

计及气体成分变化的电-气-热综合能源系统 能量流计算方法

黄雨佳, 孙秋野*, 王睿, 姚葭

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819)

Combined Energy Flow Calculation Method for Electric-gas-heat Integrated Energy System Considering Gas Composition Changes

HUANG Yujia, SUN Qiuye*, WANG Rui, YAO Jia

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China)

Abstract: Integrated energy system (IES) has become an important development direction for energy transition to achieve the goal of carbon peaking and carbon neutrality, and environmentally friendly. Considering the problem of mixing multi-type gas sources (MTGS) such as hydrogen and synthetic natural gas introduced by P2G (power-to-gas), the traditional IES energy flow calculation (EFC) cannot determine whether the quality of the mixed gas confirms standard and quantify its impact on IES. A unified EFC method for IES that considers MTGS is proposed. First, the nodal injection flow and pipeline transfer flow models related to gas characteristics are established; the nodal deviation equations for the relative density and calorific value of mixed gases and the coefficient matrix solution, are established to address the inability of existing methods to calculate the mixed gas parameters. On this basis, the IES EFC model is further constructed, and the nodal variables and extended Jacobian matrix are given after considering MTGS. The proposed model and method are validated to reflect the effects of gas composition changes on the IES.

Keywords: integrated energy system; energy flow calculation; multi-type gas sources; extended Jacobian matrix

摘要: 为实现“双碳”目标, 缓解环境压力, 综合能源系统 (integrated energy system, IES) 已成为能源转型的重要发展方向之一。考虑到电转气 (power-to-gas, P2G) 技术引

入的氢气、合成天然气等多类型供气源混合的问题, 传统的 IES 能量流计算已无法确定混合后的燃气品质是否达标, 无法量化其对 IES 中的节点压力、电压等参数影响。为此, 提出了一种计及气体成分变化的电-气-热综合能源系统能量流计算方法。首先, 将气体相对密度和热值建模为迭代变量, 给出了混合气体的相对密度和热值的节点偏差方程及求解流程, 为 IES 中多种供气源及其混合问题提供了通用模型; 其次, 提出了扩展牛顿-拉夫逊求解方法, 给出反映耦合关系的扩展雅可比矩阵, 以实现更全面的能量流结果评估和运行分析; 最后, 通过算例验证了所提模型和方法可有效反映气体成分变化对耦合系统的影响。

关键词: 综合能源系统; 能量流计算; 多类型供气源; 扩展雅可比矩阵

0 引言

随着工业生产和居民生活对能源的需求与环境友好的矛盾日益突出, 碳达峰、碳中和背景下的能源转型关键技术越来越受到重视^[1-2], 已成为科技创新的重点发展方向之一。电力作为碳减排压力较大的行业^[3], 通过新能源发电、燃气发电、热电联产 (combined heat and power, CHP) 等来替代传统火电成为了必然选择。这也使得以电、气、热为主要能源载体的综合能源系统 (integrated energy system, IES)^[4]及其内部耦合关系日益复杂, 为此, 需要深入研究多能系统的协同分析^[5]。

稳态能量流计算 (energy flow calculation, EFC) 根据有限的已知信息来求取 IES 中的电压/压力/温度、线路潮流/管道传输流量等状态变量, 既有助于判断系

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0702200); 国家自然科学基金重点项目 (U20A20190); 中央高校基本科研业务费 (N2204003)。

National Key Research and Development Program of China (2018YFA0702200); National Natural Science Foundation of China (U20A20190); Fundamental Research Funds for the Central Universities (N2204003).

统状态值是否在运行限值内,又可为综合能源系统的规划、优化等提供初始运行条件^[6-7],更加适用于IES的长期研究(如网络规划、可靠性评估等)。

为了高效准确地计算综合能源系统能量流,文献[8]建立了电-热综合能源系统的稳态能量流计算求解模型,提出了基于牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson, NR)法的统一求解和分立求解2种方法,所得的热网潮流分布与商业软件计算结果一致,验证了NR法应用到电-热IES的能量流计算中的正确性。其中,统一求解法将不同子系统的能流方程联立,实现整体迭代求解,便于整合IES的强耦合关系。文献[7]则利用统一求解法思想,对电-气综合能源系统进行稳态多能流分析,将温度列为变量之一,讨论了天然气流温度变化对能流结果的影响。文献[9]在文献[7]的基础上,加入了热网模型,对电-气-热耦合系统的能量流进行了统一求解,详细给出了各个耦合设备与能源载体之间的依赖关系,同时考虑了燃气发电机(gas-fired power generation, GG)的阀点效应、CHP机组的部分负荷特性等对IES能量流分布的影响。文献[10]计及压缩机不同的控制方式,构建了电-气-热综合能源系统能量流统一求解模型,并分别讨论了电力系统并网和孤岛2种运行方式,给出相应的统一雅可比矩阵模型。文献[11]采用能量枢纽(energy hub, EH)模型,给出了区域综合能源系统的完全解耦、部分耦合和完全耦合3种工作模式,最终求得系统的能量流结果。文献[12]基于能量传递的统一描述方法,建立了广延量守恒方程,并基于NR法进行了能量流的分解求解和统一求解。

在上述EFC研究中,燃气发电机以其快速的调峰能力在IES的电力系统功率平衡中起着重要的作用,但有关能量转换单元的详细性与完备性仍有所欠缺。其中,电转气(power-to-gas, P2G)技术通过将电能转化为氢气(hydrogen, H₂)或合成天然气(synthetic natural gas, SNG),以更快的斜坡速率调节电能,并利用现有的天然气网络进行储能,其优势被广泛关注^[13]。文献[14-15]研究了GG和P2G带来的复杂双向能量传递问题。文献[14]在电-气IES能量流计算中,考虑了P2G消纳可再生能源的能力以及该设备对能量流结果的影响,给出了同时包含GG和P2G的统一求解模型。文献[15]基于灵敏度思想,建立了电-气耦合系统的统一能量流求解模型。

然而,上述能量流计算研究,均只针对单一气质成分的天然气网络的计算,而对不同气源带来的多

种成分燃气的注入考虑不足。实际上,传统天然气(natural gas, NG)只是燃气的一种,随着P2G等技术的快速发展和应用,其他类型的气质(如H₂、SNG等)已经受到越来越多的关注^[6]。文献[16]考虑了单一气源点注入不同的天然气气质对IES中电压支撑能力的影响。文献[17]给出了异质气体及其对IES全局影响的模型。但上述研究均没有讨论反映多类型气源、气体成分变化影响的适用于不同网络的通用求解方法。

不同类型的气源具有不同的气质密度(specific gravity)和热值(calorific value),如H₂和SNG的热值分别为12.75 MJ/m³和37.40 MJ/m³,均低于传统天然气的41.04 MJ/m³,根据能量守恒原理,在体积流量相同的情况下,H₂和SNG供给的能量低于传统天然气。此外,密度作为气体流动方程中的一个要素,不仅影响管道内的流量,还会影响管道内的压降,易对气体供应安全造成影响。另一方面,网络中节点混合气体的密度和热值是未知的,仍采用单一气源的方式计算会造成输气管网中储存能量的错误评估,在影响输气管网运行的同时,还可能通过耦合设备传递到电力网。因此,为了确定并量化多类型供气源带来的混合后气体品质与特性变化,气体的密度和热值有必要在能量流计算中建模为变量,与IES的压力、电压等变量共同计算,以明晰耦合系统的运行状态。

综上所述,现有稳态能量流计算中,缺乏对混合多类型供气源的研究,且该因素与IES的耦合关系及互动机制不完善。本文针对此现状,建立了计及气体特性参数的统一求解方法,具体工作如下。

1) 在稳态能量流计算中,将气体特性——气质密度和热值建模为迭代变量,并给出相应的偏差方程及系数矩阵求解流程,为综合能源系统中多种供气源/分布式供气源及其混合问题提供通用模型。

2) 提出一种基于牛顿-拉夫逊法的扩展统一能量流求解方法。该方法给出了包含气体特性,并且反映耦合关系的扩展雅可比矩阵,迭代计算出稳态运行平衡点,实现更全面的能量流结果评估和运行分析。

1 计及气体成分变化的天然气网络建模

1.1 不同气质对天然气网络的影响

多类型供气源问题需要评估多种气源混合情况下,网络节点处混合气体的特性,包括气体密度和热值。传统单一气源模式下,气体密度和热值全网一

致, 在模型中表现为常数, 而多类型气源的混合会使得全网各处气质不同、密度与热值也将变化, 影响随后的流动模式和气体系统压力传递。假定系统稳态, 且忽略重力影响, 通过Darcy方程可知, 天然气沿着内径为 D 、长度为 dx 的管道上的压降 dp 为^[16]

$$dp = -0.5 \times \frac{\rho v^2 \lambda \times dx}{D} \quad (1)$$

式中: ρ 为天然气在该管道压力和温度条件下的质量密度; v 为天然气流速; λ 为摩擦系数, 与流体的雷诺数以及管道粗糙程度相关。在一定温度和压力条件下, 若 λ 、 D 、 dx 均为常数, 则 dp 是气体在管道中的质量密度和平均流速的函数^[15], 前者一般用天然气相对密度 ρ_s 描述, 后者可用气体流量进行表征。在正常情况下, 负荷的能量需求 H 可以用气体流量 f 乘以气体的热值 C_v 来计算($H = f \times C_v$)^[18]。然而, 当多类型供气源带来的混合气体的组成与传统天然气不同时, 气体热值发生变化, 即气体输送相同能量时的体积流量(即速度)将有所不同。例如, 氢气的热值(12.75 MJ/m³)约为传统天然气热值(41.04 MJ/m³)的1/3, 为保证负荷能量需求, 输送氢气的流量就要为天然气的约3倍, 而这又会大大提高管道压降。因此, ρ_s 和 C_v 的联合作用将影响全网状态。

1.2 计及气质密度和热值的气网能量流模型建立

天然气网络的主要组成部分是管道、气源和负荷。天然气网络能量流计算是在给定节点的气体负荷需求、参考源压力和气源组成条件下, 计算管道内气体流量和节点压力的数值。

1) 节点流量建模。

在传统能量流计算中, 一般假设整个气体网络的气体成分是相同和均匀的, 因此各节点注入的气体流量可以直接用体积流量的恒定值(单位通常为m³/h)表示。对于多类型供气源混合的情况, 将根据能量守恒原理, 基于节点热值更新各节点流出或注入的气体流量:

$$f_i^{\text{load}} = \frac{H_i^{\text{load}}}{C_{v,i}} \quad (2)$$

$$f_i^{\text{source}} = \frac{H_i^{\text{source}}}{C_{v,i}} \quad (3)$$

式中: H_i^{load} 和 H_i^{source} 分别为节点 i 处燃气负荷的能量需求和气源的能量供应。 $C_{v,\text{mix},i}$ 为流出节点 i 的混合气体总热值, 一般可以用以下公式表示:

$$C_{v,\text{mix},i} = \sum_j \varnothing_{ji} C_{v,ji} \quad (4)$$

式中: \varnothing_{ji} 和 $C_{v,ji}$ 分别是节点 j 到节点 i 的气体体积分数和总热值。由式(2)~(4)可知, 供气或需气的体积流量会随着各节点 C_v 的变化而变化, 从节点 i 流出的混合气体流量 C_v 取决于混合前不同气体的比例。

2) 管道流量建模。

计算连接节点 i 到节点 j 的天然气管道 ij 上的流量公式通常表示为

$$f_{ij} = C_{ij} \text{sign}_p(\pi_i, \pi_j) \sqrt{\text{sign}_p(\pi_i, \pi_j) \cdot (\pi_i^2 - \pi_j^2)} \quad (5)$$

$$C_{ij} = C \frac{T_b}{\pi_b} \frac{D_{ij}^{2.5}}{\sqrt{L_{ij} T_a Z_a \chi_{ij} \rho_{s,ij}}} \quad (6)$$

式中: π_i 和 π_j 分别是节点 i 和节点 j 的压力; $\text{sign}_p(\pi_i, \pi_j)$ 是压力的符号函数, 当 $(\pi_i^2 - \pi_j^2) > 0$ 时, $\text{sign}_p(\pi_i, \pi_j) = 1$, 当 $(\pi_i^2 - \pi_j^2) < 0$ 时, $\text{sign}_p(\pi_i, \pi_j) = -1$; C_{ij} 是管道常数; π_b 、 T_b 、 Z_a 和 T_a 分别是标况压力、标况温度、气体压缩系数和气体温度; D_{ij} 和 L_{ij} 分别是管道的内径和长度; χ_{ij} 是摩擦阻力系数, 随着气体成分的变化而更新; $\rho_{s,ij}$ 是管道 ij 内气体的密度, 取决于注入节点 i 的气质密度。

3) 节点平衡方程。

类似于电网, 天然气网络也需满足基尔霍夫定律, 即注入节点的流量等于流出节点的流量:

$$\Delta f_i = f_i^{\text{source}} - f_i^{\text{load}} - \sum_{j=1}^{N_G} f_{ij} = 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, (N_G - 1) \quad (7)$$

式中: N_G 是燃气网络节点总数。在气网能量流计算中, 至少要设置一个指定压力的源节点(平衡节点)作为参考来计算其他未知节点压力, 因此该方程适用于除松弛节点外的所有气体网络节点。

由式(2)~(3)、(5)~(6)可知, 源或者负荷注入节点的流量与 C_v 有关, 管道流量与 ρ_s 有关。多类型供气源的存在使得不同 ρ_s 和 C_v 的气体被注入到同一个供气网络中。为了计算混合后各个节点的 ρ_s 和 C_v , 给出偏差方程如下:

$$\Delta \rho_{s,i} = \rho_{s,i} \left(f_i^{\text{source}} + \sum_{j=1}^{N_G} \text{sign}_f(f_{ji}) \cdot f_{ji} \right) - \left[f_i^{\text{source}} \rho_{s,i}^{\text{source}} + \sum_{j=1}^{N_G} \text{sign}_f(f_{ji}) \cdot (f_{ji} \rho_{s,j}) \right] = 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, (N_G - 1) \quad (8)$$

$$\Delta C_{v,i} = C_{v,i} \left(f_i^{\text{source}} + \sum_{j=1}^{N_G} \text{sign}_f(f_{ji}) \cdot f_{ji} \right) - \left[f_i^{\text{source}} C_{v,i}^{\text{source}} + \sum_{j=1}^{N_G} \text{sign}_f(f_{ji}) \cdot (f_{ji} C_{v,j}) \right] = 0,$$

$$\forall i=1,2,\dots,(N_G-1) \quad (9)$$

式中： $\rho_{s,i}$ 和 $\rho_{s,j}$ 分别是流出节点*i*和*j*的混合气体的相对密度； $C_{v,i}$ 和 $C_{v,j}$ 分别是流出节点*i*和*j*的混合气体的热值； $\text{sign}_f(f_{ji})$ 是气体流量的符号函数，当 $f_{ji} \geq 0$ 时， $\text{sign}_f(f_{ji})=1$ ，否则， $\text{sign}_f(f_{ji})=0$ ； f_i^{source} 、 $\rho_{s,i}^{\text{source}}$ 和 $C_{v,i}^{\text{source}}$ 分别是注入节点*i*的气源的体积流量、密度和热值，其中气源可以是P2G机组生产的H₂、SNG，可以是储气单元的天然气，也可以是主供气来源的天然气。

简而言之，离开节点*i*的混合气体的 ρ_s 和 C_v 考虑为气体流量作为其权重因子的所有流入该节点气体的 ρ_s 和 C_v 的平均值，可以用 $X_{\text{out}} = \sum(f_{\text{in}} X_{\text{in}}) / \sum f_{\text{in}}$ 来理解，该式对 ρ_s 和 C_v 均适用。为了简洁表达，将式(8)和(9)整理为矩阵形式：

$$\Delta \rho_s = M_{\rho_s} \rho_s - b_{\rho_s} \quad (10)$$

$$\Delta C_v = M_{C_v} C_v - b_{C_v} \quad (11)$$

式中： M_{ρ_s} 、 M_{C_v} 为气质密度和热值的系数矩阵； ρ_s 、 C_v 为待求解向量； b_{ρ_s} 、 b_{C_v} 分别为包含气质密度和热值的列向量。 M_{ρ_s} 、 b_{ρ_s} 的求法见图1， M_{C_v} 、 b_{C_v} 同理。图1中 A_g 是支路-节点关联矩阵，元素定义规则为：+1，管道中的天然气流入节点；-1，管道中的天然气流出节点；0，管道与节点没有相连。

与节点流量平衡方程相似，平衡节点的气体成分，即密度和热值均已知，因此不包含在方程组(10)和(11)中。总结来说，考虑气体成分变化的天然气网络稳态平衡点可以通过联立式(7)、(10)和(11)，即 $\Delta F_g = [\Delta f, \Delta \rho_s, \Delta C_v]$ ，求解得到节点压力、

节点处混合气体的密度和热值，气网变量也将更新为 $X_g = [\pi, \rho_s, C_v]$ 。

2 计及气体成分变化的综合能源系统能量流计算

2.1 能量转换单元模型建立

能量转换单元用来实现各能源子系统间的能量交互、分配等功能。燃气锅炉(GB)、CHP机组、燃气发电机(GG)作为天然气网络的负荷，分别为热网和电网提供能量，模型为

$$f_i^{\text{GB}} = \phi_i^{\text{GB}} / (\eta_i^{\text{GB}} C_{v,i}) \quad (12)$$

$$f_i^{\text{CHP}} = (P_i^{\text{CHP}} + \phi_i^{\text{CHP}}) / (\eta_i^{\text{CHP}} C_{v,i}) \quad (13)$$

$$f_i^{\text{GG}} = (a_i^{\text{GG}} (P_i^{\text{GG}})^2 + b_i^{\text{GG}} P_i^{\text{GG}} + c_i^{\text{GG}}) / C_{v,i} \quad (14)$$

式中： η_i^{GB} 、 η_i^{CHP} 分别为燃气锅炉和CHP机组的转换效率； a_i^{GG} 、 b_i^{GG} 、 c_i^{GG} 为第*i*台燃气发电机的运行系数。

电动压缩机(GC)、循环泵(HP)以及电锅炉(EB)作为电力系统负荷，为天然气网络和热网提供能量，模型为

$$P_i^{\text{GC}} = (746 \times 10^{-6} / 3600) E_i^{\text{GC}} \quad (15)$$

$$P_i^{\text{HP}} = (\dot{m}_i^{\text{HP}} g H_p) / 10^6 \eta_{\text{HP}} \quad (16)$$

$$P^{\text{EB}} = \phi^{\text{EB}} / \eta_b \quad (17)$$

式中： E_i^{GC} 是压缩机所需能量，该部分能量由电网提供时，消耗电功率为 P_i^{GC} ； η_{HP} 、 η_b 分别为循环泵效率和电锅炉的产热效率； H_p 为水泵扬程。

P2G单元耗电功率生成气体，输出的气体可以直接注入到天然气网络中，有助于利用天然气网络的巨大运输能力和储存能力来完成多余电力的运输与储存，解决多余电力消纳问题，模型为

$$P_i^{\text{P2G}} = \frac{1}{3600} \frac{f_i^{\text{P2G}} C_{v,i}}{\eta_{\text{P2G}}} \quad (18)$$

式中： η_{P2G} 为能量转换效率； f_i^{P2G} 为电转气设备输出的气体流量； P_i^{P2G} 为消耗的电功率。

2.2 电力系统潮流计算模型

本方法中电力系统的潮流计算与传统交流电力系统潮流计算一致，节点功率偏差方程可写为

$$\Delta P_i = P_i^{\text{GG}} + P_i^{\text{CHP}} + P_i^{\text{EG}} - P_i^{\text{ED}} - P_i^{\text{GC}} - P_i^{\text{P2G}} - P_i^{\text{HP}} - P_i^{\text{EB}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (19)$$

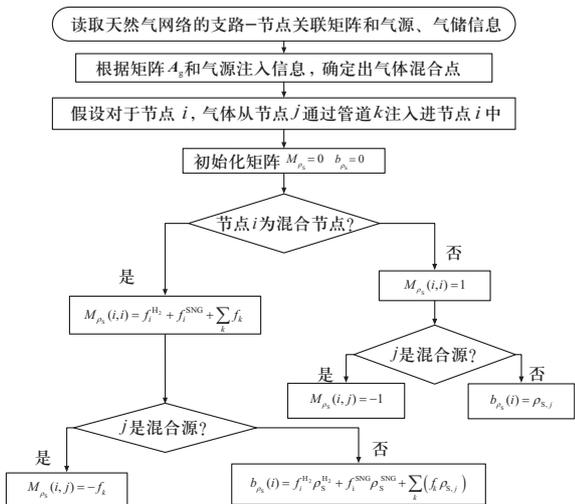


图1 气质密度系数矩阵及列向量计算流程图

Fig 1 Flowchart for calculating the matrix and column vector of specific gravity

$$\Delta Q_i = Q_i^{\text{SH}} + Q_i^{\text{EG}} - Q_i^{\text{ED}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (20)$$

式中: V 和 θ 是节点电压幅值和相角; G_{ij} 和 B_{ij} 为导纳的实部和虚部; P_i^{EG} 和 Q_i^{EG} 为传统发电机注入功率; P_i^{ED} 和 Q_i^{ED} 为母线 i 处电力负荷消耗功率; P_i^{GG} 、 P_i^{CHP} 分别为燃气发电机、CHP 注入到母线 i 的有功功率; P_i^{GC} 、 P_i^{HP} 、 P_i^{EB} 、 P_i^{P2G} 分别为电动压缩机、热网循环泵、电锅炉以及 P2G 消耗的有功功率; Q_i^{SH} 为无功补偿器注入的无功功率。

2.3 热力网络能量流计算模型

热力系统模型基于能量守恒原理^[19], 采用基于工质流体携带能量的传统能量流分析思想^[20], 模型表达如下:

$$\Delta \phi_i = \phi_i^{\text{EB}} + \phi_i^{\text{GB}} + \phi_i^{\text{CHP}} - \phi_i^{\text{HD}} - \sum_{j \in i} C_p \dot{m}_{ij} (T_s - T_r) \quad (21)$$

$$\Delta \sigma_i = \mathbf{B}_h \mathbf{K}_h \dot{\mathbf{m}} | \dot{\mathbf{m}} | \quad (22)$$

$$\Delta T_{s,i} = \mathbf{C}_s T_s - \mathbf{B}_s(i) \quad (23)$$

$$\Delta T_{r,i} = \mathbf{C}_r T_r - \mathbf{B}_r(i) \quad (24)$$

式中: ϕ_i^{EB} 、 ϕ_i^{GB} 、 ϕ_i^{CHP} 分别为电锅炉、燃气锅炉和 CHP 机组为热网提供的热功率; ϕ_i^{HD} 为节点负荷所需热功率; C_p 为水的比热容; \dot{m}_{ij} 为节点 i 至节点 j 段管道的质量流, 当热网存在环路时, 闭环回路内的水头压力损失总和为 0; 矩阵 \mathbf{B}_h 为回路-网络关联矩阵; \mathbf{K}_h 为管道系数, 与液体流动状态和摩擦阻力系数相关^[9]; \mathbf{C}_s 、 \mathbf{C}_r 为温度系数矩阵; \mathbf{B}_s 、 \mathbf{B}_r 为包含温度、质量流的列向量。

2.4 计及气体成分变化的扩展统一能量流算法

2.4.1 统一能量流模型

综合 1.2 和 2.1—2.3 节中的电、气、热及其耦合模型, 构建计及气体成分变化的能量流计算模型:

$$\Delta \mathbf{F} = [\Delta \mathbf{P} \quad \Delta \mathbf{Q} \quad \Delta \mathbf{f} \quad \Delta \rho_s \quad \Delta \mathbf{C}_v \quad \Delta \Phi \quad \Delta \sigma \quad \Delta T_s \quad \Delta T_r] = \mathbf{0} \quad (25)$$

待求解状态变量扩展为

$$\mathbf{x} = [\theta \quad V \quad \pi \quad \rho_s \quad C_v \quad \dot{\mathbf{m}} \quad T_s \quad T_r] \quad (26)$$

其中, 待求解变量个数应与式 (25) 中待求解的方程数量一致。变量个数取决于节点的功能和角色, 不同的节点类型对应不同的未知量和已知量, 如表 1 汇总所示。

表 1 各能源子系统节点类型

Table 1 The node type of sub-network

能源载体	节点类型	已知量	未知量
电力系统	平衡节点	V, θ	P, Q
	PV 节点	$ V , P$	θ, Q
	PQ 节点	P, Q	$ V , \theta$
天然气系统	平衡节点	π, ρ_s, C_v	f
	流量已知节点	f	π, ρ_s, C_v
热力系统	平衡节点	T_s	Φ, T_r, \dot{m}
	ΦT_s 节点	Φ, T_s	T_r, \dot{m}
	ΦT_r 节点	Φ, T_r	T_s, \dot{m}

2.4.2 基于 NR 法的统一能量流求解

NR 方法的优点是, 无论网络大小如何, 只要初始化所有的状态变量, 都能得到局部二次收敛的解, 因此在多能流计算中被广泛应用。本节基于 2.4.1 节模型, 通过 NR 法求解该非线性方程组, 迭代格式为

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - (\mathbf{J}_k)^{-1} \Delta \mathbf{F}_k \quad (27)$$

式中: k 是迭代次数; \mathbf{J} 为扩展统一雅可比矩阵, 表达为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{ee} & \mathbf{J}_{eg} & \mathbf{J}_{eh} \\ \mathbf{J}_{ge} & \mathbf{J}_{gg} & \mathbf{J}_{gh} \\ \mathbf{J}_{he} & \mathbf{J}_{hg} & \mathbf{J}_{hh} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中: 矩阵对角块 \mathbf{J}_{ee} 、 \mathbf{J}_{gg} 、 \mathbf{J}_{hh} 分别为电力网络、天然气网络和热力网路自身的雅可比矩阵。 \mathbf{J}_{ee} 、 \mathbf{J}_{hh} 与文献 [10] 中传统的统一雅可比矩阵表达一致, 分别为节点功率偏差方程 (19) — (20) 对状态变量 θ 、 V 的偏导数、方程 (21) — (24) 对热网状态变量 $\dot{\mathbf{m}}$ 、 T_s 、 T_r 的偏导。对角块 \mathbf{J}_{gg} 为天然气网络自身雅可比矩阵, 当考虑气质特性时, 该矩阵扩展为

$$\mathbf{J}_{gg} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \mathbf{f}}{\partial \pi} & \frac{\partial \Delta \mathbf{f}}{\partial \rho_s} & \frac{\partial \Delta \mathbf{f}}{\partial C_v} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \Delta \rho_s}{\partial \rho_s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \frac{\partial \Delta C_v}{\partial C_v} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式中: 对角矩阵 $\frac{\partial \Delta \rho_s}{\partial \rho_s}$ 和 $\frac{\partial \Delta C_v}{\partial C_v}$ 为气质密度和热值的系数矩阵 \mathbf{M}_{ρ_s} 、 \mathbf{M}_{C_v} , 是计及气体成分变化时所带来的新元素, 求法见图 1。又由 1.2 节的节点流量模型式 (2) — (3) 可知, 当负荷能量需求不变时, 其体积流量需求是 C_v 的函数, 所以式 (29) 的非对角矩阵 $\frac{\partial \Delta \mathbf{f}}{\partial C_v}$

不为 $\mathbf{0}$ ；同理，根据1.2节的管道流量模型可知，管道传输流量是 ρ_s 的函数，所以式(29)的非对角矩阵 $\frac{\partial \Delta f}{\partial \rho_s}$ 不为 $\mathbf{0}$ 。

扩展统一雅可比矩阵(28)中的非对角块矩阵元素由能量转换单元引入。如，当电网平衡节点处的源是气网的燃气发电机或CHP时， J_{ge} 存在，值为节点气流量偏差对电压相角和幅值的偏导数，否则为 $\mathbf{0}$ 。同理， J_{ch} 、 J_{gh} 和 J_{hc} 分别由循环泵、燃气锅炉和以电定热模式的CHP引入。由于气网不会由热网供能，即气网的状态变量变化不会影响热网，所以 $J_{hg}=\mathbf{0}$ 。

当电网中存在电动压缩机时，天然气网络的状态变量变化会导致气体流量发生变化，进而影响电动压缩机出力，体现为电网有功功率负荷波动，此时 J_{eg} 存在。对于传统能量流计算，气网仅有1个状态变量 $X_g=\pi$ ，所以 J_{eg} 仅包含元素 $\frac{\partial \Delta P}{\partial \pi}$ ；当考虑气体成分变化时，气网状态变量更新为 $[X_g]=[\pi, \rho_s, C_v]$ ，相应的扩展 J_{eg} 更新为

$$J_{eg} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \pi} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \rho_s} & \frac{\partial \Delta P}{\partial C_v} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (30)$$

2.4.3 计及气体成分变化的能量流计算流程

基于统一能量流模型和所给的扩展雅可比矩阵，计及气体成分变化的综合能源系统能量流计算流程如下。

步骤1：输入系统线路、管道、负荷及耦合元位置的参数；根据表1中节点类型，判别并统计各类型节点个数及相应的节点编号。

步骤2：设置系统待求状态变量的初始值 \mathbf{x}_0 ，电网、气网压力和热网变量的初始化与文献[9]一致，本文新增变量 ρ_s 和 C_v 的初始值可在主供气源的指定气质密度和热值下，采用平启动方式初始化。设置计算

精度 ε ，令迭代次数 $k=0$ 。

步骤3：根据 \mathbf{x}_k ，计算扩展方程组 $\Delta \mathbf{F}$ 。

步骤4：计算扩展统一雅可比矩阵 \mathbf{J} 。

步骤5：计算修正量 $\Delta \mathbf{x}_k = -(\mathbf{J}_k)^{-1} \Delta \mathbf{F}_k$ ，并更新状态变量 $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta \mathbf{x}_k$ 。

步骤6：若 $\|\Delta \mathbf{x}_k\|_{\infty} \leq \varepsilon$ ，则结束迭代计算，得到能量流结果 \mathbf{x}_k ，并进一步计算出电力系统源节点的注入功率、线路功率和功率损耗，计算出天然气系统平衡节点的注入流量，计算出热力系统平衡节点注入热功率、管道传输热功率和功率损耗；否则，转到步骤7。

步骤7：令 $k=k+1$ ，转到步骤3。

3 算例分析

3.1 算例系统介绍

如图2所示，本文以48节点的综合能源系统为例来验证气体成分变化对综合能源系统的影响，系统包括IEEE-14节点电网、20节点气网和14节点热网。耦合设备连接情况见表2。其中，IEEE-14节点电网的结构、线路参数和负荷水平与文献[21]一致，节点3处额外连接一个风力涡轮机，出力为45 MW；20节点天然气网络结构为Belgium天然气系统^[22]，管道长度和直径等参数与文献[23]一致，天然气气井所在的节点1为平衡节点，压力为5.6 MPa，S为储气罐，提供的气体流量已知。本文主要考虑传统天然气(NG)、合成天然气(SNG)、氢气(H₂)3种不同的气源，其各自的气质密度和热值见表3。14节点区域热网的管道长度、直径和负荷需求及耦合设备参数与文献[9]一致，其中热网平衡节点1的供水温度为120℃，其余源节点处的供水温度为 $T_s^{\text{CHP}}=130^\circ\text{C}$ ， $T_s^{\text{B}}=110^\circ\text{C}$ ，负荷回水温度为50℃，环境温度为10℃。

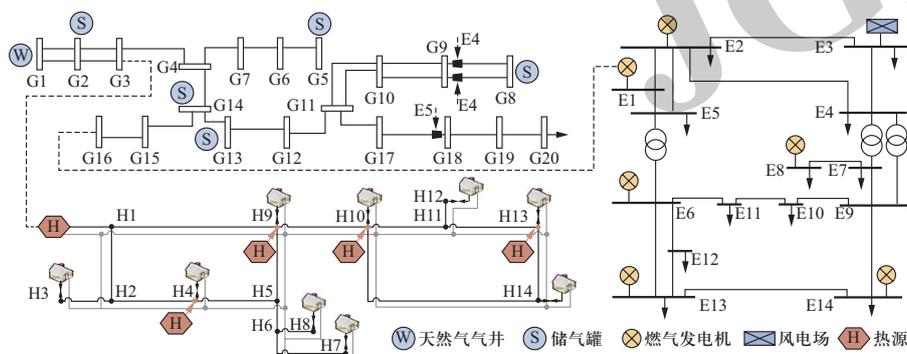


图2 48节点综合能源系统

Fig. 2 The 48-node integrated energy system

表2 耦合单元的配置及连接
Table 2 Configuration and connection of coupling units

能量转换单元	电网节点	气网节点	热网
GG	1	16	
GG	2	7	
GB、HP	12	3	1
CHP、GB、HP	6	15	4
CHP、GB、HP	13	12	9
CHP、GB、HP	14	6	10
CHP、GB、HP	8	10	13
GC	4	9	
GC	5	18	

表3 不同气源的气质密度和热值
Table 3 ρ_s and C_v of gas sources

气源	NG	SNG	H ₂
气质密度	0.604 8	0.58	0.069 6
热值/(MJ·m ⁻³)	41.04	37.40	12.75

3.2 气体成分变化对IES能量流结果的影响分析

设定气网中节点1处的气井W作为主气源, 提供NG; 节点5、8处的储气罐分别提供流量为2.8 Mm³/h、25.012 Mm³/h的SNG; 节点2、13、14分别提供流量为8.4 Mm³/h、1.2 Mm³/h、0.96 Mm³/h的SNG以及8.4 km³/h、1.2 km³/h、0.96 km³/h的H₂。为了对比考虑气体成分前后的变化, 本文采用以下2种方法对能量流稳态结果进行比较。

方法a: 传统能量流计算方法。此方法中, 基于能量守恒原理, 将注入气体网络的H₂或SNG的体积流量转化为传统天然气的体积流量, 那么所有气体网络节点的 ρ_s 、 C_v 值都分别为0.604 8和41.04 MJ/m³, 气体流量需求可以直接用流量表示, 并保持为常数。

方法b: 考虑气体成分变化的统一能量流计算方法。此方法中, 考虑H₂或SNG注入进气网并与传统天然气混合。3种气源的 ρ_s 和 C_v 是已知的, 对于混合源节点和负荷节点, ρ_s 和 C_v 则随着每次迭代而更新, 直至得到最后的收敛值。此外, 气体负荷的能量需求不变, 那么流量需求也将随着节点 C_v 的变化而变化。

基于方法a和b计算得到的能量流结果见表4—表8。表4给出了2种方法下的气源注入结果, 表5、表6总结了天然气网络节点的能量流结果, 分别包括负荷需求、压力、气质密度和热值, 以及耦合设备的流量

需求。表7、表8分别总结了电网和热网的能量流结果。具体结果分析如下。

表4 天然气网络气源注入
Table 4 The gas sources injection of gas network

节点	单一供气源		多类型供气源	
	NG流量 /(Mm ³ ·h ⁻¹)	NG流量 /(Mm ³ ·h ⁻¹)	SNG流量 /(Mm ³ ·h ⁻¹)	H ₂ 流量 /(km ³ ·h ⁻¹)
1	19.945 2	19.948 2		
2	7.657 6		8.4	8.4
5	2.551 7		2.8	
8	22.793 6		25.012	
13	1.093 9		1.2	1.2
14	0.875 2		0.96	0.96

1) 由表5最后一列可知, 考虑气体成分变化时, 网络中各个节点的 C_v 普遍发生变化, 又由于H₂和SNG气源的 C_v 都低于NG, 所以 C_v 值普遍降低。同时, 方法b计算得到的体积流量需求(第3列)大于方法a(第2列), 这是因为各个负荷的能量需求不变, 当气体热值降低, 负荷流量需求就会升高, 公式 $C_{v,a} \times F_{\text{flow},a} / C_{v,b} = F_{\text{flow},b}$ 满足所有节点也可用于证明上述结论。

根据考虑气体成分变化后的 ρ_s (第7列)和 C_v (第9列)结果也可清晰看出气体流向, 如节点8~12、17~20的负荷均由节点8的储气罐中的SNG供应。

2) 考虑气体成分变化使得负荷流量需求增加, 相应的管道压降就会增加(表5的4、5列), 以网络末端节点20为例, 体积流量需求增加了9.73%, 压力下降了20.32%(计算公式为 $|x_a - x_b| / x_a$)。

3) 与1)同理, 耦合设备燃气发电机(GG)、CHP机组和燃气锅炉(GB)都作为天然气网络负荷, 当网络中 C_v 普遍降低时, 体积流量需求均有所增加。由表6可知, 燃气发电机的需求最大增加了6.23%, CHP的需求最大增加了9.73%, 燃气锅炉的需求最大增加了9.84%。

4) 表7总结了2种方法计算得到的电力网络能量流结果, 包括发电功率 P_i^G , 电动压缩机的消耗功率 P_i^{GC} 。当计及气体成分变化时, 节点4和节点5连接的电动压缩机消耗的功率分别增加了9.73%和9.76%。这是因为各气源混合后增加了气体流量需求和管道传输流量, 由电动压缩机耗能公式可知, 流量增加时, 压缩机的功耗增加。

表5 天然气网络的负荷需求、压力、气质密度以及热值

Table 5 Gas demand, pressure, ρ_s and C_v of gas network

节点	负荷需求/($\text{Mm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		压力/MPa		气质密度		热值/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	
	方法a	方法b	方法a	方法b	方法a	方法b	方法a	方法b
1	0	0	5.600 0	5.600 0	0.604 8	0.604 8	41.04	41.04
2	0	0	5.590 3	5.590 3	0.604 8	0.597 3	41.04	39.953 4
3	3.918	4.024 6	5.562 3	5.561 1	0.604 8	0.597 3	41.04	39.953 4
4	0	0	5.192 1	5.174 6	0.604 8	0.597 3	41.04	39.953 4
5	0	0	4.855 2	4.829 2	0.604 8	0.58	41.04	37.4
6	4.034	4.322 5	4.788 5	4.751 7	0.604 8	0.586 1	41.04	38.300 9
7	0	0	4.803 8	4.767 8	0.604 8	0.597 3	41.04	39.953 4
8	0	0	4.760 2	4.835 3	0.604 8	0.58	41.04	37.4
9	0	0	6.768 9	6.865 3	0.604 8	0.58	41.04	37.4
10	6.365	6.984 5	5.437 3	5.489 0	0.604 8	0.58	41.04	37.4
11	0	0	5.301 1	5.332 9	0.604 8	0.58	41.04	37.4
12	2.12	2.326 3	5.075 7	5.073 3	0.604 8	0.58	41.04	37.4
13	0	0	4.914 1	4.886 1	0.604 8	0.58	41.04	37.398 0
14	0	0	4.889 6	4.857 7	0.604 8	0.588 4	41.04	38.638 4
15	6.848	7.273 6	4.659 3	4.602 5	0.604 8	0.588 4	41.04	38.638 4
16	0	0	4.306 4	4.208 2	0.604 8	0.588 4	41.04	38.638 4
17	0	0	5.217 2	5.236 5	0.604 8	0.58	41.04	37.4
18	0	0	6.732 8	6.581 9	0.604 8	0.58	41.04	37.4
19	0.222	0.243 6	4.321 2	3.540 9	0.604 8	0.58	41.04	37.4
20	1.919	2.105 8	4.166 8	3.320 2	0.604 8	0.58	41.04	37.4

表6 耦合设备作为天然气网络负荷的流量需求

Table 6 Flow demand of coupled units as natural gas network loads

节点	GG流量 /($\text{Mm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		CHP流量 /($\text{km}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		GB流量 /($\text{km}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	
	方法a	方法b	方法a	方法b	方法a	方法b
3					2.327	2.390
6			3.626	3.885	0.199	0.214
7	7.943 5	8.159 5				
10			3.626	3.979	0.498	0.547
12			2.901	3.183	0.299	0.307
15			2.901	3.081	0.498	0.529
16	21.530 8	22.872 3				

又由于电动压缩机作为电网负荷,进一步导致平衡节点处的发电机的有功功率出力增加。结果表明,计及气体成分变化后,同时影响了气网和电网的最终

表7 电力网络能量流结果

Table 7 Power flow results of power network

节点	P_i^G /MW		P_i^{GC} /kW	
	方法a	方法b	方法a	方法b
1	136.693 1	136.717 2		
2	40.000 0	40.000 0		
3	45.000 0	45.000 0		
4			133.6	146.6
5			49.2	54.0

结果。

5)表8总结了热网管道质量流,热损以及节点供、回水温度结果。因为本文计算的前提是保证负荷的能量需求不变,而热网又可看作是气网的负荷,所以2种方法计算得到的热网能量流结果一致,即在保证热

网需求的前提下, 热网状态不会受到气网的气质密度、热值变化的影响。这也与统一雅可比矩阵中 $J_{hg} = \mathbf{0}$, 以及气网不会对热网产生影响的结论一致。

表 8 热力网络能量流结果
Table 8 Energy flow results of heating network

管道	始端	终端	质量流 /(kg·s ⁻¹)	热损 /MW	节点	供水 温度/°C	回水 温度/°C
1	1	2	37.635 1	0.735 6	1	120	46.763 9
2	2	3	36.676 3	0.045 9	2	115.885 5	49.095 2
3	2	4	0.958 8	0.334 3	3	115.197 4	50
4	4	5	47.892 7	0.790 8	4	124.1	49.125 6
5	5	6	85.854 6	0.460 4	5	120.857 5	50
6	6	7	51.438 1	0.142	6	120.241 7	49.777 8
7	6	8	34.416 5	0.157 7	7	119.730 4	50
8	9	5	37.961 9	0.198 8	8	119.478 4	50
9	1	9	38.588 4	0.049 4	9	122.409 9	47.741 7
10	9	10	38.152	0.065 1	10	124.922 5	47.657 1
11	10	11	42.394 8	0.577 6	11	122.358 8	48.685 1
12	11	12	33.416 4	0.006 9	12	121.557 6	50
13	11	13	8.978 4	0.278 8	13	124.277 5	49.816 9
14	13	14	22.916 8	0.689 9	14	118.561 3	50
15	10	14	29.398 5	1.270 5			

综上所述, 计及气体成分变化后, 气网压力、负荷流量需求、IES中耦合设备的流量需求都受到较大影响, 如果不考虑气体成分变化带来的 ρ_s 和 C_v 两个变量的变化, 会错误评估综合能源系统的稳态。同时, 将 ρ_s 和 C_v 建模为状态变量后, 可以清晰地观察混合点气体特性。

4 结论

针对多气源的存在及其混合带来的燃气品质、压力等参数难以量化与可观的问题, 本文提出了计及气体成分变化的综合能源系统能量流计算方法。通过建立与气体特性(气质密度、热值)相关的节点注入流量和管道传输流量模型, 给出偏差方程, 以及系数矩阵求解流程, 从而建立了包含气质密度和热值偏差方程的统一能量流求解模型; 进一步基于NR法, 给出修正后的扩展统一雅可比矩阵, 来量化气体成分变化对综合能源系统的影响, 以实现更全面的稳态能量流结果评估和运行分析。

算例分析验证了所提算法的正确性和有效性, 气体成分变化不仅改变了气网压力与负荷流量需求结果, 还对IES中耦合设备的流量需求产生了影响。随着CHP、GG、P2G等能源转换技术的快速发展, 综合能源系统中多类型供气源、多成分气质的特点将愈发明显, 本文所提模型与方法可为其分析提供一定的理论基础。

在后续研究中, 将从短期运行入手, 考虑热力系统和天然气系统的动态延迟特性, 对计及多类型供气源的能量流计算与分析问题做进一步探讨。

参考文献

- [1] LI J X, WANG D, JIA H J, et al. Prospects of key technologies of integrated energy systems for rural electrification in China[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(1): 3-17.
- [2] 帅轩越, 王秀丽, 黄晶. 多区域综合能源系统互联下的共享储能容量优化配置[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(4): 382-392.
SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, HUANG Jing. Optimal configuration of shared energy storage capacity under multiple regional integrated energy systems interconnection[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(4): 382-392(in Chinese).
- [3] MA Z Y, ZHANG S N, HOU F X, et al. Exploring the driving factors and their mitigation potential in global energy-related CO₂ emission[J]. *Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 413-422.
- [4] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 52-61(in Chinese).
- [5] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(15): 1-8.
SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(15): 1-8(in Chinese).
- [6] 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(in Chinese).
- [7] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified

- gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [8] LIU X. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff: Cardiff University, 2013.
- [9] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3636-3647.
- [10] 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 system containing electricity, heat and gas[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2942-2951(in Chinese).
- [11] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3634-3642(in Chinese).
- [12] 朱永强, 蔡钦钦, 龚萍, 等. 多能源网络稳态能量流分析与计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(20): 59-66.
ZHU Yongqiang, CAI Qinqin, GONG Ping, et al. Analysis and calculation method of steady-state energy flow in multi-energy network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(20): 59-66(in Chinese).
- [13] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 11-24.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [14] ZENG Q, FANG J K, LI J H, et al. Steady-state analysis of the integrated natural gas and electric power system with bi-directional energy conversion[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 1483-1492.
- [15] 李维维, 钱瞳, 唐文虎, 等. 电-气综合能源系统的综合灵敏度指标构建方法和应用研究[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(2): 118-126.
LI Weiwei, QIAN Tong, TANG Wenhui, et al. Research on construction method and application of composite sensitivity index for integrated electricity and natural gas systems[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(2): 118-126(in Chinese).
- [16] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1293-1305.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1293-1305(in Chinese).
- [17] 高鹏飞, 周孝信, 杨小煜, 等. 计及异质气体混合的电-气-热综合能源系统能量流计算方法[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2523-2533.
GAO Pengfei, ZHOU Xiaoxin, YANG Xiaoyu, et al. Energy flow calculation of integrated electricity, natural gas and heating systems considering mixtures of gas with alternative qualities[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2523-2533(in Chinese).
- [18] HUANG Y J, SUN Q Y, ZHANG N, et al. A multi-slack bus model for bi-directional energy flow analysis of integrated power-gas systems[J/OL]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, (2021-04-30)[2022-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9420363>.
- [19] 陈群, 郝俊红, 付荣桓, 等. 基于焓理论的热系统分析和优化的能量流法[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(7): 1376-1383.
CHEN Qun, HAO Junhong, FU Ronghuan, et al. Entransy-based power flow method for analysis and optimization of thermal systems[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(7): 1376-1383(in Chinese).
- [20] 赵甜, 陈曦, 贺克伦, 等. 热力系统整体分析和优化的热量流法[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(10): 1251-1274.
ZHAO Tian, CHEN Xi, HE Kelun, et al. Heat current method for integrated analysis and optimization of thermodynamic systems[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2021, 51(10): 1251-1274(in Chinese).
- [21] 黄雨佳, 孙秋野, 王睿, 等. 面向综合能源系统的静态电压稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(增刊1): 44-53.
HUANG Yujia, SUN Qiuye, WANG Rui, et al. Static voltage stability analysis for integrated energy system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(S1): 44-53(in Chinese).
- [22] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 3347-3355.
- [23] DE WOLF D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm[J]. *Management Science*, 2000, 46(11): 1454-1465.

收稿日期: 2022-06-19; 修回日期: 2022-09-30。



黄雨佳

作者简介:

黄雨佳(1996), 女, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统的能量流计算及其安全稳定运行分析, E-mail: huangyujianeu@163.com。

孙秋野(1977), 男, 教授, 博士生导师, 国家级科技创新领军人才, IET Fellow, 研究方向为多能耦合系统的能流分析与分布式优化控制、能

源路由器硬件拓扑、自能源状态感知、非侵入式检测与

建模、电力设备状态检测技术、人工智能算法设计及应用。通信作者, E-mail: sunqiuye@mail.neu.edu.cn。

王睿(1993), 男, 讲师, 研究方向为含高比例可再生能源的新型电力系统潮流计算, E-mail: wangrui@ise.neu.edu.cn。

姚葭(1997), 女, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统的能量流计算与分析, E-mail: yaojia_neu@foxmail.com。

(责任编辑 李锡)

JGEEI

JGEEI