

太阳能冷热电联供系统的策略评估和优化配置

吴红斌, 王东旭, 刘星月

(安徽省新能源利用与节能重点实验室, 合肥工业大学, 安徽省合肥市 230009)

摘要: 冷热电联供(CCHP)系统相比于分供(SP)系统而言,具有能效高、污染少,可以实现能源的梯级利用等特点,成为未来分布式供能系统的发展趋势。文中将太阳能与 CCHP 系统相结合,设计了光伏光热一体化联供(PVST-CCHP)系统和太阳能综合利用联供(PVCU-CCHP)系统,并构建了以热定电和以电定热两种运行控制策略。基于全寿命周期法,建立了能源、环境、经济和综合评估的多指标评价体系。以 SP 系统作为参考,利用算例对 PVST-CCHP 和 PVCU-CCHP 系统的运行策略进行了评估。在此基础上,采用粒子群优化算法对最优联供系统的机组台数和燃气轮机容量进行了优化配置,实现了联供系统的综合效益最大化,为太阳能的综合应用提供了参考。

关键词: 太阳能; 冷热电联供系统; 全寿命周期法; 策略评估; 优化配置

0 引言

冷热电联供(combined cooling heating and power,CCHP)系统^[1-4]相比于传统分供(separation production,SP)系统,具有能效高、污染少的优点,可以实现能源的梯级利用等特点,成为未来分布式供能系统的发展趋势。太阳能、风能等可再生能源的大力推广已成为解决化石能源危机和环境污染的有效途径^[5]。将太阳能并入 CCHP 系统,有利于社会的可持续发展,实现绿色经济,因此太阳能与 CCHP 系统相结合,已经成为当前研究的热点^[6-7]。

在太阳能与 CCHP 系统相结合过程中,联供系统的经济评价、运行策略和优化设计是重点研究的内容。文献[8]从经济、能源和环境三方面建立了优化目标,对 CCHP 系统不同运行模式之间的调度策略进行了研究。文献[9]介绍了两种与可再生能源相结合的 CCHP 系统:一种是太阳能热动力 CCHP 系统,另一种是太阳能燃料电池可再生 CCHP 系统。文献[10]设计了一种集成太阳能利用和内燃机驱动传统联供系统的冷热电三联产系统,基于生命周期分析法,对系统的设备容量和运行策略进行了优化;文献[11]设计了一种以太阳能作为驱动能源,结合郎肯循环和喷射式制冷循环的 CCHP 系统,利用遗传算法对系统进行了优化。

本文将太阳能和 CCHP 系统相结合,设计了两

种联供系统:光伏光热一体化联供(photovoltaic solar-thermal integration CCHP,PVST-CCHP)系统和太阳能综合利用联供(comprehensive utilization of photovoltaic/thermal solar energy,PVCU-CCHP)系统,并构建了以热定电和以电定热两种运行控制策略。基于全寿命周期法,建立了能源、环境、经济和综合评估的多指标评价体系。以 SP 系统作为参考,利用算例对 PVST-CCHP 和 PVCU-CCHP 系统的运行策略进行了评估。在此基础上,采用粒子群优化算法对最优联供系统的机组台数和燃气轮机容量进行了优化配置,以实现联供系统的综合效益最大化。

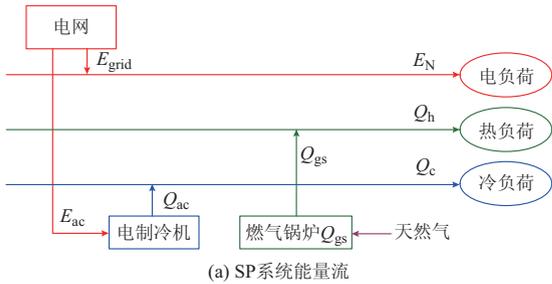
1 冷热电系统的能量流图

SP 系统、PVST-CCHP 和 PVCU-CCHP 系统的能量流如图 1 所示。

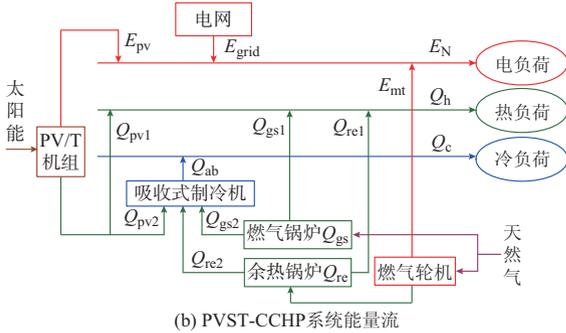
在 SP 系统中,电负荷(E_N)由电网(E_{grid})提供;冷负荷(Q_c)由电制冷机提供,电制冷机消耗电能 E_{ac} 制冷,制冷量为 Q_{ac} ;热负荷(Q_h)由燃气锅炉提供。

而两种联供系统的区别在于太阳能利用方式不同,PVST-CCHP 系统设置水冷式光伏光热一体化(photovoltaic solar-thermal integration,PV/T)机组,既可以通过表面的电池板产生电能,也可以通过电池板底部的集热器吸收热能。PVCU-CCHP 系统分别设置了太阳能光伏发电机组和太阳能集热器,前者收集太阳能发电,后者收集太阳能产热。其中,PV/T 机组、光伏发电机组和集热器都以太阳能

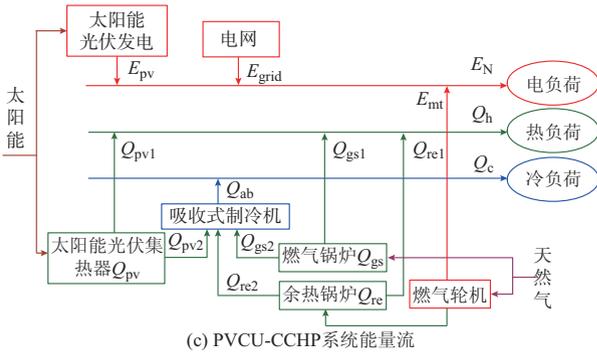
为原动力,分别为系统提供电能 E_{pv} 和热能 Q_{pv} ,其中 Q_{pv1} 直接供给热负荷, Q_{pv2} 供给吸收式制冷机用于制冷。燃气轮机以天然气作为燃料,将化学能转化为电能 E_{mt} ,其高温烟气所携带的热能 Q_{re} 由余热锅炉回收为系统提供热能;燃气锅炉作为热能补充机组仍以天然气为原料给系统提供热能 Q_{gs} 。它们所制的一部分热能 Q_{re1} 和 Q_{gs1} 提供给系统的热负荷需求,另一部分 Q_{re2} 和 Q_{gs2} 提供给吸收式制冷机制冷。吸收式制冷机的驱动热能由 Q_{pv2} 、 Q_{re2} 和 Q_{gs2} 三部分共同提供,制冷量用 Q_{ab} 表示。



(a) SP系统能量流



(b) PVST-CCHP系统能量流



(c) PVCU-CCHP系统能量流

图1 冷热电系统的能量流

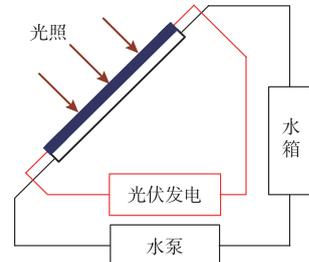
Fig.1 Energy of cooling heating and power system

2 PV/T 机组的数学模型

本文采用的是水冷式 PV/T 组件^[12],其系统结构如图2所示。

工作原理为:水通过太阳能光伏/集热板时吸收太阳能得到较高温度的热水可用于供暖或驱动制冷系统;同时,设置在光伏/集热板表面的光伏电池通过蓄电池和逆变控制器等提供电能。这种将太阳能

光伏组件、集热组件集成为一体的结构设计,可以提高能源整体利用效率,并大幅度降低系统成本和安装面积。


 图2 水冷式 PV/T 系统
Fig.2 Water-cooled PV/T system

众多研究表明,多晶硅电池的电效率 η_{el} 随着工作温度 t_p 的降低而升高,工作温度每降低 1°C ,光伏电池光电转换效率平均可提高 $0.4\% \sim 0.5\%$,表示为:

$$\eta_{el} = 0.097 - 0.00045(t_p - 25) \quad (1)$$

则光伏电池输出电功率为:

$$P_{pv} = A_{pv} \eta_{el} I \quad (2)$$

式中: P_{pv} 为 PV/T 机组发出的功率; A_{pv} 为机组的光照有效面积; η_{el} 为光伏电池的发电效率; I 为太阳辐射强度。

PV/T 集热板的集热效率 η_{th} 计算如下:

$$\eta_{th} = \alpha - \tau_{pv} \eta_{el} - \frac{U_L(t_p - t_a)}{I} \quad (3)$$

式中: α 为 PV/T 板表面的吸收率,取为 0.78; τ_{pv} 为光伏电池的吸收率,一般取 1.0; t_a 为环境温度; U_L 为集热板的损失系数,由对流损失因子 h_c 和辐射因子 h_r 组成,

$$U_L = h_c + h_r \quad (4)$$

$$h_c = 2.8 + 3.0u_w \quad (5)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (t_p^2 + t_a^2)(t_p + t_a) \quad (6)$$

u_w 为环境风速; ε 为光伏组件发射率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数。

集热板获得的热流量为:

$$Q_{pv} = A_{pv} \eta_{th} I \quad (7)$$

3 计及全寿命周期的评价指标

除考虑一次能源消耗量和当量 CO_2 减排量外,本文还以全寿命周期成本^[13]为目标,构建了多目标评价体系,全寿命周期采用对应的等年值。此外,为了评价 SP 和 CCHP 系统的优劣,还定义了 4 个相对指标。

1) 能源指标:一次能源消耗量

一次能源消耗量 (Y_{PEC}) 是指系统在一年内购买

的电量和消耗的天然气燃料量统一转化为标准一次能源,表示为:

$$Y_{\text{PEC}} = \sum_{k=1}^{8760} \frac{E_{\text{grid}k}}{\eta_{\text{gen}}} \sigma_e + F_{\text{mk}} \sigma_f \quad (8)$$

式中: $E_{\text{grid}k}$ 为时段 k 从电网购买的电量; F_{mk} 为时段 k 系统消耗的天然气燃料量; η_{gen} 为火电厂的发电效率; σ_e 和 σ_f 分别为购买每千瓦时能量时消耗的煤炭量和天然气所对应的一次能源转换系数; $k=1, 2, \dots, 8760$,代表一年有8760h。

定义1:一次能源的节约率(η_{PEC})

$$\eta_{\text{PEC}} = \frac{Y_{\text{PEC-SP}} - Y_{\text{PEC-CCHP}}}{Y_{\text{PEC-SP}}} \quad (9)$$

式中: $Y_{\text{PEC-SP}}$ 和 $Y_{\text{PEC-CCHP}}$ 分别为SP和CCHP系统一年内的二次能源消耗量。

2)环境指标:当量 CO_2 排放量

当量 CO_2 排放量(Y_{CDE})是将各种气体对温室效应在一年内的影响等效为等量 CO_2 的影响,各种气体的当量 CO_2 转换系数见附录A表A1。 Y_{CDE} 计算如下:

$$Y_{\text{CDE}} = \sum_{k=1}^{8760} \frac{E_{\text{grid}k}}{\eta_{\text{gen}}} \mu_e + F_{\text{mk}} \mu_f \quad (10)$$

式中: μ_e 和 μ_f 分别为每千瓦时能量的煤炭量和天然气所对应的 CO_2 的转换系数。

定义2:当量 CO_2 的减排率(η_{CDE})

$$\eta_{\text{CDE}} = \frac{Y_{\text{CDE-SP}} - Y_{\text{CDE-CCHP}}}{Y_{\text{CDE-SP}}} \quad (11)$$

式中: $Y_{\text{CDE-SP}}$ 和 $Y_{\text{CDE-CCHP}}$ 分别为SP和CCHP系统一年内的当量 CO_2 排放量。

3)经济指标:全寿命周期成本

全寿命周期成本(Y_{COST})包括电力和天然气的购买成本(C_{CH})、当量 CO_2 量排放的惩罚成本(C_{PUN})、运行维护成本(C_{OM})和安装成本(C_{DC}),其中 C_{CH} , C_{PUN} , C_{OM} 已经是对应的年费用,而安装成本是一次性投资,通过各出力机组的寿命和银行利率转换为等年值费用:

$$Y_{\text{COST}} = C_{\text{CH}} + C_{\text{PUN}} + C_{\text{OM}} + C_{\text{DC}} \quad (12)$$

$$C_{\text{CH}} = \sum_{k=1}^{8760} E_{\text{grid}k} C_e + F_{\text{mk}} C_f \quad (13)$$

$$C_{\text{PUN}} = \sum_{k=1}^{8760} \left(\frac{E_{\text{grid}k}}{\eta_{\text{gen}}} \mu_e + F_{\text{mk}} \mu_f \right) C_c \quad (14)$$

$$C_{\text{OM}} = \sum_{k=1}^{8760} \sum_{i=1}^N C_{\text{omi}} P_{ik} \quad (15)$$

$$C_{\text{DC}} = \sum_{k=1}^{8760} \sum_{i=1}^N D_i P_{ik} = \sum_{k=1}^{8760} \sum_{i=1}^N O_i \frac{d(1+d)^{l_i}}{(1+d)^{l_i} - 1} P_{ik} \quad (16)$$

式中: C_e 和 C_f 分别为系统从电网购买电力的价格和燃气的价格; C_c 为 CO_2 排放税; C_{omi} 为出力单元 i 单位功率的运行维护系数; P_{ik} 为出力单元 i 时段 k 发出的功率; D_i 为各个出力单元发出每千瓦功率的安装成本; O_i 为各个出力单元单位容量安装成本; d 为利率,取8%; l_i 为各个出力单元寿命; $i=1, 2, \dots, N$,其中 N 为系统的出力单元数。

定义3:全寿命周期成本节约率(η_{COST})

$$\eta_{\text{COST}} = \frac{Y_{\text{COST-SP}} - Y_{\text{COST-CCHP}}}{Y_{\text{COST-SP}}} \quad (17)$$

式中: $Y_{\text{COST-SP}}$ 和 $Y_{\text{COST-CCHP}}$ 分别为SP和CCHP系统一年内的全寿命周期成本。

4)综合评估指标

本文构建了基于能源、环境和经济性三个评价准则的综合性能评价指标(Y_{IPC}),即

$$Y_{\text{IPC}} = \omega_1 Y_{\text{PEC}} + \omega_2 Y_{\text{CDE}} + \omega_3 Y_{\text{COST}} \quad (18)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为三个评价准则的权重系数,采用判断矩阵法^[14],将经济性指标作为第1级,能源指标作为第2级,环境指标作为第3级,得到权重系数为 $\omega_1=0.2583, \omega_2=0.1047, \omega_3=0.6370$ 。

定义4:综合性能提升率(η_{IPC})

$$\eta_{\text{IPC}} = \frac{Y_{\text{IPC-SP}} - Y_{\text{IPC-CCHP}}}{Y_{\text{IPC-SP}}} \quad (19)$$

式中: $Y_{\text{IPC-SP}}$ 和 $Y_{\text{IPC-CCHP}}$ 分别为SP和CCHP系统的综合性能指标。

4 联供系统的运行策略

燃气轮机的运行策略影响着联供系统性能的优劣,通常情况下,燃气轮机主要有以热定电(ordering power by heating, OPH)和以电定热(ordering heating by power, OHP)^[15]两种策略。因此,本文就PVST-CCHP和PVCU-CCHP两种联供系统,设置以下运行策略。

4.1 PVST-CCHP系统

1)以热定电(PVST-OPH)。PV/T机组产生的热能如果不能满足系统的冷热负荷需求,不足的部分由燃气轮机满足,燃气轮机因此产生的电能和PV/T机组产生的电能共同承担系统的电负荷,不足的电能部分由电网补充。

2)以电定热(PVST-OHP)。PV/T机组产生的电能如果不能满足系统的电负荷需求,由燃气轮机发电补给,燃气轮机因此产生的余热经过余热锅炉收集和PV/T机组产生的热量负责承担系统的冷热负荷需求,不足的热能部分由燃气锅炉补给。

4.2 PVCU-CCHP系统

1)以热定电(PVCU-OPH)。吸收到的太阳能

分别用于太阳能光伏机组发电和太阳能集热器产热,如果太阳能集热器产生的热能不能满足系统的冷热负荷需求,不足的部分由燃气轮机供给,燃气轮机因此产生的电能和太阳能光伏机组发的电能共同承担系统的电负荷,不足的电能部分由电网补给。

2)以电定热(PVCU-OHP)。吸收的太阳能分别用于太阳能光伏机组发电和太阳能集热器制热,如果太阳能光伏机组发的电量不能满足系统的电负荷需求,不足的部分由燃气轮机供给,燃气轮机因此产生的余热由余热锅炉收集,和太阳能集热器产生的热能共同承担系统的冷热负荷,不足的热能部分由燃气锅炉补给。

5 算例系统分析

5.1 算例系统

本文选取某宾馆为研究对象,PV/T 机组、光伏发电机组和集热器都安装在屋顶,屋顶面积为 500 m^2 ,PV/T 机组单台面积为 1 m^2 。以一年为研究区域,时间间隔为 1 h ,即 $8\ 760$ 个时段。假设一年中每日电价不变,算例系统的相关参数见附录 A,系统的经济性分析图例见附录 B。

5.2 CHPP 的策略评估

为了比较两种联供系统的优劣,设 PVST-CCHP 系统中安装 PV/T 机组为 500 台,PVCU-CCHP 系统中光伏发电机组和集热器的安装面积均为 250 m^2 。图 3 所示为 PVST-OPH,PVST-OHP,PVCU-OPH 和 PVCU-OHP 四种运行模式下相比于 SP 系统的评估结果图。

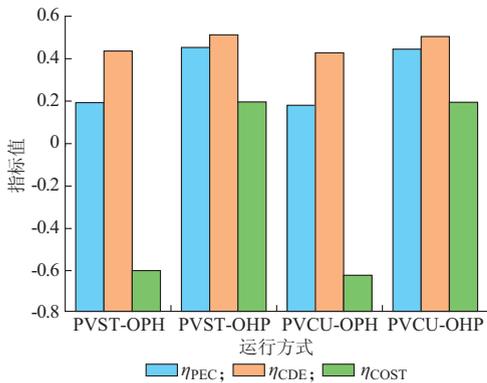


图 3 系统评估
Fig.3 System evaluation

如图 3 所示,此时 η_{PEC} 和 η_{CDE} 指标均为正值,说明四种模式下一次能源消耗量和当量 CO_2 排放量都小于 SP 系统,原因是它们都利用了太阳能清洁能源,可以减少系统的一次能源消耗量和 CO_2 排放

量,其中最优模式为 PVST-OHP,其次为 PVCU-OHP,PVST-OPH 和 PVCU-OPH。对于 η_{COST} 指标,在 PVST-OHP 和 PVCU-OHP 模式下为正值,这说明在这两种模式下经济成本小于 SP 系统,但对比 η_{PEC} 和 η_{CDE} 指标,此时 η_{COST} 的节约程度相对较小。在 PVST-OPH 和 PVCU-OPH 模式下的 η_{COST} 为负值,说明这两种模式下经济成本大于 SP 系统,这是由于系统增加了太阳能发电机组或者光伏光热一体化机组,其安装成本和运行维护费用较高。此时,最优的运行模式仍然是 PVST-OHP,其次为 PVCU-OHP,PVST-OPH 和 PVCU-OPH。综上所述,不论是 Y_{PEC} , Y_{CDE} 还是 Y_{COST} ,其中最优的运行模式为 PVST-OHP,其次分别为 PVCU-OHP,PVST-OPH 和 PVCU-OPH。

图 4 所示为四种运行模式下 η_{IPC} 的评估值。

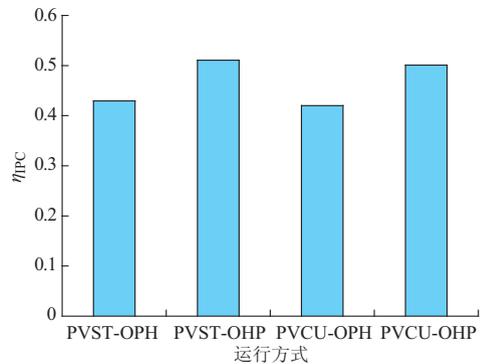


图 4 四种运行方式下 η_{IPC} 评估值
Fig.4 Evaluation values of η_{IPC} under four operation modes

由图 4 可知,在综合评估指标 η_{IPC} 下,最优的运行模式为 PVST-OHP,其次为 PVCU-OHP,PVST-OPH 和 PVCU-OPH。

5.3 最优运行模式下的优化配置

由 5.2 节可得最优运行模式为 PVST-OHP,选取 PV/T 机组的安装台数 S 和燃气轮机的容量 P 为优化变量,分别以能源、环境、经济和综合指标为目标函数,采用粒子群优化算法^[16]对 S 和 P 进行寻优,使联供系统相对于 SP 系统在这四个方面取得最大效益。设 S 最小为 0 ,最大为 500 ; P 最小为 50 kW ,最大为 300 kW 。粒子群优化算法的优化变量设置为两维变量(S, P),前者 S 产生于平均分布在 $(0, 500)$ 的随机整数,后者 P 产生于平均分布在 $(50, 300)$ 的随机整数,算法流程见附录 C。

当以(S, P)为优化变量,分别得到 η_{PEC} , η_{CDE} , η_{COST} 和 η_{IPC} 的优化结果,三维效果如图 5 所示。

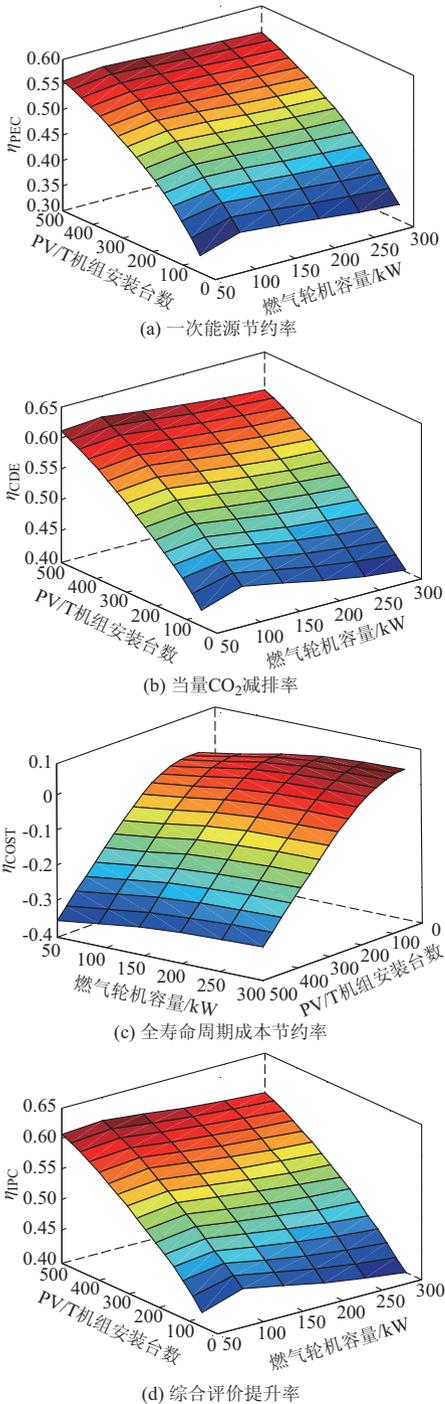


图5 优化配置平面图
Fig.5 Optimal allocation plan

由图5(a)和图5(b)可知, η_{PEC} 和 η_{CDE} 随着 S 的增大而增大, 随着 P 的增大是先增大后减小, 即 η_{PEC} 和 η_{CDE} 随着 PV/T 机组的增加而提升, 随着燃气轮机容量的增大先提升后下降。得到的最优结果为 PV/T 机组 500 台, 燃气轮机容量 100 kW, 此时系统一次能源消耗量和当量 CO₂ 排放量最小。

由图5(c)可知, η_{COST} 随着 S 的增大而减小, 随着 P 的增大而增大。当 P 为最小燃气轮机容量 50 kW 时, 即使 S 取值为 0, η_{COST} 也为负值, 即经济性能劣于 SP 系统, 随着 P 的增大, η_{COST} 也增大, 变为正值, 故最优变量取 (0, 300), 这说明燃气轮机容量的增大可以优化系统的经济性能, 而 PV/T 机组台数的增加会使得联供系统的经济性能变差, 这是由于增加了 PV/T 的安装台数, 就增加了系统的运行维护费用和安装成本。

由图5(d)可知, η_{IPC} 与 η_{PEC} 和 η_{CDE} 相同, 都是随着 S 的增大而增大, 随着 P 的增大是先增大后减小。得到的最优结果为 PV/T 机组 500 台, 燃气轮机容量 100 kW, 此时系统综合性能最优。

6 结语

本文建立了光伏光热一体化和太阳能综合利用的两种 CCHP 系统, 并分别设定了以热定电和以电定热两种运行策略。基于全寿命周期法, 建立了能源、环境、经济和综合评价四个方面的指标体系。以传统分供系统作为参考, 通过算例对联供系统的运行策略进行了评估。在此基础上, 采用粒子群优化算法对最优联供系统的一体化机组安装台数和燃气轮机容量进行了优化配置。可以看出, 光伏光热一体化机组安装台数和燃气轮机的容量是影响系统各方面效益的重要因素, 增加光伏光热一体化机组的安装台数, 可以提高系统的能源、环境和综合效益, 但是系统的经济效益可能会下降。而增加燃气轮机机组容量, 系统经济效益增加, 而能源、环境和综合效益则随着机组容量的变化先增加后减小。研究成果对于太阳能在 CCHP 系统中的应用, 具有一定的参考价值。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 顾伟, 吴志, 王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 177-185.
GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective operation of combined heat and power microgrid considering pollutant emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.
- [2] FUMO N, CHAMRA L M. Analysis of combined cooling, heating, and power systems based on source primary energy consumption[J]. Applied Energy, 2010, 87(6): 2023-2030.
- [3] 郭力, 许东, 王成山, 等. 冷电联供分布式供能系统能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 96-100.
GUO Li, XU Dong, WANG Chengshan, et al. Energy optimization and management of combined cooling and power distributed energy supply system[J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2009, 33(19): 96-100.
- [4] LI H, FU L, GENG K, et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(3): 253-257.
- [5] 丁明, 吴兴龙, 陆巍, 等. 含多个不对称光伏并网系统的配电网三相随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 47-52.
DING Ming, WU Xinglong, LU Wei, et al. Three-phase probabilistic power flow calculation in distribution systems with multiple unsymmetrical grid-connected photovoltaic system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 47-52.
- [6] 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 Energy Thermophysics, 2009, 30(5): 721-724.
- [7] GU Wei, WU Zhi, BO Rui, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating, and power microgrid: a review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54(1): 26-37.
- [8] MAGO P J, HUEFFED A K. Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1628-1636.
- [9] 苏亚欣, 费正定, 杨翔翔. 太阳能冷热电联供分布式能源系统的研究[J]. 能源工程, 2004(5): 24-27.
SU Yaxin, FEI Zhengding, YANG Xiangxiang. Investigation on the distributed energy system for cooling-heating-power combined cycle by solar energy [J]. Energy Engineering, 2004(5): 24-27.
- [10] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87.
JIN Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87.
- [11] WANG J F, DAI Y P, GAO L, et al. A new combined cooling, heating and power system driven by solar energy[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2780-2788.
- [12] 荆树春, 朱群志, 段芮, 等. 联合热泵的光伏光热一体化系统的性能评价[J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 1-4.
JING Shuchun, ZHU Qunzhi, DUAN Rui, et al. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(11): 1-4.
- [13] UDO DE HAES H A, HEIJUNGS R. Life-cycle assessment for energy analysis and management [J]. Applied Energy, 2007, 84(7/8): 817-827.
- [14] 唐巍, 薄博, 丛鹏伟, 等. 含分布式发电接入的农村电网多目标规划[J]. 农业工程学报, 2013, 29(25): 132-137.
TANG Wei, BAO Bo, CONG Pengwei, et al. Multi-objective planning of rural power network incorporating distributed generation [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(25): 132-137.
- [15] 丁明, 包敏, 吴红斌, 等. 复合能源分布式发电系统的机组组合问题[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 46-50.
DING Ming, BAO Min, WU Hongbin, et al. Unit commitment problem in distributed generation system with multiple energy sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 46-50.
- [16] YOSHIDA H, KAWATA K, FUKUYAMA Y, et al. A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.

吴红斌(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:分布式发电微网技术。E-mail: hfwuhongbin@163.com

王东旭(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源的综合利用。E-mail: 13805609396@163.com

刘星月(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向:微网系统的运行与控制。E-mail: liuxingyue0828@163.com

(编辑 章黎)

Strategies Evaluation and Optimal Allocation of Combined Cooling Heating and Power System with Solar

WU Hongbin, WANG Dongxu, LIU Xingyue

(Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Compared with the separate production (SP) system, the combined cooling heating and power (CCHP) system is the development trend of distributed energy system in the future owing to its advantages of higher efficiency, less pollution and cascade utilization of energy. By combining solar energy with CCHP, the photovoltaic solar-thermal integration CCHP (PVST-CCHP) system and the comprehensive utilization of photovoltaic/thermal solar energy (PVCU-CCHP) system are designed. At the same time, two kinds of operation modes are available, i. e., ordering power by heating and ordering heating by power. Based on the life cycle, a multi-indices evaluation system of energy, environment, economy and comprehensive evaluation is established. With the help of case studies, the operation control strategies of PVST-CCHP and PVCU-CCHP system are evaluated through the SP system as a reference. On this basis, the installation quantity of units and the capacity of gas turbines of the optimal CCHP system are obtained with the particle swarm optimization algorithm. As a result, maximization of comprehensive benefits is realized that provides reference to integrated application of solar energy in the CCHP system.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2015AA050104) and National Natural Science Foundation of China (No. 51177036).

Key words: solar; combined cooling heating and power (CCHP) system; life-cycle; strategies evaluation; optimal allocation