

面向综合能源系统的烟流机理与分析方法

李家熙¹, 王丹^{1,2}, 贾宏杰^{1,2}

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072;

2. 天津市智慧能源与信息技术重点实验室(天津大学), 天津市 300072)

摘要: 综合能源系统涉及多种不同能源形式, 烟可作为衡量能源品质的一种量度。基于“流”的思路, 提出了综合能源系统网络烟流机理建模方法。首先, 基于能流界定了烟流分析范围, 分析了热力系统的烟流机理, 定义了烟势、烟势差等概念, 建立了热力系统烟流机理模型; 然后, 将相关规律拓展到其他能源网络, 提出了电力、天然气系统的烟势概念以及烟流机理模型, 将能源站等效为烟损节点, 通过各环节烟平衡分析验证烟流机理模型的优越性; 最后, 通过算例直观展示了综合能源系统烟流分布, 分析各个环节烟损情况, 通过分析整体和局部的烟平衡关系, 验证了烟流机理模型相比于传统黑箱模型更具优越性, 并探讨了烟流理论在高品质能源系统中的应用优势。

关键词: 综合能源系统; 能源品质; 烟流; 烟损; 烟势

0 引言

为解决日益严峻的环境问题, 中国提出了“碳达峰、碳中和”的目标^[1]。能源领域作为碳排放的重点, 推动能源转型、构建清洁高效可持续的能源系统势在必行^[2]。综合能源系统(integrated energy system, IES)在满足多样化负荷供能的同时, 通过多能互补降低损失、提高能效, 从而达到节能减排的目的^[3-4]。因此, 建设高效、高品质的 IES 是解决当前环境污染和资源短缺问题的重要举措。

目前, 相关研究大多基于能量层面建立 IES 模型。文献[5]提出了气路、水路、热路模型, 建立了统一能路理论, 站在能量的角度研究了电-气-热互联系统的优化调度; 文献[6]通过能量平衡对 IES 建模, 针对容量规划与运行耦合问题, 提出了一种两阶段优化方法; 文献[7]提出了基于 Lyapunov 优化的 IES 事件触发在线能流控制策略。上述研究均以系统能量作为研究重点, 基于能源集线器模型分析不同能源系统之间的能量交互。

典型 IES 通常涉及电力、天然气、热力等网络化能源系统, 传统能流研究主要关注能量的“数量”, 而未考虑不同能量的“质”的差异, 如一般认为电能能

源品质高于热能。烟作为衡量能源品质的物理量, 兼顾了能量的“量”和“质”, 被引入能源系统的研究。文献[8-10]分别研究了双气头多联产系统、地热发电厂和并网水下压缩空气储能能源转换过程中烟的变化情况。上述文献关于烟的研究大多集中在发电、产热等具体能源转换过程中烟的变化。也有部分研究将 IES 视为黑箱模型, 以烟效率作为评价 IES 发展建设的指标。文献[11-12]将烟效率作为目标函数分别引入 IES 的规划和优化调度研究; 文献[13]基于烟效率提出了计及能源品位的 IES 综合能效评估方法。在上述文献中, 无论是具体的烟变化分析还是烟效率研究, 均未考虑 IES 的网络属性。文献[14]基于能量公理建立了烟在能源网络中的管线传递分析理论, 但并未关注烟在能源网络中的分布, 即“流”的特性。目前, 有部分学者尝试将能量、碳排放、信息等变量与 IES 的网络属性相结合, 建立能流^[15]、碳流^[16]、信息流^[17]等模型。因此, 具有网络化特征的 IES 同样需要一种基于“流”的能源品质分析理论。

本文将烟分析方法应用于电力-天然气-热力耦合能源系统, 提出了 IES 烟流理论, 建立了热力系统、电力系统、天然气系统、能源站的烟流机理模型, 分析了能源系统局部和整体的烟平衡关系和能源品质特征。同时, 通过算例验证了烟流机理模型相比于传统黑箱模型更具优越性, 并探讨了烟流模型在系统能源供应品质提升研究中的优势。

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2022-01-15。

上网日期: 2022-03-15。

国家自然科学基金资助项目(51977141); 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905000); 国家电网公司总部科技项目(SGTJDK00DWJS1800232)。

1 IES 焓流的概念和研究范畴

从类比角度出发,碳流是将碳排放和网络属性相结合形成的网络流,碳排放一般在源端或荷端产生,而在实际能源网络中并不存在真正的碳流动,故在碳流理论中,碳流被视为虚拟流^[18]。不同于碳流,虽然各能源网络传输的介质不同,但各种介质都承载着负荷所需能量,该部分能量包含焓,即有效能,因此,焓在各能源网络中作为能量的一部分真实存在。焓是指在周围环境条件下理论上能转换为其他形式能量的那部分能量,兼顾了能量的“量”和“质”,充分反映了能量的价值^[19-21]。焓本身是能量的一部分,因此,在 IES 多能流的基础上建立焓流模型是切实可行的。

本文所讨论的典型 IES 包括:电力系统、天然气系统、热力系统、供冷系统以及能源站等^[22],供冷系统的焓分析方法和热力系统类似。IES 涉及的能量形式众多,包括电力系统中的电能、天然气系统中气体的静压能等。本文重点研究电力系统中的电能焓、天然气系统中的燃料焓,以及热力系统中的热量焓等能量焓;而对于 IES 中某一能源转换环节具体的焓变化过程、不具有网络属性的焓、水和天然气的压力焓等不被用户消耗的能量焓,本文不予考虑。

目前,IES 多能流研究主要通过已知源注入功率、多能负荷需求量来求解多能潮流,负荷所需能量的分析在 IES 能流研究中至关重要。本文重点关注负荷、多能耦合环节消耗的能量焓在能源网络中的分布,文中将其称为焓流。此外,IES 多能流研究通常考虑某一运行场景(时间断面)下的能量分布,采用功率流表征稳态能流分布。与多能流研究类似,本文建立的焓流模型同样考虑稳态条件,焓流与功率流具有相同的量纲^[23],反映系统能源品质特征。

2 IES 焓流机理模型

IES 中电力、天然气、热力系统涉及的能源形式不同,其中电力、天然气系统分别传输电能和天然气,热力系统以水(蒸汽)为介质将热量从热源传递至用户,能源站为系统多能耦合环节。因此,有必要分析建立各个系统相应的焓流机理模型,以获取整个 IES 的焓流分布和焓损情况。其中,热力系统传递热量焓的计算较为复杂,本章首先分析热力系统的焓流机理,并将其规律拓展到其他能源网络。

2.1 热力系统焓流机理模型

热力系统一般以水为介质,由源端向荷端供应热能,系统主要包括供水网络和回水网络,常见的拓扑形式为辐射状和环状。基于热力系统热流研

究^[24],本文重点关注水承载热流中的焓,不考虑压力焓等不被负荷消耗的焓。

2.1.1 水传递热量焓计算方法

稳态条件下,一定质量的水温度从 T_2 变为 T_1 吸收(T_1 变为 T_2 释放)的热量 ΔQ_h 可表示为^[24]:

$$\Delta Q_h = c_p m_h (T_1 - T_2) \quad (1)$$

式中: c_p 为水的比热容(单位 $J/(kg \cdot K)$); m_h 为水的质量流率(单位 kg/s)。

由式(1)可知,水温度从 T_2 变为 T_1 吸收(T_1 变为 T_2 释放)的热量焓 Δe_h 可表示为^[25]:

$$\Delta e_h = \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) dQ_h = \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \frac{T_a}{T}\right) c_p m_h dT = (T_1 - T_2 - T_a \ln T_1 + T_a \ln T_2) c_p m_h \quad (2)$$

式中: T_a 为环境温度; T 和 Q_h 分别为变化过程中的水温 and 传递热量。

首先,分析热力系统元件中水传递的热量焓,主要涉及元件包括:供水管道、回水管道、热源和负荷。考虑两端水温分别为 T_1 和 T_2 的热力管道,管道中的水向外界释放的热量焓可由式(2)表示。热源和负荷处水吸收和放出的热量焓,同样可由式(2)得到。

$$\begin{cases} \Delta e_{h,s} = (T_{s,s} - T_{r,s} - T_a \ln T_{s,s} + T_a \ln T_{r,s}) c_p m_{h,s} \\ \Delta e_{h,l} = (T_{s,l} - T_{o,l} - T_a \ln T_{s,l} + T_a \ln T_{o,l}) c_p m_{h,l} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta e_{h,s}$ 为网络中的水在热源处吸收的热量焓; $\Delta e_{h,l}$ 为负荷处水通过换热器向用户释放的热量焓; $T_{s,s}$ 和 $T_{r,s}$ 分别为热源的供水和回水温度; $T_{s,l}$ 和 $T_{o,l}$ 分别为负荷的供水和出口温度; $m_{h,s}$ 和 $m_{h,l}$ 分别为流经热源和负荷的水质量流率。

2.1.2 热力系统焓势的概念

由式(2)和式(3)可知,元件传递热量焓与环境温度、元件两端温度、水流率、比热容有关。基于焓流理论描述热力系统中的热量焓,本文定义与元件水温、环境温度有关的变量 p_T^* 用于描述元件水温和环境温度之间的差异性。

$$p_T^* = (T - T_a \ln T) c_p \quad (4)$$

在电学理论中,电场电势差为单位正电荷从一点移动到另一点所做的功^[26]。由式(2)类比可知,元件两端水温对应的 $p_{T_1}^*$ 与 $p_{T_2}^*$ 之差可表示为单位质量水从温度 T_1 变为 T_2 传递的热量焓。

$$\Delta e_h = (T_1 - T_2 - T_a \ln T_1 + T_a \ln T_2) c_p m_h = [(T_1 - T_a \ln T) c_p - (T_2 - T_a \ln T) c_p] m_h = (p_{T_1}^* - p_{T_2}^*) m_h \quad (5)$$

类比电势差的概念^[26],式(5)将不同水温对应

的 p_T^* 之差 $p_{T_1}^* - p_{T_2}^*$ 定义为焓势差。

进一步,考虑到电路理论中电势(电位)定义与电势差密切相关,如图1(a)所示,节点电势为该点与参考点之间的电势差(电压),参考点可取电路中的任何一点,一般选大地为零电势点。在热力学中,环境状态常被视为焓的基准状态,如图1(b)所示,基于焓流理论,类比于电路中的零电势点^[26],选取环境温度对应的 p_T^* 为参考点,定义热力系统的零焓势点。

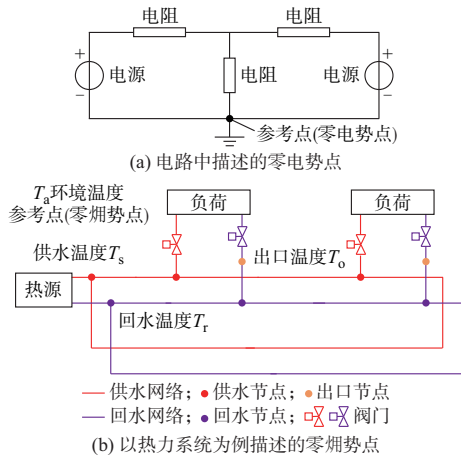


图1 零焓势点和零电势点类比图

Fig. 1 Analogy diagram of zero exergy-potential point and zero potential point

热力系统中某一节点温度与环境温度对应的焓势差,定义为温度 T 对应的焓势 p_T (单位J/kg),如下式所示:

$$p_T = p_T^* - p_{T_a}^* = [(T - T_a \ln T) c_p - (T_a - T_a \ln T_a) c_p] \quad (6)$$

式中: $p_{T_a}^*$ 为环境温度对应的焓势 p_T 。

将 $T = T_a$ 代入式(6),可得到环境温度对应的焓势 $p_{T_a}^*$ 为零,即热力系统参考点的焓势为零。

2.1.3 热力系统焓流的定义

由热力学第二定律可知,环境具有的能量都是焓^[19],因此,在环境温度下水承载热流中的焓为零。定义热力系统中某一位置热流中的焓为:水从环境温度加热到当前温度 T 吸收的热量焓,该部分焓随水在网络中流动,本文将其称为热力系统的焓流。

电力系统潮流常以线路首末端功率描述支路潮流,基于焓流理论,本文采用元件首端焓流描述元件焓流,根据首端焓流和元件传递的热量焓可得到末端焓流。如图2所示,热力系统中元件的首端和末端通过各种节点相连,这些节点主要包括:热源供水节点、热源回水节点、负荷供水节点、负荷出口节点、负荷回水节点、供水网络和回水网络的连接节点等。

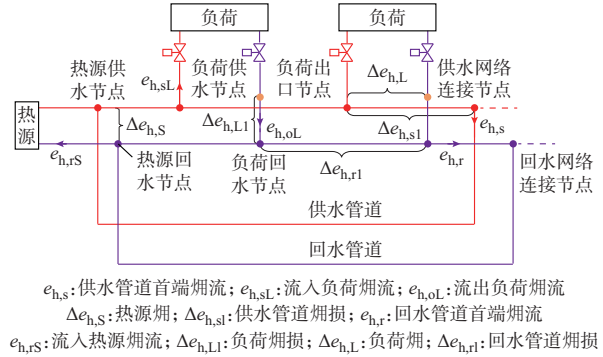


图2 简单热力系统节点和焓流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of nodes and exergy flow of a simple heat system

元件焓流与所连节点的焓势有关,节点附近焓流即为周围直接相连的元件焓流。由式(2)可知,节点附近的水由环境温度 T_a 加热到温度 T 时,吸收的热量焓可表示为:

$$\Delta e_{h,T_a} = (T - T_a \ln T - T_a + T_a \ln T_a) c_p m_h \quad (7)$$

基于焓流理论,热力系统节点附近焓流可由式(7)计算。结合式(6)中焓势定义可得,节点水温为 T 时,节点附近焓流可表示为节点焓势与水质量流率的乘积。

$$e_h = \Delta e_{h,T_a} = p_T m_h \quad (8)$$

由式(2)、式(5)和式(6)可知,元件传递的热量焓可表示为元件两端水温对应的焓势之差与流过元件的水质量流率的乘积。

$$\Delta e_h = (p_{T_1}^* - p_{T_2}^*) m_h = (p_{T_1} - p_{T_2}) m_h \quad (9)$$

式中: p_{T_1} 和 p_{T_2} 分别为水温 T_1 和 T_2 对应的焓势。

根据欧姆定律,电路中电阻元件消耗的功率等于电势差与电流的乘积。由式(9)可知,焓势和电路中的电势具有一定的相似性,热力系统中元件传递的热量焓等于焓势差与水质量流率的乘积。类比电势的物理意义,焓势即为单位质量水由环境温度变为实际温度传递的热量焓,焓势高低决定了相同质量的水在系统不同位置承载的焓值大小,可视为焓流的一种量度。焓势差的含义为温度变化过程中单位质量水传递的热量焓的大小。

图2所示为一个典型双层拓扑结构的热力系统,具有对称的供水和回水网络,负荷和热源可视为供回水网络之间的元件。本文涉及的热力系统焓流分布包括3个部分:1)焓损,包括供回水管道焓损和负荷焓损;2)热源焓和负荷焓;3)元件焓流,包括供回水管道焓流、流入热源焓流、流入负荷焓流和流出负荷焓流。

基于上述焓流分布即可获得整个热力系统有效

能的流动情况,具体分析如下。

1) 供回水管道焓损

水在供回水管道传输过程中存在热量损失,伴随着焓损。由式(9)可知,供水和回水管道焓损 $\Delta e_{h,sl}$ 和 $\Delta e_{h,rl}$ 可表示为两端节点焓势之差与管道水流率 m_h 的乘积。

$$\begin{cases} \Delta e_{h,sl} = (p_{s1} - p_{s2}) m_h \\ \Delta e_{h,rl} = (p_{r1} - p_{r2}) m_h \end{cases} \quad (10)$$

式中: p_{s1} 和 p_{s2} 分别为供水管道两端节点的焓势; p_{r1} 和 p_{r2} 分别为回水管道两端节点的焓势。

2) 热源焓和负荷焓

水在热源处吸收的热量焓(热源焓)以及在负荷处放出的热量焓(负荷焓)与管道焓损类似,均由温差产生。由式(9)可知,热源焓 $\Delta e_{h,s}$ 可表示为供水节点焓势 p_s 和回水节点焓势 p_r 之差与热源水流率的乘积,负荷焓 $\Delta e_{h,l}$ 可表示为供水节点焓势 p_s 和出口节点焓势 p_o 之差与负荷水流率的乘积:

$$\begin{cases} \Delta e_{h,s} = (p_s - p_r) m_{h,s} \\ \Delta e_{h,l} = (p_s - p_o) m_{h,l} \end{cases} \quad (11)$$

热源焓、负荷焓与管道焓损存在差异,其中管道焓损未被利用。热源焓为向系统内部提供的热量焓,负荷焓为负荷消耗的热量焓,均可视为可利用的焓而非焓损。

3) 负荷焓损

如图2所示,当回水节点为混合节点时,流出负荷的水与回水网络中的水混合后,水温发生变化,出口节点和回水节点的焓势存在差异,进而产生焓的变化,该部分焓不被负荷使用。因此,本文将它视为一种由水流混合引起的焓损。由式(9)可知,该部分焓损 $\Delta e_{h,li}$ 可表示为:

$$\Delta e_{h,li} = (p_o - p_r) m_{h,l} \quad (12)$$

4) 元件焓流

如图2所示,假设供回水网络完全对称,忽略水在管道中的损失,为满足水流的连续性,对应供回水管道中的水流率数值相同、方向相反^[22]。元件焓流与水流方向相同,对应供回水管道中的焓流方向相反。由式(8)可知,供回水管道焓流 $e_{h,s}$ 和 $e_{h,r}$ 可表示为首端节点焓势与水流率的乘积。

$$\begin{cases} e_{h,s} = p_s m_h \\ e_{h,r} = p_r m_h \end{cases} \quad (13)$$

同理,如图2所示,流入负荷焓流 $e_{h,sl}$ 可视为负荷焓流,可表示为负荷供水节点焓势与负荷水流率的乘积;流入热源焓流 $e_{h,rs}$ 可视为热源焓流,表示为热源回水节点焓势与热源水流率的乘积,此处不再

赘述。

若将负荷焓损视为出口节点和回水节点间的元件放出的热量焓,则流出负荷焓流 $e_{h,ol}$ 可视为此元件的焓流,从负荷出口节点流出,可表示为负荷出口节点焓势与负荷水流率的乘积。 $e_{h,ol}$ 一部分为负荷焓损 $\Delta e_{h,li}$,另一部分与回水网络的焓流交汇。

从以上分析可看出,热力系统焓流分布与节点焓势、水流率有关,焓势可由温度计算获得。因此,基于量测或多能潮流计算获取水流率和温度,进而由式(10)一式(13)计算热力系统的焓流分布。

2.2 电力系统焓流机理模型

在能源品质分析中,电能可以全部转换为功或其他形式能量,属于高品质能源,可全部视为焓^[19]。因此,电力系统的有功潮流即为焓流,有功损耗即为焓损。三相对称交流电力系统(以下简称电力系统)焓流和焓损可表示为:

$$e_e = P_e \quad (14)$$

$$\Delta e_e = \Delta P_e \quad (15)$$

式中: e_e 和 P_e 分别为流过电力线路的焓流和有功功率; Δe_e 和 ΔP_e 分别为线路的焓损和有功损耗。

基于量测或电力潮流计算可获取电力系统的有功潮流分布和有功损耗情况,进而由式(14)、式(15)计算焓流分布。

本文将电流视为电力系统的介质流率,焓流和焓损可以表示为:

$$e_e = P_e = \operatorname{Re} [\sqrt{3} \dot{U} \dot{I}] \quad (16)$$

$$\Delta e_e = \Delta P_e = \operatorname{Re} [\sqrt{3} (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \dot{I}] \quad (17)$$

式中: $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示复数取实部; \dot{U} 为电力线路首端的线电压相量; \dot{I} 为流过线路的线电流相量的共轭; \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 分别为线路两端的线电压相量。

由式(16)、式(17)可知,线路焓流可由线电压和线电流表示,焓损可由线电压差和线电流表示。基于焓流理论,本文将节点电压视为电力系统焓势,反映单位电流所承载的焓流。焓势差反映单位电流在电路上产生的焓损。

2.3 天然气系统焓流机理模型

天然气系统通过管网向用户供气,中国现行天然气能量计量相关标准 GB/T 22723—2008《天然气能量的测定》和 GB/T 18603—2014《天然气计量系统技术要求》等提出,一定量天然气的能量可表示为气体量与发热量的乘积,发热量即为热值,此能量计量公式被广泛运用到工程实际中^[27-28]。IES多能流研究中将天然气视为传输能量的介质,采用上述能量计量公式衡量天然气的能量,实现负荷、多能耦合环节包含的气功率与气流率之间的换算^[29]。因

此,采用热功率衡量稳态下天然气能量即气功率,不关注压力能等不被多能耦合环节、负荷消耗的能量。气功率可由气流率和总热值计算得到:

$$\phi_g = \frac{1\ 000}{3\ 600} G m_g \quad (18)$$

式中: ϕ_g 和 m_g 分别为天然气管道传输的天然气功率和流率; G 为天然气的总热值。

以热功率衡量天然气能量,气负荷消耗的燃料烟可等效为天然气燃烧过程中由环境温度加热到理论燃烧温度产生的热量烟^[30-31]。天然气的烟流 e_g 可表示为天然气的能质系数 λ_g 与气功率的乘积^[11,13]。

$$e_g = \lambda_g \phi_g = \left(1 - \frac{T_a}{T_b - T_a} \ln \frac{T_b}{T_a}\right) \times \frac{1\ 000}{3\ 600} \times G m_g \quad (19)$$

式中: T_b 为天然气理论燃烧温度。

基于烟流理论,在环境温度、天然气理论燃烧温度和总热值恒定的情况下,天然气烟流由气流率决定。在忽略管道天然气流失和气质改变的条件下,天然气系统可视为无烟损网络,无烟损是指负荷、多能耦合环节消耗的热量烟在传输过程中没有损耗。稳态条件下的管道压降决定了系统中气流的分布^[32],进而决定了烟流的分布。因此,在天然气烟流分析中虽然不考虑压力对烟损的影响,但需要考虑其对烟流分布的影响。由式(19)可知,烟流可视为天然气流率 m_g 与常数 p_g 的乘积。

$$p_g = \left(1 - \frac{T_a}{T_b - T_a} \ln \frac{T_b}{T_a}\right) \times \frac{1\ 000}{3\ 600} \times G \quad (20)$$

由式(19)、式(20)可知,常数 p_g 可视为天然气系统的烟势,表示单位气流率承载的烟,单位为 $(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{m}^3$ 。燃气管道烟流可表示为天然气流率与烟势的乘积,燃气管道两端烟势差为零,烟损可视为两端烟势差与气流率的乘积。因此,在忽略管道天然气流失和气质改变的条件下,天然气系统满足无烟损的条件。基于量测或多能潮流计算获取气流率,进而由式(19)计算天然气系统的烟流分布。

2.4 能源站烟流机理模型

能源站作为 IES 中关键的多能耦合环节,涉及多种不同品质能源形式的转换,是 IES 能源品质研究的重点^[33]。传统多能流研究通常采用能源集线器模型描述能源站,通过输入和输出端口电功率、气功率、热功率之间的平衡关系,确定能源网络之间的耦合关系^[34]。因此,能源站的烟分析同样考虑电能烟、天然气的燃料烟和水传递的热量烟。类比于电力系统潮流计算中 PQ、PV 节点的建模思路,本文不关注能源站内部能源转换环节具体的烟变化过

程,而是关注能源转化过程产生的烟损^[19],采用烟损表示能源站等值节点的烟流。这部分烟损 $e_{\text{EH},l}$ 可由下式求解:

$$e_{\text{EH},l} = e_{\text{EH},e} + e_{\text{EH},g} + e_{\text{EH},h} \quad (21)$$

式中: $e_{\text{EH},e}$ 、 $e_{\text{EH},g}$ 、 $e_{\text{EH},h}$ 分别为能源站在电力系统中消耗或供应的电能烟、天然气系统中消耗或供应的燃料烟、热力系统中消耗或供应的热量烟。 $e_{\text{EH},e}$ 、 $e_{\text{EH},g}$ 、 $e_{\text{EH},h}$ 为消耗烟时,对应元素取正值;为供应烟时,对应元素取负值;其他情况取零。

2.5 IES 烟平衡分析

烟平衡是烟分析的基础,传统 IES 烟分析方法将系统视为黑箱模型,无法有效分析系统内部有效能的分布规律。对于具有网络化特征的 IES,本文基于上述烟流机理模型分析了系统局部和整体的烟平衡关系,可量化分析能源系统内部有效能分布规律,故新模型更具优越性,系统局部和整体烟平衡关系的分析过程如附录 A 所示。

2.6 基于烟流机理模型的典型能源品质评估参数

类比于传统电力系统研究,通过多能流计算或测量方式,可获取 IES 中电流、气流和水流及温度等参数,进而获得 IES 的烟流分布,依据烟流分布可分析 IES 能源品质特征。

烟本身可评价能量价值,兼顾了不同能量“量”和“质”的差异^[19]。基于 IES 的烟流分布,可实现对系统有效能的直接观测。通过计算能源管线、能源站等环节的烟损,揭示系统能源品质薄弱环节,采取优化控制等手段,从整体或局部改善系统能源品质。

节点烟势反映节点附近单位流率介质承载的烟,烟势差反映单位流率介质传递烟的能力,因此,烟势反映了系统局部提供高品质能源的能力。例如,对于热源供水温度及负荷出口温度恒定的热力系统,热源供回水节点烟势差反映了单位质量水在单位时间内吸收热量烟的能力。

烟流分析可与传统能源品质评估指标相结合。例如,能质系数 λ 反映了单位能量所包含的烟^[11],可由烟势计算得到。

$$\begin{cases} \lambda_e = \frac{e_e}{\phi_e} = 1 \\ \lambda_g = \frac{e_g}{\phi_g} = \frac{3\ 600 p_g}{1\ 000 G} \\ \lambda_h = \frac{\Delta e_h}{\Delta Q_h} = \frac{(p_{T_1} - p_{T_2}) m_h}{c_p (T_1 - T_2) m_h} = \frac{p_{T_1} - p_{T_2}}{c_p (T_1 - T_2)} \end{cases} \quad (22)$$

式中: ϕ_e 和 λ_e 分别为电功率和对应的能质系数; λ_h 为水传递热量的能质系数。

其次,烟效率 η_e 反映了烟的有效利用程度^[13],

可由焓流计算得到。

$$\eta_e = \frac{e_{out}}{e_{in}} \quad (23)$$

式中： e_{in} 和 e_{out} 分别为系统整体或局部输入和输出的焓流。

综上所述,基于焓流分布,可计算系统管线传输、源荷供应或消耗能量的能质系数,同时可计算单一能源系统、能源站或某片区域的焓效率,为复杂系统能源品质分析提供更多技术手段。

3 IES 介质流、能流、焓流类比

如图 3 和表 1 所示,IES 中各能源网络传输的介质不同,电流、气流、水流等介质参数可以描述能源系统的运行状态,电压、气压和水压等参数决定了介质在网络中的流动情况。本文中电压、气压和水压等参数称为介质分析中的节点参数。

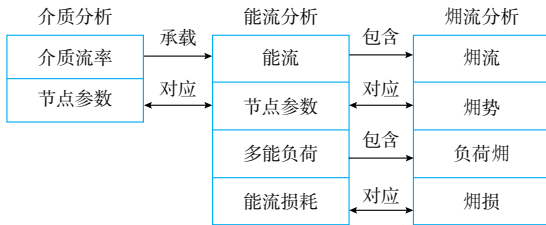


图 3 IES 流研究之间的关系
Fig. 3 Relationship between flow research in IES

表 1 各能源网络流率研究参数
Table 1 Research parameters of flow rate of each energy network

网络流率分析		电力系统	天然气系统	热力系统
介质分析	介质流率	电流	气流	水流
	节点参数	电压	气压	水压
能流分析	能流	有功潮流	气功率流	热功率流
	节点参数	电压	热值	温度
	多能负荷	电负荷	气/热负荷	热负荷
	能流损耗	线损		管道/负荷损耗
焓流分析	焓流	有功潮流	燃料焓	热量焓
	焓势 (节点参数)	电压 (电焓势)	气焓势	热焓势
	负荷焓	电负荷	燃料焓	热量焓
	焓损	线损		管道/负荷焓损

能流研究反映了供应负荷的能量在能源网络中的分布,介质是承载能流的媒介。IES 多能流研究通常考虑气流、气压、水流、水压等介质参数,能流分析建立在介质流率分析的基础上。本文认为能流节点参数应反映单位介质流率包含的能量,因此,将电压、热值、温度分别作为电力系统、天然气系统、热力

系统能量层面的节点参数,可与介质节点参数对应。IES 研究通常忽略水流、气流等介质的损失,重点关注能量的损耗。电力系统存在线损,热力管道和部分负荷存在热量损失,能源站也存在能量损耗。

焓作为能量的一部分,焓流反映了供应负荷有价值的能量在能源网络中的分布。与能流分析类似,本文重点关注电力系统的电能焓、天然气系统的燃料焓、热力系统中水承载的热量焓。焓势可视为表征焓流特征的节点参数,反映节点附近单位介质流率承载的焓,与能流分析中的节点参数对应。

在不涉及能源转换的单一能源网络中,焓流可视为能流的一部分,负荷焓也可视为负荷能量的一部分,单一能量的损耗伴随焓损,该部分焓损可视为能量损耗的一部分;在能源站等涉及能源形式转化的情况下,能量除了有“量”的损耗,还会存在“质”的损耗,此时焓损并非能量损耗的一部分。

如表 1 所示,不同能源网络的焓流特征存在差异,电力和天然气系统在负荷节点注入焓流,该部分焓流不再返回网络。热力系统负荷焓与管道焓损类似,焓流中一部分热量焓为供给负荷从网络放出,剩余的焓流返回回水网络,最终形成闭合回路。在焓损方面,天然气网络视为无损,电力系统和热力系统均存在管线焓损,热力系统中部分负荷因为出口和回水节点的焓势差存在焓损,而电力系统不存在负荷焓损。

介质流率可以描述系统的运行状态,能流可以描述能量的大小。目前,统一的能流研究以各自的网络特性建模分析为主,而焓流可以描述有价值能量的大小,在统一框架下量化表示不同形式的能源。因此,焓流分析在 IES 研究体系中极其重要,更具有普适意义。

4 算例分析

4.1 算例介绍

分析附录 B 图 B1 所示的小规模 IES。图中,蓝色网络为修改后的 5 节点低压配气系统^[32],气源气压为 30 mbar,天然气热值为 45.574 MJ/m³,理论燃烧温度为 1 973 °C^[35];红色网络为热力系统供水网络,热源的供水温度为 100 °C;紫色网络为回水网络,负荷的出口温度为 50 °C;环境温度为 10 °C^[24];绿色网络为 6 节点电力系统,改编自 IEEE 33 节点配电系统^[36],源端电压为 12.66 kV。能源站结构与外部节点连接关系如图 B2 所示,采用的能源转换设备为燃气锅炉(GB)和热电联产(CHP)机组,其中 GB 的气-热转换效率为 0.9,CHP 的气-电和气-热转换效率分别为 0.3 和 0.4。能源站采取以热定电的运行

模式,CHP的天然气分配系数为0.5。能源站在天然气系统中为负荷节点 G_5 ,在热力系统中为唯一热源 H_1 ,在电力系统中为电源节点 E_6 。

4.2 IES焓流分析

基于附录B所示的电力、天然气、热力系统的能流、介质流参数,计算IES的焓流分布。

根据附录B表B1和表B2中的电力潮流结果,计算电力系统的节点焓势如表2所示,焓流和焓损如表3所示。由环境温度和天然气理论燃烧温度计算天然气的能质系数为0.70,天然气系统的节点焓势结果如表4所示,均为 $8.88(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{m}^3$ 。根据节点焓势和表B3、表B4所示的天然气流量分布,计算天然气系统的焓流分布如表5所示。

表2 电力系统节点焓势
Table 2 Node exergy-potential of power system

节点	焓势/(kV∠rad)	节点	焓势/(kV∠rad)
E_1	12.66∠0	E_4	12.60∠ 4.41×10^{-4}
E_2	12.65∠ 9.04×10^{-5}	E_5	12.64∠ -8.63×10^{-5}
E_3	12.62∠ 2.66×10^{-4}	E_6	12.63∠ 3.74×10^{-4}

表3 电力系统焓流分布
Table 3 Exergy flow distribution of power system

线路	起点	终点	焓流/kW	焓损/kW
1	E_1	E_2	1 308.32	1.30
2	E_2	E_3	602.53	1.53
3	E_3	E_4	483.87	0.78
4	E_2	E_5	338.06	0.14
5	E_6	E_3	207.90	0.15

表4 天然气系统节点焓势
Table 4 Node exergy-potential of natural gas system

节点	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
焓势/ $(\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{m}^{-3}$	8.88	8.88	8.88	8.88	8.88

表5 天然气系统焓流分布
Table 5 Exergy flow distribution of natural gas system

管道	起点	终点	焓流/kW	焓损/kW
1	G_1	G_2	1 638.44	0
2	G_1	G_3	945.22	0
3	G_1	G_4	1 328.86	0
4	G_2	G_3	750.67	0
5	G_3	G_4	708.45	0
6	G_4	G_5	971.98	0

基于附录B表B5所示的热力系统供水、出口、回水温度,选取环境温度 10°C 对应的焓势为零焓势点,计算供水、出口、回水节点的焓势如表6所示。

根据热力系统节点焓势以及附录B表B5和表

表6 热力系统节点焓势
Table 6 Node exergy-potential of heat system

源/荷	供水节点焓势/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	出口节点焓势/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	回水节点焓势/ $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$
H_1	49.55	10.49	10.49
H_2	48.82	10.81	10.64
H_3	47.58	10.81	10.81

B6所示的水质量流率,计算整个热力系统的焓流分布,得到元件焓流、管道焓损计算结果如表7所示,热源焓、负荷焓、负荷焓损计算结果如表8所示。

表7 热力系统焓流和管道焓损分布
Table 7 Exergy flow and pipeline exergy loss distribution of heat system

元件	首端	末端	首端焓流/kW	管道焓损/kW
供水管道1	H_1 供水节点	H_2 供水节点	115.56	1.72
供水管道2	H_2 供水节点	H_3 供水节点	17.13	0.43
供水管道3	H_1 供水节点	H_3 供水节点	95.33	3.79
回水管道1	H_2 回水节点	H_1 回水节点	24.82	0.36
回水管道2	H_3 回水节点	H_2 回水节点	3.79	0.06
回水管道3	H_3 回水节点	H_1 回水节点	20.79	0.61
流入热源 H_1	H_1 回水节点	H_1 供水节点	44.64	
流入负荷 H_2	H_2 供水节点	H_2 出口节点	96.71	
流出负荷 H_2	H_2 出口节点	H_2 回水节点	21.41	
流入负荷 H_3	H_3 供水节点	H_3 出口节点	108.23	
流出负荷 H_3	H_3 出口节点	H_3 回水节点	24.59	

表8 热源焓、负荷焓及负荷焓损
Table 8 Heat source exergy, load exergy and load exergy loss

源/荷	热源/负荷焓/kW	负荷焓损/kW
H_1	-166.25	0
H_2	75.30	0.33
H_3	83.65	0

根据电力、天然气、热力系统的 E_6 、 G_5 和 H_1 的节点焓流结果,计算能源站焓损为597.83 kW。由以上全部焓流计算结果得到各个能源系统的焓流分布如图4(a)所示。图中,蓝色网络代表配气系统,红色和紫色网络分别代表供水和回水网络,绿色网络代表配电系统,紫色数字表示源端供应或负荷消耗的焓(kW),黑色数字表示元件焓流(kW),红色数字表示焓损(kW)。由表3和图4(a)可知,电力系统存在线路焓损,不存在负荷焓损。图4(a)数据表明,针对电力系统,流入节点的线路焓流与节点电源对应的焓之和,等于流出节点的线路焓流、节点负荷消耗的焓、线路焓损之和,满足局部焓平衡关系。同时,电力系统源端供应的焓为1 516.22 kW,负荷消

耗的烟为 1 512.33 kW, 烟损为 3.89 kW, 源端供应的烟等于负荷消耗的烟与烟损之和, 满足整体烟平衡关系。

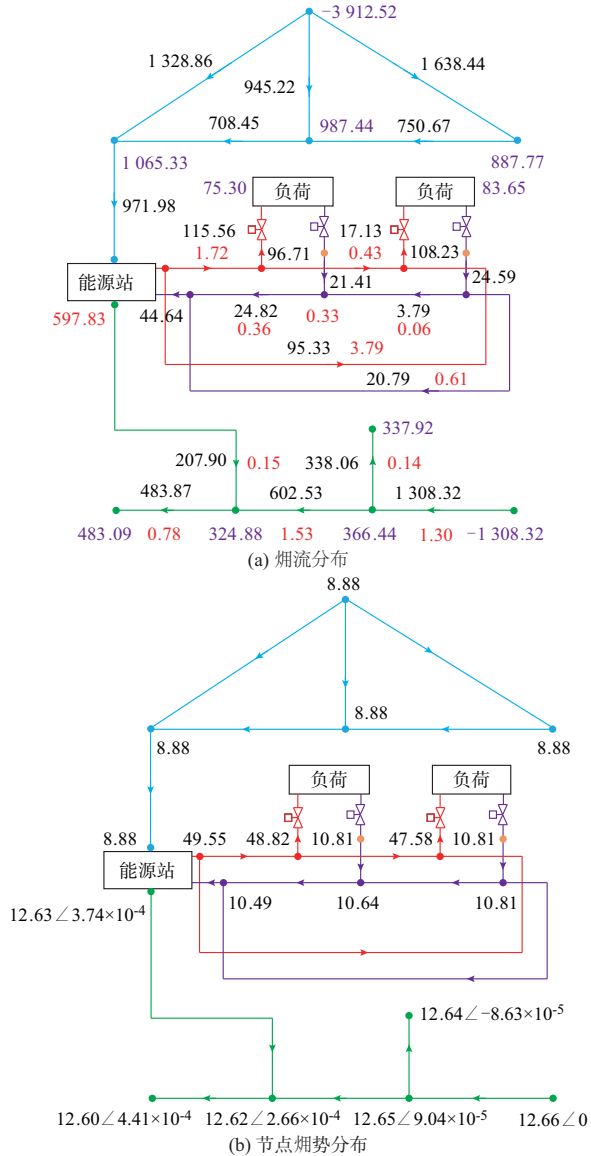


图4 算例系统烟流和节点烟势分布示意图
Fig. 4 Schematic diagram of exergy flow and node exergy-potential distribution of test system

由表5和图4(a)可知, 天然气系统不存在烟损, 烟流在数值上为气流率的8.88倍。图4(a)数据表明, 针对天然气系统各节点, 流入节点的管道烟流与节点气源供应的烟之和, 等于流出节点的管道烟流、节点负荷消耗的烟之和, 满足局部烟平衡关系。同时, 系统气源烟为3 912.52 kW, 负荷烟为3 912.52 kW, 满足整体烟平衡关系。

由表6和图4(a)可知, H_2 的回水节点为混合节点, H_2 的出口节点烟势与回水节点烟势不相等, 因此, 热力系统在 H_2 的回水节点处存在烟损。图4(a)

数据表明, 对于热力系统各节点, 流入节点的元件前端烟流与节点所连热源烟之和, 等于流出节点的元件末端烟流、节点所连负荷消耗的烟、元件烟损之和, 满足局部烟平衡关系。同时, 系统的热源烟为166.25 kW, 负荷烟为158.95 kW, 供水和回水网络的烟损分别为5.94 kW和1.03 kW, 负荷烟损为0.33 kW, 热源烟等于负荷烟与系统烟损之和, 满足整体烟平衡关系。

类比于电力系统电压分布, 图4(b)展示了系统节点烟势的分布。电力系统的节点烟势采用幅值(kV)和相角(rad)表示; 天然气系统的节点烟势均为8.88 (kW·h)/m³; 热力系统节点烟势的单位为kJ/kg。

对于热力系统, 热源 H_1 和负荷 H_3 的供水节点烟势分别为49.55 kJ/kg和47.58 kJ/kg, 即节点附近单位质量水承载的烟分别为49.55 kW和47.58 kW, 表明 H_1 附近水承载高品质能量的能力高于 H_3 。算例数据说明, 热力系统的节点烟势越高, 所处位置的能源品质越高。

负荷 H_2 和 H_3 供水和出口节点的烟势差分别为38.01 kJ/kg和36.77 kJ/kg, 即 H_2 和 H_3 中单位质量水向负荷供应的烟分别为38.01 kW和36.77 kW, 若以当前烟势供应相同烟负荷, 则 H_3 需要更大的水流率。算例数据说明, 供水和出口节点烟势差越高, 向负荷供应高品质能量的能力越高。负荷的出口节点烟势相等, 供水和出口节点烟势差由供水节点烟势决定, 供水节点烟势越高, 向负荷供应高品质能量的能力越高。此外, 分析 H_2 和 H_3 的出口和回水节点的烟势差可知, 回水节点烟势也反映了负荷烟损的程度。

综上可以看出, 节点烟势可作为反映热力系统局部能源品质的重要参数。

整个IES的输入烟为5 220.84 kW, 输出烟为4 611.81 kW, 网络烟损、负荷烟损、能源站烟损之和为609.03 kW, 烟效率为88.33%, 整个系统满足烟平衡关系。因此, 各个能源系统和整个IES均满足局部和整体烟平衡关系, 与传统的黑箱模型相比, 基于烟流机理的模型可量化分析能源网络内部有效能的分布情况, 实现系统的量质协同研究。受设备型号与运行方式影响, 能源站烟损占比为98.16%, 在系统总烟损中所占比例最大。GB和CHP为满足供热需求, 将大量中等品质的天然气转换为较低品质的热能, 虽然也产生部分高品质电能, 但上述能源转换模式使总烟损呈现增大的趋势。

基于传统黑箱模型的IES烟分析, 通常采用基于能质系数的烟计算方法得到系统输入和输出的电能烟、燃料烟、热量烟, 进而以烟效率作为优化目标

进行其他计算,较少关注 IES 网络中烟的分布^[13]。算例采用基于黑箱模型的烟分析法,得到各源荷能质系数和烟值如表 9 所示。可以看出,源端和负荷烟与本文烟流机理模型计算结果相同,系统烟效率求解结果也相同。通过式(22)同样可以得到表 9 所示的能质系数结果。

表 9 基于能质系数的源端及负荷烟计算结果
Table 9 Calculation results of source and load exergy based on energy quality coefficient

源/荷	功率/kW	能质系数	烟/kW
E_1	-1 308.32	1	-1 308.32
E_2	366.44	1	366.44
E_3	324.88	1	324.88
E_4	483.09	1	483.09
E_5	337.92	1	337.92
G_1	-5 579.17	0.701 3	-3 912.52
G_2	1 265.94	0.701 3	887.77
G_3	1 408.07	0.701 3	987.44
G_4	1 519.13	0.701 3	1 065.33
H_2	408.16	0.184 5	75.30
H_3	456.88	0.183 1	83.65

由图 4 可知,相比于传统黑箱模型的烟分析法,烟流机理模型不仅可以求解源端和负荷烟、系统烟效率,还能清晰地呈现 IES 网络中各环节、各管线的烟流分布和烟损情况。烟作为衡量能量品质的一种量度,反映了当前运行状态下系统整体及局部的能源品质特征,节点烟势的建立为局部能源品质分析提供了思路。基于烟流分布建立源、网、荷中烟的联系,可为未来烟计量、定价、交易提供理论基础,而基于黑箱模型的烟分析法难以实现上述应用。此外,烟流机理模型还能结合烟效率等概念,实现整体或某类能源系统、能源站、系统内某片区域、节点、管线的能源品质分析,为建设高品质能源系统提供思路。

5 结语

相比于基于黑箱模型的 IES 烟效率分析,烟流机理模型呈现了 IES 网络中烟流和烟损的分布,且烟流分析方法可与当前众多 IES 研究技术相结合,形成新的研究思路。

首先,烟流分布反映了烟流的空间特性,基于烟流分布可计算系统源、荷端供应和消耗的烟,建立源、网、荷中烟的联系,分析整体或局部的烟效率、烟损等能源品质参数,为规划、运行控制、交易层面的烟分析提供依据,为构建高品质能源系统提供理论基础;其次,烟流分析可拓展到不同时间断面,反映

烟流研究的时间特性。在未来新型电力系统高比例可再生能源集成的背景下,根据研究对象的时间尺度,可进行日前、月(季)、年度、中长期等各类时间尺度的烟流研究,获取各时间节点下的系统能源品质特征。

后续研究工作将围绕 IES 的烟流理论,从能量的量质协同角度,分析高比例可再生能源接入对系统的影响,建立考虑可再生能源的整体和局部能源品质评估参数;基于系统烟流、烟损分布,考虑不同能源环节以及整体、局部的能量品质差异,提出有利于能源品质提升的系统规划运行方法;深入剖析系统烟流产生、传输、消费机理,结合烟经济学等方法,开展系统烟交易理论与市场机制等研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 陈皓勇,蔡伟钧,陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 8-17.
CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power Internet of Things technology with energy and information fusion [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 8-17.
- [2] LIU S, ZHOU C, GUO H M, et al. Operational optimization of a building-level integrated energy system considering additional potential benefits of energy storage [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 30-41.
- [3] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [4] ZHU M T, XU C S, DONG S F, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-12.
- [5] 陈瑜玮,孙宏斌,郭庆来. 综合能源系统分析的统一能路理论(五): 电-热-气耦合系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7928-7937.
CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (V): integrated electricity-heat-gas dispatch [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7928-7937.
- [6] WANG Y L, WANG Y D, HUANG Y J, et al. Planning and operation method of the regional integrated energy system considering economy and environment [J]. Energy, 2019, 171: 731-750.
- [7] WANG Guofeng, YANG Xiaodong, CAI Wenhui, et al. Event-triggered online energy flow control strategy for regional integrated energy system using Lyapunov optimization [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,

- 2021, 125(3): 106451.
- [8] 郝艳红,冯杰,李文英,等.双气头多联产系统的烟经济优化与分析[J].中国电机工程学报,2014,34(20):3266-3275.
HAO Yanhong, FENG Jie, LI Wenyong, et al. Exergoeconomic optimization and analysis of a dual-gas sourced polygeneration system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (20) : 3266-3275.
- [9] COSKUN C, OKTAY Z, DINCER I. Modified exergoeconomic modeling of geothermal power plants [J]. Energy, 2011, 36(11): 6358-6366.
- [10] EBRAHIMI M, CARRIVEAU R, TING D S K, et al. Conventional and advanced exergy analysis of a grid connected underwater compressed air energy storage facility [J]. Applied Energy, 2019, 242: 1198-1208.
- [11] HU X, ZHANG H, CHEN D W, et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both exergy efficiency and economy [J]. Energy, 2020, 197: 117155.
- [12] 陈聪,沈欣炜,夏天,等.计及烟效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J].电力系统自动化,2019,43(12):60-67.
CHEN Cong, SHEN Xinwei, XIA Tian, et al. Multi-objective optimal dispatch method for integrated energy system considering exergy efficiency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 60-67.
- [13] 刘洪,赵越,刘晓鸥,等.计及能源品位差异的园区多能源系统综合能效评估[J].电网技术,2019,43(8):2835-2843.
LIU Hong, ZHAO Yue, LIU Xiaou, et al. Comprehensive energy efficiency assessment of park-level multi-energy system considering difference of energy grade [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2835-2843.
- [14] 葛海麟,陈皓勇,文俊中,等.基于能量网络理论的分分布式供能系统分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):34-40.
GE Hailin, CHEN Haoyong, WEN Junzhong, et al. Distributed energy system analysis based on energy network theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (6) : 34-40.
- [15] 王英瑞,曾博,郭经,等.电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J].电网技术,2016,40(10):2942-2951.
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951.
- [16] CHENG Y H, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3562-3574.
- [17] 尹桥宣,段斌,康灿平,等.基于HLA/Agent的能源系统与通信系统联合仿真设计[J].电力系统自动化,2016,40(17): 22-29.
YIN Qiaoxuan, DUAN Bin, KANG Canping, et al. Design of energy system and cyber system co-simulation based on HLA/Agent [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40 (17) : 22-29.
- [18] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.电力系统碳排放流分析理论初探 [J].电力系统自动化,2012,36(7):38-43.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.
- [19] 傅秦生.能量系统的热力学分析方法[M].西安:西安交通大学出版社,2005.
FU Qinsheng. Thermodynamic analysis method of energy system [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005.
- [20] 刘强,段远源.超临界600 MW火电机组热力系统的烟分析 [J].中国电机工程学报,2010,30(32):8-12.
LIU Qiang, DUAN Yuanyuan. Exergy analysis for thermal power system of a 600 MW supercritical power unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(32): 8-12.
- [21] CENGEL A Y, BOLES M A. Thermodynamics: an engineering approach [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 2009.
- [22] 胡泉,尚策,程浩忠,等.综合能源系统能流计算方法述评与展望[J].电力系统自动化,2020,44(18):179-191.
HU Xiao, SHANG Ce, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect of calculation method for energy flow in integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 179-191.
- [23] YANG Q C, QIAN Y, KRASLAWSKI A, et al. Advanced exergy analysis of an oil shale retorting process [J]. Applied Energy, 2016, 165: 405-415.
- [24] LIU X Z, WU J Z, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [25] ZHANG L, LIU X H, JIANG Y. Exergy analysis of parameter unmatched characteristic in coupled heat and mass transfer between humid air and water [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 84: 327-338.
- [26] 孙雨耕.电路基础理论[M].北京:高等教育出版社,2011.
SUN Yugeng. Basic circuit theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.天然气能量的测定:GB/T 22723—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Energy determination for natural gas: GB/T 22723—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.天然气计量系统技术要求:GB/T 18603—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements of measuring systems for natural gas: GB/T 18603—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [29] ABEYSEKERA M, WU J, JENKINS N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas [J]. Applied Energy, 2016, 164: 991-1002.
- [30] 薛志峰,刘晓华,付林,等.一种评价能源利用方式的新方法 [J].太阳能学报,2006,27(4):349-355.
XUE Zhifeng, LIU Xiaohua, FU Lin, et al. One new

- assessment method for the energy utilization manner[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2006, 27(4): 349-355.
- [31] MÜLLER A, KRANZL L, TUOMINEN P, et al. Estimating exergy prices for energy carriers in heating systems: country analyses of exergy substitution with capital expenditures [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(12): 3609-3617.
- [32] 江茂泽. 输配气管网的模拟与分析[M]. 北京:石油工业出版社,1995.
- JIANG Maoze. Simulation and analysis of gas transmission and distribution network [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [33] 黄伟,刘文彬. 基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 20-28.
- HUANG Wei, LIU Wenbin. Multi-energy complementary based coordinated optimal planning of park integrated energy station-network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 20-28.
- [34] MOHAMMADI M, NOOROLLAHI Y, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Energy hub: from a model to a concept—a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1512-1527.
- [35] 同济大学. 燃气燃烧与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- Tongji University. Gas combustion and application [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [36] 张涛,史苏怡,徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(4): 22-28.
- ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(4): 22-28.
- 李家熙(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统分析。E-mail:3016203186@tju.edu.cn
- 王丹(1981—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:综合能源系统、智能配用电系统、分布式能源与微网等。E-mail:wangdantjuee@tju.edu.cn
- 贾宏杰(1973—),男,博士,教授,主要研究方向:大电网稳定性分析、电网规划、新能源集成、综合能源系统分析等。E-mail:hjjia@tju.edu.cn

(编辑 章黎)

Exergy Flow Mechanism and Analysis Method for Integrated Energy System

LI Jiayi¹, WANG Dan^{1,2}, JIA Hongjie^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Smart Energy & Information Technology of Tianjin Municipality (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: An integrated energy system (IES) involves many different forms of energy, and exergy can be used as a measure of energy quality. Based on the idea of “flow”, a modeling method for the exergy flow mechanism in the IES network is proposed. First, the exergy flow analysis scope is defined based on the energy flow. The exergy flow mechanism of the heat system is analyzed. The concepts including exergy-potential and exergy-potential difference of heat system are defined. And the exergy flow mechanism model of the heat system is established. Then, the relevant laws are extended to other energy networks, and the concept of exergy-potential and exergy flow mechanism model of power systems and natural gas systems are proposed. The energy station is equivalent to an exergy loss node, and the advantage of the exergy flow mechanism model is verified through the exergy balance analysis of each link. Finally, a test system is given to intuitively show the exergy flow distribution of IES, and the exergy loss of each link is analyzed. By analyzing the overall and local exergy balance relationship, it is verified that the exergy flow mechanism model has more advantages than the traditional black-box model. The advantages of applying exergy flow theory in the high-quality energy system are discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977141), National Key R&D Program of China (No. 2018YFB0905000) and State Grid Corporation of China (No. SGTJDK00DWJS1800232).

Key words: integrated energy system; energy quality; exergy flow; exergy loss; exergy-potential

