

基于能源集线器矩阵化建模的冷热电多能流优化调度

陆怀谷¹,庄重¹,陈亮¹,张伟¹,尹俊杰²,王建华²

(1. 国网江苏省电力有限公司 常州供电分公司,江苏 常州 213164;
2. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210018)

摘要:为研究综合能源系统多能流交互耦合特性对于优化多能流的调度方案,提高能源系统整体效率的作用,通过能源集线器构建通用能量交换分析模型,并分解为分配矩阵和转化矩阵;提出冷热电三联供系统能源集线器矩阵化模型,针对燃气轮机、电制冷机、辅助锅炉等内部元件进行矩阵化建模;考虑能源集线器内部元件的工况实时变化,一体化描述多能流的输入输出耦合关系;以能源服务商利润最大化为目标,优化每个时隙的能源输入量和分配参数。利用 Yalmip + fmincon 进行算例分析,验证了所述矩阵化模型在多能流耦合优化调度方面的作用。

关键词:综合能源系统;冷热电三联供;矩阵化建模;能源集线器;多能流

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0228-07

Optimal Scheduling of Multi-energy Flow of CCHP Based on Matrix Modeling of Energy Hub

LU Huaigu¹, ZHUANG Zhong¹, CHEN Liang¹, ZHANG Wei¹, YIN Junjie², WANG Jianhua²

(1. Changzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213164, China;
2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China)

Abstract: To study the multi-energy flow interaction and coupling characteristics of integrated energy systems for optimizing the scheduling plan of multi-energy flow and improving the overall efficiency of the energy system, a general energy exchange analysis model is constructed by an energy hub and further decomposed into a distribution matrix and a transformation matrix. On this basis, a matrix modeling method for the energy hub of the combined cooling, heating and power system is proposed. For internal components such as gas turbine, electric refrigerator, auxiliary boiler, etc., a matrix model is established to describe the input-output coupling relationship of multi-energy flow in an integrated manner by considering the real-time changes in the working conditions of the internal components of the energy hub. To maximize the profit of energy service providers as the optimization objective, the energy inputs and distribution parameters of each time slot are optimized. By numerical analysis, Yalmip + fmincon are applied to verify that the matrix model has a certain optimization effect in terms of multi-energy flow scheduling.

Keywords: integrated energy system; CCHP; matrix modeling; energy hub; multi-energy flow

0 引言

在过去较长一段时间内,由于各类能源系统彼此之间存在较少的耦合环节,因此实行不同能源系统相对独立管理的模式,如电网、热网、天然气网等属于不同公司独立规划、独立管理和独立维护^[1]。面临新形势,过去运行的管理模式会导致能源使用效率总体不高,而且面临极端天气等自然灾害(如台风、冰雹、地震)时,各类供能系统(如供电、供气、供热、供冷等)之间缺乏必要的协调配合^[2],从而导致单方面的能源故障存在引发复杂连锁反应的风险。

为了将具有不同物理本质的多种能源系统统一规划调度,当前学者已进行较为深入的研究和探讨。文献类比电路模型,并借鉴例如时域频域变换、戴维南等值定理、集中参数等效等传统电路分析方法^[3],将多能流的传输网络进行统一规划,取得了较好的数学形式上的统一,亦有

专家学者指出可能由于追求统一模型而引入了一些不必要的人为假设,值得进一步深入探讨研究以实现较为统一的模型形式和较为灵活的调度效果。部分研究着眼于提出“统一能路”的概念及其方法论,并以天然气网络、热力网络为研究对象推导了统一能路理论中的气路、水路与热路模型^[4],对于未来大规模的多能流耦合规划提供了一定的指导意见。

进一步地,国内外在综合能源系统矩阵化建模研究方面也进行了较为丰富的讨论研究。苏黎世联邦理工学院 FAVRE-PERROD P 教授团队提出能源集线器(energy hub, EH)这一概念,是用以表征不同能源载体的输入、输出、转换、存储的多端口装置^[5]。意大利学者率先提出在冷热电三联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统中根据输出能流情况,基于“回溯”算法探求能流输入情况和 EH 内部的分布情况^[6],较为细致地刻画了三联供系统内部的能流分布及其转化关系。能源集线

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019082)

作者简介:陆怀谷(1971—),男,安徽六安人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统调度。

器标准化矩阵建模在定义了节点-端口能量转化和端口-支路关联关系等基础上,能够实现计算机自动化建模,并实现综合能源系统线性化、标准化建模,适用于多种结构的综合能源系统^[7-8]。然而也存在能流之间部分耦合关系被忽略简化,导致矩阵中出现大量“0”元素和为了追求矩阵描述形式而把简单问题复杂化的问题,尤其是忽略了能源集线器内部元件运行工况的实时变化。在规划调度方面,文献[9-10]在已知各类能源年度典型日负荷曲线、输入能源最大容量与单位价格、可选设备及其投资价格等数据情况下,对区域综合能源系统的设备选择、连接方式以及典型日的设备运行方式进行优化。

在综合能源系统中,多能流耦合关系较为紧密,耦合环节较为复杂,耦合形式较为典型的是冷热电三联供系统^[11]。该系统的设计运行模式建立在能量梯级利用的概念之上,首先通过燃气轮机燃烧天然气产生高品位电能,再将低品位热能通过余热锅炉、制冷机等设备转化用于供热和制冷。根据数据统计,传统的集中发电、远程送电模式的发电效率较低,且在输配电过程中存在较大的电能损耗。类似地,集中输送热能每公里有一定的温度降落,因此一般规划过程中传输距离设计仅为数公里。然而,经过能量梯级利用的冷热电三联供系统使能源利用效率从传统发电模式的40%左右提高到80%~90%,且输电损耗相对较少^[12]。其优势在于可以在系统内引进转化效率更高的机组,实现电、气、热、冷的最优分配转化模式,显著提高多种能源利用效率;可以强化居民用户之间、建筑楼宇之间、生产企业之间的有效连接,较大程度上实现资源共享;可以有效融入太阳能发电、光伏集热、风能发电、地热利用等可再生能源,从而有效减少二氧化碳排放量,推动能源结构的升级转型^[13]。

针对上述问题,本文构建了能源集线器的通用能量交换分析模型,通过矩阵一体化描述能源集线器的能量输入端、能量输出端以及集线器内部的拓扑关系,集中明确地表征多能流之间的供能方式、用能形式和耦合关系。随后对冷热电三联供系统进行详细阐述,建立燃气轮机、电制冷机、辅助锅炉等内部元件矩阵化模型,完整描述多能流的输入、输出耦合关系并进行一定程度的解耦,最后通过算例分析验证了所述矩阵化模型在多能流耦合优化调度方面的作用。

1 通用能量交换分析模型

当前综合能源系统方面的研究多专注于考虑更为复杂的情况和创新优化调度理论,而瑞士学者较早提出能源集线器的概念:它被认为是可以转换、调节和存储多个能量载体的单元,代表了不同能源基础设施和负载之间的接口。图1表述了能源集线器概念。

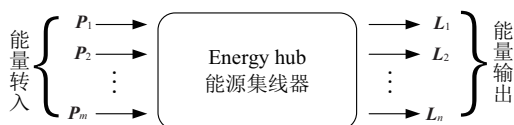


图1 通用能量交换分析模型

在研究过程中,稳态流量模型相对暂态流量模型来说更为简洁,且针对较小范围的能源集线器来说也更为适用。对流经能量转换设备的流量进行简单分析,将其能量效率定义为稳态输出与输入之比。通过多个输入和输出,可以定义一个元素与功率流一一对应的转换矩阵。耦合矩阵描述了能流从集线器的输入到输出的转换,元素可从集线器的转换器结构和转换器的效率特性中得出。从通用网络流量到更详细的稳态功率流量模型,电、气、热等各种流量均适用,其适用的程度取决于所进行的研究类型。

能源枢纽左端的 P 向量表示多能源系统的原始能源输入,下标 $m \in M$ 表示输入能源种类;右端的 L 向量表示经过转换后的能源输出,下标 n 表示输出能源种类。因此数学层面上的能源集线器是一个映射函数:

$$L=f(P) \quad (1)$$

式中函数 $f(\cdot)$ 可以考虑到各种形式能源的传输、转换、存储等环节。因此可以利用一个耦合矩阵来描述输入-输出之间的关系:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 c_{ij} 为耦合因子,表示第 j 种形式能源输出与第 i 种形式能源输入的比值。各种形式能源的输入到输出可以分为两个步骤:能源分配和能源传输或转化。能源分配是指各种能源以一定的比例分配到不同能源传输或转化设备。能源传输或转化是指能源输入该设备后通过机械、化学等途径进行转化,具有一定的转化效率。所以可以将式(2)中的耦合矩阵作进一步的分解:

$$\begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \vdots \\ P'_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{k1} & v_{k2} & \cdots & v_{km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \cdots & \eta_{1k} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \cdots & \eta_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \eta_{n1} & \eta_{n2} & \cdots & \eta_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P'_1 \\ P'_2 \\ \vdots \\ P'_k \end{bmatrix}$$

可以简记为

$$L=\eta NP=CP \quad (4)$$

式中: v_{ij} 为分配因子,表示第 i 种形式能源输入分配到用于转化第 j 种形式能源的比例,对应的 N 为分配矩阵; η_{ij} 为效率因子,表示第 i 种形式能源转化为第 j 种形式能源的效率,对应的 η 为转化矩阵。

2 CCHP 系统矩阵化建模

2.1 CCHP 系统及其内部元件

图2展示了基于CCHP的能源集线器,该系统用于详细说明如何建立能源集线器模型,它由热电联供(combined heat and power, CHP)单元、辅助锅炉(auxiliary

boiler, AB)、电制冷机(electric refrigerator, ER)和吸收式制冷机(absorption refrigerator, AR)组成,其中热电联供单元

包括燃气轮机(gas turbine, GT)和余热锅炉(waste-heat boiler, WB)两部分。

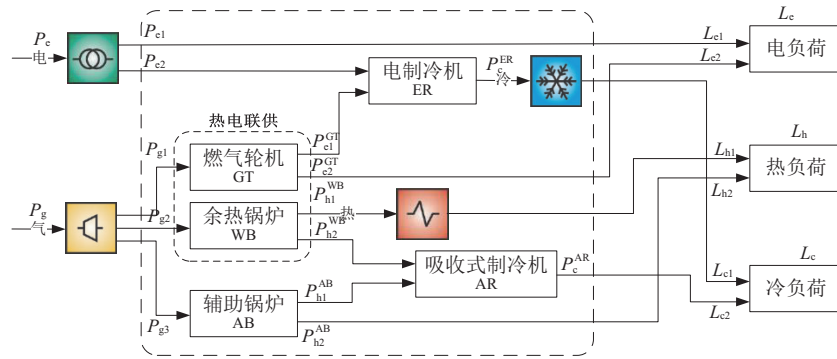


图2 CCHP系统及其内部元件示意图

能源输入端为电能和天然气两种,分别记为 P_e 、 P_g ; 能源输出端连接电负荷 L_c 、热负荷 L_h 、冷负荷 L_c 三种负荷形式。

输入电能 P_e 从电力传输系统获得,进入能源集线器,一部分直接用于电负荷,其电能损耗忽略不计,另一部分进入电制冷机 ER 转化为冷能,满足部分冷负荷需求。

$$P_e \cdot N_e = P_e \cdot \begin{bmatrix} v_{e1} \\ v_{e2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{e1} \\ P_{e2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

输入电能 P_e 经分配矩阵 N_e 作用后,分为 P_{e1} 和 P_{e2} 两部分,其中 v_{e1} 、 v_{e2} 分别表示分配比例,且 $v_{e1} + v_{e2} = 1$ 。

天然气 P_g 通过气网输送至冷热电三联供系统中, P_{g1} 、 P_{g2} 部分用于热电联供单元 CHP(包括燃气轮机 GT 和余热锅炉 WB),另一部分 P_{g3} 用于辅助锅炉 AB。

$$P_g \cdot N_g = P_g \cdot \begin{bmatrix} v_{g1} \\ v_{g2} \\ v_{g3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ P_{g3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

输入天然气 P_g 经分配矩阵 N_g 作用后,分为 P_{g1} 、 P_{g2} 和 P_{g3} ,其中 v_{g1} 、 v_{g2} 、 v_{g3} 表示分配比例,且 $v_{g1} + v_{g2} + v_{g3} = 1$ 。需要注意的是,在实际生产过程中,天然气 P_{g1} 、 P_{g2} 首先全部注入燃气轮机 GT 燃烧转化,随后利用余热锅炉 WB 进行热能回收,并非图 2 中所示天然气 P_{g1} 、 P_{g2} 分别进入燃气轮机 GT、余热锅炉 AB。如果按照实际生产次序进行建模过于复杂,为简化计算采用上述表达方式;且从能量转化形式这一本质上来说,将 P_{g1} 视为注入燃气轮机 GT 产生电能, P_{g2} 视为注入余热锅炉 AB 产生热能也有一定道理。

对于燃气轮机 GT 来说,燃烧生产的电能一部分直接用于电负荷,另一部分经过电制冷机 ER 生成冷能供应给冷负荷。由图 2 可知,燃气轮机为输入一端口、输出二端口形式:

$$\begin{cases} P_{in}^{GT} = [P_{g1}] \\ P_{out}^{GT} = P_{in}^{GT} \cdot \eta_e^{GT} = [P_{g1}] \cdot \begin{bmatrix} \eta_{e1}^{GT} \\ \eta_{e2}^{GT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{e1}^{GT} \\ P_{e2}^{GT} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{in}^{GT} 、 P_{out}^{GT} 分别表示燃气轮机 GT 单元的输入能流与输出能流矩阵; η_e^{GT} 表示燃气轮机 GT 单元的转化矩阵,上

标 GT 表示转化单元名称,下标 e 表示输出能源类型为电能;由于燃气轮机为输入一端口、输出二端口形式,则转化矩阵 η_e^{GT} 为 1×2 矩阵 $[\eta_{e1}^{GT}, \eta_{e2}^{GT}]^T$, η_{e1}^{GT} 和 η_{e2}^{GT} 分别对应输出电能 P_{e1}^{GT} 、 P_{e2}^{GT} 的转化效率。

对于余热锅炉 WB 来说,收集的热能部分用于热负荷,其余部分用于吸收式制冷机转化为冷能。

$$\begin{cases} P_{in}^{WB} = [P_{g2}] \\ P_{out}^{WB} = P_{in}^{WB} \cdot \eta_h^{WB} = [P_{g2}] \cdot \begin{bmatrix} \eta_{h1}^{WB} \\ \eta_{h2}^{WB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{h1}^{WB} \\ P_{h2}^{WB} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{in}^{WB} 、 P_{out}^{WB} 分别表示余热锅炉 WB 单元的输入能流与输出能流矩阵; η_h^{WB} 表示余热锅炉 WB 单元的转化矩阵,上标 WB 表示转化单元名称,下标 h 表示输出能源类型为热能; η_{h1}^{WB} 和 η_{h2}^{WB} 分别对应输出热能 P_{h1}^{WB} 、 P_{h2}^{WB} 的转化效率。

对于辅助锅炉 AB 来说,

$$\begin{cases} P_{in}^{AB} = [P_{g3}] \\ P_{out}^{AB} = P_{in}^{AB} \cdot \eta_h^{AB} = [P_{g3}] \cdot \begin{bmatrix} \eta_{h1}^{AB} \\ \eta_{h2}^{AB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{h1}^{AB} \\ P_{h2}^{AB} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{in}^{AB} 、 P_{out}^{AB} 分别表示辅助锅炉 AB 单元的输入能流与输出能流矩阵; η_h^{AB} 表示辅助锅炉 AB 单元的转化矩阵; η_{h1}^{AB} 和 η_{h2}^{AB} 分别对应输出热能 P_{h1}^{AB} 、 P_{h2}^{AB} 的转化效率。

对于电制冷机 ER 来说,

$$\begin{cases} P_{in}^{ER} = P_{e2} + P_{e1}^{GT} \\ P_{out}^{ER} = P_{in}^{ER} \cdot \eta_c^{ER} = (P_{e2} + P_{e1}^{GT}) \cdot \eta_c^{ER} = P_c^{ER} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{in}^{ER} 、 P_{out}^{ER} 分别表示电制冷机 ER 单元的输入能流与输出能流矩阵,注意与式(7)~式(9)中的矩阵形式加以区分; η_c^{ER} 表示电制冷机 ER 单元的转化效率,上标 ER 表示转化单元名称,下标 c 表示输出能源类型为冷能;由于燃气轮机为输入二端口、输出一端口形式,且在某一固定时隙内转化效率 η_c^{ER} 保持不变,则输出冷能 P_c^{ER} 由式(10)可得。

对于吸收式制冷机 AR 来说,

$$\begin{cases} P_{in}^{AR} = P_{h2}^{WB} + P_{h1}^{AB} \\ P_{out}^{AR} = P_{in}^{AR} \cdot \eta_c^{AR} = (P_{h2}^{WB} + P_{h1}^{AB}) \cdot \eta_c^{AR} = P_c^{AR} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{in}^{AR} 、 P_{out}^{AR} 分别表示吸收式制冷机 AR 单元的输入能流与输出能流矩阵; η_c^{AR} 表示吸收式制冷机 AR 单元的转化

效率; P_e^{AR} 表示输出冷能。

2.2 输入、输出矩阵化模型

由图 2 所示的基于 CCHP 系统能源集线器,根据式(2)-式(4)可得输入矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix} \quad (12)$$

经分配矩阵作用后的分配矩阵 P' 如下:

$$P' = \begin{bmatrix} N_e & 0 \\ 0 & N_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{e1} & \vdots & & & \\ & P_{e2} & \vdots & & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & P_{g1} & \\ & 0 & \vdots & & P_{g2} \\ & & & & & P_{g3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

从输出端向能源集线器内部看,输出矩阵即负载矩阵 L :

$$L = \begin{bmatrix} L_e \\ L_h \\ L_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{e1} + L_{e2} \\ L_{h1} + L_{h2} \\ L_{c1} + L_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{e1} + P_{e2}^{GT} \\ P_{h1}^{WB} + P_{h2}^{AB} \\ P_c^{ER} + P_c^{AR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{e1} + P_{g1} \cdot \eta_{e2}^{GT} \\ P_{g2} \cdot \eta_{h1}^{WB} + P_{g3} \cdot \eta_{h2}^{AB} \\ (P_{e2} + P_{e1}^{GT}) \cdot \eta_c^{ER} + (P_{h2}^{WB} + P_{h1}^{AB}) \cdot \eta_c^{AR} \end{bmatrix} \quad (14)$$

联立式(12)-式(14),并根据式(4)的化简形式 $L = CP$ 即可求得输入、输出的耦合矩阵 C 。

2.3 优化目标与约束条件

优化目标:对能源服务商而言,能源集线器向用能负荷输出的电能、热能、冷能,分别赋予“售能单价”;输入的电能、天然气从电力系统和天然气系统购入,分别赋予“购能单价”。在每个时隙内,满足用户用能需求的前提下,实现盈利最大化。

约束条件:1)每一时隙分配矩阵中的元素都在各自合理区间内动态变化,且满足不同种类输入能源集线器的能源分配比例之和为 1;2)燃气轮机 GT、电制冷机 ER 等单元设备的输入能源量应处于 (\min, \max) 合理的范围之内;3)转化单元的转化效率与设备性能、环境因素等有紧密关系,同样应处于合理区间之内;4)还应满足能源集线器内部能流转化的等式约束,如式(14)所示。

公式化表达如下:

$$\begin{aligned} \max \quad & \pi = R - C = \sum_{\text{output}} L \cdot \alpha - \sum_{\text{input}} P \cdot \beta \\ \text{s.t.} \quad & \sum v_m = 1, \quad \forall m \in M, \\ & P_{\min} \leq P_i \leq P_{\max}, \quad \forall i, \\ & \eta_{\min} \leq \eta_i \leq \eta_{\max}, \quad \forall i, \\ & \& \text{式(14)} \end{aligned} \quad (15)$$

功率乘时间等于能量,即 $P \times t = E$ 。本文所考虑的时间间隔均为 1 h,因此公式(15)表示利润 π 等于盈利 R 减去成本 C ,省略时间常数。其中, α 为服务商向用户出售能源的单价; β 为服务商从系统购入能源的单价。

已知服务商从系统购入能源单价 β 根据提前签订的合

同,向用户出售能源单价 α 在基准价格的基础上产生一定波动。本算例中的变量包括:①可控变量,分配比例 v 和购入能源量 P ,两者为优化变量;②不可控变量,转化效率 η ,仅可通过分配比例 v 控制 CCHP 系统内各单元的启停状态。

3 算例分析

3.1 原始数据

为了验证本文方法的有效性,使用 MATLAB - YALMIP 平台开发了上述优化程序,该算例分析中所用的硬件环境是 Intel(R) Core(i) i7-6500 M CPU@2.50 GHz, 8 GB RAM, Win10 64 位(操作系统), MATLAB R2019 b (开发环境), YALMIP 版本是 R20200116。

fmincon 函数可以被用来求解带约束条件的非线性多变量函数(constrained nonlinear multivariable function)的最小值,即可以用来求解带约束的非线性规划问题。其非线性规划模型表达式中 b, b_{eq} 是向量, A, A_{eq} 是矩阵, $c(x)$ 和 $c_{eq}(x)$ 是返回向量的函数,而 $f(x)$ 是返回标量的函数, $f(x), c(x)$ 和 $c_{eq}(x)$ 可以是非线性函数。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ c(x) \leq 0 \\ c_{eq}(x) = 0 \\ lb \leq x \leq ub \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

能源服务商购入和售出能源单价如表 1 所示。在实际情况下,价格随供需等多种因素而波动。因此,在算例分析中单价随机波动 $\pm 5\%$,每小时更新一次。在未来研究中,可将负荷响应、价格杠杆纳入考量范围之内。

表 1 能源服务商购入和售出能源单价

季节	$\alpha_e /$ (元/kWh)	$\alpha_h /$ (元/kWh)	$\alpha_c /$ (元/kWh)	$\beta_e /$ (元/kWh)	$\beta_g /$ (元/m ³)
夏季	0.60	1.04	0.90	0.27	0.73
冬季	0.60	0.98	1.10	0.20	0.80

根据表 2 可以得知,本算例所考虑的 CCHP 系统中转化单元输入功率和转化效率范围。根据统计计算结果给定 $t=0$ 时刻的初始数据后,为后续每一时刻的转化效率增加 random 随机函数,用于模拟各个元件运行转化效率的不确定性。

表 2 转化单元输入功率和转化效率范围

转化单元	P_{\min}	P_{\max}	η_{\min}	η_{\max}
燃气轮机 GT	100 m ³	200 m ³	2.0	3.8
余热锅炉 WB	50 m ³	150 m ³	4.0	5.2
辅助锅炉 AB	0 m ³	200 m ³	6.0	8.5
电制冷机 ER	0 kW	50 kW	3.0	3.4
吸收式制冷机 AR	0 kW	200 kW	0.6	0.7

夏季、冬季典型日负荷需求 24 h 内随时间变化如图 3

所示。根据“需求决定供给”的原则,综合能源服务商从系统中购入能量由该时隙的能源需求量及其种类所决定。由图3可见,电负荷需求基本保持稳定,符合峰谷波动规律,且夏季用电需求较大;热负荷需求在夏季7时、20时附近出现峰值,在冬季中午前后出现谷值但基本平稳;冷负荷在夏季15时前后出现峰值,较大需求范围保持6h左右,日出前后需求最少,而冬季对冷负荷需求整体维持在较低水平。

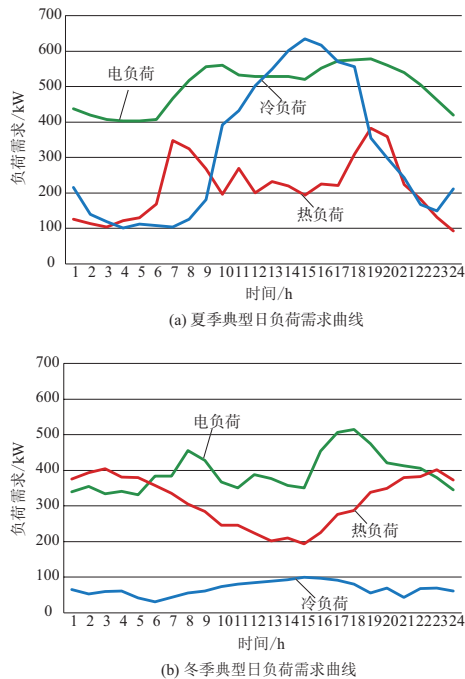


图3 夏季、冬季典型日负荷需求曲线图

3.2 仿真结果

夏季、冬季典型日利润曲线随时间波动情况如图4所示。对比图3的夏季典型日负荷需求可知,利润曲线走势与冷负荷需求走势基本一致,均为10时~20时出现较大值,且18时附近利润最大,此时电、热、冷负荷需求量之和也接近峰值。类似地,将图3的冬季典型日负荷需求曲线与图4冬季利润曲线对比可知,利润基本保持平稳,与冬季典型日负荷需求走势类似。从图4夏季、冬季利润曲线对比可知,夏季能源收益在白天时段高于冬季能源收益,而夜间基本保持一致,甚至低于冬季能源收益。

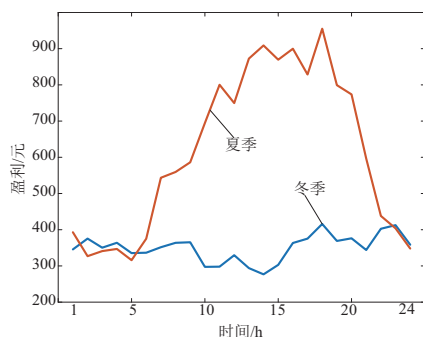


图4 夏季、冬季典型日利润曲线图

为了直观地体现本文所提调度方案在能源服务商收益方面的优势,在算例分析中采用了3种不同的方案进行对比。方案1)本文所提出的CCHP系统能源集线器调度方法,根据情况实时调整购入电、气能量以及各转化单元的分配量;方案2)电能由电力系统直接满足负荷需求,热能和冷能由天然气系统燃烧转化以满足热负荷、冷负荷需求;方案3)天然气直接通过燃气轮机等设备满足电、热、冷负荷需求,不再从电力系统购入。

以夏季典型日为例,分别采用以上3种方案进行优化调度,能源服务商利润如图5所示。整体上来说,3种方案的利润走势基本相近。将13时~18时的曲线细节放大可知,方案1明显优于其他两种方案,每个时段不同程度地获得更多收益,约为6%左右。进一步来说,除了考虑能源服务商的收益之外,能源消耗总量也应纳入考量范围之内,这与温室气体的排放、不可再生能源储量等密切相关。通过计算可知,方案1所消耗的能源总量也较少,合理采用不同种类的能源以满足用能需求,一定程度上实现了绿色节能生产供应。进一步地,将冬季、夏季典型日各分配单元在不同时隙的分配比例用累积柱形图表示,从电力系统、天然气系统购入的电能、天然气用梯形图表示,如图6、图7所示。

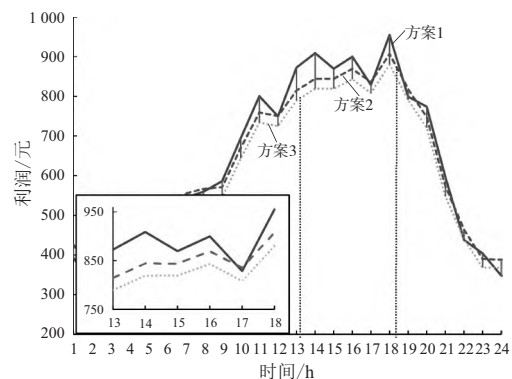


图5 夏季不同供能方案利润对比图

根据图6(a)柱形图可知,从电力系统获得的电能经分配后主要用于电负荷需求,少部分用于电制冷机ER转化为冷能;从天然气系统获得的天然气绝大部分注入热电联供系统(约2/3用于燃气轮机GT,约1/3用于余热锅炉WB),极少部分用于辅助锅炉AB,当热电联供系统满载运行仍无法满足用能需求时,才启用辅助锅炉AB进行补充,符合系统设计初衷;燃气轮机GT所发出的电能少部分注入电制冷机ER中进行电-冷转化,大部分直接用于电负荷供应,这是由于天然气成本较低,虽然经燃气轮机GT、电制冷机ER等设备转化过程中有一定的能量损失,相对于从电力系统直接购能来说更为经济,一定程度上避免了远距离输电的能量损耗;余热锅炉WB绝大部分时间直接供应热负荷,在冷负荷需求高峰时段会将注入吸收式制冷机AR的分配比例增大,以满足冷负荷需求;由于辅助锅炉AB的转化效率较高,主要用于余热锅炉WB供应冷负荷时,余热锅炉会投入生产。

类似地,图7(a)柱形图一定程度上验证了上述分析。纵向对比夏季、冬季的分配比例来看,购入电能、余热锅炉

WB 和辅助锅炉 AB 在时间变化上峰谷基本相反。这是因为夏季冷负荷需求较大,且时段性较强,在中午时刻附近各设备会充分分配能源注入电制冷机 ER 和吸收式制冷机 AR 中,以满足陡然增加的冷负荷需求。

对比图 6(b)、图 7(b)的梯形图可知,从系统购入的电力和天然气对系统的峰谷调节也有一定的积极作用。尤其是冬季典型日的天然气购入量基本保持平稳,这对整个天然气系统的平稳运行具有重要意义;夜间购入较多天

然气以满足供热需求,也能保证整体系统的稳定出气量。夏季典型日的电能购入量对电力系统削峰填谷作用更为明显,白天时段正常是用电高峰期,通过 CCHP 系统的调节使中午前后的 6 h 高峰时间购入电能减少,并用天然气代替。由于本算例仅考虑单个用户的用能需求,因此 CCHP 系统购入能源波动起伏较大,如果将此方案推广至园区级甚至跨区级范围,其削峰填谷、节能高效的特点应当更为明显。

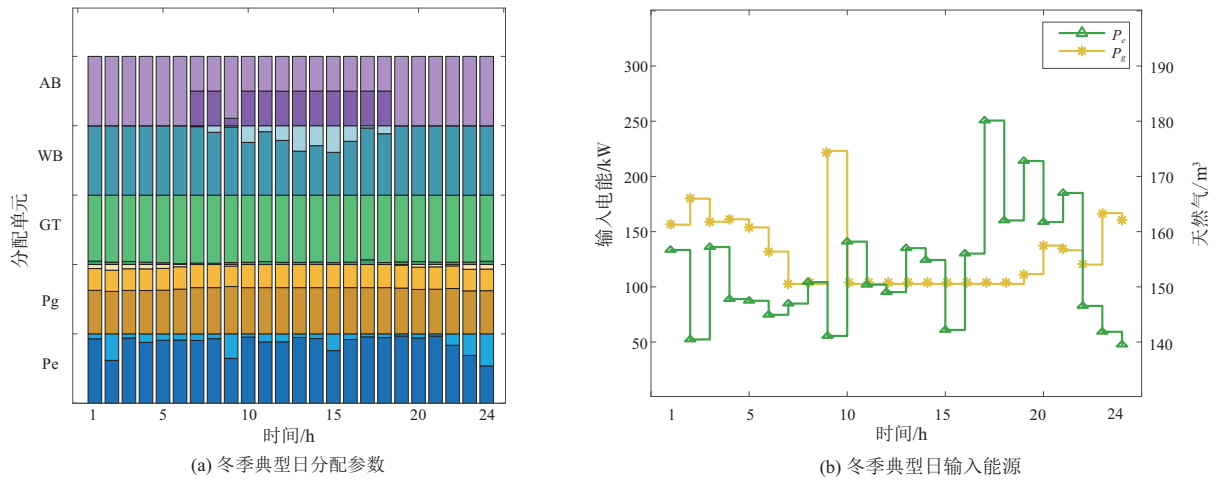


图 6 冬季典型日分配参数累积柱形图、输入能源梯形图

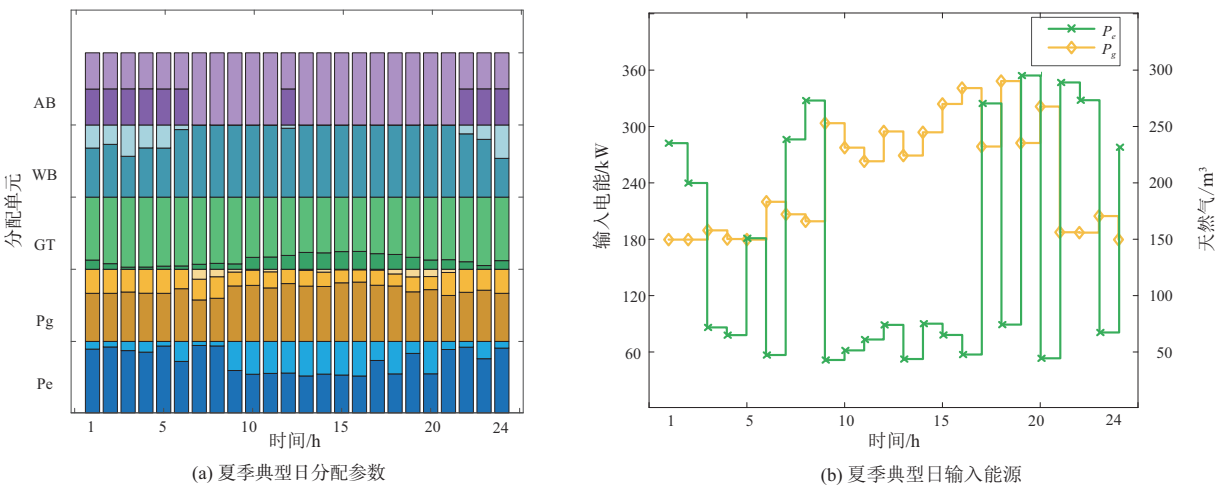


图 7 夏季典型日分配参数累积柱形图、输入能源梯形图

4 结语

本文提出的冷热电三联供系统能源集线器矩阵化建模方法,可以得到如下结论。

- 1) 通过矩阵一体化描述能源集线器的能量输入端、能量输出端以及集线器内部的拓扑关系,集中明确地表征多能流之间的供能方式、用能形式和耦合关系。
- 2) 实现对能源梯级利用,有效提高综合利用率。冷热电三联供系统的综合能源利用率比传统供能方式有显著提

升,而且由于靠近用能负荷可以减少能量传输损失。

3) 对电力系统和天然气系统有削峰谷的作用,合理优化多能流之间的转化关系,增强不同供能系统的互济协调能力,提高用能安全性和可靠性。

4) 对比其他供能方案,该方法既实现了节能环保、减少碳排放的绿色发展目标,保证了用户的多样化用能需求,又使能源服务商利益最大化。

该类问题研究的难点在于耦合矩阵的分离和解耦,研究更为快速准确的解耦方式对于能源集线器优化速度的提升具有显著效果,有待在未来工作中深入探讨。

参考文献:

- [1] 吕振华,李强,韩华春. 综合能源系统电-气互联环节的建模与仿真[J]. 科技通报,2021,37(2):75-80,85.
- [2] 仇钧,王荣历,方云辉,等. 含微电网供电的区域综合能源系统仿真研究[J]. 科技通报,2021,37(2):56-61.
- [3] 杨经纬,张宁,康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论—(一)支路模型[J]. 电力系统自动化,2020,44(9):21-32.
- [4] 陈彬彬,孙宏斌,陈瑜玮,等. 综合能源系统分析的统一能流理论(一):气路[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):436-444.
- [5] FAVRE-PERROD P. A vision of future energy networks[C]//2005 IEEE Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa. Durban, South Africa; IEEE,2005:13-17.
- [6] CHICCO G, MANCARELLA P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. Energy,2009,34(3):261-273.
- [7] WANG Y, ZHANG N, KANG C Q, et al. Standardized matrix modeling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(1):257-270.

- [8] WANG Y, CHENG J N, ZHANG N, et al. Automatic and linearized modeling of energy hub and its flexibility analysis[J]. Applied Energy,2018,211:705-714.
- [9] WANG Y, ZHANG N, ZHUO Z Y, et al. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: starting from scratch[J]. Applied Energy,2018,210:1141-1150.
- [10] HUANG W J, ZHANG N, YANG J W, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(2):1452-1464.
- [11] 刘小军,李进,曲勇,等. 冷热电三联供(CCHP)分布式能源系统建模综述[J]. 电网与清洁能源,2012,28(7):63-68.
- [12] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
- [13] 丁水汀,段伦,韩树军,等. 冷热电联供系统运行模式优化[J]. 热科学与技术,2007,6(2):95-100.

收稿日期:2022-05-13

(上接第 222 页)

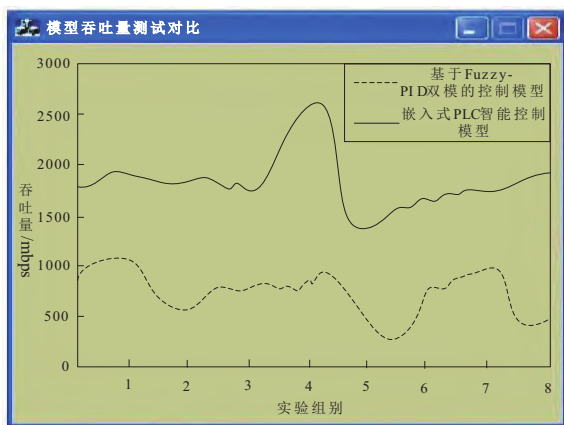


图9 嵌入式小型 PLC 智能控制模块吞吐量对比曲线

从图9中可以直观地看出,优化嵌入式小型 PLC 智能控制模块的吞吐量始终高于传统模块,即本文设计的模块在控制性能方面更加具有优势。

3 结语

在计算机网络快速发展的大背景下,PLC 的控制技术也在不断地革新,并逐步完善。通过嵌入式技术的应用,有效地改善 PLC 的智能控制模块的性能和功能,为今后自动控制方面的推广应用打下良好的基础。

参考文献:

- [1] 史春笑. 基于嵌入式软 PLC 技术的智能控制器设计[J]. 计算机测量与控制,2020,28(4):126-130.
- [2] 朱伟,王虹,李首滨,等. 基于嵌入式 PLC 的掘进机控制系统设计[J]. 工矿自动化,2020,46(2):100-106.
- [3] 高雁翔. 综掘设备嵌入式 PLC 控制系统设计[J]. 煤矿机械,2020,41(7):174-178.
- [4] 徐啸. 嵌入式软 PLC 在煤矿控制系统中的应用[J]. 能源技术与管理,2020,45(4):181-182.
- [5] 张晨凯. 矿井带式输送机 PLC 智能控制系统[J]. 机械管理开发,2020,35(3):201-203.
- [6] 魏邦霞. 基于单片机的可编程序控制器设计[J]. 电子测试,2020(5):131-132.
- [7] 王琪,吴少斌,高进可,等. 基于 PLC 的多层玻纤缠绕机控制系统的设计[J]. 机械制造与自动化,2020,49(6):182-185.
- [8] 覃尚活,郭乾,刘颖辉,等. 基于 SMART PLC 的移动机器人控制系统[J]. 机床与液压,2021,49(15):33-36.
- [9] 白克. 基于 PLC 和机器视觉的采摘机器人智能控制系统设计[J]. 农机化研究,2021,43(2):212-216.
- [10] 覃尚活,郭乾,刘颖辉,等. 基于 SMART PLC 的移动机器人控制系统[J]. 机床与液压,2021,49(15):33-36.
- [11] 李剑,王皖君. 基于 PLC 的发动机曲轴热锻智能控制系统设计[J]. 热加工工艺,2020,49(17):90-94.
- [12] 叶云洋,胡俊达. 基于 Fuzzy-PID 双模控制的磁悬浮转子系统控制器设计[J]. 电工技术,2020(12):15-16,19.

收稿日期:2022-06-07