

热电冷联产系统经济性诊断方法研究

张晓晖

(苏州大学物理科学与技术学院, 江苏省 苏州市 215006)

Research on Thermo-economics Diagnostic Method for the Combined Heating Cooling and Power Plant

ZHANG Xiao-hui

(School of Physics Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: According to the specific characteristic of the heating cooling power cogeneration (trigeneration) plant, a fairly complete thermo-economic diagnostic mathematical model of heating cooling power cogeneration plant was established based on equivalent enthalpy drop theory and absorption chiller performance equation, an idea of extending the thermo-economic diagnostic to heating cooling power cogeneration plant was provided. When extracted steam links to absorption chiller directly, the economy diagnostic mathematical model of thermal system for this kind of trigeneration was unified into condensing unit and cogeneration unit by introducing the concept of "generalized heating". With the use of absorption chiller performance model, an approximate calculation method was derived for the absorption chiller unit with a quantitative analysis of the effect of operating parameters on the absorption chiller performance. The formula is simple, physically clear and accurate enough. Its correctness was verified by calculation examples and model predictions were compared against performance data from experiments with favorable results.

KEY WORDS: heating cooling power cogeneration; generalized heating; thermal economy; diagnosis

摘要: 针对热电冷联产系统的特殊性, 利用等效焓降理论和吸收式制冷机的性能方程, 通过理论分析和数学推导, 建立一套全面热电冷联产系统的经济性定量计算数学模型。通过引入“广义供热”抽汽概念, 将抽汽直接连接用于制冷的热电冷联产系统的热力系统内扰动的经济性诊断方法同凝汽机组、供热机组的经济性诊断方法统一。给出单效吸收式制

冷机局部定量分析近似计算方法, 解决了工程上吸收式制冷机局部定量分析计算时的简化计算问题, 提出的近似计算方法在精度和计算量方面均具有一定的优势, 既解决了吸收式制冷机变工况计算问题, 又满足实际机组经济性诊断的需要, 实例计算证明了理论模型和诊断方法的准确、简捷性。

关键词: 热电冷联产; 广义供热; 热经济性; 诊断

0 引言

等效焓降法^[1-2]是基于热力学的热功转换原理, 考虑到设备质量、热力系统结构和参数的特点, 经过严密的理论推导, 用以研究热功转换及能量利用程度的一种方法, 它摒弃了常规计算的缺点, 不需要全盘重新计算就能查明系统热经济性的变化, 即利用热力系统局部定量分析替代整体热力系统计算的一种简捷、快速、方便的热力系统经济性定量分析方法, 已形成比较完善的常规凝汽机组^[1-2]、二次再热机组^[3-8]、供热机组^[9]和压水堆核电机组^[10-12]的热力系统经济性诊断和分析方法, 并且广泛地应用于火电厂的节能诊断和节能改造, 创造了巨大的社会效益和经济效益。

热电冷联产系统是在已有供热机组基础上发展而来, 有关其节能判断分析已由作者在文献[13]中详细论述, 关于经济性诊断方面: 严俊杰^[9]给出了再热供热机组的研究成果, 此方法仅限于排汽压力不变的热力系统中使用, 为此李秀云^[14]研究了供热机组排汽压力的经济性诊断模型, 由于热电冷联产系统构成与现有火电机组和供热机组有不同之处: 热电冷联产系统的构成形式具有多样性, 利用汽轮机某一级抽汽直接与蒸汽型吸收式制冷机连接, 吸收式制冷机发生器冷凝水返回汽轮发电机组的回热系统, 汽轮发电机组与吸收式制冷机相互耦

基金项目: 国家自然科学基金项目(50276037); 上海市重点建设学科项目。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50276037).

合, 因此汽轮机机组对吸收式制冷机会产生影响, 而且吸收式制冷机的扰动不仅使吸收式制冷机性能变化, 也对高压机组经济性有影响; 另外一种热电冷联产系统的连接方式是利用现有热水网驱动的热水型吸收式制冷机, 供热汽轮机与吸收式制冷机通过中间的热网加热器而相互耦合。此外, 吸收式制冷机种类也具有多样性, 有单效、多效、多级等不同种类, 吸收式制冷机是一个热-冷转换系统, 不能简单地看作换热器, 供冷与供热相呈现不同特点, 而且还要明确热电冷联产机组供应 3 种不等价的能量-热能、电能和冷量的特点, 由于这些特殊性, 常规热力系统的各种成熟经济性定量分析方法不能直接用于热电冷系统定量诊断。国内外对热电冷联产机组经济性诊断研究还没有文献报道, 而现有的热电冷机组的热力系统及制冷系统定量计算方法十分繁琐, 在实际计算中常因原始资料不全或在线经济诊断中由于其计算耗时长而无法计算, 有必要寻求一种简捷、方便、概念清晰的方法, 以便于对热电冷联产系统进行定量分析诊断。

本文正是针对这些问题, 旨在基于等效焓降理论以及所建立的吸收式制冷机模型为基础, 通过理论分析和数学推导, 建立一套完整的热电冷联产系统局部定量分析方法, 为此类系统的经济性诊断和热力系统定量分析提供简便、快速、有效的工具。

1 经济性诊断的分项经济指标

由于热电冷联产机组输出热能、冷量和电能 3 种不同形式能量, 因此热经济性分析比单纯的凝汽发电机组要复杂得多, 完整、合理而且有效的热电冷机组性能评价指标是经济性诊断研究的基础, 从热电冷联产系统汽轮机本体侧来讲, 用于制冷抽汽和用于供热抽汽对于等效焓降计算形式都是一样的。以双抽供热机组为例, 由于供热机组已经有一套完整的诊断理论, 如果将供热抽汽概念广延到制冷, 那么就可以利用现有的经济性分析理论, 制冷所需抽汽可以认为是“广义供热”抽汽, 这样与一般意义上的供热抽汽统一起来。在进行热力系统内部扰动分析时, 认为对外“广义供热量”不变, 这样是把局部变动限制在某一固定工况, 使其变动范围不至太大, 至于由于供冷负荷一天内的变化幅度较大, 抽汽量的调节频繁等则属于工况变动问题。因为不涉及到吸收式制冷机内部局部变化, 所以吸收式制冷机性能系数不变。考虑到现行实际运行热

电机组都采用“热量法”作为热电分摊的基础, 因此热电冷联产系统的经济性诊断按照国家目前采用的法定计量方法——“热量法”进行。分项经济指标可以用“广义供热热耗率”和发电热耗率表示, “广义供热热耗率”表示如果抽汽用于供热则与传统的供热热耗率计算一样, 如果抽汽用于制冷, 认为是对吸收式制冷机的发生器进行加热所需的热耗量。按照“热量法”分配原则, “广义供热的热耗量”为

$$Q_h = \frac{D_h(h_h - \bar{t}_h)}{\eta_b \eta_p} \quad (1)$$

式中: η_b 为锅炉效率; η_p 为管道效率; D_h 为“广义供热”抽汽量; h_h 为“广义供热”抽汽焓; $\bar{t}_h$ 为“广义供热”抽汽回水焓。

“广义供热热耗率”为

$$q_h = \frac{100\ 000}{\eta_b \eta_p} \quad (2)$$

发电的热耗量为

$$Q_e = \frac{D_0(h_0 - \bar{t}_{gs}) + \sigma - Q_h D_{rh}}{\eta_b \eta_p} \quad (3)$$

式中: D_0 为机组新蒸汽流量; D_{rh} 是再热蒸汽流量; σ 为 1 kg 蒸汽在再热器中的吸热量; h_0 为新蒸汽焓; $\bar{t}_{gs}$ 为给水焓。

发电的热耗率为

$$q_e = 3\ 600 \frac{D_0(h_0 - \bar{t}_{gs}) + D_{rh} \cdot \sigma - Q_h}{\eta_b \eta_p N_d} \quad (4)$$

式中 N_d 为机组发电功率。

热力系统内部扰动分析时, “广义供热热耗率”经济指标不受影响, 而主要表现为对发电经济性变化的定量分析。

2 不同连接形式的热电冷联产系统经济性诊断的数学模型

2.1 基于供热机组的热电冷系统经济性诊断方法

通过引入“广义供热”抽汽概念, 使得热电冷联产系统的分项经济指标可用“广义供热热耗率”和发电热耗率表示, 可借鉴现有的等效焓降理论对具体的热电冷联产系统进行经济性定量分析。

利用供热汽轮机的某一级抽汽作为吸收式制冷机的驱动热源, 本文直接采用如图 1 所示具有再热的双抽机组为例进行研究, 工业抽汽量为 D_n , 采暖抽汽量为 D_t , 制冷抽汽量为 D_r 。

根据等效焓降理论, 可以得出该机组抽汽等效

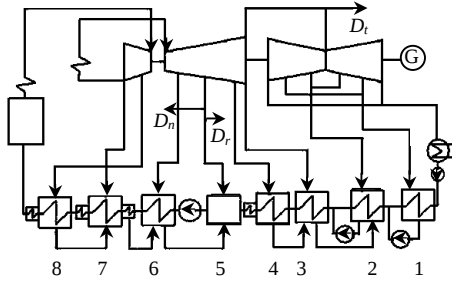


图1 典型的具有再热的供热供冷机组

Fig. 1 Flow chart of typical trigeneration plant with reheat

焓降如下, 再热冷端以后的抽汽为

$$H_j = h_j - h_k - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad (5)$$

式中符号意义见文献[1], j 为加热器的编号($j=1, 2, \dots, 6$)。

再热冷端以前的抽汽为

$$H_j = h_j - h_k + \sigma - \sum_{r=1}^{j-1} \frac{A_r}{q_r} H_r \quad (6)$$

式中 j 为加热器的编号($j=7, 8$)。

各加热器的抽汽效率为

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j} \quad (7)$$

新蒸汽等效焓降为

$$H_0 = h_0 - h_k + \sigma - \sum_{r=1}^n \frac{\tau_r}{q_r} H_r - \frac{D_n}{D_0} (h_n - h_k) - \frac{D_t}{D_0} (h_t - h_k) - \frac{D_r}{D_0} (h_r - h_k) - \sum \Pi_f \quad (8)$$

式中: h_j 为 j 加热器的抽汽焓; n 为热力系统中加热器的数目($n=8$); Π_f 为各种辅助成分的作功能力损失。

如果由于热力系统的某种变化而引起 1 kg 新蒸汽等效焓降改变为 ΔH^* , 1 kg 新蒸汽的循环吸热量变化为 Δq , 根据式(8)可得出供热机组新蒸汽等效焓降的真实变化 ΔH 为

$$\Delta H = \Delta H^* - \left(\frac{D_n}{D'_0} - \frac{D_n}{D_0} \right) (h_n - h_k) - \left(\frac{D_t}{D'_0} - \frac{D_t}{D_0} \right) (h_t - h_k) - \left(\frac{D_r}{D'_0} - \frac{D_r}{D_0} \right) (h_r - h_k) \quad (9)$$

式中: D'_0 为系统变化后的新蒸汽量; ΔH^* 相当于凝汽机组新蒸汽等效焓降的变化。

根据能量供应水平相等的原则, 系统变化前、后的功率不变, 则有

$$H_0 D_0 = (H_0 + \Delta H) D'_0 \quad (10)$$

令

$$\begin{cases} \Pi_n = \frac{D_n}{D_0} (h_n - h_k) \\ \Pi_t = \frac{D_t}{D_0} (h_t - h_k) \\ \Pi_r = \frac{D_r}{D_0} (h_r - h_k) \end{cases} \quad (11)$$

将式(8)、(10)代入式(9)整理得到

$$\Delta H = \frac{H_0}{H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r} \cdot \Delta H^* \quad (12)$$

系统变化前、后的总热耗量变化为

$$\Delta Q = \frac{D'_0 (q_0 + \Delta q) - D_0 q_0}{\eta_p \eta_b} \quad (13)$$

式中: q_0 为 1 kg 新蒸汽的循环吸热量; Δq 为 1 kg 新蒸汽的循环吸热量变化; η_b 为锅炉效率; η_p 为机组管道效率。

根据供热供冷机组能量供应水平相等可知, 在不考虑机组管道效率和锅炉效率变化的情况下, 此热耗量的变化为发电的煤耗率的变化 Δb , 即

$$\Delta b = \frac{3600 \Delta Q}{29308 N_d} = \frac{3600 \Delta Q}{29308 D_0 H_0 \eta_{jx} \eta_d} \quad (14)$$

将式(13)代入式(14), 得到

$$\Delta b = \frac{3600}{29308 H_0 D_0 \eta_{jx} \eta_d} \cdot \frac{D'_0 (q_0 + \Delta q) - D_0 q_0}{\eta_p \eta_b} \quad (15)$$

将式(10)、(11)代入式(15)整理得到

$$\Delta b = \frac{3600 q_0}{29308 \eta_b \eta_p \eta_{jx} \eta_d (H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r)} \cdot \frac{H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r}{H_0} \cdot \frac{\Delta q \frac{H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r}{q_0} - \Delta H^*}{H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r + \Delta H^*} \quad (16)$$

令:

$$\lambda = \frac{H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r}{H_0} \quad (17)$$

$$b^* = \frac{3600 q_0}{29308 \eta_b \eta_p \eta_{jx} \eta_d (H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r)} \quad (18)$$

$$\eta_i = \frac{H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r}{q_0} \quad (19)$$

$$H_0^* = H_0 + \Pi_n + \Pi_t + \Pi_r \quad (20)$$

则式(16)简化为

$$\Delta b = b^* \lambda \frac{\Delta q \eta_i - \Delta H^*}{H_0^* + \Delta H^*} \quad (21)$$

分析式(21)可以看出: 1) b^* 为新蒸汽流量为 D_0 时凝汽机组的发电煤耗率; 2) H_0^* 为凝汽机组的新

蒸汽等效焓降; Δq 为凝汽机组 1 kg 新蒸汽的循环吸热量变化(凝汽机组与供热机组相同); η_i 为凝汽机组的汽轮机装置效率, 因此上式第 3 项是再热凝汽机组装置效率的相对变化 $\delta\eta_i$ 。热电冷联产机组热力系统变化引起机组经济性变化的表达式为

$$\Delta b = b^* \lambda \frac{\Delta q \eta_i - \Delta H^*}{H_0^* + \Delta H^*} = b^* \lambda \delta\eta_i = \lambda \Delta b^* \quad (22)$$

式中: λ 为热电冷联产机组的经济性转换系数; Δb^* 为凝汽机组的经济性变化。

可见, 不管热电冷系统中抽汽是用于供热或是制冷, 在“广义供热量”不变条件下, 热电冷热系统的局部定量分析问题变成与凝汽机组相同的问题, 机组热力系统的经济性与凝汽机组的经济性变化通过系数 λ 统一起来。但是, 所需诊断用原始数据 τ, q, γ 是在增加抽汽制冷后的热力系统状态计算得到, 以作为经济性诊断的基础数据。与供热机组的诊断模型^[8]相比, 形式完全相同, 只不过, 凝汽化处理时多出一项用于制冷用抽汽损失项 I_r , 其本质意义在于将热电冷系统凝汽化处理, 前提条件是系统内的变化扰动时“广义供热量”不变, 热系统的任何变动都成了凝汽循环的变动, 因此, 变成了一个与凝汽机组相同的问题。由此可以将式(17)推广应用到 2 个或 2 个以上抽汽制冷时的热系统经济性诊断分析, 只需将 b^* 、 H_0^* 、 λ 计算式中分别添加相应抽汽损失项即可。

2.2 热水网驱动吸收式制冷机的经济性诊断模型

2.2.1 吸收式制冷机的局部定量的条件和方法

为充分利用现有集中供热系统, 利用供热汽轮机中作功后的低压抽汽通过热交换器向热水网提供热量, 热水由循环水泵在热网中循环, 同时可驱动吸收式制冷机制冷。

对热力系统经济性影响的定量模型与 2.1 节相同。本节重点放在吸收式制冷机的经济性诊断模型上。

为了对吸收式制冷机经济性诊断的定量计算, 必须建立相应的模型, 新加坡国立大学伍金泉教授研究小组分别对单级的氨水^[15]和溴化锂吸收式制冷机^[16-22]进行了系统的研究, 建立了简化的性能系数的计算关系式, 适应于吸收式制冷机变工况计算, 但不能直接用来对吸收式制冷机经济性诊断进行定量计算, 如同利用等效焓降法对热系统进行定量分析须满足一定条件一样, 对吸收式制冷机经济性诊断的定量计算, 也须满足一定条件, 为分析方

便, 把吸收式制冷机的局部变动(热网水温度或冷却水的温度等影响因素)限制在某一固定工况, 使其变动范围不至太大, 其性能系数认为不变, 吸收式制冷机运行参数变化对经济性的影响即表现在对输出制冷量的影响, 至于吸收式制冷机性能系数的变化, 是一个工况变动问题, 这样, 对吸收式制冷机进行局部定量分析计算, 就要先确定基准工况, 运用基准工况下的热力参数通过性能系数 η_{COP} 的计算式计算出吸收式制冷机的性能系数, 并作为诊断用已知值, 然后据此确定某一工况下偏离基准工况(如冷却水温度或发生器热源温度变化)对吸收式制冷机制冷量影响。冷却水温度与发生器温度局部微小变化时可利用下式^[17,21]对制冷量进行定量计算。

$$Q_e = \frac{\left(\frac{T_g^i}{T_g^i - T_c^i}\right)(B_1 - \frac{T_c^i}{T_g^i} B_2)}{\frac{1}{\eta_{COP}} - \left(\frac{T_c^i - T_e^o}{T_e^o}\right)\left(\frac{T_g^i}{T_g^i - T_c^i}\right)} \quad (23)$$

式中: T_g^i 为发生器驱动热源的热热水进口温度; T_c^i 为冷却水进口温度; T_e^o 为蒸发器冷冻水出口温度; B_1 、 B_2 为常数。

公式(23)事实上是一个局部定量计算公式, 在该公式的推导中假设参数对于基准工况偏离的局部微小变化而 η_{COP} 不变化, 这是基于对吸收式制冷机通用特性线得出的^[16-19], 但是当冷却水温度与发生器温度变化较大时, 需考虑 η_{COP} 的变化。在计算中应用于某些情况将会产生误差, 而且这种误差将随局部参数变化的增大而增大, 这将在下面的理论与实际算例对比中得到验证。

2.2.2 实例计算

为了验证本文提出的计算公式计算精度, 首先利用实际性能测试数据获得不同发生器温度与冷却水温度变化时吸收式制冷机输出制冷量的准确结果, 以此为基准, 比较本文这种算法的计算精度与相对误差, 以远大 BDH151 吸收式制冷机为例, 利用本文提出的不考虑 η_{COP} 变化与考虑 η_{COP} 变化 2 种方法结果对比。

第 1 种情况, 不同冷却水温度下制冷量随发生器温度变化时模型计算值与实验结果(厂家所做的实验结果数据)对比, 结果如表 1 和图 2 示。

第 2 种情况, 制冷量随冷却水温度变化时, 模型计算值与实验结果对比其结果如表 2 和图 3 示。

可以看出, 制冷量随着发生器温度升高而升高,

表 1 制冷量随发生器温度变化时
模型计算值与实验结果对比

Tab. 1 Comparison of predictions of compute modeling
against experiment measurements for cooling capacity as
evaporator temperature changes

T_c^i /K	T_e^0 /K	T_g^i /K	实际 制冷量/kW	式(23)计算 制冷量/kW	相对误差
303.15	280.15	367.75	120.80	115.365 30	0.044 990
303.15	280.15	368.75	129.86	123.945 60	0.045 544
303.15	280.15	371.15	151.00	146.099 20	0.032 500
303.15	280.15	374.15	166.10	169.829 10	-0.022 450
301.15	280.15	364.15	99.66	99.342 64	0.003 184
301.15	280.15	364.65	105.70	104.285 30	0.013 380
301.15	280.15	365.65	120.80	113.852 30	0.057 510
301.15	280.15	366.65	132.88	123.017 40	0.074 222
301.15	280.15	368.65	151.00	140.238 80	0.071 300
305.15	280.15	368.65	99.66	98.347 10	0.013 710
305.15	280.15	370.15	120.80	119.825 10	0.008 071
305.15	280.15	371.15	129.86	129.562 00	0.002 295
305.15	280.15	373.15	144.96	147.775 40	-0.019 422

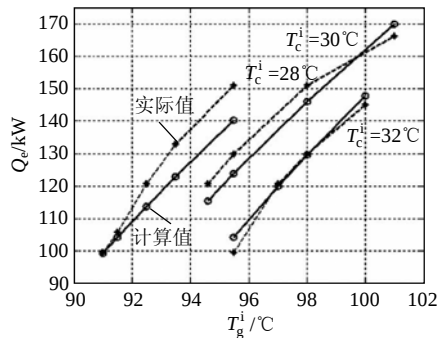


图 2 发生器温度变化时模型计算值与实验结果对比曲线

Fig. 2 Effect of evaporator temperature changes on
cooling capacity for computation and
experiment measurements

随着冷却水温度升高而下降,但曲线略向下弯。由于实际 η_{COP} 随发生器温度升高和冷却水温度下降而略有提高,而计算模型中近似认为不变,所以会产生模型计算预测曲线与实际曲线相交情况,但趋势是相同的。同时在计算模型推导中使用了线性近似方法,略去了高阶项,在计算中应用会产生误差。

由表 1 对比结果可见,在运行参数变化较小时,近似计算数值与实际数值结果相当一致,在参数变化大时,如在不同的冷却水温度下,发生器温度分别变化到 100 和 101 $^{\circ}\text{C}$ 时,计算数值大于实际值,相对误差出现负数分别为-2.245%和-1.942%。原因是:计算中认为 η_{COP} 不变,实际上,由于参数变化大,发生器温度偏离基准数值较大,相应 η_{COP} 也变化,即要考虑变工况的影响,所以产生负误差。对于冷却水温度变化时,制冷量的对比结果见表 2,同样地,在运行参数变化较小时,近似计算数值与实际数值结果相当一致。本文提出的考虑变工况与

表 2 制冷量随冷却水温度变化时
模型计算值与实验结果对比

Tab. 2 Comparison of predictions of compute modeling
against experiment measurements for cooling capacity as
condenser coolant inlet temperature changes

T_c^i /K	T_e^0 /K	T_g^i /K	实际 制冷量/kW	式(18)计算 制冷量/kW	相对误差
301.15	280.15	369.15	154.02	143.360 8	0.069 206
302.15	280.15	369.15	144.96	136.162 0	0.060 693
303.15	280.15	369.15	132.88	128.306 1	0.034 421
304.15	280.15	369.15	117.78	119.698 8	-0.016 291
305.15	280.15	369.15	105.70	110.227 0	-0.042 830

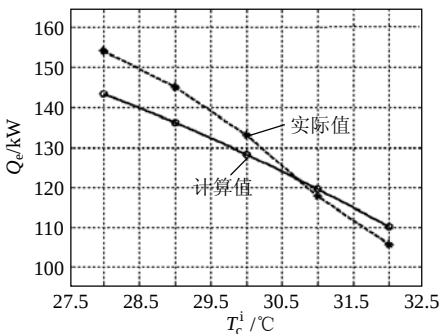


图 3 冷却水温度变化时模型计算值与实验结果对比曲线

Fig. 3 Effect of condenser coolant inlet temperature
changes on cooling capacity for computation and
experiment measurements

不考虑变工况 2 种方法的计算结果误差在 8% 以内,因此在运行参数偏离基准值不大时,不采用变工况的计算方法也可以满足工程计算精度实际需要。该式大大简化了吸收式制冷机的性能计算,为吸收式制冷机的定量分析提供了快速准确的计算方法,由此进一步证明:本文方法完全可以替代繁琐的详细计算过程,并可获得较高精度的工程解,可直接用于运行机组的节能诊断。

3 结论

- 1) 系统地研究了热电冷联产系统不同连接方式下经济性诊断方法,对于由于热系统内扰动的经济性定量分析,通过引入“广义供热”抽汽概念,将热电冷联产系统的经济性诊断方法同凝汽机组、供热机组的经济性诊断方法统一起来,提出了一套解决热电冷联产系统局部定量分析的数学模型。所得局部定量计算公式是通过数学推导得到的,其计算结果与常规热平衡方法结果相一致。
- 2) 针对热电冷联产系统经济性诊断的特殊性,给出了满足工程实际需要的吸收式制冷机的主要运行参数局部变化时制冷量的定量计算方法,通过实例计算和比较,证明了该方法的可行性和准确性,所提出的近似计算方法既解决了吸收式制冷机

变工况计算问题,又满足了实际机组快速实时定量分析的需要。

参考文献

- [1] 林万超. 火电厂热系统节能理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1994: 1-20
- [2] 严俊杰, 邢秦安, 林万超, 等. 火电厂热力系统经济性诊断理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 22-70.
- [3] 邵树峰, 严俊杰, 刘继平, 等. 二次再热机组热力系统的定量分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(11): 1137-1141.
Shao Shufeng, Yan Junjie, Liu Jiping, et al. Thermo-economics analysis method of thermal system for power unit with double reheat [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(11): 1137-1141(in Chinese).
- [4] 严俊杰, 邵树峰, 李杨, 等. 二次再热超临界机组热力系统经济性定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 186-190.
Yan Junjie, Shao Shufeng, Li Yang, et al. A method for analysis the economics of a thermal system in a supercritical pressure power unit with double reheat cycles[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 186-190(in Chinese).
- [5] 黄智, 万鹏, 李杨, 等. 超临界二次再热抽汽凝汽式机组热力系统的经济性诊断[J]. 热力发电, 2005, 34(12): 44-47.
Huang Zhi, Wan Peng, Li Yang, et al. Economic behavior diagnosis of thermodynamic system for supercritical double reheat extraction condensing unit[J]. Thermal Power Generation, 2005, 34(12): 44-47(in Chinese).
- [6] 李杨, 邢秦安, 严俊杰, 等. 二次再热超临界供热机组热力系统经济性定量分析方法[J]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 351-353.
Li Yang, Xing Qinan, Yan Junjie, et al. Economic-quantitative analysis method used for the thermodynamic system of a supercritical heat supply unit with a double reheat[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(4): 351-353(in Chinese).
- [7] 李运泽, 杨献勇, 罗锐. 二次再热超临界机组热力系统的全方位线性分析法[J]. 热能动力工程, 2002, 17(3): 258-260.
Li Yunze, Yang Xianyong, Luo Rui. Omni-directional linear analytical method used for the thermodynamic system of a double-reheat supercritical power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(3): 258-260(in Chinese).
- [8] 李运泽, 杨献勇, 严俊杰, 等. 二次再热超临界机组热力系统的三系数线性分析法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 132-136.
Li Yunze, Yang Xianyong, Yan Junjie, et al. Linear method for the thermal economical analysis of supercritical pressure power plant with double reheat[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 132-136(in Chinese).
- [9] 严俊杰, 刘继平, 邢秦安, 等. 供热机组热力系统经济性诊断方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(9): 60-63.
Yan Junjie, Liu Jiping, Xin Qinan, et al. Diagnosis method of thermal efficiency for a cogeneration system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(9): 60-63(in Chinese).
- [10] 严俊杰, 林万超, 邓士敏. 热电联产压水堆机组二回路热力系统经济性诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 21(8): 60-63.
Yan junjie, Lin Wanchao, Deng Shimin. Research on mathematical model of thermo-economics analysis for pressurized water reactor nuclear cogeneration plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 21(8): 60-63(in Chinese).
- [11] 杨豫森, 严俊杰, 刘立成, 等. 压水堆核电机组二回路热力系统计算的研究[J]. 热能动力工程, 2004, 19(1): 25-28.
Yang Yusen, Yan Junjie, Liu Licheng, et al. A study of the thermodynamic system calculations for the secondary circuit of a pressurized water reactor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(1): 25-28(in Chinese).
- [12] 严俊杰, 李秀云, 林万超. 热电联产压水堆机组二回路经济性定量分析理论的研究[J]. 核动力工程, 2001, 22(1): 92-95.
Yan Junjie, Li Xiuyun, Lin Wanchao. Research on economy quantitative analysis theory for the secondary-circuit of pwr nuclear cogeneration plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(1): 92-95(in Chinese).
- [13] 张晓晖, 陈钟硕. 热电冷联产系统的能耗特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 93-98.
Zhang Xiaohui, Chen Zhongqi. Energy consumption performance of combined heat cooling and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 93-98(in Chinese).
- [14] 李秀云, 严俊杰, 林万超. 火电厂冷端系统评价指标及诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001(9): 94-98.
Li Xiuyun, Yan Junjie, Lin Wanchao. Study on thermo-economics diagnosis method for cold-end system in steam power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2001(9): 94-98(in Chinese).
- [15] Chua H T, Tohb H K, Ng K C. Thermodynamic modeling of an ammonia-water[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(7): 896-906.
- [16] Chua H T, Toh H K, Malek A, et al. A general thermodynamic framework for understanding the behaviour of absorption chillers [J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(7): 491-507.
- [17] Chua H T, Ng K C, Gordon J M. Experimental study of the fundamental properties of reciprocating chillers and their relation to thermodynamic modeling and chiller design[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(1): 2195-2204.
- [18] Ng K C, Tu K, Chua H T, et al. Thermodynamic analysis of absorption chillers : internal dissipation and process average temperature[J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18(8): 671-82.
- [19] Gordon J M, Ng K C, Chua H T. Optimizing chiller operation based on finite-time thermodynamics: universal modeling and experimental confirmation[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20(3): 191-200.
- [20] Chua HT, Toh H K, Ng K C. Temperature-entropy diagram for an irreversible absorption refrigeration cycle[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(1): 446-52.
- [21] Ng K C, Chua H T, Han Q. On the modeling of absorption chillers with external and internal irreversibilities[J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(5): 413-25.
- [22] Ng K C, Chua H T, Han Q, et al. Thermodynamics modeling of absorption chiller and comparison with experiments[J]. Heat Transfer Engineering, 1999, 20(2): 42-51.



张晓晖

收稿日期: 2008-09-05。

作者简介:

张晓晖(1969—), 男, 博士, 从事火电机组节能理论应用和传热数值模拟技术研究, xzhzhg@suda.edu.cn。

(编辑 张媛媛)