春夏秋仅有热水需求，故其热量大部分由燃气锅炉WNS1.4提供，少部分由溴化锂机组BHE-250提供。

该能源中心仅在夏季有供冷需求，故本文冷负荷仅考虑夏季典型日。图11与图12给出了WSSH-CCHP系统与SP系统四季典型日的供冷策略。由图11可见：夜晚及凌晨电价低谷阶段，WSSH-CCHP系统的冷负荷优先由电制冷机提供，此时冰蓄冷空

调利用低谷电储冷；日间电网电价高且冷负荷需求大，优先运行利用内燃机余热驱动的溴化锂制冷机组 BHE-250，不足冷量由电制冷机及地源热泵制冷来补充，日间热泵产生的多余冷量通过蓄冷空调存储，在冷量不足时释放来补充系统冷需求。由图 12 可见，SP 系统供冷均由冷水机组提供。

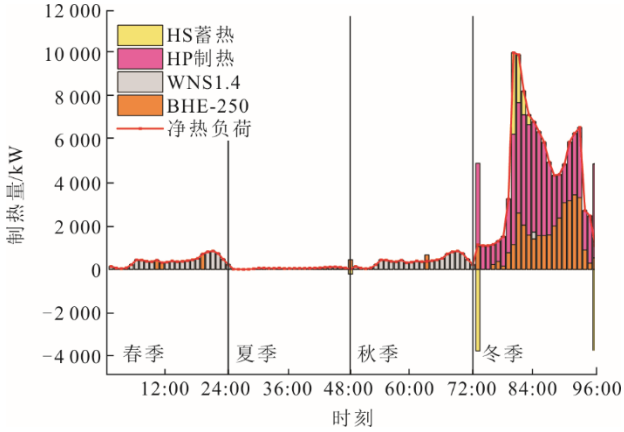


图 9 WSSH-CCHP 系统典型日供热管理策略  
Fig.9 WSSH-CCHP heating management strategy of the typical day

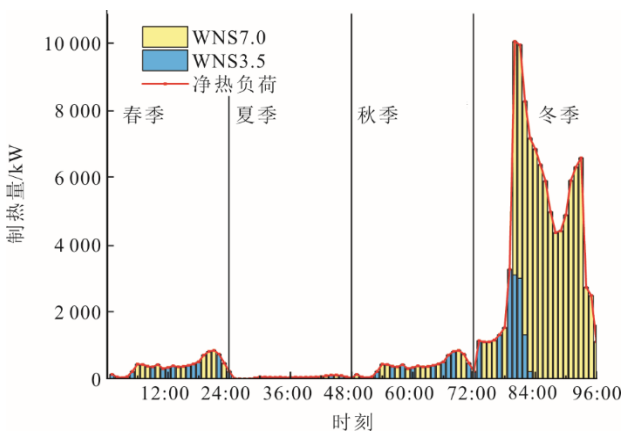


图 10 SP 系统典型日供热管理策略  
Fig.10 SP heating management strategy of the typical day

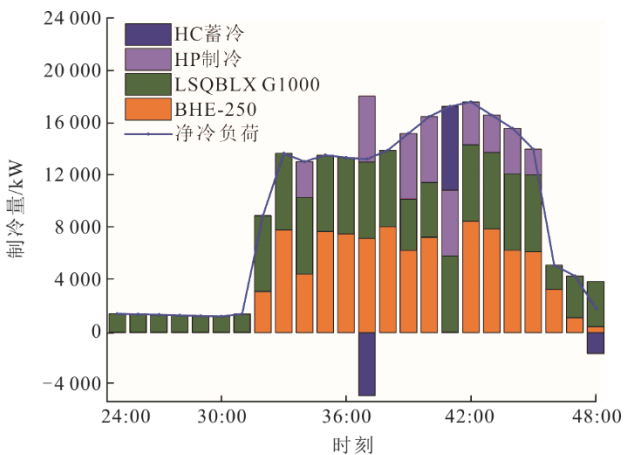


图 11 WSSH-CCHP 系统夏季典型日供冷管理策略  
Fig.11 WSSH-CCHP cooling management strategy of the typical summer day

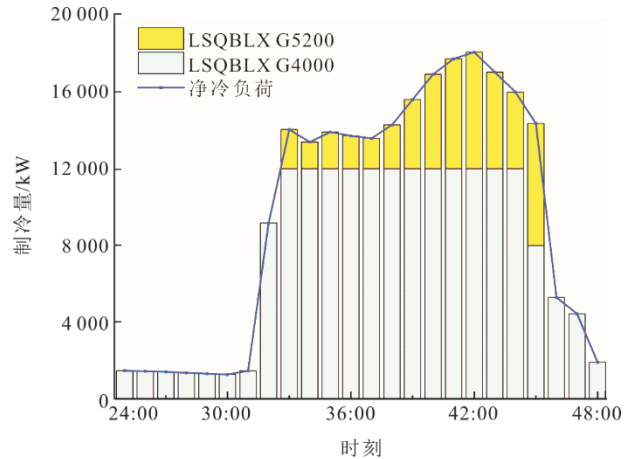


图 12 SP 系统夏季典型日供冷管理策略  
Fig.12 SP cooling management strategy of the typical summer day

### 5 结 语

本文提出了一种耦合可再生能源的冷热电联供 (WSSH-CCHP) 系统，建立了考虑能效、经济与环境的综合评价指标，利用济南市某能源中心的冷热电风光负荷数据，以提出的综合性能指标最大为优化目标，根据建立的设备数据库中的设备信息，采用混合 MILP 算法对系统配置与运行策略进行了集成优化研究，得出以下结论。

- 1) WSSH-CCHP 系统的经济、能效及环保性能都优于分供系统，综合性能指标  $Z_{max}$  相较分供系统提升了 37.8%，具有显著的综合效益。
- 2) WSSH-CCHP 系统的年总成本中购电成本大幅下降，仅占年总成本的 8.0%，相比于分供系统明显提高了系统应对电价波动的能力。
- 3) 引入风光储设备可减少电网购电和内燃机的发电功率，提高了系统的调节灵活性和环保性能，可满足用户的不同负荷需求。

### [参 考 文 献]

[1] 金红光, 刘启斌, 隋军. 多能互补的分布式能源系统理论和技术的研究进展总结及发展趋势探讨[J]. 中国科学基金, 2020, 34(3): 289-296.  
JIN Hongguang, LIU Qibin, SUI Jun. Theory and technology of multi-energy complementary distributed energy system: summary of the research progress and development trend[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 289-296.

[2] 陈雪晶, 陈裕兴, 陈逸明. 天然气分布式 CCHP 系统的发展现状及应用前景[J]. 智能城市, 2019, 5(24): 14-15.  
CHEN Xuejing, CHEN Yuxing, CHEN Yiming. Development status and application prospect of natural gas CCHP systems[J]. Intelligent City, 2019, 5(24): 14-15.

[3] 付佳鑫, 刘颖琦. 我国天然气分布式能源发展现状及思考[J]. 节能, 2020, 39(10): 113-114.

- FU Jiabin, LIU Yingqi. Development status and consideration of natural gas distributed energy[J]. Energy Conservation, 2020, 39(10): 113-114.
- [4] 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.  
XIE Ming, REN Decai, PU Xiaozhou, et al. Summary of development and application of CCHP system[J]. Refrigeration, 2019, 38(1): 63-69.
- [5] MURUGAN S, HORÁK B. Tri and polygeneration systems-A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1032-1051.
- [6] ROSIEK S, BATLLES F J. Renewable energy solutions for building cooling, heating and power system installed in an institutional building: case study in southern Spain[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 147-168.
- [7] 王志贺, 刘元园, 唐沂媛, 等. 考虑二氧化碳排放的冷热电联供系统的容量配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 104-110.  
WANG Zhihe, LIU Yuanyuan, TANG Yiyuan, et al. Capacity configuration of CCHP system considering carbon dioxide emissions[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2017, 29(8): 104-110.
- [8] GE Y, HAN J T, MA Q Z, et al. Optimal configuration and operation analysis of solar-assisted natural gas distributed energy system with energy storage[J]. Energy, 2022, 246: 123429.
- [9] 蒋润花, 蔡睿贤, 韩巍, 等. 太阳能与冷热电联产系统集成[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 721-724.  
JIANG Runhua, CAI Ruixian, HAN Wei, et al. Integrated solar energy and CCHP system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(5): 721-724.
- [10] 李高潮, 卢怀宇, 孙启德. 基于可再生能源的冷热电联供系统集成配置与运行优化研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2014, 37(3): 106-119.  
LI Gaochao, LU Huaiyu, SUN Qide. Research progress in configuration and operation optimization of combined cooling, heating and power (CCHP) systems based on renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 37(3): 106-119.
- [11] 丁泽宇, 侯宏娟, 段立强. 基于线性规划的太阳能辅助热电联供机组运行优化研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 34-39.  
DING Zeyu, HOU Hongjuan, DUAN Liqiang. Study on operation optimization of solar-aided combined heat and power unit based on linear programming[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 34-39.
- [12] 谭钧元, 王旭, 许野, 等. 耦合太阳能的冷热电联供系统双层运行优化配置设计[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 1-8.  
TAN Junyuan, WANG Xu, XU Ye, et al. Design for configuration and operation optimization of hybrid solar and CCHP system based on bilevel optimization model[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 1-8.
- [13] JAYASEKARA S, HALGAMUGE S K, ATTALAGE R A, et al. Optimum sizing and tracking of combined cooling heating and power systems for bulk energy consumers[J]. Applied Energy, 2014, 118: 124-134.
- [14] LU S. L, LI Y W, XIA H W. Study on the configuration and operation optimization of CCHP coupling multiple energy system[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 177: 773-791.
- [15] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.  
ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [16] 余小兵, 杨利, 居文平, 等. 内燃机余热回收冷热电联供系统性能研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 49-55.  
YU Xiaobing, YANG Li, JU Wenping, et al. Performance analysis on a combined cooling, heating and power system for waste heat recovery of internal combustion engine[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 49-55.
- [17] 刘权. 耦合可再生能源的 CCHP 系统集成优化与运行特性[D]. 济南: 山东大学, 2022: 1.  
LIU Quan. Integrated optimization and operation characteristics of CCHP system coupled with renewable energy[D]. Jinan: Shandong University, 2022: 1.
- [18] 刘义达, 祁金胜, 尹晓东, 等. 燃气内燃机智慧能源系统优化设计软件研发[J]. 山东电力技术, 2021, 48(1): 48-53.  
LIU Yida, QI Jinsheng, YIN Xiaodong, et al. Development of optimal design software for smart energy system based on gas internal combustion engine[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(1): 48-53.
- [19] XU L, RUAN X B, MAO C X. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid power system[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2013, 4(3): 774-785.
- [20] YOU H L, HAN J T, LIU Y, et al. 4E analysis and multi-objective optimization of a micro poly-generation system based on SOFC/MGT/MED and organic steam ejector refrigerator[J]. Energy, 2020, 206: 118122.
- [21] 赵振东. 太阳能冷热电联供系统多目标优化设计与运行研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018: 1.  
ZHAO Zhendong. Research on multi-objective operation and design optimization of a combined cooling heating and power solar energy system[D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 1.
- [22] 张耀天, 张旭成, 贾明顺, 等. 基于层次分析法的自适应决策评价方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(5): 1065-1070.  
ZHANG Yaotian, ZHANG Xuming, JIA Mingshun, et al. Adaptive evaluation method based on analytic hierarchy process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(5): 1065-1070.
- [23] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16.  
ZHAO Xia, ZHAN Chengyong, JIA Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-16.
- [24] 王瑞琪, 王鹤鸣, 孙波. 新能源冷热电联供系统优化设计方法研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(12): 1317-1326.  
WANG Ruiqi, WANG Heming, SUN Bo. System optimization design of combined cooling, heating, and power system integrated with renewable energies[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(12): 1317-1326.

(责任编辑 邓玲惠)