

耦合可再生能源的分布式联供系统设计及运行策略优化

邱雨微, 郑徐跃, 詹翔燕, 朱兴仪, 孟超, 赵英汝*

(厦门大学能源学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 基于通用数学建模(the general algebraic modeling system, GAMS)软件, 针对耦合可再生能源技术的分布式冷热电联供(renewable energy coupled combined cooling, heating and power, RCCHP)系统构建数学模型, 并结合上海市某综合区域为案例, 选取 2 项经济性指标和 1 项环境性指标, 对 4 种情景下 RCCHP 系统的运行情况进行模拟计算与分析, 分析该系统的设备组合、逐时运行策略、经济性与环境性, 同时分析了可再生清洁发电技术与能源政策对分布式多联供系统的影响。结果表明, 夜间采用电网购电与风力发电互补供应电负荷、白天使用 CCHP 耦合风力发电联合互补供能是经济性最佳的运行策略, 能够抑制可再生能源的波动性并且实现多种电能的完全消纳。与传统分产(separated production, SP)系统相比, RCCHP 系统能够极大地降低系统对电网的依赖度, 减少耗气量, 同时极大地提高系统的环境性, 但其较高的初始投资费用限制了其经济性与实用性。

关键词: 数学优化; 可再生能源; 风力发电; 光伏

中图分类号: TK 472

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2019)01-0103-08

传统的能源系统浪费资源, 污染环境, 不仅不能满足社会活动的用能质量要求, 还有悖于节能减排的时代主题^[1]。能源储备消耗及全球环境危机亟待降低化石能源的消耗比例, 优化产能供能方式的结构配置, 提高生产效率, 减少污染物排放^[2]。因此, 高效、环保的能源利用方式尤其重要。分布式冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统以“电能自发自用, 余热利用最大化”为原则就地产能供能^[3], 利用高质量热能发电, 低质量热能制冷、制热, 实现“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”, 从而提高能量的综合转换效率。CCHP 系统倡导利用包括热电联供及可再生能源系统的分布式产能和包括吸收制冷设备、电空调、各种动力源热泵、锅炉的辅助供能技术^[4], 以满足规划区域的逐时冷热电能量需求。

当前国内外关于多能源集成分布式能源系统的建模与优化的研究模型较简单, 大多数集中于理论政策的研究, 少数研究以经济性作为计算核心, 仅涉及

简单系统的线性估算, 较少涉及技术设备组合、容量配置、运行策略、系统联合性能的综合优化。分布式综合能源系统的设计不仅要考虑到供给侧能量生产与需求侧负荷变化规律之间的相互匹配, 还需要联合设计系统内部能量生产技术之间的互补作用以达到系统节能性最优与生产效率最佳的目的。传统的热电机可配置的容量范围宽, 调峰性能优越, 不仅能长期稳定地平衡基本负荷又能切入调峰模式, 其产电与产热的同时性限制了对热电错峰的用户负荷的实时匹配^[5]。可再生能源包括太阳能、风能等^[6], 但是其可配置的容量较小, 自然条件依赖性强, 具有随机性、波动性特点。因此, 结合以上能源的优势与不足, 利用其互补特性切入互补发电模式是 CCHP 系统有效改善产能质量^[7]、提高产能效率、降低产能排放的运行方式。燃气-风电-太阳能互补发电模式是一种先进的能源互联网发电策略, 根据天然气、风、光的分布式互补特性, 基于先进数字化模型对 CCHP 系统优化使其实现智能调度与协调运行^[8], 不仅可以克服可再生能源技术的随机性与波动

收稿日期: 2018-03-11 录用日期: 2018-05-23

基金项目: 福建省科技计划引导性项目(2018H0036)

*通信作者: yrzha@xmu.edu.cn

引文格式: 邱雨微, 郑徐跃, 詹翔燕, 等. 耦合可再生能源的分布式联供系统设计及运行策略优化[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 103-110.

Citation: QIU Y W, ZHENG X Y, ZHAN X Y, et al. The optimal design and operation strategy for combined cooling, heating and power system coupled with renewable energies[J]. Xiamen Univ Nat Sci, 2019, 58(1): 103-110. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

性,降低系统的整体排放数值,而且节约运行成本,具有很好的经济价值和环保效益^[9].

综上所述,针对互补 CCHP 系统的研究具有切实的经济环保意义.本文中提出耦合可再生能源技术的分布式冷热电联供(renewable everygy coupled CCHP system, RCCHP)系统联合启用燃气内燃机与风电机组、光伏系统、储能电池配合供电,不足的电能由电网购入的方案.该系统中余热锅炉(heat recover steam generator, HRSG)回收燃气内燃机的高温排热,利用电锅炉配合供应热负荷与吸收式制冷机的供热汽耗,储热水箱辅助调节热能供应,电制冷空调与吸收式制冷机组协调平衡逐时冷负荷^[10].RCCHP 系统的能源输入为天然气、风能、太阳能,综合能源利用效率能够超过 80%^[11].从经济效益方面考虑,RCCHP 系统的燃气供应价格由长期供应的燃气公司给定,购电价格依照当地电网规定,燃气与电量购买费用总和构成系统运行支出费用;同时,RCCHP 系统内的剩余电量根据电网企业的规定按不同产电技术的度电价格卖给电网,产生一定的经济收益.从环境因素方面考虑,消耗化石能源所产生的碳排放折算成碳税计入系统运行支出费用公式^[12].

本文中以上海某区域建筑供能为案例,使用 GAMS 软件搭建 RCCHP 系统的混合整数非线性规划(MINLP)数学模型,共 1 440 个优化时段(15 年×4 季×24 h),并选取 2 项经济性指标和 1 项环境性指标,设置 4 种不同的运行情景进行分析计算,得出系统的逐时最优控制策略以及不同产能技术设备的最优配置数量与容量,由此分析可再生清洁发电技术对分布式联供系统的影响.

1 RCCHP 系统

RCCHP 系统分为 3 个模块:发电模块、制热模块、制冷模块.发电模块主要由燃气内燃机、光伏系统、与配电网相连的风电机组及蓄电池组成.系统可以根据需要选择与公共电网并网.制热模块主要由余热锅炉、燃气锅炉与蓄热水箱联合供应^[13].电空调制冷机组与吸收式制冷机同时组成制冷单元. RCCHP 系统构型与能量流动如图 1 所示.

1.1 目标函数

RCCHP 系统可高效梯级利用能源,因此其运行支出费用远小于传统分产分供系统的购电和购气费用总和,本文中以规划期内这部分节省运行费用的净现值(I_{NPV})最大化为目标,建立数学模型,如下:

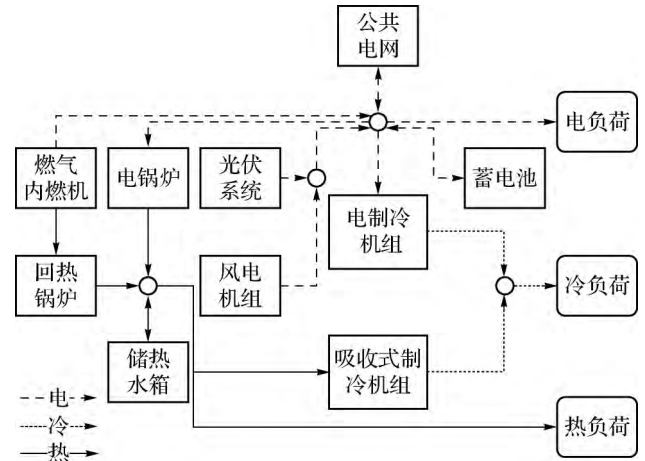


图 1 RCCHP 系统流程图

Fig. 1 Flowchart of RCCHP system

$$\max I_{NPV} = \max \sum_{j=1}^n I_{CS-j} \cdot (1+i)^{-j} - (I - I^{SP}), \quad (1)$$

其中, I_{CS-j} 表示运行支出总费用差值, I^{SP} 与 I 分别代表分产(separated production, SP)系统与 RCCHP 系统的初始投资费用.在运行支出费用方面,RCCHP 系统虽具有相对的经济优势,但需要更高的初始投资^[14].因此,RCCHP 系统建设项目是否值得投资需要综合计算其经济性评价指标^[15].

$$\begin{aligned} I_{CS} &= I_{TOC-SP} - I_{TOC}, \quad (2) \\ I_{TOC} &= \sum_{s,t} (\gamma_{el,s,t} \cdot E_{el,s,t}) - \sum_{c,s,t} (\lambda_{c,sale} \cdot E_{c,sl,s,t}) + \\ &\quad \sum_{s,t} (\gamma_{ng,s,t} \cdot F_{ng,s,t}) + \sum_{s,t} (\varphi \cdot C_{CE}), \quad (3) \\ I_{TOC-SP} &= \sum_{s,t} (\gamma_{el,s,t} \cdot E_{el,s,t}^{SP}) + \sum_{s,t} (\gamma_{el,s,t} \cdot E_{cl,s,t}^{SP}) \\ &\quad + \sum_{s,t} (\gamma_{ng,s,t} \cdot F_{ng,s,t}^{SP}) + \sum_{s,t} (\varphi \cdot C_{CE-SP}), \quad (4) \end{aligned}$$

其中: I_{TOC} 和 I_{TOC-SP} 为 RCCHP 系统和传统 SP 系统的运行支出总费用^[16]; $\gamma_{el,s,t}$ 、 $\gamma_{ng,s,t}$ 、 $\lambda_{c,sale}$ 、 φ 对应 s 季节 t 时刻的电价、气价、度电上网价格及碳排放税率; $E_{el,s,t}^{SP}$ 、 $E_{cl,s,t}^{SP}$ 、 $F_{ng,s,t}^{SP}$ 、 C_{CE-SP} 分别为 SP 系统的照明电负荷、供冷电负荷、燃气耗量及总碳排放量; $E_{el,s,t}$ 、 $E_{c,sl,s,t}$ 、 $F_{ng,s,t}$ 、 C_{CE} 分别为 RCCHP 系统的照明电负荷、3 种产电技术的上网电量、总燃气耗量以及总碳排放量.

$$\begin{aligned} I &= \sum_{RCCHP-C} (P_{RCCHP-C} \cdot R_{RCCHP-C}^E) + \sum_{RCCHP-C} (P_{RCCHP-C} \cdot R_{RCCHP-C}^Q) + \sum_{RCCHP-C} (P_{RCCHP-C} \cdot R_{RCCHP-C}^C), \quad (5) \\ I^{SP} &= \sum_{SP-C} (P_{SP-C} \cdot R_{RCCHP-C}^Q) + \sum_{SP-C} (P_{SP-C} \cdot R_{RCCHP-C}^C), \quad (6) \end{aligned}$$

其中: I^{SP} 与 I 分别代表 SP 系统与 RCCHP 系统的初始投资费用; R^E 、 R^Q 、 R^C 为电、热、冷技术额定容量; SP-C 表示 SP 系统中的产能技术, 包括燃气锅炉(BOIL)、电制冷空调(EC); RCCHP-C 表示 RCCHP 系统中的产能技术, 包括产电技术即燃气内燃机(GE)、风电(WP)、光伏(PV)、蓄电池(EST), 产热技术(HRSG)、电锅炉(EB)、储热水箱(QST), 制冷技术即 EC、吸收式制冷机组(ABS); P 指代各技术的单位功率造价。

除 I_{NPV} 外, 本文中同时计算 15 年内的内部收益率(I_{IRR})作为 RCCHP 系统的经济效益评价指标^[17], 其数学公式为:

$$\sum_{j=1}^n I_{CS-j} \cdot (1 + I_{IRR})^{-j} - (I - I^{SP}) = 0, \quad (7)$$

式中, j 表示运行的年份, n 表示运行周期 15 年。

除了 RCCHP 系统的经济效益, 环境影响也是关注的重点^[18]。本文中碳排放量的计算如下:

$$C_{CE-SP} = \sum_{s,t} (\alpha_{ng} \cdot F_{s,t}^{SP} + \alpha_{el} \cdot E_{buy,s,t}^{SP}), \quad (8)$$

$$C_{CE} = \sum_{s,t} (\alpha_{ng} \cdot F_{s,t} + \alpha_{el} \cdot E_{buy,s,t}), \quad (9)$$

$$C_{CER} = \frac{C_{CE-SP} - C_{CE}}{C_{CE-SP}}. \quad (10)$$

式中: α_{ng} 与 α_{el} 表示天然气与公共电网的度电碳排放系数; $F_{s,t}$ 与 $E_{buy,s,t}$ 为天然气总耗气量与电网总买电量。

1.2 子系统数学模型

1.2.1 燃气内燃机

燃气内燃机的发电量计算如下:

$$E_{GE,s,t} = F_{GE,s,t} \cdot \eta_{GE,el,s,t}, \quad (11)$$

$$\eta_{GE,el,s,t} = a_1 \cdot f_{GE,s,t}^2 + a_2 \cdot f_{GE,s,t} + a_3, \quad (12)$$

$$\lambda_{CUT-GE} \cdot R_{GE}^E \leq E_{GE,s,t} \leq R_{GE}^E. \quad (13)$$

其中: $E_{GE,s,t}$ 表示 GE 在 s 季节 t 时刻的输出功率; $F_{GE,s,t}$ 表示天然气耗量; $\eta_{GE,el,s,t}$ 表示 GE 的电效率; 部分负载率 $f_{GE,s,t}$ 是机组功率与配置容量的比值; a_1 、 a_2 、 a_3 是电效率曲线系数 ($a_1, -0.031; a_2, 0.105; a_3, 0.285$); λ_{CUT-GE} 表示机组的切出系数。

GE 的高温烟气排热计算为:

$$Q_{GE,s,t} = F_{GE,s,t} \cdot \eta_{GE,th,s,t}, \quad (14)$$

$$\eta_{GE,th,s,t} = b_1 \cdot f_{GE,s,t}^2 + b_2 \cdot f_{GE,s,t} + b_3. \quad (15)$$

其中: $Q_{GE,s,t}$ 表示 GE 在 s 季节 t 时刻可回收的烟气余热; $\eta_{GE,th,s,t}$ 表示 GE 的热效率; b_1 、 b_2 、 b_3 是 GE 的热效率曲线系数 ($b_1, 0.134; b_2, -0.299; b_3, 0.509$)。

1.2.2 余热回收系统

HRSG 回收 GE 的高温余热产生高压蒸汽, 其回

收效率高且稳定, 其计算如下:

$$Q_{HRSG,s,t} = Q_{GT,s,t} \cdot \eta_{HRSG}, \quad (16)$$

$$Q_{HRSG,s,t} \leq R_{HRSG}^Q. \quad (17)$$

其中: $Q_{HRSG,s,t}$ 表示 s 季节 t 时刻 HRSG 回收的蒸汽热量; $\eta_{HRSG,s,t}$ 表示 HRSG 的热效率。

1.2.3 光伏系统

本文中采取 PV 系统功率与太阳辐射量和环境温度成非线性数学模型^[19], 其计算为:

$$E_{PV,s,t} = N_{PV} \cdot R_{PV}^E \cdot \frac{W_{s,t}}{W_{stan}} \cdot (1 + Kt \cdot (T_{PV,s,t} - Ta)), \quad (18)$$

其中, $E_{PV,s,t}$ 表示 PV 在 s 季节 t 时刻的输出功率, N_{PV} 代表需要优化的安装数量, R_{PV}^E 表示标准测试条件 ($W_{stan}, 1\,000\text{ W/m}^2; Ta, 25\text{ }^\circ\text{C}$) 下的最大发电功率, $W_{s,t}$ 为实际辐照数值, Kt 是电池组件的功率温度系数 ($Kt, -0.003\,9$), $T_{PV,s,t}$ 为电池温度。

1.2.4 风力发电机组

本文中采取简化的 WP 机组功率预测模型, 拟合指定 WP 机组的风速-功率曲线, 机组的出力与来流风速成非线性数学模型^[20], 其计算为:

$$E_{WP,s,t} = \begin{cases} \text{num}_{WP} \cdot 0, v_{s,t} < v^{in}, v_{s,t} > v^{out}, \\ \text{num}_{WP} \cdot (c_1 \cdot v_{s,t}^3 + c_2 \cdot v_{s,t}^2 + c_3 \cdot v_{s,t} + c_4), \\ v^{in} \leq v_{s,t} < v^{rated}, \\ \text{num}_{WP} \cdot R_{WP}^E, v^{rated} \leq v_{s,t} \leq v^{out}. \end{cases} \quad (19)$$

其中: $E_{WP,s,t}$ 为 WP 在 s 季节 t 时刻的出力; $v_{s,t}$ 为来流风速, v^{in} 为切入风速, v^{out} 为切出风速, v^{rated} 为额定风速; num_{WP} 是整数变量, 表示 WP 需要配置的台数; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 分别表示 WP 的风速-功率曲线系数 ($c_1, -0.010\,6; c_2, 0.317\,3; c_3, -2.034; c_4, 3.853$); R_{WP}^E 是额定功率。

1.2.5 储能系统

EST 与 QST 作为能量存储设备, 储能与放能不能同时发生, 且同一运行时刻储电与买电不能同时发生^[21]。其计算如下:

$$E_{EST,s,t} = E_{EST,s,t-1} + E_{EP-EST,s,t} - E_{EG-EST,s,t} - E_{ELS-EST,s,t}, \quad (20)$$

$$Q_{QST,s,t} = Q_{QST,s,t-1} + Q_{QP-QST,s,t} - Q_{QG-QST,s,t} - Q_{QLS-QST,s,t}, \quad (21)$$

其中, $E_{EST,s,t}$ 与 $Q_{QST,s,t}$ 分别表示 s 季节 t 时刻的 EST 储电量与 QST 储热量, $E_{EP-EST,s,t}$ 与 $Q_{QP-QST,s,t}$ 表示充电量与蓄热量, $E_{EG-EST,s,t}$ 与 $Q_{QG-QST,s,t}$ 表示放电量与放热量, $E_{ELS-EST,s,t}$ 与 $Q_{QLS-QST,s,t}$ 表示 EST 电量损耗与 QST

热量损耗。

1.2.6 锅炉、电制冷机组

本文中辅助联供设备锅炉、电空调制冷机组均采用固定能效比的数学模型,即机组的能量输入乘以相应的能效系数等于产能输出,运行时刻机组的产能输出不能超过额定容量的配置。

1.2.7 吸收式制冷机组

ABS 是 RCCHP 热能梯级利用的重要技术配置,本文中选取二阶非线性数学公式拟合吸收式制冷机模型,其计算为:

$$C_{ABS,s,t} = Q_{ABS,s,t} \cdot \eta_{ABS,s,t}, \quad (22)$$

$$\eta_{ABS,el,s,t} = d_2 \cdot f_{ABS,s,t}^2 + d_1 \cdot f_{ABS,s,t} + d_3, \quad (23)$$

$$\lambda^{CUT-ABS} \cdot R_{ABS}^C \leq C_{ABS,s,t} \leq R_{ABS}^C, \quad (24)$$

其中, $C_{ABS,s,t}$ 表示 ABS 在 s 季节 t 时刻的制冷量, $Q_{ABS,s,t}$ 表示 ABS 的供汽热耗, $\eta_{ABS,s,t}$ 表示 ABS 的制冷效率, $f_{ABS,s,t}$ 是制冷量与配置容量的比值, d_1 、 d_2 、 d_3 是 ABS 制冷效率曲线系数, $\lambda^{CUT-ABS}$ 表示切出系数。

1.3 能量平衡约束

RCCHP 系统的能量供应平衡指总能量输出不能小于用户负荷,能量平衡约束具体计算公式为:

$$C_{ABS,s,t} + C_{EC,s,t} \geq L_{s,t}^C, \quad (25)$$

$$Q_{HRSG,s,t} + Q_{EB,s,t} + Q_{QG-QST,s,t} \geq Q_{ABS,s,t} + Q_{QP-QST,s,t} + L_{s,t}^Q, \quad (26)$$

$$\sum E_{EPU} + E_{PV,s,t} + E_{WP,s,t} + E_{G_{EST},s,t} + E_{buy,s,t} = E_{EC,s,t} + E_{EB,s,t} + E_{QST,s,t} + EL_{s,t} + EP_{EST,s,t}, \quad (27)$$

其中, $CL_{s,t}$ 表示 s 季节 t 时刻的冷负荷, $L_{s,t}^Q$ 表示 s 季节 t 时刻的热负荷, $L_{s,t}^C$ 表示 s 季节 t 时刻的电负荷。

由于风电、光电、燃气发电的不同上网价格,本文中设置分价上网模型,具体计算为:

$$E_{EPS_{c,s,t}} + E_{EPU_{c,s,t}} = \sum_{c,s,t} E_{c,s,t}, \quad (28)$$

$$E_{buy,s,t} \cdot E_{EPS_{s,t}} = 0, \quad (29)$$

式中, $E_{buy,s,t}$ 与 $E_{sale,s,t}$ 表示 s 季节 t 时刻的买电量以及上网总卖电量; $E_{EPS_{c,s,t}}$ 表示不同发电技术 c 的对应时刻上网电量, $E_{EPU_{c,s,t}}$ 表示除去上网卖电量剩下的系统产电量。

2 案例分析与优化结果

针对上述提出的 RCCHP 系统数学模型,本文中以上海市某综合区域为案例,对系统的最优技术组合

及运行策略进行分析,并提出 4 种分布式多联供系统的运行情景,分别为:

- 1) 情景一: CCHP 系统并网运行模式,无可再生能源配置,不可上网售电,无储能;
- 2) 情景二: RCCHP 系统并网运行模式,耦合可再生能源技术,不可上网售电,有储能;
- 3) 情景三: RCCHP 系统并网与上网联合运行模式,余电分价上网,有储能;
- 4) 情景四: 燃气价格下降 50% 的 RCCHP 系统运行模式。

RCCHP 系统在不同情景下的夏、冬季节电能逐时平衡情况如图 2~4 所示。图中负值表示系统设备电耗。RCCHP 系统在 4 种运行情景下的净现值与内部收益率如图 5 所示,4 种运行情景下的年耗气量与二氧化碳减排百分数如图 6 所示。

其中模型的条件: 目标区域的实时电价、上网电价、燃气价格见文献[22],相关技术、经济参数如表 1 所示。

表 1 SP 系统、RCCHP 系统的相关技术、经济参数^[23-24]

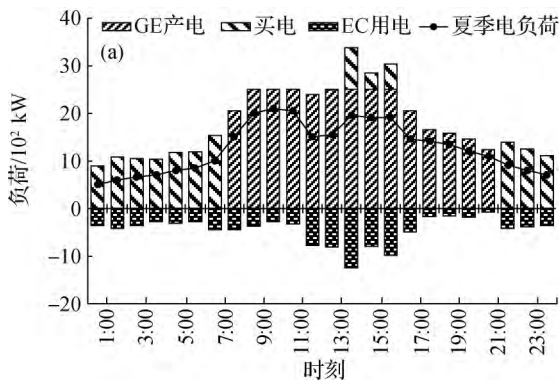
Tab 1 Technical and economic parameters of SP system and RCCHP system^[23-24]

系统类别	技术设备	参数	符号	数值	设备的价格/(元·kW ⁻¹)
SP	公共电网	发电效率	$\eta_{PR,el}$	0.35	
		传输效率	$\eta_{PR,trs}$	0.92	
	燃气锅炉 电制冷空调	供热效率	$\eta_{BOIL,th}$	0.88	370
		制冷效率	$\eta_{EC,el}$	3.50	1 512
RCCHP	燃气内燃机	发电效率	$\eta_{GE,el,s,t}$	0.35	
		供热效率	$\eta_{GE,th,s,t}$	0.47	4 000
	余热锅炉	供汽效率	$\eta_{HRSG,s,t}$	0.90	486
	电锅炉	供热效率	$\eta_{EBOIL,th}$	0.90	350
	吸收式制冷	制冷效率	$\eta_{ABS,s,t}$	1.20	1 944
	换热器	换热效率	$\eta_{HEX,s,t}$	0.92	300
	电制冷空调	制冷效率	$\eta_{EC,s,t}$	3.50	1 512
	蓄电池	损耗系数	η_{EST}	0.10	4 000
储热水箱	损耗系数	η_{QST}	0.10	200	

2.1 情景一

情景一的夏、冬季日逐时电能运行情况见图 2。由图 2(a)可知,夏季夜晚区域电负荷全由电网购入,同时使用电制冷空调满足区域冷负荷,这是因为夜间电价和负荷较低,若使用 CCHP 系统其负载与运行

效率低,经济效益不佳.而白天电、冷负荷较高,采用



看,图6中情景一系统碳减排率为20.596%,年燃气

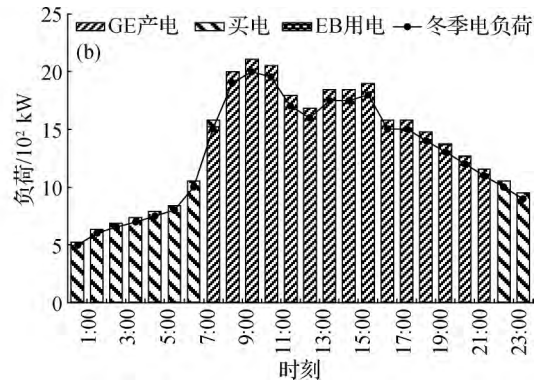


图2 情景一夏(a)、冬(b)季典型日逐时电能组合

Fig 2 Hourly electricity combination for a typical summer(a) and winter(b) day of scenario one

内燃机供应电负荷能够使机组具有较大的负载出力,运行效率较高,且白天电价处在高位,使用余热回收的吸收式制冷可以极大地降低运行费用.14:00—16:00是一天内电、冷负荷最高点,内燃机及吸收式制冷不能完全覆盖总负荷需求,需要由电网购入不足的电能,这时如果以最大电负荷配置内燃机发电容量,不仅会增大初始投资费用,还会使其大部分时刻运行在低负载出力水平,造成系统效率低下,运行费用高.

耗量相对于情景三、四较低,这是因为电网日电碳排放量高,清洁能源的低耗量以及较高的电网依赖性同时限制了系统的碳减排能力,环境效益表现一般.

2.2 情景二

情景二的夏冬季日逐时电能运行情况如图3所示,其电能运行策略与情景一具有很大的差异.图3(a)中夏季夜间除了从电网低价购电满足电负荷及供冷电负荷,风电出力也承担了部分夜间负荷供应.白天多能协调供应电负荷,内燃机仍保持稳定运行且具有较高的负荷出力水平.与情景一不同的是,白天风电出力使得系统完全不需要从电网买电就能满足总电负荷.一天中18:00—21:00系统电负荷较低时,多余的内燃机与风电出力能够储存在蓄电池中调节系统供应,使其运行更具有灵活性.

图2(b)中情景一冬季夜间仍采用电网低价购电取代的运行策略,白天电价、热负荷较高,内燃机出力能够完全覆盖热负荷需求,同时灵活调节电负荷供应.总体上情景一的电负荷供应方式较简单,内燃机出力约占总电负荷的66.82%,剩余部分由电网购入.从图5中可看出情景一的最优 I_{NPV} 较低,这是因为情景一是单一的联供运行模式,系统在经济性目标的优化下依然保持较高的电网依赖度,相较于分产系统节省的运行费用较少.而情景一简单的系统结构产生较低的初始投资费用,因此在优化策略的运行下系统的相对收益使得其内部收益率 I_{IRR} 较高.从环境效益角度来

图3(b)中运行策略与夏季最大的不同在于冬季风资源较夏季明显增大,19:00—21:00系统完全不买电,依靠风电出力与部分蓄电池放电满足电负荷,同时内燃机与电锅炉配合供应热负荷.夜间的22:00至次日7:00采用电网购电与风电出力的互补运行模式,风电出力极大减少了夜间购电量,降低了电网依赖度.冬季

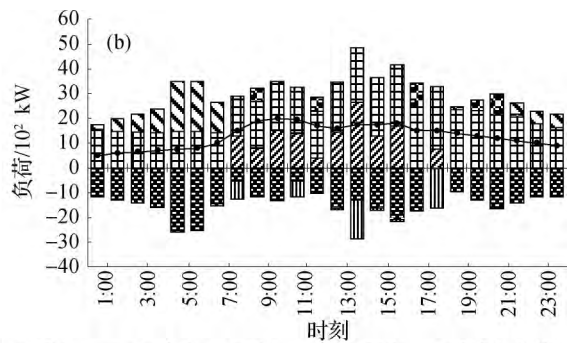
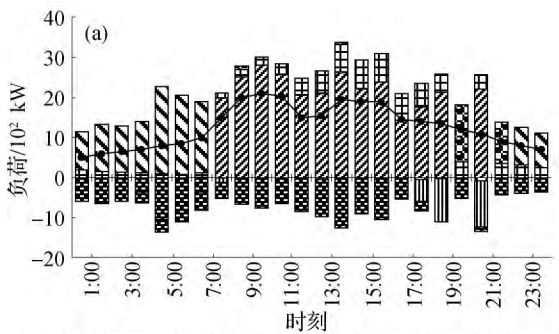


图3 情景二夏(a)、冬(b)季典型日逐时电能组合

Fig 3 Hourly electricity combination for a typical summer(a) and winter(b) day of scenario two

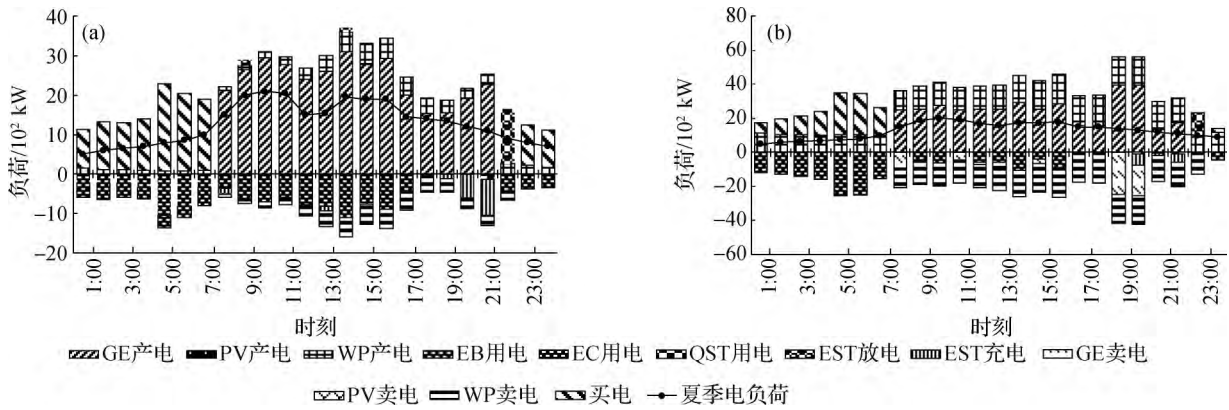


图 4 情景三夏(a)、冬(b)季典型日逐时电能组合

Fig 4 Hourly electricity combination for a typical summer(a) and winter(b) day of scenario three

白天中 8:00—16:00 内燃机出力缩减,大量风电出力配合蓄电池联合供应平衡了系统的电能需求,电网购电为 0.这是因为目标函数中运行费用同时计算了碳税支出,低排放风电出力相比于内燃机更具有经济优势.而情景二中基本没有光伏系统的配置是因为初始成本较低的风电机组比光伏系统更具配置优势,其单位功率初始投资造价是限制优化系统选择光伏系统的主要因素.

情景二供能方式的灵活性与稳定性要明显优于情景一,从图 6 中可看出其二氧化碳减排率约为情景一的 2 倍,达 38.93%,年天然气耗量 18.054 GW·h 也是所有情景中最低的,可再生风电出力明显提高了系统的环境效益及一次能源节约量.然而,图 5 中情景二的净现值与内部收益率都最低,经济效益不甚理想,说明可再生风电带来的运行费用收益及碳减排税收增益不足以平衡其高昂的初始投资费用,风电机组的单位功率成本较内燃机大,单位成本是阻碍分布式多联供系统引入可再生清洁技术的主要原因之一.

2.3 情景三

图 4 是情景三的夏冬季日逐时电能调度运行情况,与情景一、二类似,夜间仍采用低价购电满足区域电负荷与冷、热负荷的运行模式.但在白天其运行策略与情景一、二差异较大的原因是系统多余的电能能够分价上网.由于目标函数即它的经济性最优,系统选择将上网电价高的可再生能源技术所产生的电能发电上网,其中发电上网价格最高的风电上网电量最大,而上网电价较低的内燃机则增大出力用以满足系统电能需求,显然这样的运行策略抵消了部分系统运行费用,提高了经济性,从图 5 中可看出其净现值较情景二提高近 1 倍.但较多地配置初投资较高的可再生

能源技术,其内部收益率并不高,与净现值相比改善较少.同时从图 6 中可见,过多地使用内燃机使得其年耗气量增大,二氧化碳减排率降低,使得其系统环境效益低于情景二.

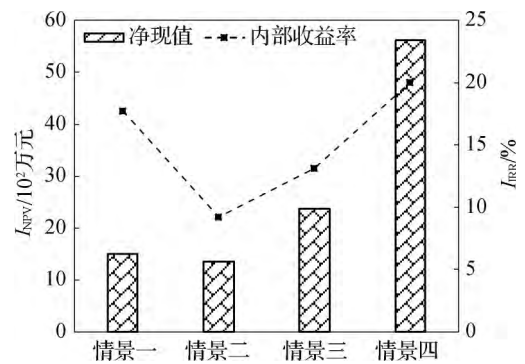


图 5 RCCHP 系统 4 种运行情景下的 I_{NPV} 与 I_{IRR}
Fig 5 I_{NPV} and I_{IRR} in four operating scenarios of RCCHP system

2.4 情景四

如图 5 所示,当燃气价格下降 50%时,RCCHP 系统的经济效益显著提高,其净现值相较于情景三提高了 143.48%,同时内部收益率高达 20%,这说明燃料价格对系统的经济效益影响很大.另外,燃气价格优势不仅导致系统降低了运行费用,内燃机出力上网量增加也是净现值增大的主要原因之一.但过多地使用内燃机会降低清洁能源的使用,同时增大耗气量,从图 6 中可看出,情景四二氧化碳减排率为 20.1%,与情景一相当,数值较低.因此,追求较高经济效益的同时环境效益环境效益也会相对减小.

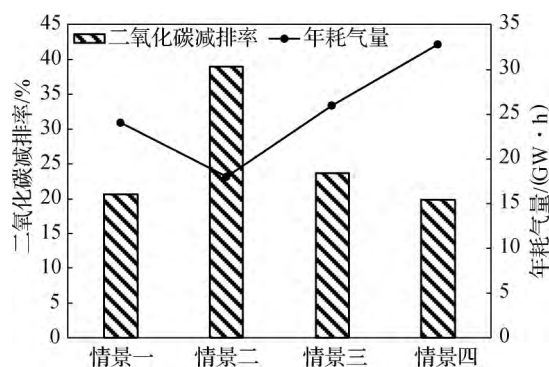


图 6 RCCHP 系统 4 种运行情景下的年耗气量与二氧化碳减排率

Fig. 6 Annual gas consumption and the percentage of CO₂ emission reduction in four operating scenarios of RCCHP system

3 结 论

本文中基于 GAMS 软件对区域能源系统建立了 RCCHP 的模型,同时使用上海市某综合区域为案例,分析其在不同情境下的设备组成、运行策略、经济效益与环境效益,以及不同能源政策对 RCCHP 系统的影响,得到以下结论:

1) 前 3 个情景说明区域能源系统的经济性最佳运行策略为:夜间能源负荷与电价较低时由电网购电满足电负荷,同时使用电驱动设备满足冷、热负荷;白天能源负荷与电价较高时使用 CCHP 或 RCCHP 系统供能,仅在负荷高峰期少量不足电能由电网购入。

2) 单一 CCHP 系统可使得本案例目标区域年碳排放降低 20.596%,内部收益率接近 20%,但仍有接近 40%的电负荷需要依赖电网供应。

3) 耦合可再生能源技术的 RCCHP 系统较 CCHP 系统极大地降低了系统对电网的依赖度,减少耗气量,同时极大地提高了系统的环境性,但其较高的初始投资费用限制了其经济性与实用性。

4) 可再生能源技术的补贴上网电价可以显著提高 RCCHP 系统的经济效益,但过多地使用可再生能源技术发电上网会增加内燃机的使用,使得耗气量增加,环境性降低。

5) 天然气价格是影响 RCCHP 系统运行策略、经济性与环境性的重要因素,较低的天然气价格虽然可显著降低系统的运行费用,提高经济性,但会增大系统耗气量,同时降低可再生能源技术的使用,导致环境性不佳。

参考文献:

- [1] POULLIKKAS A. Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 11(7): 30-56.
- [2] ZHENG X Y, QIUY W, ZHANG X Y. Optimization based planning of urban energy systems; retrofitting a Chinese industrial park as a case study[J]. *Energy*, 2017, 139(7): 31-41.
- [3] BIEZMA M V, SAN CRISTÓBAL J R. Investment criteria for the selection of cogeneration plants; a state of the art review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 26(12): 583-588.
- [4] MORAN A, MAGO P J, CHAMRA L M. Thermoeconomic modeling of micro-CHP (micro-cooling heating and power) for small commercial applications[J]. *International Journal of Energy Research*, 2012, 32(9): 808-823.
- [5] 孔祥强, 李华, 曲磊, 等. 楼宇冷热电联供系统节能性研究[J]. *能源工程*, 2010(2): 62-65.
- [6] CARDONA E, PIACENTINO A. Matching economical, energetic, and environmental benefits; an analysis for hybrid CCHP-heat pump systems[J]. *Energy*, 2006, 31(4): 490-515.
- [7] 吴杰康, 熊焰, 风, 水, 气互补发电模型的建立及求解[J]. *电网技术*, 2014, 38(3): 603-609.
- [8] LOZANO M A, CARVALHO M, SERRA L M. Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems[J]. *Energy*, 2009, 34: 2001-2008.
- [9] 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.
- [10] REN H B, GAO W J. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(5): 1001-1014.
- [11] WANG X S, YANG C, HUANG M M, et al. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating and power system driven by solar energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89(9): 289-297.
- [12] CAO J, LIU F. Simulation and optimization of the performance in the air-conditioning season of a BCHP system in China[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 40(3): 185-192.
- [13] 付林, 李辉. 天然气热电冷联供技术及应用[M]. 北京: 中国工业出版社, 2008: 12-13.
- [14] MAGO P J, CHAMRA L M. Analysis and optimization of CCHP system based on energy, economical, and environmental consideration[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(10): 1099-1106.
- [15] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度[J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 8-14.
- [16] KONG X Q, WANG R Z, LI Y, et al. Optimal operation

- of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3): 530-538.
- [17] LOZANO M A, RAMOS J C, CARVALHO M, et al. Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2013, 41(10): 1063-1075.
- [18] 刘豪, 朱彤, 张涛. 上海地区不同类型建筑的 CCHP-ORC 系统评价与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12): 3198-3205.
- [19] LIU M, SHI Y, FANG F. A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers[J]. *Applied Energy*, 2012, 95(11): 164-173.
- [20] 霍小亮, 周伟国, 阮应君. 楼宇三联供系统设备容量与运行策略集成优化[J]. *天然气工业*, 2009(8): 119-122.
- [21] GÜLEN S C. Principal engineer gas turbine combined cycle fast start; the physics behind the concept[J]. *Power Engineering*, 2013, 6(4): 1-3.
- [22] 金红光, 郑丹星, 徐建忠. 分布式冷热电联产系统装置及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 41-42.
- [23] 熊焰, 吴杰康, 王强, 等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [24] ZHENG X Y, WU G C, QIU Y W. A MINLP multi-objective optimization model for operational planning of a case study CCHP system in urban China [J]. *Apply Energy*, 2018, 210: 1126-1140.

The optimal design and operation strategy for combined cooling, heating and power system coupled with renewable energies

QIU Yuwei, ZHENG Xuyue, ZHAN Xiangyan,
ZHU Xingyi, MENG Chao, ZHAO Yingru*

(College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: To evaluate the economic and environmental performance of the combined cooling, heating and power (CCHP) system coupled with wind power and photovoltaic cell, a mixed integer nonlinear model is formulated in GAMS to determine the optimal technology combination, capacity and operation strategy taking the separated production (SP) system as reference. In this paper, net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) are introduced as economic indicators, and CO₂ emission reduction rate (CER) as the environmental indicator, to perform multi-objective analysis. The model is applied to a comprehensive area in Shanghai by four different scenarios to figure out the contribution made by renewable energy to the CCHP system. The results illustrate that a combination of electricity purchased from the grid, generated by wind turbines for electric load balance at night and CCHP system coupled with renewable energy operating in daytime, is capable of eliminating the fluctuation of renewable energy and meeting power consumption. Compared with SP system, CCHP system coupled with renewable energies (RCCHP) system is a potentially interesting option to reduce grid dependence and gas fuel consumption and improve environment benefit. However, high initial investment costs of RCCHP system limit its economic performance and practicality.

Keywords: mathematical optimization; renewable energy; wind power; photovoltaic cell