

冷热电联产系统新评价准则研究

和彬彬, 段立强, 杨勇平

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

摘 要:从冷热电联产系统能量梯级利用的本质特征提出了能量梯级利用率的评价准则。该准则由发电、制冷与供热的能量利用率分别乘以不同的权重系数后累加得到。先确定比较的基准点,然后采用层次分析的方法得出基准点各能量利用率的权重系数。对基准点权重系数根据冷热产品温度及环境温度进行修正可得到其它情况的权重系数值。结合实际的联产系统算例,给出了这种评价准则的使用方法,并与原有的评价准则进行分析对比。结果表明,该评价准则具有合理性,可作为冷热电联产系统评价比较的实用方法。

关 键 词:冷热电联产; 评价准则; 能量梯级利用率

中图分类号: TK01 文献标识码: A

引 言

冷热电联产符合能量梯级利用的原理,是合理用能的一种有效途径,因而受到了广泛的关注^[1~4]。但联产系统是一个多能量产品输出的复杂系统,用来对联产系统进行比较及优化的评价准则成为目前研究的难点^[5]。尤其是对冷热产品种类及冷热产品参数不同的联产系统,进行评价对比困难。因为冷热电是不同的产品,很难直接进行定量比较,如何合理的区别冷热电产品,是解决联产系统评价问题的难点与关键,现有的评价指标本质上均是对冷热产品根据不同的标准及方法进行区别。本文从联产系统的本质特征出发建立了能量梯级利用的一般模型,提出了能量梯级利用率的评价准则。

1 能量梯级利用率评价准则

1.1 能量梯级利用模型

冷热电联产系统的本质是按照能量品位高低对能量进行梯级利用。一般是燃料化学能通过燃烧转化为热能,高品位的热能先用来发电,发电后产生烟

气余热用来供冷与供热。联产系统的“冷”主要是空调用冷,通常制冷系统的性能与输入热源温度有一定关系。联产系统的“热”主要是暖通用热、生活热水等低品位的热,通常布置在制冷系统的下游^[6]。显然评价准则应该反映这一本质特征。

根据联产系统的本质特征抽象出冷热电联产系统的一般模型,即能量梯级利用的模型:为充分对能量进行利用,燃料首先用来发电,进行第一级利用,然后用来供冷,进行第二级利用,最后用来供热,进行最后一级利用。当系统不供电时可以理解为供电级的能量利用率为零,供冷与供热级做相同处理。这样,热电、冷电及冷热电联产或者单独的供电、供热、供冷系统均统一为冷热电联产系统。

1.2 能量梯级利用率

每级能量的利用情况用各级能量利用率来考查。

发电级能量利用率 η_e 定义为:

$$\eta_e = W / (f \times H) \quad (1)$$

供冷级能量利用率 η_c 定义为:

$$\eta_c = Q_c / (f \times H) \quad (2)$$

供热级能量利用率 η_h 定义为:

$$\eta_h = Q_h / (f \times H) \quad (3)$$

式中: f —燃料量; H —燃料低位发热值; W —发电功率; Q_c —制冷量; Q_h —供热量。

显然,发电、供冷与供热的能量利用率是不能同等对待的。根据冷热电联产系统能量梯级利用模型提出能量梯级利用率的评价准则:把各级能量利用率乘以不同的权重系数后求和,得出值称为能量梯级利用率,即通过权重系数对冷热电产品进行区别。如果某级不存在,则该级的能量利用率取为零。

事实上冷能与热能是相对环境而言的,不同系统生产的冷热能温度很可能不同,系统运行环境的

温度也可能不同。所以可以采用这样的办法: 先选出确定的环境温度、确定温度的冷能与热能温度作为比较的基准点, 得出基准点各利用率的权重系数后, 根据环境温度及冷热温度对基准点的权重系数进行相应的修正即可得其它情况的权重系数值。

能量梯级利用率 η_i 表达式为:

$$\eta_i = q_e \eta_e + k_c q_c \eta_c + k_h q_h \eta_h \quad (4)$$

式中: q_e, q_c, q_h —基准点发电、供冷与供热能量利用率的权重系数, 是确定的常数; k_c, k_h —冷能温度修正系数与热能温度修正系数。

1.3 基准点权重系数的确定

1.3.1 确定比较的基准点

选取比较的基准点为: 环境温度 30 °C, 冷能温度为 7 °C, 热能温度为 70 °C。

1.3.2 确定权重系数值

事实上电冷热是不同的产品, 发电、供冷与供热的能量利用率无法直接量化比较。层次分析法(AHP)是一种定性和定量相结合的分析方法^{7~8}。AHP把复杂的问题分解为各个组成因素, 将这些因素按支配关系分组形成有序的递阶层次结构, 通过两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性, 然后综合人的判断, 将思维判断数量化。本文采用层次分析的方法把定性的问题定量化。

(1) 建立 AHP 模型。AHP 模型分为比较层、指标层两层, 如图 1 所示。比较层即联产系统能量梯级利用率; 指标层就是发电、供冷及供热的能量利用率。

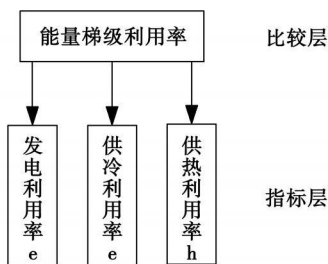


图 1 层次结构示意图

表 1 判断矩阵

	e	c	h
e	1	4	7
c	1/4	1	2
h	1/7	1/2	1

(2) 构造判断矩阵。通过对指标层进行两个因素之间逐一比较, 并使用 1~9 的比例标度来赋值, 可以由专家评分法确定。本研究根据能量梯级利用

的原则, 得出在基准点发电级能量利用率比供冷级能量利用率重要, 供冷级比供热级稍重要的判断, 由此得出判断矩阵如表 1 所示。

(3) 由判断矩阵计算得出各指标权重 q_e, q_c, q_h , 如表 2 所示。

表 2 各指标权重

	e	c	h	q
e	0.717 9	0.750 0	0.636 4	0.701 4
c	0.179 5	0.187 5	0.272 7	0.213 2
h	0.102 6	0.062 5	0.090 9	0.085 3

经检验满足一致性要求。

1.4 确定修正系数

冷热产品的本质特征是与环境的温度具有温度差。当温差越大时, 生产起来就越困难。无论是冷热产品的温度发生变化还是环境温度发生变化, 根本上讲是改变了这个温差。所以可以对这个温差进行修正。本文引入的冷能温度修正系数 k_c 与热能温度修正系数 k_h 的计算方法为:

$$k_c = (T_0 - T_c) / \Delta T_c \quad (5)$$

$$k_h = (T_h - T_0) / \Delta T_h \quad (6)$$

式中: T_c —冷能温度; T_h —热能温度; T_0 —环境温度; ΔT_c —基准点冷能温差; ΔT_h —基准点热能温差, 代入基准点温度值, 环境 30 °C, 冷能 7 °C, 热能 70 °C 得: $\Delta T_c = 23, \Delta T_h = 40$ 。

考虑到冷能一般比热能偏离环境温度小, 所以选用了较高的环境基准温度, 这样对冷热能温度的修正更趋于合理。当环境温度及冷热能温度发生变化时, 则修正值发生变化, 冷能与热能的权重系数会发生变化, 即冷能比热能稍重要只是在基准点的判断结果。当环境温度低于制冷温度时, 此时制冷已无意义, 能量处于浪费状态, 由表达式可得冷能温度修正系数 k_c 为负值, 供冷级对能量梯级利用效率的贡献为负值, 合理的反映了这一情况。

2 能量梯级利用率的应用

为便于对评价准则进行分析, 选取 4 个以燃气轮机为核心的联产系统。联产系统一与联产系统二采用相同参数的回热微型燃气轮机。示意图如图 2 与图 3 所示。微燃气轮机额定参数: 透平进口温度 900 °C, 发电功率为 100 kW, 压比 3.8, 回热度为 0.9, 系统一为冷电联产。余热锅炉生产 0.098 MPa

饱和蒸汽。制冷机组为蒸汽型单效溴化锂制冷机，冷媒水进口温度 12℃，出口温度 7℃，额定功率下热力系数 $COP = 0.7$ 。系统二为热电联产，直接由换热器生产生活用热水。进口水温 20℃，出口水温 70℃，压力 0.2 MPa。即系统一为微燃气轮机余热单纯用来制冷的冷电联产，系统二为相同的微燃气轮机余热单纯用来供热的热电联产。

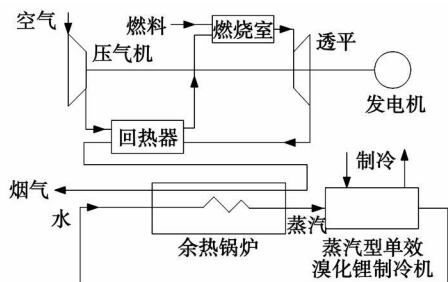


图 2 联产系统一示意图

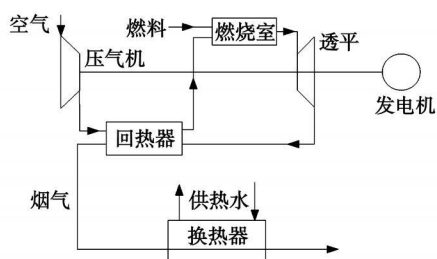


图 3 联产系统二示意图

联产系统三与联产系统四采用相同参数的简单循环小型燃气轮机，如图 4 与图 5 所示。额定参数：发电功率 500 kW，透平进口温度 1 100℃，系统三的余热锅炉生产 0.8 MPa 饱和蒸汽。制冷机组为蒸汽型双效溴化锂制冷机制冷，额定功率时制冷系数 COP 为 1.2，冷媒水进口温度 12℃，出口温度 7℃。系统四的烟气先驱动热管废热溴化锂制冷机组制冷，温度降到 150℃再进入热水器生产 70℃热水。制冷机额定功率时 COP 为 1.29。环境温度除特殊说明外，均指 30℃。

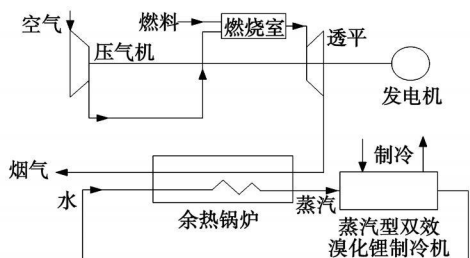


图 4 联产系统三示意图

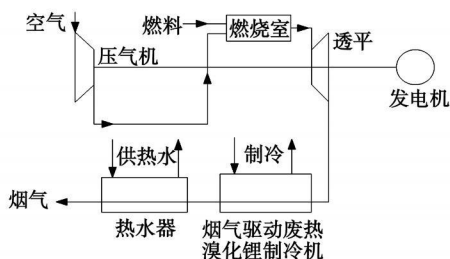


图 5 联产系统四示意图

各系统的能量梯级利用率计算结果如表 3 所示。通过量梯级利用率各系统的能量梯级利用率的值的大小即可对几个系统能量的利用情况进行比较。

表 3 各联产系统的评价结果

	系统一	系统二	系统三	系统四
$\eta_i / \%$	26.03	24.23	36.06	37.89

可见能量梯级利用率准则可以对有不同冷热产品的不同联产系统的能量利用情况进行比较，且对比结果与能量梯级利用的原理相符，对系统对能量的综合利用情况的评价是较为合理的。

3 与原有评价准则的对比

目前使用较多的评价准则主要有 3 种。

3.1 火用效率 η_y

$$\eta_y = (W + A_c \times Q_c + A_h \times Q_h) / (f \times H) \quad (7)$$

式中： A_c —冷量的卡诺循环效率； A_h —热量的卡诺循环效率。因为燃料的火用值与低位热值相差不大，所以常用低位热值代替火用值。

3.2 节能率 η_j

$$\eta_j = (f_s - f_c) / f_s \quad (8)$$

式中： f_c —联产系统所用燃料量； f_s —在相同产出的情况下分产系统燃料用量。

3.3 折合发电效率 η_z

$$\eta_z = W / (f_c - f_{sc} - f_{sh}) \quad (9)$$

式中： f_{sc} —参照系中生产相同冷量需要的燃料量； f_{sh} —参照系中生产相同热量的需要的燃料量。

联产系统一与联产系统二是相同的微燃气轮机机组的余热分别用来供冷与供热。当联产系统一与联产系统二中的微燃气轮机发电功率改变时， η_y 、 η_j 、 η_z 、 η_t 的评价结果如图 6~图 9 所示。其中 η_j 的参照系统选择如下^[9]：参照动力系统为电网，考虑网损后供电效率为 85%，参照制冷系统选择压缩式制冷机， COP 为 5.0。

η_y 、 η_j 、 η_z 与本文提出的 η_i 均是对冷能与热能进行了区别, 但是区别的方法及标准不同。

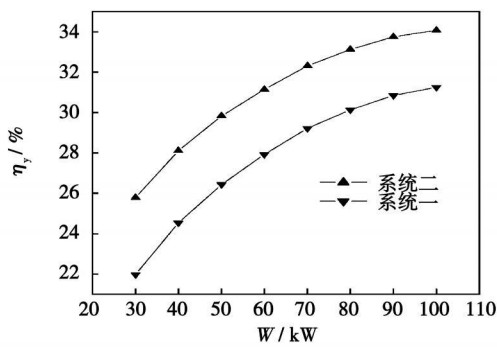


图 6 变发电功率时 η_y 的变化

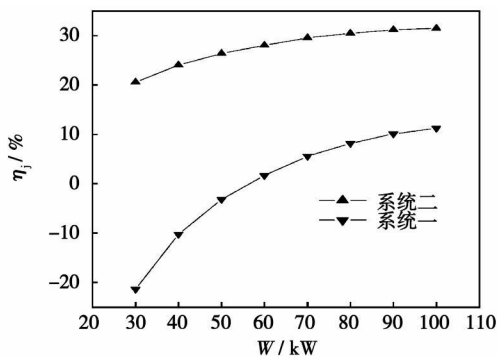


图 7 变发电功率时 η_j 的变化

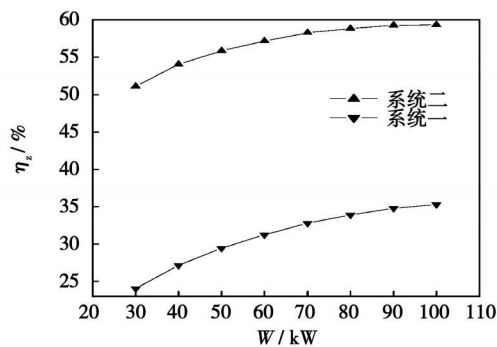


图 8 变发电功率时 η_z 的变化

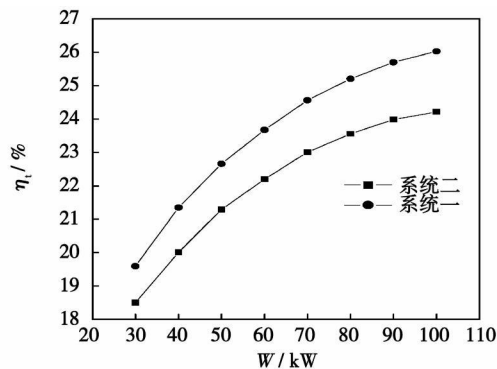


图 9 变发电功率时 η_i 的变化

η_y 、 η_j 、 η_z 评价的结果存在以下的共同点: 在相同的微燃气轮机及相同工作状态下, 余热用来供热比用来供冷占优势。由此可得出如下推论: 提高系统的性能应该减少供冷, 更多的用来供热。这似乎是不合理的。原因是 η_y 、 η_j 、 η_z 在冷热对比中冷能很难取得优势, 而本文提出的 η_i 在基准点确立了冷能比热能更为重要的关系, 并可以通过对环境温度与冷热能的温度进行修正, 使冷能与热能的重要性对比发生变化, 是更为合理的。

指标 η_y 把冷火用与热火用等同对待, 但是冷火用显然更难获得。冷与热是能源产品, 它们是用来满足人们舒适性的要求的, 本身不再是作为能量使用。所以不再适合使用评价能量的指标来区别。

由图 7 可见单纯供热时的 η_j 明显高于单纯供冷时的节能率。事实上能生产同样数量冷热产品的低品位的余热并不能简单的等价于可以生产同样数量冷热产品的燃料化学能。供热与供冷的节能难度并不相同。

η_z 中存在与 η_j 节能率中相同的问题。用来单纯供热时折合发电效率显著高于单纯制冷时折合发电效率。

图 9 给出 η_i 的变化情况。在相同的余热情况下, 冷电联产的性能比热电联产略占优势, 而且随着功率增加优势是逐渐增加的, 这样的评价结果是与能量梯级利用的原则是相符的。当然, 冷能的优势是在该环境温度与冷热温度下得出的, 当环境及冷热温度发生变化时, 由于修正系数取值发生变化, 则可能得出不同结论。通过比较分析可发现 η_i 对于联产系统的评价结果是更为合理的。

4 结 论

对冷热电联产系统的评价准则进行了研究。先根据冷热电联产系统能量梯级利用的本质特征建立了联产系统的能量梯级利用模型, 基于该模型提出了能量梯级利用率的新评价准则。该评价准则的值由发电、制冷与供热级的能量利用率分别乘以不同的权重系数后累加得到。先确定比较的基准点, 采用层次分析的方法得出基准点各能量利用率的权重系数, 然后对冷热产品温度及环境温度的不同进行修正可得到其它情况各级能量利用率的权重系数值。结合实际的联产系统, 给出了这种评价准则的使用方法, 并与现有的评价准则进行了比较, 表明了该新评价准则的合理性。当然该评价准则中基准点

的选取及判断矩阵的赋值可在实际应用中改进与完善。

参考文献:

- [1] 张晓晖, 陈效孺, 杨 荣. 冷热电联产系统对 CO₂ 排放影响的分析研究[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 296—299
- [2] 冯小平, 张蓓红, 龙惟定. 影响冷热电联产系统经济性因素的灰关联分析[J]. 热能动力工程, 2006, 21(4): 342—344.
- [3] 王振铭, 郁 刚. 我国热电联产的现状、前景与建议[J]. 中国电力, 2003, 36(9): 43—49.
- [4] 孙建国, 冯志兵. 冷热电联产系统的发展及前景[J]. 燃气轮机技术, 2006, 19(2): 11—17.
- [5] 冯志兵, 金红光. 冷热电联产系统的评价准则[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(5): 725—728
- [6] 冯志兵, 金红光. 燃气轮机冷热电联产系统及其热力分析[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 487—492
- [7] 王云波, 李 政, 倪维斗. 层次分析法在多联产系统综合评价中的应用[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 580—586.
- [8] 皇甫艺, 吴静怡, 王如竹, 等. 冷热电联产 CCHP 综合评价模型的研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(增刊): 13—16
- [9] 冯志兵, 金红光. 冷热电联产系统节能特性分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4): 541—544.

(编辑 陈 滨)

新技术、新产品

燃气轮机联合循环动力装置(GTCC)运行

据《Gas Turbine World》2008年5—6月号, 加利福尼亚能源委员会报道, 位于里弗赛德市的775 MW Inland Empire 烧天然气的电站将在8月开始试运行。

Inland Empire 是使用GE 60 Hz H系统的第一个项目, 该系统是迄今设计的最先进的GTCC(燃气轮机联合循环)动力装置, 并且是第一个能以超过60%效率运行的燃气轮机联合循环电站。

由GE S107H联合循环装置设定的1×1 H系统动力装置在60%效率下的额定输出功率为400 MW。它使用闭路蒸汽冷却系统, 允许更高的燃烧温度, 使燃气轮机能提高效率、减少排放和更低的燃料消耗。

在Inland Empire 电站将运行2个S107H系统。

该设计的50 Hz 方案已于2003年在英国南威士的巴格兰电站投入运行。

2005~2009年14种机型燃气轮机退出生产线

据《Gas Turbine World》2009年年度手册报道, 在2005~2009年期间共有14型燃气轮机退出生产线。

退出生产线的大多数型号是因为它们在市场上已不再具有竞争能力、生产重叠或简单地被弃而不用的牺牲品。尽管特定的设计型号不再正常生产, 但制造者仍将根据专门的订单建造它们。

手册中列出了退出生产的燃气轮机主要的参数, 该14型燃气轮机的原设备制造者和燃气轮机型号、推出年份、额定输出功率、热耗率、效率、退出生产年份。

(吉桂明 摘译)

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 588 ~ 591

The temperature of atmospheric environment has a big influence on the performance of a gas turbine. An additional installation of an inlet air atomization and cooling system is of enormous practical value for improving the performance of the gas turbine. Through an analysis of the working principle of an inlet air atomization and cooling system of a gas turbine, proposed were a design version and functional realization of a PLC-based (programmable logic controller) gas turbine inlet air atomization and cooling control system. The operation results show that the control system enjoys a high automation level, a good operating stability and a reliable performance. After the gas turbine inlet air atomization type cooling skid equipped with the control system in question has been put into operation, the power output of a PG6551(B) type gas turbine increased, relatively speaking by 8.35% and the efficiency rose by about 3.24%. **Key words:** gas turbine, inlet air cooling, control technique

冷热电联产系统新评价准则研究 = A Study of New Evaluation Criteria for Combined Cooling-heating-power Cogeneration Systems [刊, 汉] / HE Bin-bin, DUAN Li-qiang, YANG Yong-ping (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 592 ~ 596

From the intrinsic characteristics of energy stepped utilization of a cooling-heating-power cogeneration system, presented were the criteria for evaluating energy stepped utilization rates. The criteria were obtained by accumulative adding of energy utilization rates of power generation, refrigeration and heat supply, multiplied by various weighting coefficients respectively. The reference point for comparison was first determined and then a layer-by-layer analytic method was adopted to obtain the weighting coefficients for various energy utilization rates at the reference point. Then, the weighting coefficients at the reference point were corrected by using the temperature of the cold and hot product and the ambient temperature to obtain the weighting coefficients under other circumstances. In conjunction with a calculation case of a practical cogeneration system, the method for using the evaluation criteria was given, and an analysis and comparison with the original evaluation criteria were performed. The research results show that the evaluation criteria under discussion feature rationality, thus adequately serving as a practical method for evaluating and comparing combined cooling-heating-power cogeneration systems. **Key words:** combined cooling-heating-power cogeneration, evaluation criterion, energy stepped utilization rate

燃气机热泵冷热电三联供系统热经济学分析 = Thermo-economics Analysis of a Cooling-heating-power Cogeneration System for a Gas Engine-driven Heat Pump [刊, 汉] / FANG Zheng, YANG Zhao, CHEN Yi-guang (Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 597 ~ 603

A cooling-heating-power cogeneration system for a gas engine-driven heat pump was analyzed by adopting a thermo-economics analytic method. From a calculation and analysis of exergy cost differences and exergy economic factors of subsystems as well as exergy economic coefficient of the whole system under the condition of the following 4 influencing factors, i. e. various rotating speeds, evaporation temperatures, condensing temperatures and natural gas prices, the authors have proposed some improvements necessary for the above cooling-heating-power cogeneration system and problems meriting attention in setting a rational transmission ratio during the design of the system. Moreover, they have also concluded that the system enjoys broad prospects for its application in China. **Key words:** cooling-heating-power cogeneration, gas-turbine driven heat pump, thermo-economics, exergy cost difference, exergy economic factor, exergy economic coefficient

不可逆闭式布雷顿热电联产装置炯经济性能优化 = Exergy Economic Performance Optimization of an Irre-