

基于炯经济学的分布式供能系统分析评价方法

陈锦彬, 陈皓勇[†], 陈思敏, 刘欣, 赵振东, 陈健润

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 对分布式供能系统的性能进行准确而全面的分析评价, 是分布式供能系统进一步发展的重要环节. 能源互联网背景下, 分布式供能系统变得越来越复杂, 其分析评价方法面临巨大挑战. 本文首先基于炯经济学理论, 建立了分布式供能系统统一分析模型; 其次, 提出了综合考虑炯效率和炯损作为分布式供能系统能耗特性评价指标, 炯损成本和炯经济系数作为经济特性评价指标的分析评价方法, 并设计了分析评价的流程; 最后, 以某供电局分布式供能系统为算例, 验证了所提模型和分析评价方法的优越性. 结果表明, 本文提出的统一分析模型和分析评价方法对系统投资决策、优化设计和运行优化具有指导意义.

关键词: 炯经济学; 分布式供能系统; 能耗特性; 经济特性; 综合分析评价

引用格式: 陈锦彬, 陈皓勇, 陈思敏, 等. 基于炯经济学的分布式供能系统分析评价方法. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 553 – 560

DOI: 10.7641/CTA.2021.10504

Analysis and evaluation method of distributed energy supply system based on exergic economics

CHEN Jin-bin, CHEN Hao-yong[†], CHEN Si-min, LIU Xin, ZHAO Zhen-dong, CHEN Jian-run
(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Accurate and comprehensive analysis and evaluation of the performance of distributed energy supply system (DESS) is an important part of its further development. Under the background of the energy internet, the DESS becomes more and more complex, and its analysis and evaluation methods are facing great challenges. Firstly, based on the theory of exergy economics, a unified analysis model of the DESS is established. Secondly, an analysis and evaluation method of the DESS is proposed, in which exergy efficiency and exergy loss are taken as evaluation indexes of energy consumption characteristics, and exergy loss cost and exergy economic coefficient are taken as those of economic characteristics, and the analysis and evaluation process is designed. Finally, a DESS of a power supply bureau is taken as an example to verify the superiority of the proposed model and the analysis and evaluation method. The results show that the unified analysis model and the analysis and evaluation method proposed in this paper have guiding significance for the investment decision, optimal design and operation optimization of the system.

Key words: exergy economics; distributed energy supply system; energy consumption characteristics; economic characteristics; comprehensive analysis and evaluation

Citation: CHEN Jinbin, CHEN Haoyong, CHEN Simin, et al. Analysis and evaluation method of distributed energy supply system based on exergic economics. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(3): 553 – 560

1 引言

能源问题关乎国计民生, 如何实现能源的高效、清洁利用是各个国家、机构研究的热点问题. 相较于集中式供能系统, 分布式供能系统具有更高的灵活性, 有利于可再生能源的充分消纳, 以及实现能量的梯级利用.

现阶段对供能系统的分析方法主要有能量分析法和炯分析法. 相较于能量分析法, 炯分析法进一步考虑了系统做功能力的变化, 直指用能的本质^[1-4]. 这两种分析方法是基于系统的能耗特性角度进行分析, 忽略了系统的经济特性. 因此, 研究人员使用炯经济分析法对系统性能进行分析, 这一方法综合考虑了系统的热

收稿日期: 2021-06-11; 录用日期: 2021-11-11.

[†]通信作者. E-mail: eehychen@scut.edu.cn; Tel.: +86 13826100525.

本文责任编辑: 张潮海.

国家自然科学基金项目(51937005), 国家重点研发计划项目(2016YFB0900100)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51937005) and the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900100).

力性能和经济效益,可以在保证经济性的前提下,最大程度地实现节能^[6-8].

始于20世纪50年代末,国内外众多学者对焓经济学理论进行了深入研究^[9-12].文献[13]对地源热泵系统进行了传热特性与热经济学分析;文献[14]考虑环境成本,对水电联产机组的焓经济成本进行了分析;文献[15-17]基于焓经济学,对太阳能辅助发电系统的系统性能进行改良;文献[18]根据能量微元利用过程中品位的变化,提出基于品位的成本分摊方法;文献[19]基于结构模式,对燃气-蒸汽联合循环机组进行了经济性分析,并对产品价格进行了敏感性分析.

对分布式供能系统进行全面、准确的分析评价是后续开展系统运行优化、规划的重要基础,文献[20]从“经济、能效、环境”3个维度出发,提出了动态权重的系统评分标准.文献[21]提出利用熵权法结合专家评价法确定指标权重的系统评价方法.文献[22]根据基于层次分析的改进熵权法确定指标权重,建立VIKOR多目标决策模型进行方案的选择.

上述文献对焓经济学的应用和分布式供能系统的评价做出了有益探索,但仍存在不足:1)文献[13-19]的研究局限在于设备层面,忽略了焓在供能网络传递产生的损耗对分布式供能系统性能分析的影响,计算出的焓流成本较真实值偏低,且并未系统地整理出分布式供能系统性能的分析评价方法.2)文献[20-22]对能耗的评价仅仅是从能量分析的角度出发,而没有考虑能量品质的变化,对系统能耗特性的评价是不准确的.3)目前对分布式供能系统评价方法研究集中于对系统性能进行评分,但该评分难以作为依据指导改善系统性能.

本文研究工作针对以上文献不足之处展开,首先,基于焓经济学,建立了分布式供能系统统一分析模型,该模型计及焓在供能网络传递产生的损耗,将传递管路作为建模的一部分;其次,以焓效率和焓损作为能耗特性评价指标,以焓损成本和焓经济系数作为经济特性评价指标,详细设计了综合考虑能耗特性和经济特性的分析评价方法和流程;再次,根据分析评价结果,提出改善系统性能的措施;最后,以某供电局分布式供能系统为算例,对其能耗特性和经济特性进行分析评价,并提出改善系统性能的措施.

2 基于焓经济学的焓流成本计算模型

2.1 成本平衡方程

分布式供能系统由能源转换设备、能量存储设备、能量传递线/管路以及许多不同的用能负荷组成.基于焓经济学对分布式供能系统进行分析,需先将分布式供能系统划分成若干个子系统,可以将单一设备(能量传递线/管路也看作是一类特殊的设备)或者多个设备视为一个子系统,划分精度的不同会影响分

析的难度和分析结果的精度.将子系统*i*视为*j*个输入端口,*k*个输出端口的枢纽,如图1所示.

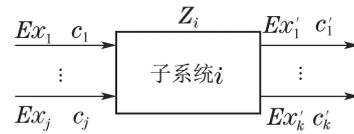


图1 基于焓经济学的子系统模型

Fig. 1 Subsystem model based on exergy economics

图中: Ex_j 代表子系统的第*j*种输入焓流, c_j 代表该输入焓流的单位焓经济成本, Ex'_k 代表子系统的第*k*种输出焓流, c'_k 代表该输出焓流的单位焓经济成本, Z_i 代表子系统*i*的非能量成本.

为了对分布式能源系统的经济性进行分析,基于焓经济学构建子系统的成本平衡方程,对于系统*i*,其成本平衡方程如式(1)所示:

$$\sum_{t=1}^j Ex_t c_t + Z_i = \sum_{w=1}^k Ex'_w c'_w, \quad (1)$$

其中输出焓流总成本等于输入焓流总成本与非能量成本之和,成本平衡方程是焓经济分析方法的基础.

2.2 非能量成本计算模型

为了得到单位时间的非能量成本,将子系统的总非能量成本(子系统的设备成本和运行维护费用)按经济寿命周期进行折算^[23],如式(2)所示:

$$Z = \frac{\varphi f}{H} Z_0, \quad (2)$$

其中: Z_0 表示子系统的设备成本; H 表示系统年运行小时数; φ 表示系统维护因子, f 表示年度化因子^[23-24].

2.3 输出焓流成本分摊计算模型

考虑到子系统的输出焓流不止一种,不同的输出焓流用途不同(或流入下级子系统,或被直接加以利用),因此,本节基于成本平衡方程,对不同输出焓流进行成本分摊.

等量的高品位能源的焓与低品位能源的焓相比,具有更高的使用价值(使用范围更广,使用途径更便捷),因而也应具有更高的经济价值.当输出中同时包含几种品位相差甚远的能源(比如冷热电联产装置同时输出高品位的电能以及低品位的冷能和热能),传统的输出焓流成本分摊方法认为各种输出焓流均具有相同的单位焓经济成本,无法体现不同焓流价值差异.因此,本文引入能质系数对成本分摊方法进行改进

$$\lambda = \frac{Ex}{Q}, \quad (3)$$

式中能质系数 λ 代表某种能源中焓 Ex 占能量 Q 的比重.

为保证输出焓流的单位焓经济成本按照能源品质进行分配. 在系统成本平衡方程基础之上增加成本分摊方程, 如式(4)所示:

$$\frac{c'_1}{\lambda_1} = \frac{c'_2}{\lambda_2} = \dots = \frac{c'_k}{\lambda_k}. \quad (4)$$

3 基于焓经济学的分布式供能系统分析

3.1 网络模型描述

前一节基于焓经济学建立了子系统的模型, 而分布式供能系统可以看作是由焓流相互关联的多个不同类型子系统所形成的网络, 如图2所示. 值得说明的是, 分布式供能系统的网络模型并不唯一, 而是根据具体问题的分析需要, 确定子系统划分的精度.

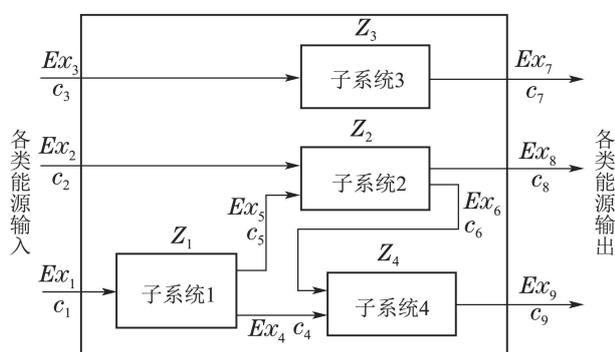


图2 分布式供能系统网络模型

Fig. 2 Model of distributed energy supply system

将焓经济分析应用到分布式供能系统时, 需要分情况考虑能量传递过程产生的焓损是否需要计算:

- 1) 从能源种类的角度考虑. 电焓在传递过程中的损耗远小于冷、热、压焓, 本文将忽略;
- 2) 从距离的角度考虑. 同一能源站各设备间(设备层面)进行焓传递所产生的焓损, 远小于不同能源站间以及能源站向负荷进行焓传递(网络层面)产生的焓损, 本文将忽略;

综上, 本文将不同能源站间或能源站向负荷供能的冷、热、气远距离传递管道作为子系统进行建模.

3.2 基于焓经济学的分布式供能系统统一建模

按问题分析需要, 分布式供能系统可划分为 m 个子系统, 子系统间由 n 种焓流相互关联, 为统一描述以及后续计算方便, 以矩阵方法对分布式供能系统加以描述. 以事件矩阵 $\mathbf{A}(m \times n)$ 表示子系统和焓流之间的联系. 矩阵元素 $\mathbf{A}(i \times j)$ 表示第 j 种焓流与第 i 个子系统的关联, $+1$ 表示第 j 种焓流流入第 i 个系统, -1 表示流出, 0 表示两者之间无关联. 此时可将成本平衡方程写成式(5)所示:

$$\mathbf{A} \times \mathbf{E}x \times \mathbf{c} + \mathbf{Z} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

式中: 将 n 种焓流记为对角矩阵 $\mathbf{E}x(n \times n)$, 焓流的单位焓经济成本记作矩阵 $\mathbf{c}(n \times 1)$, m 个子系统的非能

量成本记为矩阵 $\mathbf{Z}(m \times 1)$.

当忽略非能量成本, 仅对能量成本进行探究时, 令 $\mathbf{Z} = \mathbf{0}$, 有

$$\mathbf{A} \times \mathbf{E}x \times \mathbf{c}' = \mathbf{0}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{c}' 代表焓流的单位能量成本矩阵.

分布式供能系统中焓流数量 n 一般大于子系统数量 m , 未知量个数多于方程数量, 需补充 $n - m$ 个方程才能求解:

- 1) 已知输入焓流成本补充方程.

$$\mathbf{A}_1 \times \mathbf{E}x \times \mathbf{c} = \mathbf{C}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{A}_1(s \times n)$ 是输入焓流矩阵, 代表有 s 种输入供能系统的焓流成本已知, 矩阵中仅输入焓流对应元素位置为 $+1$. \mathbf{C} 代表已知输入焓流成本矩阵.

- 2) 成本分摊方程的矩阵表示形式.

$$\mathbf{A}_2 \times \mathbf{E}x \times \mathbf{c} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

式(8)为式(4)对应矩阵表达形式, 其中 $\mathbf{A}_2(r \times n)$ 为输出焓流能质系数矩阵.

为便于求解, 将式(5)(7)(8)整理成统一形式可得

$$\mathbf{A}' \times \mathbf{E}x \times \mathbf{c} + \mathbf{Z}' = \mathbf{0}, \quad (9)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}'(n \times n) = \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{pmatrix}, \mathbf{Z}'(n \times 1) = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} \\ -\mathbf{C} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}.$$

4 基于焓经济学的系统评价方法

4.1 分布式供能系统评价指标

能量分析法跟踪能量在系统各传递过程中“数量”上的变化, 却忽略了“品质”的改变. 焓分析法提出焓的概念来弥补这一不足. 本文将焓损和焓效率作为系统能耗特性的评价指标, 其中, 以焓损表征传递过程中能量品质的降低和做功能力的下降, 焓效率表征系统中设备、环节对焓的利用程度.

经济特性是系统性能评价的重要方面, 综合考虑能耗特性和经济特性两个维度, 才能对分布式供能系统的性能进行更全面的分析评价. 焓的价格化是焓分析走向实用化的必由之路^[11], 本文将焓损成本和焓经济系数作为系统经济特性的评价指标, 其中, 以焓损成本表征传递过程中能量品质降低所带来的经济损失, 以焓经济系数表征系统节能经济性潜力.

- 1) 能耗特性指标: 焓损、焓效率.

焓损表示子系统各种输入焓流之和与各种输出焓流之和的差值, 如式(10)所示:

$$E x_{\text{loss}} = \sum E x_{\text{in}} - \sum E x_{\text{out}}, \quad (10)$$

其中: $E x_{\text{loss}}$ 代表子系统的焓损, $E x_{\text{in}}$ 代表子系统的输入焓流, $E x_{\text{out}}$ 代表子系统的输出焓流.

烟效率表示子系统各种输出烟流之和与各种输入烟流之和的比值,如式(11)所示:

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum Ex_{out}}{\sum Ex_{in}} \quad (11)$$

2) 经济特性指标: 烟损成本、烟经济系数.

子系统的烟损成本由烟损数量和烟损的单位烟经济成本所决定,如(12)所示:

$$C_{loss} = Ex_{loss} c_{loss}, \quad (12)$$

其中: C_{loss} 代表子系统的烟损成本, c_{loss} 代表子系统烟损的单位烟经济成本.

烟经济系数表示子系统非能量成本占总成本的比重,其表达式如式(13)所示:

$$f_{Ex} = \frac{Z}{c_{loss} Ex_{loss} + Z}, \quad (13)$$

其中 f_{Ex} 代表子系统的烟经济系数.

4.2 分布式供能系统评价流程

设计分布式供能系统分析评价流程如图3所示. 首先,基于本文提出的烟流成本计算方法,建立分布式供能系统的烟经济学模型;继而,求解模型得到分布式供能系统的能耗特性指标与经济特性指标;其次,根据指标进行性能分析,对系统和生产工艺流程性能进行评价;最后根据分析评价结果提出改进系统性能的建议.

其中,求出分布式供能系统的能耗特性指标后,对各子系统进行烟损的横向比较,并将子系统的烟效率和同类型设备进行比较,从而对各子系统的能耗特性进行评价;求出分布式供能系统的经济特性指标后,将各子系统运行产生的烟损成本进行横向比较,对各子系统的经济特性进行评价,而烟经济系数是将系统能耗特性与经济特性相关联的关键指标,为系统性能优化指明了方向.如图4所示,增加非能量成本的投入可以使系统的烟效率提高,能耗特性提升,系统总成本先下降再上升,将总成本达到最低时对应的称为参考值.当小于参考值时,通过更换设备等方法增加非能量成本的投入可以同时实现能耗特性和经济特性的优化;当大于参考值时,能耗特性已达到较高水平,若继续追加非能量成本,以经济特性的大幅下降换取能耗特性的小幅提升,代价太大,此时,则应从分布式供能系统整体出发,优化生产工艺流程.

根据不同应用场景对系统性能的要求,设置能耗特性和经济特性的权重,选择不同的目标 f_{Ex} ,从而采取不同的改进措施,实现系统性能的优化.根据子系统类型将常见的改进措施分类汇总如表1所示.下文

继续将此种分析评价方法在某供电局分布式供能系统的案例中进行具体应用.

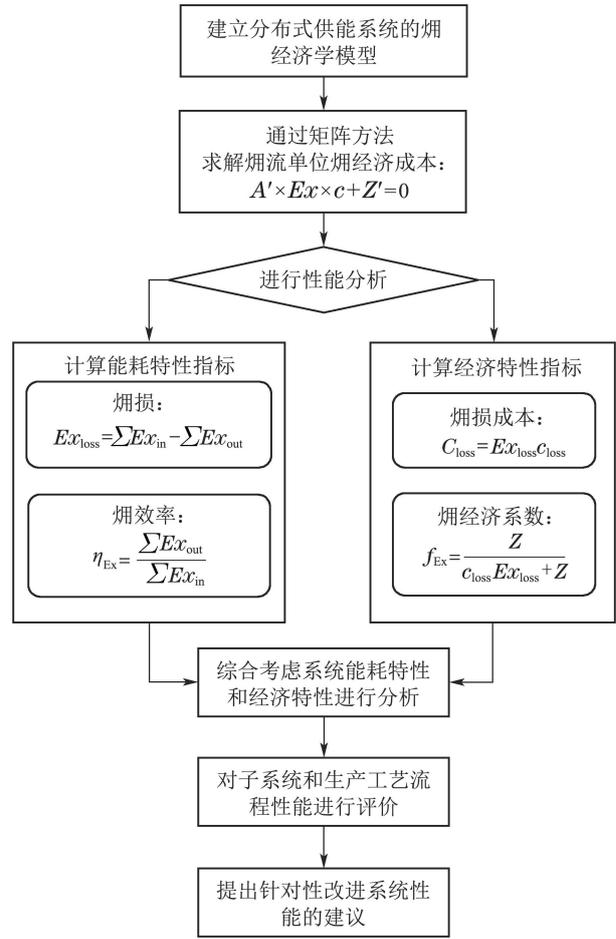


图3 基于烟经济学的分布式供能系统分析评价流程
Fig. 3 Analysis and evaluation process of distributed energy supply system based on exergonic economic

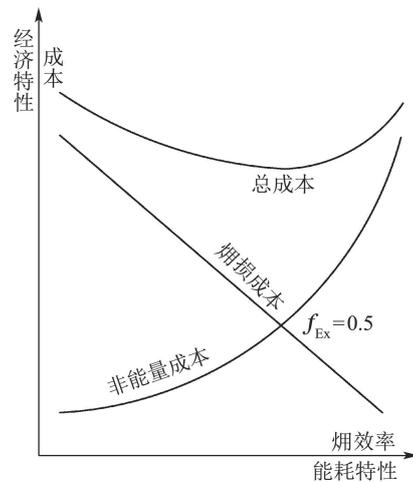


图4 子系统性能-成本变化曲线
Fig. 4 Subsystem performance – cost curve

表 1 分布式供能系统性能改进措施

Table 1 Performance improvement measures of distributed energy supply system

改进措施	
能量转换设备	换用焓效率不同的组件、改变运行工况
能量传递管道	改变保温材料厚度、改变传递管道材质、管径、进行流量调节
能量存储设备	增加/去除能量存储设备、改变储能设备容量
系统整体性	增加/去除能量回收利用环节、调整生产结构

表 2 分布式供能系统焓流参数

Table 2 Exergy flow parameters of distributed energy supply system

系统焓流	焓流序号	焓流数值/kW
输入天然气化学焓	Ex_1	875.8889
电网购电焓	Ex_2	64.6860
燃气轮机产电焓	Ex_3	291.9630
电空调制冷焓	Ex_4	71.0500
燃气轮机余烟热焓	Ex_5	169.0507
溴化锂机组制冷焓	Ex_6	42.1963
冷水管末端冷焓	Ex_7	32.9683

5 算例分析

5.1 工程算例

为了验证此种分析评价方法的正确性和实用性, 对某供电局的分布式供能系统进行建模, 并由计算结果对该分布式供能系统的能耗特性、经济特性进行分析评价。

该分布式供能系统使用燃气轮机发电供给办公楼中央电空调制冷使用, 缺口电量经由电网购电补足, 天然气燃烧产生的高温余烟, 通过溴化锂吸收制冷机组进行制冷, 经由冷水管向办公楼供冷, 办公楼需要的冷量由溴化锂制冷机组和中央电空调共同供给。根据前述原理和各子系统间能量传递、转换关系, 该分布式供能系统网络模型如图5所示。

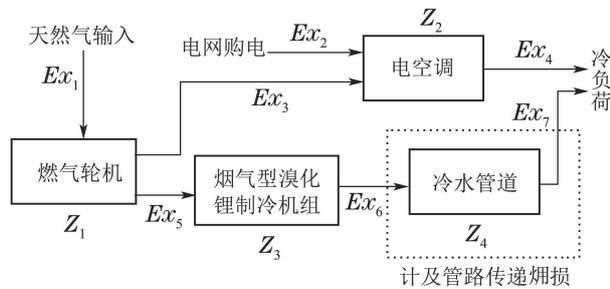


图 5 某供电局分布式供能系统网络模型

Fig. 5 Distributed energy supply system model of a power supply bureau

对该分布式供能系统进行数据采集时, 环境温度为 34.6°C , 电价为 $0.9\text{元}/\text{kWh}$, 天然气价格为 $2.0\text{元}/\text{m}^3$, 天然气低位发热值 $9.77\text{ kWh}/\text{m}^3$, 燃气轮机排气温度为 280°C , 溴化锂机组排烟温度为 160°C , 系统各焓流值如表2所示^[25]。

该分布式供能系统涉及到的设备造价分别是: 微燃机组造价为 $700\text{元}/\text{kW}$; 中央电空调造价为 $3450\text{元}/\text{kW}$, 溴化锂制冷机组造价为 $1017\text{元}/\text{kW}$ ^[26], 冷水管造价为 $500\text{元}/\text{m}$ ^[27]。为进一步确定各焓流的单位焓经济成本, 对各子系统的非能量成本进行计算, 得到各子系统的非能量成本汇总如表3所示。

表 3 子系统非能量成本

Table 3 Subsystem cost and non-energy cost

子系统	非能量成本/(元·h ⁻¹)
燃气轮机	19.1781
电空调	184.0000
溴化锂制冷机组	11.8882
冷水管	4.5662

将本文所提按能质系数分摊方法与传统分摊方法对比, 计算得到各股焓流成本汇总如表4所示。可以看出, 传统分摊方法下燃气轮机产生的两种产品的单位焓经济成本都为 $0.4266\text{元}/\text{kWh}$, 不符合优质优价的规律。按能质系数分摊方法, 电焓成本为 $0.5409\text{元}/\text{kWh}$, 热焓成本为 $0.2400\text{元}/\text{kWh}$, 体现了价值差异。

表 4 分布式能源系统各焓流单位焓经济成本

Table 4 Unit cost of exergy flow in distributed energy system

焓流序号	单位焓经济成本/(元·kWh ⁻¹)	
	按能质系数分摊	传统分摊方法
Ex_1	0.2047	0.2047
Ex_2	0.9000	0.9000
Ex_3	0.5409	0.4266
Ex_4	5.6317	4.9238
Ex_5	0.2400	0.4266
Ex_6	1.2431	2.1696
Ex_7	1.7295	2.9154

按能质系数分摊方法计算下, 电空调将电焓转化成冷焓的成本($5.6317\text{元}/\text{kWh}$)高于传统分摊方法($4.9238\text{元}/\text{kWh}$); 水冷空调将余烟热焓转化成热焓的成本($1.2431\text{元}/\text{kWh}$)低于传统分摊方法($2.1696\text{元}/\text{kWh}$), 更符合实际生产情况, 由此验证了本文所提模型的实用性。

5.2 系统性能分析评价与改进建议

为分析分布式供能系统中各烟流的单位烟经济成本随生产流程环节变化情况,以燃气轮机燃烧天然气发电,并排放高温余烟通入烟气型溴化锂制冷机组进行制冷的过程为例进行说明.过程中各种烟流的数量和单位烟经济成本变化曲线如图6所示.

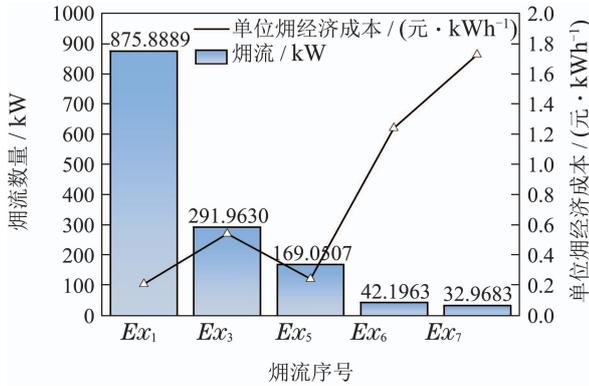


图6 烟流数量和单位烟经济成本变化

Fig. 6 Exergy quantity and unit exergy economic cost change

由图6可以看出,溴化锂制冷机组向负荷供冷时在传递管道内产生了9.2280 kW的烟损,使得供应到冷负荷的冷烟成本上升了39%,由此说明,烟在网络中传递产生的损耗对烟流成本分析不可忽视,验证了本文所提模型的优越性.

整个供冷过程中,燃料烟到负荷得到的冷烟($Ex_1 - Ex_5 - Ex_6 - Ex_7$),烟传递的不可逆性导致能量品质降低,烟流数量逐级减少;过程环节非能量成本的不断叠加,也使烟流的单位烟经济成本不断升高.因此,仅从烟数量的角度进行分析是不全面的,烟的价格化是烟分析走向实用的必由之路,也正是开展烟经济分析必要性的体现.

该分布式能源系统的外部输入能源充足,本文以子系统输入烟流的平均单位烟经济成本给烟损定价.根据模型求解得到的烟流成本和非能量成本进行计算,得到各子系统能耗特性和经济特性参数汇总如表5所示.

表5 各子系统能耗特性和经济特性参数

Table 5 The energy consumption characteristic and economic characteristic parameter of each subsystem

子系统	烟损 / kW	烟效率	烟损成本 / (元·h ⁻¹)	烟经济系数
燃气轮机	414.8752	0.5263	84.9284	0.1842
电空调	285.5990	0.1992	173.0761	0.5153
溴化锂制冷机组	126.8544	0.2496	30.4390	0.2809
冷水管道	9.2280	0.7813	11.4709	0.2847

对各子系统性能进行分析,燃气轮机产生的烟损最多,对比同类其他设备发现,该燃气轮机的能量利用效率在同类型设备中处于中等偏下水平;中央电空调的烟效率最低,属于能耗特性较差的单元,是由于电能和冷能的品位差距过大,中央电空调将电烟转换成冷烟的过程中产生了大量损耗;电空调产生的烟损成本最高,超过了燃气轮机,是因为冷烟的单位烟经济成本远远高于天然气烟;而冷水管道产生的火用损远远低于其他子系统,但由于冷烟单位烟经济成本高昂,带来的烟损成本却并不低;由此可见,综合考虑能耗特性和经济特性进行分析,得到的评价结果才是全面的.

各子系统非能量成本和烟损成本占比如图7所示,烟经济系数为系统的优化指明了方向,根据该指标可以提出改进系统性能的措施.比如,中央电空调的烟效率仅为0.1992,但其烟经济系数为0.5153,高于参考值0.5^[12,25],继续追加非能量成本投入,并不能对系统能耗特性有很大提升,反而会使系统经济特性大幅降低,导致“节烟而不省钱”.中央电空调将高品位的电能转为低品位的冷能,能量的降质带来极大的烟损,属于能源供应途径的缺陷,应尽可能减少以此方式供冷的比重,仅将其作为余热烟制冷的补充手段,实现能量的梯级利用.

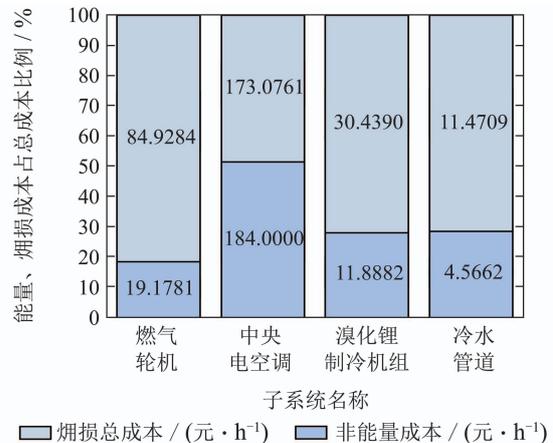


图7 各子系统非能量成本、烟损成本比例

Fig. 7 Proportion of non-energy cost and total exergy loss cost of each subsystem

该分布式供能系统中,燃气轮机、溴化锂制冷机组、冷水管道烟经济系数都远低于参考值,此时,增大非能量成本投入,可以同时提升系统能耗特性和经济特性.针对燃气轮机和溴化锂制冷机组,可以更换效率更高的机组,而从系统整体性的角度进行分析,可以增加余热回收装置对溴化锂制冷机组排放的余热进行进一步回收,降低产生的烟损.

由前述的分析可知,越靠近生产流程末端,烟流的单位烟经济成本越高,采取措施降低生产流程末端环节产生的烟损可以有效提高系统的经济性.此分布式

供能系统中, 冷水管道连接供能站和负荷, 位于生产流程的末端。冷媒存储冷焓的能力低, 因此, 冷焓传递需要冷媒流量很大, 传递过程中的温度改变将带来大量焓损。因此, 针对冷水管道, 可以增大对管材和管道保冷材料的投资, 合理选择传递冷焓的温度和流量。

6 结论

为了更全面地对分布式供能系统的性能进行分析评价, 本文建立了基于焓经济学的分布式供能系统统一分析模型, 并设计了分布式供能系统分析评价方法和流程, 最后以某供电局分布式供能系统为例进行分析验证, 结果表明: 1) 与传统分摊方法相比, 按能质系数分摊方法可以反映不同种类能源焓价值的差异; 2) 本文所提基于焓经济学的分布式供能系统统一分析模型, 可以充分考虑到网络传递中焓损的影响, 准确计算系统各焓流成本; 3) 综合考虑能耗特性和经济特性, 才能对系统性能提出更全面、准确的评价, 并据此改进系统性能。本文工作可为分布式供能系统节能改造提供科学参考。

参考文献:

- [1] JIN Hongguang, XUAN Yimin, HE Yaling, et al. Engineering thermophysics and sustainable energy development. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(10): 6 – 12.
(金红光, 宣益民, 何雅玲, 等. 工程热物理学与能源可持续发展. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(10): 6 – 12.)
- [2] CHEN H Y, CHEN S M, LI M, et al. Optimal operation of integrated energy system based on exergy analysis and adaptive genetic algorithm. *IEEE Access*, 2020, PP(99): 1 – 1.
- [3] CHEN Haoyong, WEN Junzhong, WANG Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(10): 66 – 76.
(陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66 – 76.)
- [4] CHEN Haoyong, LI Ming, QIU Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, 49(3): 243 – 254.
(陈皓勇, 李明, 邱明, 等. 时变能量网络建模与分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 243 – 254.)
- [5] HUA Ben. *Analysis and Synthesis of Energy Consumption in Process*. Beijing: Hydrocarbon Processing Press, 1989.
(华贲. 工艺过程用能分析及综合. 北京: 烃加工出版社, 1989.)
- [6] ZHAO Chun, WANG Peihong. Investigation on the evaluation indices for thermoeconomic analysis of combined cycle power plants. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(23): 44 – 50.
(赵春, 王培红. 燃气-蒸汽联合循环热经济学分析评价指标研究. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 44 – 50.)
- [7] LI Huijun, LIU Xuemin. Analysis on the energy saving of a 600 MW subcritical unit based on accounting model of thermoeconomics. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2013, 40(2): 89 – 94.
(李慧君, 刘学敏. 基于热经济学会计模式亚临界600 MW机组节能分析. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(2): 89 – 94.)
- [8] CHENG Weiliang, JI Hui, DI An. Thermoeconomic analysis of a 1000 MW coal-fired power generation unit. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*, 2013, 28(2): 187 – 191.
(程伟良, 季辉, 狄安. 1000 MW燃煤机组的热经济学分析. 热能动力工程, 2013, 28(2): 187 – 191.)
- [9] ELSAYED Y, EVANS R. Thermoeconomics and the design of heat systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 1970, 92(1): 27.
- [10] TSATSARONIS G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, 19(3): 227 – 257.
- [11] VALERO A, LOZANO M, MUNOZ M. *A General Theory of Exergy Saving on the Exergetic Cost*. ASME Book H0341A, 1986, 2: 1 – 8.
- [12] WANG Jiaxuan, ZHANG Hengliang. *Power Engineering Thermoeconomics*. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1995.
(王加璇, 张恒良. 动力工程热经济学. 北京: 水利电力出版社, 1995.)
- [13] YAN Aibin. *Heat transfer performance and thermoeconomic analysis for ground source heat pump system*. Tianjin: Tianjin University, 2005.
(颜爱斌. 地源热泵系统的传热特性与热经济学分析. 天津: 天津大学, 2005.)
- [14] LI Bin, WANG Jiaojiao. Exergoenvironmental cost analysis for a dual-purpose power and desalination plant. *Turbine Technology*, 2015, 57(1): 4.
(李斌, 王佼佼. 考虑环境成本的水电联产机组热经济学分析. 汽轮机技术, 2015, 57(1): 4.)
- [15] HOU Hongjuan, WANG Mengjiao, YANG Yongping. Exergy evaluation of solar aided coal-fired power generation system. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(1): 119 – 125.
(侯宏娟, 王梦娇, 杨勇平. 太阳能辅助燃煤发电系统性能的焓方法分析. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 119 – 125.)
- [16] HOU Hongjuan, WANG Lu, FU Li, et al. Thermal performance researches of solar aided air-cooled coal-fired power system. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(8): 1638 – 1642.
(侯宏娟, 王露, 付立, 等. 太阳能辅助空冷机组互补发电系统热性能研究. 工程热物理学报, 2015, 36(8): 1638 – 1642.)
- [17] HAN Zhonghe, WANG Jixuan, WANG Yingying, et al. Performance study on thermodynamic systems and techno-economic analysis of carbon capture for solar thermal aided coal-fired power plants. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(5): 10.
(韩中合, 王继选, 王莹莹, 等. 太阳能辅助燃煤机组碳捕集系统性能研究及技术经济分析. 中国电机工程学报, 2014, 34(5): 10.)
- [18] QI Haiqing, HAN Wei, ZHANG Na. Exergy cost allocation method based on energy level and its application. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(6): 1141 – 1146.
(亓海青, 韩巍, 张娜. 基于品位的成本分摊方法及其应用. 工程热物理学报, 2016, 37(6): 1141 – 1146.)
- [19] LIU Danna. *Modeling and research on cost allocation of cogeneration of heat power and cool units*. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
(刘丹娜. 热电冷多联产机组成本分摊建模与研究. 北京: 华北电力大学, 2017.)
- [20] ZHOU Huan, HUANG Longqiong, WU Renjian, et al. Value assessment method of integrated energy system based on green exergy economy. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(2): 36 – 42.
(周欢, 黄龙琼, 伍人剑, 等. 基于绿色焓经济的综合能源系统价值评价方法. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 36 – 42.)
- [21] ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3706 – 3713.
(张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3706 – 3713.)

- [22] ZHANG Shixiang, LÜ Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 8.
(张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法. 电网技术, 2018, 42(8): 8.)
- [23] GOGUS Y. Thermo-economic optimization. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(7): 559 – 580.
- [24] SILVEIRA J L, TUNA C E. Thermo-economic analysis method for optimization of combined heat and power systems. Part I. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(6): 673 – 678.
- [25] GE Hailin, CHEN Haoyong, WEN Junzhong, et al. Distributed energy system analysis based on energy network theory. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(6): 34 – 40.
(葛海麟, 陈皓勇, 文俊中, 等. 基于能量网络理论的分布式供能系统分析. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 34 – 40.)
- [26] WANG Zhiwei. *Analysis and optimization for MT-CCHP*. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
(王志伟. 微型燃气轮机冷热电联供系统的研究与优化. 保定: 华北电力大学(河北), 2007.)
- [27] LIU Wenjuan. *District cooling in the residential construction conditions of the advantages of using*. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.

(刘文娟. 区域供冷在小区建筑中使用的优越性条件分析. 太原: 太原理工大学, 2011.)

作者简介:

陈锦彬 硕士研究生, 目前研究方向为综合能源系统分析和运行优化等, E-mail: 6446741@qq.com;

陈皓勇 博士, 教授, 目前研究方向为新能源发电与智能电网技术、综合能源系统与能源物联网、电力经济与电力市场等, E-mail: eehychen@scut.edu.cn;

陈思敏 硕士研究生, 目前研究方向为综合能源系统建模与运行优化研究等, E-mail: 472575353@qq.com;

刘欣 硕士研究生, 目前研究方向为综合能源系统能源优化管理研究等, E-mail: 782569276@qq.com;

赵振东 博士, 目前研究方向为能量网络理论, 综合能源系统规划与运行等, E-mail: 1245252023@qq.com;

陈健润 博士, 目前研究方向为综合能源系统动力学建模与运行优化等, E-mail: 947332679@qq.com.