楼宇型分布式冷热电联产系统互联运行节能优化

刘浩^{1,2}, 徐聪^{1,2}, 隋军^{1,2*}, 韩巍^{1,2}

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100190

* 联系人, E-mail: suijun@iet.cn

2017-06-06 收稿, 2017-07-24 修回, 2017-07-24 接受, 2017-09-27 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2014CB249202)资助

摘要 针对互联运行的分布式冷热电联产系统进行节能优化研究, 在分布式冷热电联产系统网络中通过系统间的电、冷、热的互相传输, 提升网络的整体节能性能. 建立了两个并网运行的分布式冷热电联产系统的互联运行优化模型, 该模型以总相对节能率最大为目标对系统进行运行优化. 选择宾馆和写字楼的两个分布式冷热电联产系统进行案例分析, 系统分别根据宾馆和写字楼的冷热电负荷进行优化设计, 然后利用互联运行优化模型对其运行状态进行优化, 使总相对节能率进一步提升. 通过优化, 该案例的总相对节能率由互联前的23.9%提升到28.5%.

关键词 分布式能源, 冷热电联产, 互联, 运行优化

分布式冷热电联产系统是能够有效实现节约能源和减少温室气体排放的技术之一, 其在设计工况下能够将70%以上的输入能量转化为用户需要的冷能、热能和电能, 但是由于用户负荷不断变化, 系统在运行过程中会偏离额定工况而使节能率降低.

文献[1]指出多个分布式发电系统的互联运行是电力系统的一个发展趋势. 可以多个分布式单元组成网络, 通过集中式或分布式控制构成虚拟电厂向用户供能, 能够提升分布式单元的总体性能. 与独立的分布式冷热电联产系统相比, 冷热电联产系统网络可以更加高效、灵活和多样化^[2].

冷热电联产系统网络的能量管理很大程度上决定了网络的性能, 系统在网络中的控制方式包括电跟随、热跟随、连续运行、调峰等, 在运行过程中要兼顾不同的目标、环境条件变化、系统运行特性等多方面的影响^[3]. 通过优化系统的运行策略可以减少从电网补充的电能^[4]、减小各种不确定性造成的风险^[5]、

提高可再生能源的集成度^[6]、提高能源供应的安全性^[7]、获得更好的经济性^[8]等.

文献[9~11]对包含发电单元、制冷单元、供热单元、储能单元等的分布式网络进行了优化设计研究, 以成本最低、碳排放量最小为目标建立优化模型, 确定系统单元的容量和运行方式. 文献[12~14]对包含热电联产系统、储能系统、可再生能源发电系统的虚拟电厂进行了研究, 建立优化模型确定系统单元的运行策略, 使其在电力市场中获得最大收益.

分布式冷热电联产系统网络中, 每个系统属于不同的用户, 系统的设计不是集中式的, 并非从整体上进行容量配置. 本文研究通过系统间的电、冷、热的互相传输提升整体的相对节能率, 减少系统变工况导致的损失, 对系统进行互联运行优化, 建立两个系统的互联运行优化模型. 选择位于宾馆和写字楼的分布式冷热电联产系统进行案例分析, 以总相对节能率最大为目标确定系统的运行状态, 并与二者

引用格式: 刘浩, 徐聪, 隋军, 等. 楼宇型分布式冷热电联产系统互联运行节能优化. 科学通报, 2017, 62: 3703–3710

Liu H, Xu C, Sui J, et al. Energy-saving optimization of interconnected distributed cooling, heating and power systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3703–3710, doi: 10.1360/N972017-00628

的单独运行数据进行比较.

1 系统运行优化模型

分布式冷热电联产系统网络示意图如图1所示,网络中每个用户拥有冷热电联产系统,用户之间通过电网、区域冷网和区域热网互相联通,进行电、冷、热的传输,以提高网络的整体节能性能.

1.1 数学模型

本文的数学模型针对由内燃机、溴化锂吸收式制冷机和换热器构成的冷热电联产系统,利用二次函数表示内燃机的效率、排烟温度、排烟流量和输出功率的关系^[15],即

$$\eta^* = A_1 P^{*2} + A_2 P^* + A_3, \quad (1)$$

$$T^* = B_1 P^{*2} + B_2 P^* + B_3, \quad (2)$$

$$F^* = C_1 P^* + C_2, \quad (3)$$

式中, η 为发电效率, P 为输出功率, T 为烟气温度, F 为烟气流量, “*”代表与额定值的比值. A_i , B_i 和 C_i 为常数, 下标 $i=1, 2, 3$. 烟气中可利用的热量为

$$Q_{\text{gas}} = F(h_T - h_{T_0}), \quad (4)$$

式中, h_T 为温度为 T 的烟气的焓, h_{T_0} 为排向环境的烟气的焓, 此时温度为 T_0 , 本文取 120°C . 内燃机缸套水热量为

$$Q_{\text{jacket}} = \lambda Q_{\text{fuel}}, \quad (5)$$

式中, Q_{fuel} 为内燃机输入燃料的热量, λ 为缸套水热量占输入总热量的份额. 内燃机变工况运行时, 缸套水热量为

$$Q_{\text{jacket}}^* = D_1 P^{*2} + D_2 P^* + D_3, \quad (6)$$

图1 (网络版彩色)分布式冷热电联产系统网络示意图

Figure 1 (Color online) Diagram of distributed combined cooling heating and power system network

式中, D_i 为常数($i=1, 2, 3$).

当内燃机的输出功率变化时, 其排烟的温度和流量都发生变化, 烟气型溴化锂吸收式制冷机的输出功率是排烟的温度和流量的函数. 制冷量和性能系数与内燃机烟气流量的关系为

$$Q_c^* = K_{Q1} F^{*2} + K_{Q2} F^* + K_{Q3}, \quad (7)$$

$$COP^* = K_{COP1} F^{*2} + K_{COP2} F^* + K_{COP3}, \quad (8)$$

式中, Q_c 为制冷量, COP 为制冷机的性能系数, K_{Q_i} 和 K_{COP_i} 为与烟气温度有关的系数, 即

$$K_{Q_i} = a_{Q_i} T^* + b_{Q_i}, \quad (9)$$

$$K_{COP_i} = a_{COP_i} T^{*2} + b_{COP_i} T^* + c_{COP_i}, \quad (10)$$

式中, a_{Q_i} , b_{Q_i} , a_{COP_i} , b_{COP_i} 和 c_{COP_i} 为常数.

系统的供热量为

$$Q_h = Q_{\text{gas}} - Q_c / COP + Q_{\text{jacket}}. \quad (11)$$

1.2 优化目标

本文的优化目标为相对节能率

$$R = \frac{E_0 - E}{E_0}, \quad (12)$$

式中, E 为系统的燃料消耗量, E_0 为电、冷、热负荷相同时, 参比分产系统的燃料消耗量. 在分产系统中, 电、冷、热负荷分别由电网、电压压缩式制冷机和燃气锅炉供应. 分产系统的燃料消耗量为

$$E_0 = L_e / \eta_{e,0} + L_c / \eta_{c,0} + L_h / \eta_{h,0}, \quad (13)$$

式中, L_e , L_c 和 L_h 分别为电、冷和热负荷, $\eta_{e,0}$ 为分产系统的供电效率, $\eta_{c,0}$ 为分产系统的供电效率与制冷机的性能系数的乘积, $\eta_{h,0}$ 为分产系统的供热效率. 本文取电网的供电效率为35.8%, 电压压缩式制冷机的性能系数为4.2, 燃气锅炉的供热效率为92%.

对于含有 n 个系统的网络, 总燃料消耗量为所有系统的燃料消耗量的总和, 总相对节能率为

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^n E_{i,0} - \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n E_{i,0}}. \quad (14)$$

1.3 优化方法

对于一个用户的分布式冷热电联产系统及其作为备用的分产系统, 其燃料消耗量为 E , 但是用户的负荷需求并不是全部由冷热电联产系统满足的, 其中联产系统的燃料消耗量为

$$E_{\text{com}} = L_{\text{e,com}} / \bar{\eta}_{\text{e,com}}, \quad (15)$$

式中, $L_{\text{e,com}}$ 为联产系统满足的电负荷, $\bar{\eta}_{\text{e,com}}$ 为联产系统的平均供电效率. 由于联产系统不能全部满足负荷而由分产系统补充消耗的燃料量为

$$E_{\text{sep}} = \frac{L_{\text{e,sep}}}{\eta_{\text{e,0}}} + \frac{L_{\text{c,sep}}}{\eta_{\text{c,0}}} + \frac{L_{\text{h,sep}}}{\eta_{\text{h,0}}}, \quad (16)$$

式中, $L_{\text{e,sep}}$, $L_{\text{c,sep}}$ 和 $L_{\text{h,sep}}$ 分别为由分产系统补充的电、冷和热负荷, 即

$$L = L_{\text{com}} + L_{\text{sep}}, \quad (17)$$

其中, L 为电、冷或热负荷需求, L_{com} 为联产系统满足的负荷需求, L_{sep} 为分产系统满足的负荷需求. 将式(13), (15)~(17)带入式(12)可得

$$R = \frac{1}{E_0} \left(\frac{L_{\text{e,com}}}{\eta_{\text{e,0}}} + \frac{L_{\text{c,com}}}{\eta_{\text{c,0}}} + \frac{L_{\text{h,com}}}{\eta_{\text{h,0}}} - \frac{L_{\text{e,com}}}{\bar{\eta}_{\text{e,com}}} \right), \quad (18)$$

式中, $L_{\text{c,com}}$ 和 $L_{\text{h,com}}$ 分别为冷热电联产系统满足的冷负荷和热负荷. 从式(18)可以看出, 当系统内燃机的运行状态一定时, 系统的供电量 $L_{\text{e,com}}$ 一定, 对于独立运行的系统, 增加供冷量 $L_{\text{c,com}}$ 和供热量 $L_{\text{h,com}}$ 以及提高供电效率 $\bar{\eta}_{\text{e,com}}$ 会使系统的相对节能率增加, 即提高内燃机的发电效率和充分利用余热可以提高系统的相对节能率.

每个系统都单独运行时, n 个系统的总相对节能率为

$$R_n = \frac{1}{\sum_{i=1}^n E_{i,0}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_{i,\text{e,com}}}{\eta_{\text{e,0}}} + \frac{L_{i,\text{c,com}}}{\eta_{\text{c,0}}} + \frac{L_{i,\text{h,com}}}{\eta_{\text{h,0}}} - \frac{L_{i,\text{e,com}}}{\bar{\eta}_{i,\text{e,com}}} \right). \quad (19)$$

在冷热电联产系统网络中, 每个系统可以和其他系统进行能量交换, 对于第 k 个联产系统, 其燃料消耗量为

$$E_{k,\text{com}} = \frac{L_{k,\text{e,com}}}{\bar{\eta}_{k,\text{e,com}}} + \frac{\sum_{i=1}^n L_{i \neq k,\text{e,com,out}}}{\bar{\eta}_{k,\text{e,com,out}}}, \quad (20)$$

式中, $L_{i \neq k,\text{e,com,out}}$ 为第 k 个联产系统向其他系统输出的电能, $\bar{\eta}_{k,\text{e,com,out}}$ 为该联产系统生产这些电能的平均效率. 第 k 个用户的负荷需求可以分为3个部分, 分别由第 k 个联产系统、分产系统和其他系统满足, 即

$$L_k = L_{k,\text{com}} + L_{k,\text{sep}} + \sum_{i=1}^n L_{i \neq k,\text{com,in}}. \quad (21)$$

将式(13), (16), (20)和(21)带入式(14)可得

$$R_n = \frac{1}{\sum_{i=1}^n E_{i,0}} \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{L_{k,\text{e,com}}}{\eta_{\text{e,0}}} + \frac{L_{k,\text{c,com}}}{\eta_{\text{c,0}}} + \frac{L_{k,\text{h,com}}}{\eta_{\text{h,0}}} - \frac{L_{k,\text{e,com}}}{\bar{\eta}_{k,\text{e,com}}} \right) + \sum_{i,k=1}^n \left(\frac{L_{k \neq i,\text{e,com,in}}}{\eta_{\text{e,0}}} - \frac{L_{k \neq i,\text{e,com,out}}}{\bar{\eta}_{k,\text{e,com,out}}} \right) + \sum_{i,k=1}^n \left(\frac{L_{k \neq i,\text{c,com,in}}}{\eta_{\text{c,0}}} + \frac{L_{k \neq i,\text{h,com,in}}}{\eta_{\text{h,0}}} \right) \right], \quad (22)$$

与式(19)比较可知, 该式增加了最后两项, 其中第一项为第 k 个联产系统向第 i 个联产系统传输电能或者接收第 i 个联产系统的电能对总相对节能率的影响, 该项有可能为负值, 使总相对节能率降低, 第二项为第 k 个联产系统接收第 i 个联产系统的冷能和热能对相对节能率的影响, 该项恒为正值. 如果系统的运行状态不变, 系统间传输多余的冷能和热能对总相对节能率总是有利的.

在优化模型中, 需要确定每个系统每个时刻的输出功率. 定义最低电负荷率 r 为内燃机最小输出功率 L_{min} 与其额定功率的比值, 两台内燃机分别有各自的最低电负荷率, 当电负荷小于 L_{min} 时, 内燃机停止运行, 电负荷由电网满足, 当电负荷大于内燃机额定输出功率时, 内燃机以额定工况运行, 部分负荷由电网满足. 如果电负荷处于 L_{min} 和内燃机额定功率之间, 两个系统的内燃机以效率最大为目标确定各自的输出功率. 内燃机的排烟作为吸收式制冷机的热源, 制冷机在每一个时刻的最大制冷量不仅受额定制冷量的限制, 还受到内燃机排烟流量和温度的限制. 当某一时刻的最大制冷量小于该时刻的冷负荷需求时, 首先由另一个系统的多余制冷量作为补充, 其次由分产系统制冷作为补充. 当某一时刻的最大制冷量大于该时刻的冷负荷需求时, 可以向另一个系统传输冷量或者降负荷运行. 内燃机烟气经过制冷机后, 剩余的热量以及缸套水的热量用来供热, 所以系统的最大制热量受到烟气和缸套水的限制. 当某一时刻的最大制热量小于该时刻的热负荷需求时, 首先由另一个系统的多余制热量作为补充, 其次由分产系统制热作为补充. 当某一时刻的最大制热量大于该时刻的热负荷需求时, 可以向另一个系统传输热量或者降负荷运行. 最后以总相对节能率最大为目标对内燃机最低电负荷率进行迭代求解.

2 案例分析

本文对宾馆和写字楼的两个分布式冷热电联产

系统进行分析, 示意图如图2所示, 系统由内燃机、溴化锂吸收式制冷机和换热器构成, 当系统的电、冷、热输出功率小于负荷需求时, 可以由分产系统补充. 两个分布式冷热电联产系统首先根据其用户的负荷需求按照以电定热的运行方式进行优化设计, 然后使它们之间可以互相传输电、冷、热, 优化互联之后的运行方式. 宾馆和写字楼的负荷如图3所示^[16,17]. 内燃机和吸收式制冷机的性能参数以及式(1)~(10)中的系数^[15,18,19]如表1所示. 选取宾馆的内燃机、吸收式制冷机和换热器的额定输出功率分别为1194, 1200和548 kW, 最低电负荷率为0. 写字楼的内燃机和吸收式制冷机的额定输出功率分别为1493和1500 kW, 最低电负荷率为0.38. 宾馆和写字楼的分布式冷热电联产系统的相对节能率分别为26.6%和19.9%, 总相对节能率为23.9%.

两个系统互联之后, 经过运行策略的优化, 总相对节能率为28.5%, 互联前后两个系统的运行情况分别如图4和5所示. 互联之前, 宾馆的内燃机全天跟随负荷运行. 写字楼的内燃机在21时到第二天7时, 电负荷低于最小输出功率, 内燃机停止运行, 其他时间内燃机不间断运行. 互联之后, 宾馆的系统最低电负荷率为0, 写字楼的系统最低电负荷率为0.3. 在22时到第二天7时, 写字楼的电负荷低于最小输出功率, 内燃机停止运行, 宾馆的内燃机跟随电负荷运行, 写字楼的电负荷由电网进行补充. 其他时间两台内燃机以总效率最高的方式运行, 其中17~21时写字楼的内燃机的输出功率明显高于其电负荷, 宾馆的内燃机输出功率低于其电负荷, 一部分电能由写字楼向宾馆传输. 写字楼的冷负荷在7时之后快速上升, 而电负荷上升缓慢, 内燃机的余热无法满足冷负荷需求, 而宾馆的制冷量此时有剩余, 所以一部分冷能从

图2 (网络版彩色) 分布式冷热电联产系统互联运行示意图

Figure 2 (Color online) Diagram of interconnected distributed combined cooling heating and power system

图3 (网络版彩色) 逐时冷热电负荷. (a) 宾馆逐时冷热电负荷; (b) 写字楼逐时冷热电负荷

Figure 3 (Color online) Hourly cooling, heating and power demands. (a) Hourly demands for the hotel; (b) hourly demands for the office building

表1 系统性能参数

Table 1 Performance parameters of systems

性能参数	数值
内燃机额定效率(%)	38
内燃机额定空燃比	32
内燃机额定排烟温度(°C)	550
吸收式制冷机额定性能系数	1.3
A_i	(-1.6, 2.47, 0.13)
B_i	(0.09, 0.38, 0.53)
C_i	(0.03, 0.97)
λ	0.2
D_i	(0.45, -0.05, 0.59)
a_{Qi}	(-0.59, 1.85, 0.01)
b_{Qi}	(0.13, -0.24, -0.16)
a_{COPi}	(-2.59, 4.88, -2.86)
b_{COPi}	(5.67, -10.73, 6.14)
c_{COPi}	(-3.62, 6.75, -2.65)

图 4 (网络版彩色)宾馆冷热电联产系统的运行情况。(a) 系统的电输出功率;(b) 系统的冷输出功率;(c) 系统的热输出功率

Figure 4 (Color online) Operation of the cooling, heating and power system for the hotel. (a) Hourly electric outputs; (b) hourly cooling outputs; (c) hourly heat outputs

宾馆向写字楼传输。在17时之后写字楼的冷负荷快速下降,而电负荷下降缓慢,所以内燃机的余热比较充足,此时宾馆的冷负荷还处于较高水平,所以一部分冷能从写字楼向宾馆传输。在其他大部分时间,两个系统的制冷量都比冷负荷小,所以制冷机按照最大输出冷量运行,不足冷能由电压缩式制冷机满足。

图 5 (网络版彩色)写字楼冷热电联产系统的运行情况。(a) 系统的电输出功率;(b) 系统的冷输出功率;(c) 系统的热输出功率

Figure 5 (Color online) Operation of the cooling, heating and power system for the office building. (a) Hourly electric outputs; (b) hourly cooling outputs; (c) hourly heat outputs

宾馆的系统热输出功率在大部分时间不能满足热负荷,而写字楼没有热负荷,所以互联之后写字楼的系统的多余热能全部向宾馆传输。

互联前后两个系统的总供能份额如图6所示,互联后系统的供电、供冷和供热份额都有所提升,其中供电份额由94.1%提升到95.3%,供冷份额由67.1%提

图6 (网络版彩色)互联前后系统的总供能份额

Figure 6 (Color online) Shares of cooling, heating and power demands satisfied by the systems

升到72.8%，供热份额由38.1%提升到61.2%。互联前后的平均供电效率分别为38.9%和38.8%。式(22)与(19)相减可得到互联后联产系统运行状态变化对总相对节能率增量的贡献值、系统间传输电能对总相对节能率增量的贡献值、系统间传输冷能对总相对节能率增量的贡献值和系统间传输热能对总相对节能率增量的贡献值，分别为-0.6%，0.1%，1.4%和3.7%。系统的运行状态变化对总相对节能率增量的贡献值为负值，但是电、冷、热的传输能够补偿该不足并使总相对节能率提升。本文忽略系统间的电能传输损失，假设冷、热的传输效率相同，图7为总相对节能率与冷热传输效率的关系。总相对节能率随着冷热传输效率的降低而降低。

图7 总相对节能率随冷热传输效率的变化情况

Figure 7 Curve of the total relative energy saving ratio versus the cooling and heat transmission efficiency

3 结论

本文对分布式冷热电联产系统的互联运行进行节能优化研究，通过系统间的电、冷、热的传输提升整体的节能性能，建立了两个分布式冷热电联产系统互联运行优化模型，选择位于宾馆和写字楼的两个分布式冷热电联产系统进行案例分析。结果表明，通过两个系统的能量传输，在系统的供电效率基本保持不变的情况下，供电、冷、热的份额分别由94.1%，67.1%和38.1%提升到95.3%，72.8%和61.2%，总相对节能率由互联前的23.9%提升到28.5%，其中系统的运行状态变化、传输电能、传输冷能和传输热能分别对总相对节能率增量贡献了-0.6%，0.1%，1.4%和3.7%。

参考文献

- Setiawan E A. Concept and Controllability of Virtual Power Plant. Kassel: Kassel University Press, 2007
- Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. Energy, 2014, 65: 1–17
- Gu W, Wu Z, Bo R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. Int J Elec Power, 2014, 54: 26–37
- Othman M M, Hegazy Y G, Abdelaziz A Y. Electrical energy management in unbalanced distribution networks using virtual power plant concept. Electr Pow Syst Res, 2017, 145: 157–165
- Zamani A G, Zakariazadeh A, Jadid S. Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant. Appl Energy, 2016, 169: 324–340
- Reihani E, Motalleb M, Thornton M, et al. A novel approach using flexible scheduling and aggregation to optimize demand response in the developing interactive grid market architecture. Appl Energy, 2016, 183: 445–455
- Tascikaraoglu A, Erdinc O, Uzunoglu M, et al. An adaptive load dispatching and forecasting strategy for a virtual power plant including renewable energy conversion units. Appl Energy, 2014, 119: 445–453
- Rahmani-Dabbagh S, Sheikh-El-Eslami M K. A profit sharing scheme for distributed energy resources integrated into a virtual power plant. Appl Energy, 2016, 184: 313–328
- Guo L, Liu W J, Cai J J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system.

- Energy Convers Manage, 2013, 74: 433–445
- 10 Li L X, Mu H L, Li N, et al. Economic and environmental optimization for distributed energy resource systems coupled with district energy networks. *Energy*, 2016, 109: 947–960
 - 11 Ameri M, Besharati Z. Optimal design and operation of district heating and cooling networks with CCHP systems in a residential complex. *Energy Buildings*, 2016, 110: 135–148
 - 12 Pandžić H, Morales J M, Conejo A J, et al. Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming. *Appl Energy*, 2013, 105: 282–292
 - 13 Tajeddini M A, Rahimi-Kian A, Soroudi A. Risk averse optimal operation of a virtual power plant using two stage stochastic programming. *Energy*, 2014, 73: 958–967
 - 14 Pandžić H, Kuzle I, Capuder T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization. *Appl Energy*, 2013, 101: 134–141
 - 15 He X H, Cai R X. Typical off-design performances of internal combustion engine and its CHP system (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 29: 191–194 [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. *工程热物理学报*, 2008, 29: 191–194]
 - 16 Yang M H, Ruan Y J, Li Z Y, et al. Simulation of hourly cooling heating and electrical load in CCHP system (in Chinese). *Power Generation Air Cond*, 2009, 30: 85–88 [杨木和, 阮应君, 李志英, 等. 三联供系统中逐时冷热电负荷的模拟计算. *发电与空调*, 2009, 30: 85–88]
 - 17 Jin H G, Zheng D X, Xu J Z. Distributed Combined Cooling Heating and Power System Device and Application (in Chinese). Beijing: China Electric Power Press, 2010 [金红光, 郑丹星, 徐建中. 分布式冷热电联产系统装置及应用. 北京: 中国电力出版社, 2010]
 - 18 Jiang R H, Yang X X, Yang M L, et al. The experimental research of dehumidification unit driven by low temperature waste heat of internal combustion engine jacket water (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2008, 35: 2338–2342 [蒋润花, 杨晓西, 杨敏林, 等. 内燃机缸套水低温余热驱动除湿机组实验研究. *工程热物理学报*, 2008, 35: 2338–2342]
 - 19 Zheng J J, Guo P J, Sui J, et al. Off-design performance of an exhaust-fired absorption refrigerator (in Chinese). *J Eng Thermophys*, 2012, 33: 1275–1278 [郑剑娇, 郭培军, 隋军, 等. 烟气型吸收式制冷机的变工况特性研究. *工程热物理学报*, 2012, 33: 1275–1278]

Summary for “楼宇型分布式冷热电联产系统互联运行节能优化”

Energy-saving optimization of interconnected distributed cooling, heating and power systems

LIU Hao^{1,2}, XU Cong^{1,2}, SUI Jun^{1,2*} & HAN Wei^{1,2}¹ Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;² School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

* Corresponding author, E-mail: suijun@iet.cn

Distributed cooling, heating and power systems can convert about 70% of input fuel energy to useful energy under design conditions. But the performance decreases when operating under off-design conditions due to the fluctuation of energy demands of users. This study investigated the energy saving performance of the distributed cooling, heating and power system network in which the systems can transmit cooling, heating and power energy mutually. In the network the systems are designed independently according to the energy demands of their own users and operate in parallel with the power grid. The transmission of energy can influence the operation states of the systems and therefore increase the performance under off-design conditions. The aim of this work is to optimize the energy outputs of the systems in the network in order to obtain a higher relative energy saving ratio. An optimization model is established for the optimal operation of two systems. The model can determine the optimal hourly energy outputs of each system and energy transmission between each system. Two systems for a hotel and an office building are selected for a case study. The systems are designed according to the cooling, heating and power demands of the hotel and office building, respectively, and then the operation states of the systems are optimized in order to further improve the relative energy saving ratio. Each system is composed of an internal combustion engine, an absorption refrigerator and a heat exchanger. The rated powers of the internal combustion engine, absorption refrigerator and heat exchanger for the hotel are 1194, 1200 and 548 kW, respectively. The rated powers of the internal combustion engine and absorption refrigerator for the office building are 1493 and 1500 kW and there is no hot water demand for the office building. The relative energy saving ratios of the systems for the hotel and office building are 26.6% and 19.9%, respectively. The total relative energy saving ratio is 23.9%. The average power generation efficiency is 38.9%. The shares of electric, cooling and heat demands satisfied by the combined system are 94.1%, 67.1% and 38.1%, respectively. In the optimization model, the operation of the internal combustion engine is determined by the rated power and minimum output power. When the demand is greater than the rated power the output of the engine is equal to the rated power. When the demand is lower than the minimum output power the output of the engine is zero. The cooling and heat demands are first satisfied by the waste heat of the engine and then the other system. There are electric compression refrigerators and gas boilers for backup when the outputs of the two systems are lower than the demands. After optimization the total relative energy saving ratio is 28.5% which is increased by 4.6%. The average power generation efficiency is 38.8%. The shares of electric, cooling and heat demands satisfied by the combined system are 95.3%, 72.8% and 61.2%, respectively. The contributions of the transmission of electric, cooling and heat on the increase of the total relative energy saving ratio are 0.1%, 1.4% and 3.7%, respectively.

distributed energy, combined cooling heating and power system, interconnect, operation optimization

doi: 10.1360/N972017-00628