

内燃机联产双源系统的敏感性和变工况特性

王锡, 杨勇平, 宋之平, 徐二树

(电站设备状态监测与控制教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Sensitivity & Part-load Performances of Internal Combustion Engine Dual Source System

WANG Xi, YANG Yong-ping, SONG Zhi-ping, XU Er-shu

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University),
Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The dual source air-conditioning system (DSACS) based on distributed energy system (DES) can perform cooling or heating independently. It has the DES's advantages, and can avoid the problem of interconnecting with public power grid because it has only one product. The performance of internal-combustion engine dual-source system was full studied. The sensitivity analysis of DSACS showed that its efficiency is influenced remarkably by the heat pump's coefficient of performance (COP) and the generating efficiency. Then, the DSACS off-design performance was analyzed by utilizing the typical analytical solution of internal combustion engine, and by considering variation of input power of heat pump and the heat source temperature of waste heat lithium bromide water chiller/heater. The DSACS has a better off-design performance compared to the performances of ground source heat pump and direct-fired lithium bromide water chiller/heater. Consequently, DSACS is a worthy and remarkable energy saving system.

KEY WORDS: internal combustion engine; ground source heat pump; lithium bromide water chiller/heater; sensitivity analysis; part-load; energy conservation

摘要: 基于分布式能量系统的双源可逆型空调系统作为一个独立运行的冷热供应系统, 不仅有分布式系统的优点, 而且产品单一可避免电上网的问题。对内燃机联产双源系统进行了深入的分析, 由敏感性分析结果可知, 热泵的循环性能系数(coefficient of performance, COP)和发电效率对双源系统性能影响很大。根据典型内燃机变工况的计算方法和对热泵考虑输入功率的影响, 以及对余热型溴化锂机组考虑余热温

度的影响, 得出双源系统的变工况特性, 与其它供热/冷系统比较可知, 双源系统的供能能力比土壤源热泵机组和直燃型溴化锂机组要优越; 因此, 认为内燃机联产双源系统有很大节能潜力, 值得推广。

关键词: 内燃机; 土壤源热泵; 溴化锂机组; 敏感性分析; 变工况; 节能

0 引言

热能属于低品位能量, 传统区域锅炉房集中供热方式中以直接燃烧高品位的化石燃料来供应能量, 由于品位的严重失配, 一次能源利用率低, 因此有巨大的节能潜力^[1]。热电联产供热系统中热电分摊存在人为规定性与客观实在性^[2], 为提高供热的一次能源利用率, 文献[3]提出了联产供热新模式, 接着又引入了可逆型供热系统的概念^[4-5], 可逆型供热系统主要有热电联产供热系统和电驱动热泵供热系统。另一方面, 能源系统的环境问题^[6-7]越来越受重视, 被认为有较好能源利用率和环境效益的分布式能量系统受到了广泛关注^[8-10], 但分布式能量系统存在产品多样相互牵制以及电上网的问题。文献[11]提出的可逆型供热系统即双源可逆型空调系统(简称双源系统)可以单独运行为建筑物提供热/冷量, 避免电上网这一尴尬的问题, 且在供热方面与常规锅炉方案相比节能效果显著, 与电驱动热泵供暖方案相比可靠性更高。值得关注的是, 当将双源系统用于夏季供冷时, 可以对电网起到削峰作用, 增加能源消耗安全性。

本文对既供热又供冷, 原动机采用内燃机的双源系统作进一步的探讨。首先对内燃机联产双源系统进行敏感性分析; 大多数情况下双源系统处于变工况运行模式, 因此本文又对双源系统的变工况特

基金项目: 国家自然科学基金项目(50606010); 教育部科学技术研究重点项目(107119)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50606010); Key Project Supported by the Ministry of Education in China (107119).

性进行分析,并将其与土壤源热泵机组和直燃型溴化锂冷热水机组的变工况特性进行比较。

1 双源可逆型空调系统简介

双源系统可逆型空调系统的原理如图 1 所示。在双源系统内设置热电联产发电机组,它是由发电机和任一形式适合热电联产的热机构成。这一热电联产机组产出的是热能和电能。

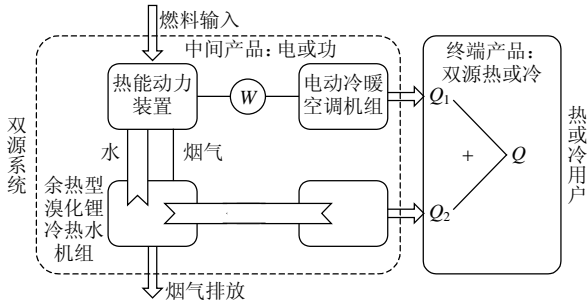


图 1 双源系统示意图

Fig. 1 Scheme of the dual-source system

在冬季(或夏季),电能被用于驱动电动冷暖空调机组以热泵(或制冷)方式供热(或供冷),形成用户得到热量(或冷量)供应的一个“源”;热能则通过余热型溴化锂冷热水机组生产热水(或利用余热驱动吸收式制冷循环生产冷水)送给用户,形成用户得到热量(或冷量)供应的另一个“源”。这样,每个用户都同时拥有 2 个不同的供应热量(或冷量)的“源”,一个是电驱动的热(或冷)源,另一个是余热热源(或热驱动的冷源),即双源,这也是本文中所提出的双源系统名称的由来。

不同的原动机对应的余热型溴化锂冷热水机组也有所区别,例如,当原动机为燃气轮机时,则余热利用装置为烟气型溴化锂吸收式冷热水机组,即在图 1 中原动机没有水带出的那部分余热,只有烟气带出的余热;当原动机为内燃机时,因为内燃机的余热以烟气和冷却水 2 种方式存在,因此余热利用装置为热水烟气型溴化锂冷热水机组。

双源可逆型空调系统,其特点是联产与单供相结合,即热和电的联产和热或冷的单供。这一系统的优点有:1) 供热/冷的一次能源效率高;2) 由于终端产品的单一化,为满足给定用户群的供热/冷需要时,因发的电不是用于照明、设备等用电设施,而是用来制热/冷,所以燃料总耗量比热电联产方案降低很多;3) 作为独立运行的冷暖供应系统,与公共电网的关系比热电联产要松散得多^[11]。

2 内燃机联产双源系统设计工况的性能

本文分析的双源系统的热机采用内燃机,对应的余热利用装置是热水烟气型溴化锂冷热水机组(简称溴化锂机组),在冬季时回收余热供热,而在夏季时用回收的余热驱动吸收式制冷循环制冷。需要说明的是,因本文考虑的双源系统既供热又供冷,主要针对国内供热/冷常规的建筑面积为几万到十几万平方米的建筑物(群),因此本文讨论的双源系统中的内燃机的功率数量级在几千千瓦以下。

考虑到双源系统在冬季时的热泵运行模式,双源系统要有一个低温热源,电动冷暖空调机组若用空气源热泵空调机组,其受环境影响很大,需要备用尖峰锅炉^[12],而用水源(这里的水源可以是地表水、地下水,也可以是中水)或土壤源热泵空调机组可以保证双源系统的稳定性。本文的研究对象是土壤源热泵空调机组。

双源系统的供热/冷指数,用 ξ 表示。供热/冷指数 ξ 可以表示为

$$\xi = \eta_e \epsilon_c + \eta_s \epsilon_s + \eta_w \epsilon_w \quad (1)$$

式中: η_e 为热动力装置的发电效率; ϵ_c 为热泵的性能系数; η_s 为回收的烟气余热份额; ϵ_s 为热水烟气型溴化锂机组中烟气余热利用的性能系数; η_w 为内燃机冷却水回收的余热份额; ϵ_w 为热水烟气型溴化锂机组中热水余热利用的性能系数。

双源系统虽然是热电联产,但最终目的是单供、供热或者供冷。为了进一步了解双源系统的性能,将其与供热/冷的系统进行比较分析。由于双源系统中的子系统(土壤源热泵机组和余热型溴化锂冷热水机组)均可以单独供热或供冷,因此本文给出方案 1(双源系统方案)与方案 2(直接从电网取电驱动的土壤源热泵机组方案)、方案 3(直燃型溴化锂冷热水机组方案)的设计工况的比较。为了方便比较,方案 2 和方案 3 中的供热/冷指数是系统所供热/冷量与消耗的一次能源的比值,也就是说方案 2 中的土壤源热泵机组的供热/冷指数是一次能源利用率,而不是机组的性能系数值;另方案 2 中热泵的性能系数 $\epsilon_{c,c}$ 和 $\epsilon_{c,h}$ 与方案 1 的取值相同。

各动力、供热、制冷子系统的性能及参数均采用目前技术水平的典型数据。本文取 $\epsilon_{c,c}=4.5$ 、 $\epsilon_{c,h}=3.4$ 、 $\epsilon_{s,c}=1.25$ 、 $\epsilon_{w,c}=0.7$ (下标 c 表示制冷, h 表示制热)。需要说明的是,在供热时溴化锂机组并没有按热泵模式运行,因溴化锂机组工质制冷剂水特性的因素,进水温度不能低于 5℃,而对于土壤源

热泵在连续运行时地下埋管的出口温度很可能低于 5℃^[13-14]，若要保证不低于 5℃，需要加大安全系数等措施，但在这方面目前还未有研究，故本文仅考虑回收的热量直接供热，即 $\varepsilon_{w,h}=1$ 、 $\varepsilon_{s,h}=1$ 。对于内燃机设计参数的确定，根据文献[15]及厂家的数据，选取 $\eta_e=38.58\%$ ，烟气余热份额为 34.24%，冷却水余热份额为 17.25%，其他损失约为 10%，烟气排烟温度为 508℃。对于冷却水未考虑传热损失，认为全部回收，则 $\eta_{w,c}=\eta_{w,h}=\eta_w=17.25\%$ ，而对于烟气部分的热量回收，夏季烟气余热制冷时排气温度为 170℃，则烟气回收的热量约为 $\eta_{s,c}=24.42\%$ ，冬季烟气供热时排气温度为 130℃，则烟气回收的热量约为 $\eta_{s,h}=26.3\%$ 。另外，因方案 2 中土壤源热泵机组直接从电网取电，取平均供电煤耗为 349 g/(kW·h)，即平均发电效率为 35.2%。根据上述情况计算出各方案设计值，列于表 1 中。

表 1 各方案设计值比较

Tab. 1 Design parameters of the projects

| 参数 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 |
|--------------|------|---------|----------|
| | 双源系统 | 土壤源热泵机组 | 直燃型溴化锂机组 |
| 供热系数 ξ_h | 1.74 | 1.20 | 0.925 |
| 供冷系数 ξ_c | 2.16 | 1.58 | 1.250 |

从表 1 可以看出，双源系统在设计工况下其 $\xi_c=2.16$ 、 $\xi_h=1.74$ ，远高于土壤源热泵机组和直燃型溴化锂机组， ξ_c 、 ξ_h 分别高出土壤源热泵机组 36.7% 和 45%，高出直燃机 72.8% 和 88.1%。从机理上讲，双源系统供热/冷指数高的主要原因是：1) 作为终端产品的热(冷)量中除了有燃料热外还有通过热泵得到的环境热；2) 能够合理的梯级利用能量，将能源品味高的热能先转化为电能，再通过性能好的热泵转化为更多的热(冷)量。

3 内燃机联产双源系统敏感性和变工况特性

3.1 内燃机联产双源系统敏感性分析

双源系统的能源利用效率受多种因素的影响，图 2、3 为双源系统的冬季供热指数和夏季供冷指数随各影响因素变化的敏感性分析。在供热指数的计算中认为 $\varepsilon_{w,h}=\varepsilon_{s,h}=1$ 。

图 2 中： $\Delta\eta_w=(\eta_w-0.1725)/0.1725$ ； $\Delta\eta_{s,h}=(\eta_{s,h}-0.263)/0.263$ ； $\Delta\eta_e=(\eta_e-0.3858)/0.3858$ ； $\Delta\varepsilon_{e,h}=(\varepsilon_{e,h}-3.4)/3.4$ 。

图 3 中： $\Delta\eta_e=(\eta_e-0.3858)/0.3858$ ； $\Delta\eta_{s,c}=(\eta_{s,c}-0.2442)/0.2442$ ； $\Delta\eta_w=(\eta_w-0.1725)/0.1725$ ； $\Delta\varepsilon_{e,c}=(\varepsilon_{e,c}-4.5)/4.5$ ； $\Delta\varepsilon_{s,c}=(\varepsilon_{s,c}-1.25)/1.25$ ； $\Delta\varepsilon_{w,c}=(\varepsilon_{w,c}-0.7)/0.7$ 。

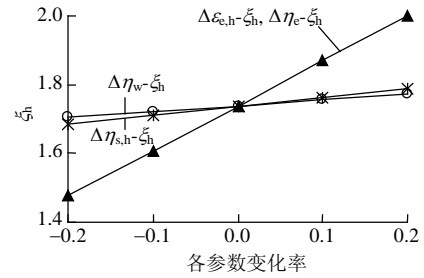


图 2 供热指数 ξ_h 随各参数的变化

Fig. 2 Sensitivity analysis of coefficient of heat supply ξ_h

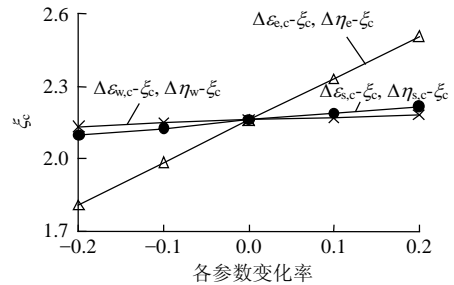


图 3 供冷指数 ξ_c 随各参数的变化

Fig. 3 Sensitivity analysis of coefficient of cooling supply ξ_c

由图 2 可以看出，供热指数 ξ_h 随各参数的增加而增加，其中对 ξ_h 的影响最大的是 $\varepsilon_{e,h}$ 和 η_e (两者影响一样大)，其次是 $\eta_{s,h}$ ，影响最小的是 η_w 。由图 3 可以看出，供冷指数 ξ_c 随各参数的增加而增加，其中对 ξ_c 影响最大的是 $\varepsilon_{e,c}$ 和 η_e (两者影响一样大)，其次是 $\varepsilon_{s,c}$ 和 $\eta_{s,c}$ (两者影响一样大)，影响最小的是 $\varepsilon_{w,c}$ 和 η_w (两者影响一样大)。

出现有参数对供热/冷指数影响一样大的原因是，式(1)等号右边的每一项都是 2 个参数的乘积，只要有其中一个参数变化，这一项就相应地以相同的变化率变化，故式(1)等号右边的每项中的 2 个参数对系统的影响程度相同(供热时 $\varepsilon_{w,h}$ 、 $\varepsilon_{s,h}$ 排除在外)。 ε_e 和 η_e 对 ξ 影响最大的原因是， ε_e 与 η_e 的乘积比后两项大，也可以说，与余热(烟气和冷却水)的供冷相比，电制热/冷所占比例要大得多。另外，由于 $\varepsilon_s > \varepsilon_w$ ，且 $\eta_s > \eta_w$ ，所以 ε_s 和 η_s 对 ξ 的影响比 ε_w 和 η_w 要大。

由以上分析可知，要提高双源系统的能源利用效果最好是提高 ε_e 和 η_e ，这样可以获得较好的能源利用效果。若要提高 η_e ，应选择发电效率高的内燃机；若要提高 ε_e ，应使热泵机组工作的热源温度尽可能接近室内温度，即冬季应尽可能利用温度高的热源，夏季尽可能利用温度低的热源，才能保证 ε_e 较大。

另由图 2、3 可知， $\xi_c=1.81\sim 2.51$ 、 $\xi_h=1.48\sim 2.0$ 。可见双源系统有很高的能源利用率。

3.2 内燃机联产双源系统变工况特性

3.2.1 变工况特性的简化

双源系统为建筑物提供冷/热量，常需要在部分负荷下运行，在设计工况下系统运行情况好并不能保证在变工况下运行情况也好，下文将讨论双源系统在部分负荷下的特性，并将其与第 2 节所述的方案 2、3 的变工况特性进行比较。

双源系统的内燃机可以是柴油发电机和燃气内燃机。市场上发电内燃机种类繁多，由于气缸数、是否增压、冷却方式等的不同，导致内燃机在排气温度等方面存在很大差异。文献[16]给出了以内燃机设计点的数值为比较标准，内燃机变工况的通用特性关系，如式(2)~(4)所示。

$$\bar{T}_{fg} = T_{fg} / T_{fg,s} = 0.53 + 0.38\bar{N} + 0.09\bar{N}^2 \quad (2)$$

$$\bar{G}_{fg} = G_{fg} / G_{fg,s} = 0.968 + 0.029\bar{N} \quad (3)$$

$$\bar{\eta} = \eta / \eta_s = 0.13 + 2.47\bar{N} - 1.6\bar{N}^2 \quad (4)$$

式中： \bar{T}_{fg} 为内燃机排烟温度； \bar{G} 为排气流量； $\bar{\eta}$ 为发电效率； \bar{N} 为比输出功率；下标 s 表示设计工况参数。

值得说明的是，在变工况下，随着负荷的降低，内燃机发电效率先增后减，且存在一个最大值(约在 $\bar{N} = 0.8$)，该点为最佳发电效率，对应内燃机的燃料消耗最小值。

双源系统中热水烟气型溴化锂机组的性能受许多因素的影响，如水(夏季包含溴机冷冻水、溴机冷却水，冬季是热水)流量和温度、烟气以及内燃机冷却水(对于溴化锂机组来说，相当于热源水)的温度和流量等。为了简化计算，本文仅考虑烟气或内燃机冷却水(热源水)的温度和流量对热水烟气型溴化锂机组性能的影响。即使只考虑余热温度和流量或燃料量的影响，问题仍很复杂，这是因为溴化锂机组由高/低压发生器、高/低温换热器、冷凝器、蒸发器、吸收器等换热器组成，实际运行中，由于运行参数的不同，不同工况下各换热单元的传热系数有所不同。文献[17-19]研究表明，对溴化锂制冷系统来说，除了高温发生器以外，各换热单元的传热系数变化很小，在近似计算中，可以认为除了高温发生器以外的换热设备传热系数保持不变。

由式(3)可知，内燃机的烟气量在其变工况时变化不大，在 $\bar{N} = 0.1$ 时， $\bar{G} = 0.971$ ，故本文仅考虑烟气温度对溴化锂机组的影响；此外，假设内燃机冷却水的流量不变，仅考虑内燃机冷却水(热源水)温度对溴化锂机组的影响；综上，本文仅考虑余热

温度对余热型溴化锂机组的影响，为了方便计算将烟气、热水分开考虑。此时，余热型溴化锂机组的变工况特性性能可以表示为

$$\bar{Q} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (5)$$

式中： \bar{Q} 为负荷率； $a_0 \sim a_3$ 为常系数； t 为余热的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

土壤源热泵的制热/冷量，同样受很多因素的影响，如冷冻水流量温度、冷却水流量温度、输入功率等。为方便计算，假设土壤源热泵的源测入口水温、水流保持不变，则制热/冷量仅与输入功率有关系^[20]，有

$$\bar{Q} = b_0 + b_1 \bar{N} + b_2 \bar{N}^2 + b_3 \bar{N}^3 \quad (6)$$

式中 $b_0 \sim b_3$ 为常系数。

由式(2)~(6)可以得出内燃机双源系统的变工况特性。

方案 2、3 大多数情况也是在变工况模式下运行的。对于方案 2 的土壤源热泵机组，其驱动力是直接从电网取电，而在此考虑的供电煤耗 349 g/(kW·h)，即平均发电效率为 35.2%，已经是考虑了季节和温度各方面影响的平均值，故不再考虑其变化。方案 2 中的供热制冷性能系数和方案 1 中热泵机组相同(如式(6))，这样经过换算就可以得到方案 2 电网电驱动土壤源热泵的第一定律效率。

对于直燃型溴化锂机组，同样做以上假设，仅考虑燃料量对其性能的影响，则燃料量 \bar{Q}_f 与负荷率 \bar{Q} 的关系为

$$\bar{Q}_f = c_0 \bar{Q} + c_1 \bar{Q} + c_2 \bar{Q}^2 + c_3 \bar{Q}^3 \quad (7)$$

式中 $c_0 \sim c_3$ 为常系数。

结合厂家数据，将本文中式(5)~(7)中各常系数列于表 2 中。

表 2 各常系数
Tab. 2 Constant coefficients

| 常系数 | 土壤源热泵 | 余热型溴机 | | 直燃式溴机 |
|---------------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|
| | | 烟气 | 热水 | |
| $a_0/b_0/c_0$ | -0.548 65 | 0.352 32 | 1.805 790 | 0.138 70 |
| $a_1/b_1/c_1$ | 2.372 40 | 0.002 82 | 0.032 050 | 0.581 00 |
| $a_2/b_2/c_2$ | -0.832 56 | $2.072\ 67 \times 10^{-5}$ | 0.000 217 | -0.286 00 |
| $a_3/b_3/c_3$ | 0.005 05 | $2.188\ 15 \times 10^{-8}$ | — | 0.565 88 |

3.2.2 供热变工况分析

供热时随着供热负荷的变化，发电供热、余热(包括烟气与热水)供热所占份额的变化如图 4 所示，由于直燃型溴化锂机组的供热效率(0.925)小于 1，在此仅比较双源系统与土壤源热泵机组的供热变工况特性，如图 5 所示。方案设计值如表 1 所示。

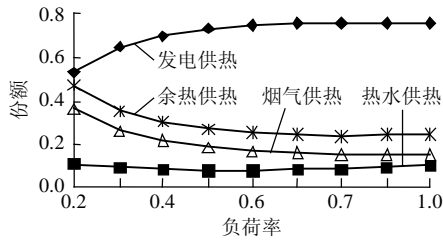
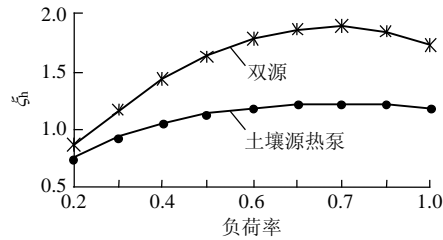


图4 双源系统各供热份额随负荷率的变化

Fig. 4 Proportion of various heating in part-load of the dual source system

图5 供热指数 ξ_h 随负荷率的变化Fig. 5 Coefficient of heat supply ξ_h in part-load

从图4可以看出,由于内燃机发电效率较高($\eta_e = 38.58\%$),发电制热所占份额比较大(设计工况下约占0.75),由于发电效率越高,则供热指数越大(参见图3),则可以推断出发电制热所占份额也越大。随着负荷的降低,开初始阶段各供热份额变化不明显,这主要是由于热泵性能系数 $\varepsilon_{e,h}$ 、内燃机发电效率 η_e 变化均不大;但当负荷低于50%时,发电制热份额开始下降,余热供热开始增加,这是由于 $\varepsilon_{e,h}$ 、 η_e 急剧减小,同时余热份额增加导致的。

从图5可以看出,在负荷为20%~100%时双源系统供热能力强于土壤源热泵;在负荷大于25%时, $\xi_h > 1$,也优于溴化锂机组。双源系统在负荷接近80%时有个最优值,这主要是由于 η_e 和 $\varepsilon_{e,h}$ 的设计值均并不是最大所致。可见,内燃机联产双源系统不仅在设计工况下节能,而且在部分负荷时也节能,尤其在负荷为80%左右时,节能效果最大。

3.2.3 供冷变工况分析

供冷时发电制冷、余热(包括烟气与热水)制冷所占比例如图6所示,双源系统与土壤源热泵机组、直燃型溴化锂机组的变工况特性比较如图7所示。

从图6可以看出,由于内燃机发电效率较高,发电制冷所占份额比较大(设计工况下约占0.8)。随着负荷率的降低,初始阶段发电制冷所占比例变化不明显(原因与供热时相同);但当负荷低于0.4时,由于 $\varepsilon_{e,c}$ 、 η_e 均下降,发电制冷份额开始下降,余热制冷开始增加,其变化幅度没有供热工况时大。

从图7可以看出,双源系统在负荷为20%~

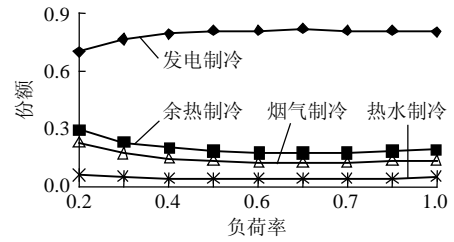
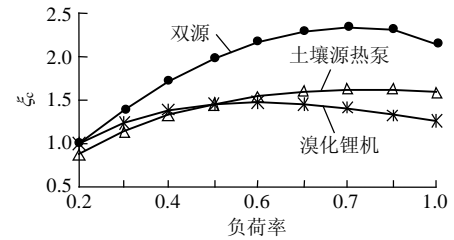


图6 双源系统各供冷份额随负荷率的变化

Fig. 6 Proportion of various cooling in part-load of the dual source system

图7 供冷指数 ξ_c 随负荷率的变化Fig. 7 Coefficient of cooling supply ξ_c in part-load

100%时,供冷能力均大于土壤源热泵和溴化锂机组。双源系统在负荷接近80%时有个最优值(原因与供热工况相同)。可见,供冷时内燃机联产双源系统在设计负荷和部分负荷时均节能,尤其在负荷80%左右时,节能效果最显著。

根据上文的分析可知,内燃机联产双源可逆型空调系统无论是在供热工况还是在供冷工况下,在额定负荷还是在部分负荷下,供热/冷指数都高于电网直接取电的土壤源热泵空调机组和直燃型溴化锂机组,节能效果明显,其中负荷为80%时,节能效果最显著。

4 结论

本文探讨了内燃机匹配土壤源热泵和热水烟气型溴化锂机组的双源可逆型空调系统的敏感性和变工况特性。

在 $\eta_e = 38.58\%$ 时,双源系统在设计工况下其 $\xi_c = 2.16$ 、 $\xi_h = 1.74$,分别高出土壤源热泵机组36.7%和45%,高出直燃机72.8%和88.1%,如果发电效率更高则节能效果将更加明显。由双源系统的敏感性分析结果可知,热泵机组的性能和内燃机发电效率对其性能影响最大。

对双源系统的变工况特性进行分析,将其与电网取电的土壤源热泵和直燃型溴化锂机组的变工况特性进行比较。经比较可知:双源系统在负荷为20%~100%时都有节能优势,在负荷约为80%时节能效果最显著。

可见, 基于分布式能量系统的是一个有很大节能潜力的冷热供应系统, 本文的研究为内燃机联产双源系统的设计及应用提供了参考。

参考文献

- [1] 宋之平, 王加璇. 节能原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 204-287.
Song Zhiping, Wang Jiakuan. The principle of energy saving[M]. Beijing: Electric Press, 1985: 204-287(in Chinese).
- [2] 宋之平. 试论联产电厂热电单耗分摊中的人为规定性与客观实在性[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 217-220.
Song Zhiping. Critical remarks on personal judgments and objective realities in cost allocation for cogeneration plants[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 217-220(in Chinese).
- [3] 宋之平. 以总能系统观点和用热终端高效化为特征的大中型火电机组联产供热系统新模式[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(1): 1-5.
Song Zhiping. Novel model of CHP heating system for sizable power units[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(1): 1-5(in Chinese).
- [4] Song Z P. Total energy system analysis of heating[J]. Energy, 2000, 25(9): 807-822.
- [5] 宋之平. 从可持续发展的战略高度重新审视热电联产[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(4): 225-230.
Song Zhiping. Rediscovering the combined heat and power in terms of the sustainable development[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(4): 225-230(in Chinese).
- [6] 段力强, 徐刚, 林汝谋, 等. IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 263-267.
Duan Liqiang, Xu Gang, Lin Rumou, et al. New evaluation criterion of IGCC system performance integrating thermodynamics with environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 263-267(in Chinese).
- [7] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.
Qian Kejun, Yuan Yue, Shi Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15(in Chinese).
- [8] 李鹏, 廉超, 李波涛. 分布式电源并网优化配置的图解方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 91-96.
Li Peng, Lian Chao, Li Botao. A graph-based optimal solution for siting and sizing of grid-connected distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 91-96(in Chinese).
- [9] Söderman J, Pettersson F. Structural and operational optimisation of distributed energy systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(13): 1400-1408.
- [10] Houwing M, Ajah A N, Heijnen P W, et al. Uncertainties in the design and operation of distributed energy resources: the case of micro-CHP systems[J]. Energy, 2008, 33(10): 1518-1536.
- [11] 宋之平. 一种值得关注的城市天然气消费方式: 双源可逆型供暖(空调)系统[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 181-184.
Song Zhiping. A worthy-of-note option for urban natural gas consumption-dual source heating/air conditioning system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 181-184(in Chinese).
- [12] 毕庆生, 宋之平, 杨勇平, 等. 燃气内燃机双源供暖系统的研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(1): 130-132, 79.
Bi Qingsheng, Song Zhiping, Yang Yongping, et al. Study on dual-source gas internal-combustion engine heating systems[J]. HVAC, 2009, 39(1): 130-132, 79(in Chinese).
- [13] 王景刚, 马一太, 张子平, 等. 地源热泵的运行特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 361-366.
Wang Jinggang, Ma Yitai, Zhang Ziping, et al. Operating performance simulation of ground source heat pump system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3): 361-366(in Chinese).
- [14] 李恺渊. 基于管群换热器温度场分析的土壤源热泵运行特性研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2007.
Li Kaiyuan. Research on the operating characteristic of ground source heat pump based on the temperature field of a group of under ground heat exchangers[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2007(in Chinese).
- [15] 何晓红. 内燃机热电联产系统的变工况特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
He Xiaohong. Typical off-design performances of internal combustion engine CHP system[D]. Beijing: the Graduate School of Chinese Academy of Sciences. 2008(in Chinese).
- [16] 何晓红, 蔡睿贤. 内燃机及其热电联产系统的典型变工况解析特性[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 191-194.
He Xiaohong, Cai Ruixian. Typical off-design performances of internal combustion engine and its CHP system[J]. Journal of Engineering Thermophysics. 2008, 29(2): 191-194(in Chinese).
- [17] 冯志兵, 金红光. 燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 25-30.
Feng Zhibing, Jin Hongguang. Part-load performance of CCHP with gas turbine and storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 25-30(in Chinese).
- [18] Grossman G, Zaltash A. ABSIM-modular simulation of advanced absorption systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(6): 531-543.
- [19] Kaita Y. Simulation results of triple-effect absorption cycles[J]. International Journal of Refrigeration. 2002, 25(7): 999-1007.
- [20] 吴伯谦. 土壤源热泵实验研究与经济性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Wu Boqian. Experimental study and economy analysis of ground source heat pump[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006(in Chinese).

收稿日期: 2009-11-22。

作者简介:

王锡(1976—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事分布式能量系统的研究, wx@ncepu.edu.cn;

杨勇平(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事分布式能量系统、发电厂经济运行方面的研究;



王锡

宋之平(1933—), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事节能原理、经济学、能量系统分析方面的研究。

(编辑 李婧妍)