

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.013

考虑压缩机不同运行状态的 IES 气网潮流分布式计算方法

陈茂云¹, 郑建勇^{1,2}, 梅飞³, 吴建章²

(1. 东南大学苏州研究院, 江苏 苏州 215123; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 压缩机运行状态的变化会造成气网工况变化, 进而对电-气-热综合能源系统的稳态潮流产生影响。为求解压缩机不同运行状态下的综合能源系统气网潮流, 文中分别对综合能源系统各子网络和能量耦合环节建模。考虑压缩机 5 种工作模式和 2 种驱动方式, 针对含有多台不同运行状态压缩机的天然气网络, 基于牛顿-拉夫逊法, 提出保留压缩机管道整体求解的气网潮流计算方法, 并拓展一种分离压缩机管道等效求解方法, 以分布式计算方法顺序求解综合能源系统潮流。通过 2 个算例, 验证了所提保留压缩机管道整体求解方法的精确性和有效性, 弥补了现有气网潮流计算模型无法处理复杂气网工况且收敛性、通用性差的缺点, 揭示了压缩机运行状态的变化对综合能源系统潮流的影响。

关键词: 电-气-热综合能源系统; 稳态潮流; 压缩机运行状态; 天然气网络; 分布式计算方法; 牛顿-拉夫逊法

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)04-0122-11

0 引言

电-气-热综合能源系统 (integrated energy system, IES) 通过热电联产机组、燃气轮机、电制氢、光伏、风力发电等设备统筹管理区域电能、热能、天然气能, 实现了能源利用的清洁与高效^[1-6]。综合潮流计算是 IES 稳态分析的核心, 然而, 系统运行方式的多样性、耦合模式的复杂性、系统内设备运行状态的变化性大大增加了综合潮流统一求解的难度。因此, 充分利用电网、气网、热网潮流计算的现有成果, 形成稳定、高效的潮流分布式计算方法是研究 IES 潮流计算的重要方向, 对指导 IES 的协同规划、优化调度具有重大意义^[7-11]。

文献[12]基于能量枢纽 (energy hub, EH) 模型, 给出了不同耦合模式下 IES 潮流分布式求解算法的流程; 文献[13]细化了热网模型, 提出基于内点法的最优潮流计算方法; 文献[14]结合遗传算法的全局搜索能力和牛顿法的局部搜索能力, 优化了气网节点压力初值的选取, 提高了 IES 潮流计算的效率; 文献[15]考虑大规模新能源并网, 建立了综合潮流顺序求解模型, 并对系统稳定性进行了评估; 文献[16]考虑风电场出力和电、气负荷的随机性, 基于半不变量法求解电-气互联系统的最优潮流; 文献[17]将辐射型热网的供水网络和回水网络解耦, 实现电-热 IES 的快速潮流计算; 文献[18]针对耦合设备的耗水特性, 提出电-气-水混合潮流的

计算方法。

然而, 现有 IES 稳态潮流计算大多侧重于对系统运行方式、耦合模式的研究, 忽略了系统内关键设备, 尤其是气网中压缩机的运行状态变化, 气网潮流计算模型较为粗糙, 不适用于含多台不同工作模式、不同驱动方式压缩机的天然气网络, 无法精确求解不同气网工况下的潮流。文献[19]考虑含有多台气压缩机的天然气网络, 但其潮流计算模型无法处理电压压缩机; 文献[20]研究不同耦合情况下含有电压压缩机的 IES 潮流分布式顺序求解流程, 然而并没有将压缩机所有工作模式纳入考虑; 文献[21]分离气压缩机管道, 从而简化气网潮流计算, 但该方法在含有多台压缩机的复杂网络拓扑下的适用性并未得到验证; 文献[22]建立考虑压缩机 3 种工作模式的综合潮流求解算法, 但处理方法较为繁琐, 且忽略了驱动方式的改变对综合潮流的影响。

针对上述问题, 文中提出一种考虑压缩机不同运行状态的 IES 潮流分布式计算方法。首先, 对 IES 各子网络和能量耦合环节建模; 然后, 分别建立基于牛顿-拉夫逊法的电网、热网、气网潮流计算模型, 考虑压缩机的 5 种工作模式和 2 种驱动方式, 推导含有多台不同运行状态压缩机的气网的雅可比矩阵, 提出保留压缩机管道的整体求解方法, 并拓展分离压缩机管道的等效求解方法, 在此基础上, 以分布式计算方法顺序求解 IES 潮流; 最后, 通过 2 个算例对 2 种气网求解方法的通用性和收敛性进行对比, 并验证所提算法在不同气网工况、不同系统规模下的精确性和有效性。

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-03-02

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目 (BE2020027)

1 电-气-热 IES 建模

1.1 天然气系统模型

电力系统、热力系统的潮流计算模型已较为成熟,文献[20]给出了电力系统的交流潮流模型和热力系统的水力、热力模型。下文主要对天然气系统进行建模。

1.1.1 普通管道模型

对于等温、恒定摩擦系数且不考虑气体压缩率的水平管道 r ,其管道流量 $f_{p,r}$ 可由改进的 Weymouth 方程得到。

$$f_{p,r} = K_{p,r} s_{p,r} \sqrt{|\Pi_i - \Pi_j|} \quad (1)$$

$$s_{p,r} = \begin{cases} 1 & \Pi_i \geq \Pi_j \\ -1 & \Pi_i < \Pi_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $K_{p,r}$ 为管道 r 参数; Π_i 、 Π_j 分别为管道首末节点 i 、 j 的气体压力 π_i 、 π_j 的平方; $s_{p,r}$ 表征管道 r 流量方向,默认气体由高压力节点流向低压力节点。

1.1.2 压缩机管道模型

天然气传输造成的气压损耗通过压缩机升压弥补,按驱动方式的不同,压缩机可分为气压缩机和电压缩机,分别消耗天然气和电能以压缩气体,2种压缩机管道模型分别如图 1(a)、图 1(b)所示。其中 w_j 、 w_p 分别为压缩机管道进出口节点 j 、 p 的注气量; $f_{C,k}$ 为压缩机 k 管道流量; $\tau_{C,k}$ 为气压缩机耗气量; $p_{C,k}$ 为电压缩机消耗的功率。

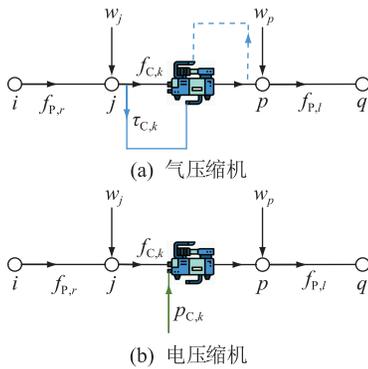


图 1 压缩机管道模型

Fig.1 Models of pipelines with compressor

考虑与理想气体行为的偏差,经实验修正的压缩机功率方程为:

$$H_{C,k} = B_{C,k} f_{C,k} \left[\left(\frac{\Pi_p}{\Pi_j} \right)^{\frac{Z_{C,k}}{2}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: $H_{C,k}$ 为压缩机 k 的功率; $B_{C,k}$ 为常数,与压缩机 k 工作参数相关; Π_j 、 Π_p 分别为压缩机进出口节点 j 、 p 的气体压力 π_j 、 π_p 的平方; $Z_{C,k}$ 为压缩机 k 入口气体压缩系数。

对于气压缩机,其耗气量可近似表示为:

$$\tau_{C,k} = \alpha_{C,k} + \beta_{C,k} H_{C,k} + \gamma_{C,k} H_{C,k}^2 \approx \alpha_{C,k} + \beta_{C,k} H_{C,k} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{C,k}$ 、 $\beta_{C,k}$ 、 $\gamma_{C,k}$ 为压缩机 k 近似系数。为简化分析,平方项系数 $\gamma_{C,k}$ 常忽略不计^[21]。

对于电压缩机,其耗气量为 0,可由 IES 中电网供电,消耗的功率换算成电功率为^[23]:

$$P_{C,k} = 745.7 H_{C,k} \quad (5)$$

文中考虑压缩机的 5 种工作模式。模式 I:定压缩比(π_p 与 π_j 比值为定值);模式 II:定压差(π_p 与 π_j 差值为定值);模式 III:定管道流量($f_{C,k}$ 为定值);模式 IV:定入口压力(π_j 为定值);模式 V:定出口压力(π_p 为定值)。并考虑压缩机 2 种驱动方式:电驱动、气驱动,其中气压缩机可以从入口或出口节点取气。

1.1.3 天然气网络模型

天然气网络流量平衡方程为:

$$\mathbf{A}_g \mathbf{f}_p + \mathbf{V}_g \mathbf{f}_c + \mathbf{w}_g - \mathbf{T}_g \boldsymbol{\tau}_c = \mathbf{0} \quad (6)$$

式中: \mathbf{A}_g 为普通管道-节点关联矩阵; \mathbf{f}_p 为普通管道流量矩阵; \mathbf{V}_g 为压缩机管道-节点关联矩阵; \mathbf{f}_c 为压缩机管道流量矩阵; \mathbf{w}_g 为节点注气量矩阵,节点注气量为节点气供应与气负荷之差; \mathbf{T}_g 为表征压缩机是否从节点取气的矩阵,若压缩机 k 从节点 i 取气,则 $T_{g,ik}$ 为 1,反之 $T_{g,ik}$ 为 0; $\boldsymbol{\tau}_c$ 为压缩机耗气量矩阵。

1.2 耦合环节模型

IES 中耦合设备主要包括:电-气耦合设备,如电压缩机等;电-热耦合设备,如热泵等;气-热耦合设备,如燃气锅炉等;电-气-热耦合设备,如热电联产机组等。考虑到电压缩机仅消耗电能以维持气网运行,不直接影响气负荷,可将此耦合关系简化为电网额外电负荷。采用 EH 模型对耦合环节建模,EH 中耦合设备将气网输入的天然气能转化为电能和热能输出,并充分利用区域光伏、风力发电,其结构如图 2 所示。图中 P_{pv} 、 P_{wt} 分别为光伏、风力发电量; $P_{i,g}$ 为 EH 的气能输入; $P_{o,e}$ 、 $P_{o,h}$ 分别为 EH 的电能、热能输出; α 为电能分配系数; β_1 、 β_2 为天然气分配系数。

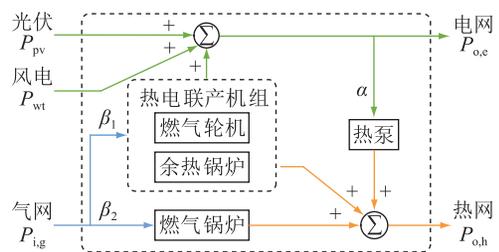


图 2 能量枢纽结构

Fig.2 Structure of energy hub

则该 EH 可表示为:

$$\begin{bmatrix} P_{o,e} \\ P_{o,h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \alpha & 1 - \alpha & \beta_1 \eta_{chp}^e (1 - \alpha) \\ \alpha \eta_{hp} & \alpha \eta_{hp} & \beta_1 \eta_{chp}^h + \beta_2 \eta_{gb} + \alpha \eta_{hp} \beta_1 \eta_{chp}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{pv} \\ P_{wt} \\ P_{i,g} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: η_{chp}^e 、 η_{chp}^h 分别为热电联产机组电能、热能转换效率; η_{gb} 为燃气锅炉效率; η_{hp} 为热泵供热系数。

2 考虑压缩机不同运行状态的 IES 潮流分布式计算方法

统一计算和分布式计算是 IES 潮流计算的 2 种主要方法。前者须构造整个能量网络的统一雅可比矩阵^[24],随着模型精细度的提高,难以快速收敛。因此,文中采用分布式策略来提高 IES 潮流计算的有效性和通用性,基于牛顿-拉夫逊法求解各能源子网络的潮流,其迭代形式如下:

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{x}_t - (\mathbf{J}_t)^{-1} \Delta \mathbf{F}_t \quad (8)$$

式中: \mathbf{x}_t 为第 t 次迭代的网络状态量; \mathbf{J}_t 为第 t 次迭代雅可比矩阵; $\Delta \mathbf{F}_t$ 为第 t 次迭代偏差量。

2.1 电、热力网络潮流计算

电力系统状态量为 $\mathbf{x}_e = [\mathbf{U} \ \boldsymbol{\theta}]$,其中 \mathbf{U} 、 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为节点电压幅值矩阵和相角矩阵。热力系统状态量为 $\mathbf{x}_h = [\mathbf{T}_{s,load} \ \mathbf{T}_{r,load} \ \mathbf{m}]$,其中 $\mathbf{T}_{s,load}$ 、 $\mathbf{T}_{r,load}$ 分别为管道供、回水温度矩阵; \mathbf{m} 为管道流量矩阵。则电力、热力网络偏差量可由式(9)、式(10)表示。电网、热网雅可比矩阵详见文献[25]。

$$\Delta \mathbf{F}_e = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{sp} - \text{Re}(\mathbf{U}_1 (\mathbf{Y} \mathbf{U}_1)^*) \\ \mathbf{Q}_{sp} - \text{Im}(\mathbf{U}_1 (\mathbf{Y} \mathbf{U}_1)^*) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Delta \mathbf{F}_h = \begin{bmatrix} \Delta \Phi \\ \Delta \mathbf{p} \\ \Delta \mathbf{T}_s \\ \Delta \mathbf{T}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_p \mathbf{A}_h \mathbf{m} (\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_o) - \Phi_{sp} \\ \mathbf{B}_h \mathbf{K}_h \mathbf{m} | \mathbf{m} | - \boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{C}_s \mathbf{T}_{s,load} - \mathbf{b}_s \\ \mathbf{C}_r \mathbf{T}_{r,load} - \mathbf{b}_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: \mathbf{P}_{sp} 、 \mathbf{Q}_{sp} 、 Φ_{sp} 分别为系统给定有功、无功功率和热功率矩阵; \mathbf{Y} 为电网导纳矩阵; \mathbf{U}_1 为电压相量矩阵; \mathbf{C}_p 为热水比热容矩阵; \mathbf{A}_h 为热网节点-管道关联矩阵; \mathbf{T}_s 、 \mathbf{T}_o 分别为节点供水温度、输出温度矩阵; \mathbf{B}_h 为回路-支路关联矩阵; \mathbf{K}_h 为管道阻力系数矩阵; \mathbf{C}_s 、 \mathbf{C}_r 为供回水网络系数矩阵; \mathbf{b}_s 、 \mathbf{b}_r 为与供回水温度有关的列向量。

2.2 天然气网络潮流计算

当天然气网络中同时存在多台不同工作模式、

不同驱动方式的压缩机时,天然气网络稳态潮流计算的复杂度大幅提升,现有方法由于其局限性,不能统筹考虑并有效处理所有气网工况。对此,文中推导压缩机不同运行状态下的气网雅可比矩阵,提出一种保留压缩机管道整体求解的气网潮流计算方法;同时,拓展一种分离压缩机管道的等效求解方法,采用 2 种方法求解不同工况下的气网潮流。

2.2.1 保留压缩机管道整体求解

在传统天然气网络稳态潮流计算中,除平衡节点、负荷节点压力未知^[26],须设置所有节点压力初值,以求解负荷节点的注气量偏差 $\Delta \mathbf{w}$ 。

$$\Delta \mathbf{F}_g = \Delta \mathbf{w} = \mathbf{w}_s + \mathbf{A} \mathbf{f}_p + \mathbf{V} \mathbf{f}_c - \mathbf{T} \boldsymbol{\tau}_c \quad (11)$$

式中: $\Delta \mathbf{F}_g$ 为气网潮流计算偏差量; \mathbf{A} 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{T} 分别为 \mathbf{A}_g 、 \mathbf{V}_g 、 \mathbf{T}_g 中去除压力已知节点对应行、列的矩阵; \mathbf{w}_s 为负荷节点的实际注气量。

对于不含压缩机管道的天然气网络,气网雅可比矩阵可表示为:

$$\mathbf{J}_g = \frac{\partial \Delta \mathbf{w}}{\partial \boldsymbol{\Pi}} = -\mathbf{A}_g \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{A}_g^T \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{\Gamma}$ 为对角矩阵; $\boldsymbol{\Pi}$ 为管道节点气体压力的平方组成的矩阵。 $\boldsymbol{\Gamma}$ 的对角元素为:

$$\Gamma_r = \frac{1}{2} \frac{f_{p,r}}{\Pi_i - \Pi_j} \quad r = 1, 2, \dots, N_p \quad (13)$$

式中: N_p 为天然气网络中的管道数量。

若天然气网络中含有压缩机管道,则 \mathbf{J}_g 根据压缩机运行状态的差异而有所不同。第 t 次迭代过程中入口取气的压缩机进出口节点压力 $\pi_{j,t}$ 、 $\pi_{p,t}$ 满足:

$$\begin{cases} \pi_{p,t} = R_{C,k} \pi_{j,t} & \text{模式 I} \\ \pi_{p,t} = \pi_{j,t} + D_{C,k} & \text{模式 II} \\ \pi_{p,t} = \sqrt{s_{p,l} \left(\frac{f_{C,k} + w_p}{K_{P,l}} \right)^2 + (\pi_{q,t})^2} & \text{模式 III} \\ \pi_{j,t} = \pi_{j,0} & \text{模式 IV} \\ \pi_{p,t} = \pi_{p,0} & \text{模式 V} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $R_{C,k}$ 为压缩机 k 的压缩比; $D_{C,k}$ 为压缩机 k 的压差。

在图 1 所示压缩机管道模型中,管道进、出口节点 j 、 p 的流量平衡式为:

$$\begin{cases} w_j = f_{C,k} + g_{C,k} \boldsymbol{\tau}_{C,k} - f_{p,r} \\ w_p = f_{p,l} - f_{C,k} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $g_{C,k}$ 为 0-1 变量,表征压缩机 k 的驱动方式,为 1 表示气驱动,为 0 表示电驱动。

将压缩机出口节点压力视为已知,消去 $f_{C,k}$,并

由式(4)将 $\tau_{c,k}$ 代入压缩机管道进出口节点流量平衡式(15),则压缩机入口节点注气量可改写为:

$$w_j = -K_{p,r} s_{p,r} \sqrt{|\Pi_i - \Pi_j|} + g_{c,k} \alpha_{c,k} + \omega_j \theta_j \quad (16)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_j = K_{p,l} s_{p,l} \sqrt{|\Pi_p - \Pi_q|} - w_p \\ \theta_j = g_{c,k} \beta_{c,k} B_{c,k} \left[\left(\frac{\Pi_p}{\Pi_j} \right)^{\frac{z_{c,k}}{2}} - 1 \right] + 1 \end{cases} \quad (17)$$

记:

$$\sigma_{c,k} = g_{c,k} \beta_{c,k} B_{c,k} Z_{c,k} \quad (18)$$

对 J_g 中第 j 行元素作如下修改:

$$\begin{cases} J_{g,jj} = \frac{-K_{p,r} s_{p,r}}{2\sqrt{|\Pi_i - \Pi_j|}} + \frac{\omega_j \sigma_{c,k}}{2\Pi_j} \left(\frac{\Pi_p}{\Pi_j} \right)^{\frac{z_{c,k}}{2}} \\ J_{g,jq} = \frac{K_{p,l} s_{p,l} \theta_j}{2\sqrt{|\Pi_p - \Pi_q|}} \end{cases} \quad (19)$$

同理,将压缩机入口节点压力视为已知,则压缩机出口节点注气量可改写为:

$$w_p = K_{p,l} s_{p,l} \sqrt{|\Pi_p - \Pi_q|} - \frac{\omega_p}{\theta_p} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_p = w_j + K_{p,r} s_{p,r} \sqrt{|\Pi_i - \Pi_j|} - g_{c,k} \alpha_{c,k} \\ \theta_p = g_{c,k} \beta_{c,k} B_{c,k} \left[\left(\frac{\Pi_p}{\Pi_j} \right)^{\frac{z_{c,k}}{2}} - 1 \right] + 1 \end{cases} \quad (21)$$

由式(18),对 J_g 中第 p 行元素作如下修改:

$$\begin{cases} J_{g,pi} = \frac{K_{p,r} s_{p,r}}{2\theta_p \sqrt{|\Pi_i - \Pi_j|}} \\ J_{g,pp} = \frac{-K_{p,l} s_{p,l}}{2\sqrt{|\Pi_p - \Pi_q|}} - \frac{\omega_p \sigma_{c,k}}{2\theta_p^2 \Pi_p} \left(\frac{\Pi_p}{\Pi_j} \right)^{\frac{z_{c,k}}{2}} \end{cases} \quad (22)$$

当压缩机工作在模式IV下,可认为其入口节点压力已知;当压缩机工作在其余4种模式下,可认为其出口节点压力已知。由式(19)、式(22),根据压缩机运行状态的不同,修改雅可比矩阵 J_g 中对应的元素,并删去 J_g 中压力已知节点对应行和列,得到最终的气网雅可比矩阵。对于压力已知的压缩机相关节点,在每次迭代开始前由式(14)计算其压力平方,其与平衡节点都被视为压力已知节点,不参与牛顿-拉夫逊法迭代,具体计算流程如图3所示。

对于出口取气的压缩机,相关公式推导同理,须注意的是,此时工作在模式III、IV下的压缩机入口节点压力已知,工作在其他3个模式下的压缩机

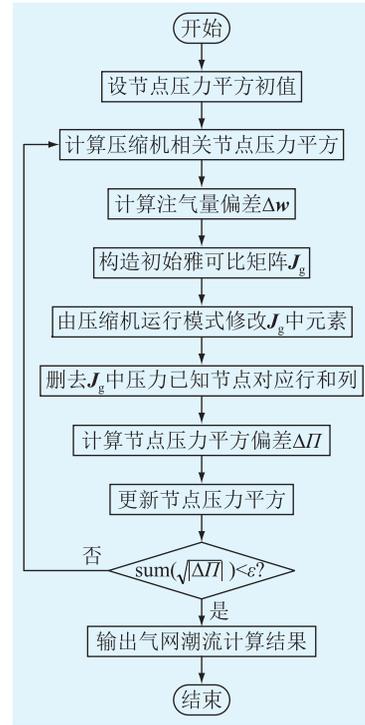


图3 整体求解计算流程

Fig.3 The calculation process of integrated method

出口节点压力已知。

2.2.2 分离压缩机管道等效求解

文献[21]提出一种根据压缩机不同工作模式,将压缩机管道从天然气网络中分离的等效求解方法。该方法对于仅含有1台压缩机的天然气网络表现出良好的收敛性,文中对该方法进行拓展,使其可以处理压缩机5种工作模式和2种驱动方式,以将其与保留压缩机管道整体求解方法进行对比。

根据压缩机工作模式、驱动方式的不同,迭代求解管道流量 $f_{p,ij}$ 、 $f_{p,pq}$,并将其等效为压缩机前后节点气负荷 L_{in} 、 L_{out} 。将相关管道从天然气网络中分离,设置等效后的天然气网络节点压力平方的初值,则等效天然气网络各节点注气量为:

$$w' = -A' f_p' + L_{out} - L_{in} \quad (23)$$

式中: A' 为去除压力已知节点对应行的等效天然气网络管道-节点关联矩阵; f_p' 为等效天然气网络管道流量; L_{in} 、 L_{out} 为等效气负荷向量。

与保留压缩机管道的整体求解方法类似,对等效天然气网络进行牛顿-拉夫逊法迭代,从而解出不含压缩机管道的等效天然气网络的节点压力分布,最终得到原天然气网络的稳态潮流。

2.3 IES 潮流分布式计算流程

限于篇幅,仅考虑系统在热-电强耦合情况下运行,即气网潮流由外部气源平衡,电网、热网的平衡节点由EH供电,设计图4所示IES潮流分布式计

算流程。设定电网平衡节点所连接 EH 的热功率初值,首先求解热网潮流。若有电压压缩机,则传递耦合功率和 EH 耗气量,依次求解气网、电网潮流,在保证各子网络潮流收敛的前提下进行迭代,直至 EH 功率收敛,最后输出潮流计算结果。若无电压压缩机,则退化为在电网、热网潮流收敛后单独进行气网潮流计算,气网潮流收敛则 IES 潮流收敛。

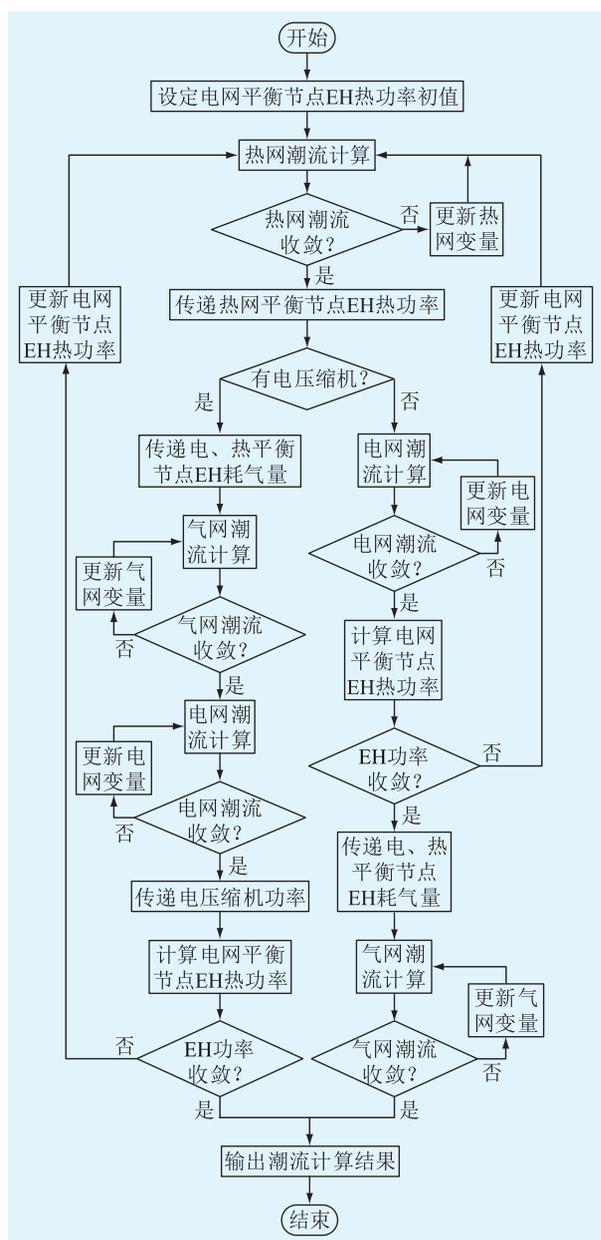


图 4 IES 潮流分布式计算流程

Fig.4 Flowchart of distributed algorithm for IES flow calculation

3 算例分析

3.1 算例 1

为验证 IES 潮流分布式计算方法的有效性,比较文中提出的保留压缩机管道的整体求解方法与

分离压缩机管道的等效求解方法在处理气网潮流时的效果,构建包含改进 IEEE 33 节点电网、比利时 20 节点气网^[27-28]、巴厘岛 32 节点热网^[29]及 3 个 EH 的 IES。3 个 EH 分别连接电网节点 20、气网节点 5、热网节点 1;电网节点 1、气网节点 20、热网节点 32;电网节点 18、气网节点 13、热网节点 31,并以热网为基准进行功率匹配。其中,比利时 20 节点气网中 2 台压缩机分别为电驱动和气驱动,压缩比分别为 1.2 和 1.1。

3.1.1 2 种气网潮流求解方法收敛性对比

采用前文所述分布式计算方法,其中气网潮流分别使用 2 种求解方法进行计算,给定相同的气网节点压力初值,收敛精度取 10^{-3} ,得到的气网潮流和压缩机计算结果如图 5 和表 1 所示 ($1 \text{ MMCFD} = 0.33 \text{ m}^3/\text{s}$, $1 \text{ psia} = 6.8948 \text{ kPa}$)。可见,在相同的收敛精度下,2 种方法求解气网潮流的误差在合理范围内。表 2 给出了 2 种求解方法下 EH 计算结果,其余网络潮流计算结果均近乎相同,这进一步说明该误差可以忽略不计,2 种求解方法均能够满足 IES 潮流分布式计算的精度要求。表 2 中 f 为 EH 输入天然气流量; Φ 为 EH 输出热功率; P 为 EH 输出功率。

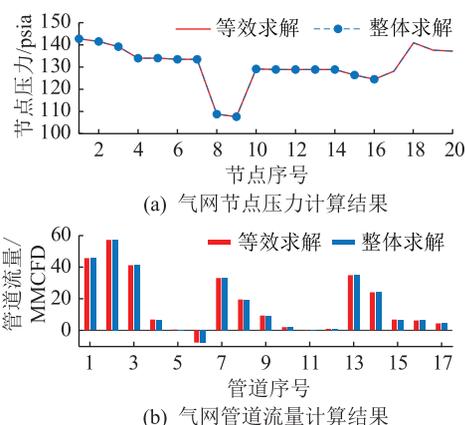


图 5 整体和等效求解方法下气网潮流计算结果
Fig.5 Gas flow calculation results with integrated and equivalent method

表 1 整体和等效求解方法下压缩机计算结果
Table 1 Calculation results of compressors with integrated and equivalent method

压缩机	整体求解		等效求解	
	τ_c/MMCFD	H_c/kW	τ_c/MMCFD	H_c/kW
1	0	69.000	0	69.000
2	0.006	22.978	0.006	22.978

然而,只有在初值设置合理的情况下,分离压缩机管道的等效求解方法才能正确收敛。表 3 为同随机初值下 2 种求解方法一次气网潮流计算迭代

表 2 整体和等效求解方法下 EH 计算结果

EH 输入、 输出	整体求解			等效求解		
	EH1	EH2	EH3	EH1	EH2	EH3
f/MMCFD	0.132	0.201	0.106	0.132	0.201	0.106
Φ/MW	0.810	0.782	0.275	0.810	0.782	0.275
P/MW	0.457	0.814	0.369	0.457	0.814	0.369

过程中节点压力和注气量的不平衡量。等效求解方法在迭代过程中会出现节点压力停止更新的情况,此时收敛过程提前结束,在节点压力的收敛判据下得到的气网潮流计算结果无法满足所有节点的流量平衡,相对于文中提出的整体求解方法,对初值的依赖性更强,收敛性得不到保证。

表 3 整体和等效求解方法下不平衡量

迭代 次数	整体求解不平衡量		等效求解不平衡量	
	压力/psia	注气量/ MMCFD	压力/psia	注气量/ MMCFD
0	970.163 0	1 317.487 0	712.341 0	495.114 0
10	34.772 0	15.810 0	0.030 8	12.964 0
20	0.064 4	0.028 3	0.001 3	12.956 0
30	0.001 2	0.000 5		

3.1.2 2 种气网潮流求解方法通用性对比

虽然 2 种气网潮流求解方法均可求解算例 1,但分离压缩机管道的等效求解方法也存在明显的局限性。其对气网模型的简化计算流程并不适用于所有天然气网络,尤其是含有多台压缩机的气网,压缩机的安装位置和网络拓扑很可能导致网络无法进行相应等效,如压缩机首尾相连的情况。分离压缩机管道的等效求解方法使用场景存在较大限制,相对于文中提出的保留压缩机管道的整体求解方法,通用性不强。

3.1.3 2 种气网潮流求解方法收敛速度对比

改变 1 台气压缩机的工作模式,在给定相同的气网节点压力初值的情况下,分别使用 2 种方法求解气网潮流 10 次,取平均值,得到 2 种气网潮流求解方法的收敛精度 ε 与运算时间的关系见图 6。

可见,尽管降低了雅可比矩阵的维度,但额外引入的迭代流程使得分离压缩机管道的等效求解方法收敛速度更慢。在收敛精度为 10^{-3} 时,2 种气网潮流求解方法的平均运算时间见表 4。以模式 I 为例,2 种气网潮流求解方法分别耗时 0.566 s、0.242 s。且随着精度要求的提高,收敛时间差越来越大。

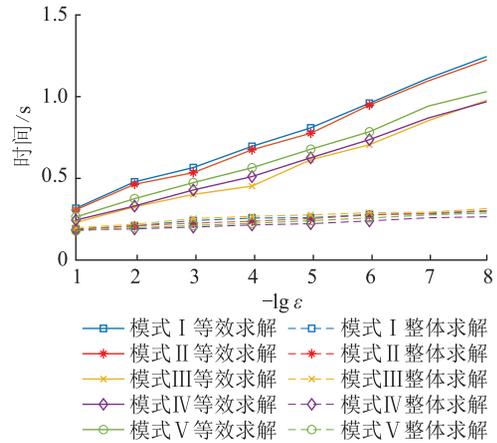


图 6 2 种气网潮流求解方法收敛精度与时间的关系
Fig.6 Relation between convergence precision and computing time of integrated and equivalent method

表 4 压缩机不同工作模式下气网潮流计算时间比较
Table 4 Comparison of computing time between different working modes of compressor

压缩机工作模式	整体求解时间/s	等效求解时间/s
模式 I	0.242	0.566
模式 II	0.226	0.535
模式 III	0.254	0.402
模式 IV	0.202	0.429
模式 V	0.212	0.474

同时,由于具体的迭代流程不同,分离压缩机管道的等效求解方法在处理 5 种不同工作模式压缩机时收敛速度存在明显差异,处理模式 I 耗时最长,处理模式 III 耗时最短;而保留压缩机管道的整体求解方法在不同气网工况下收敛速度只有细微的差异。

3.2 算例 2

为进一步分析压缩机不同运行状态对 IES 潮流的影响,构建图 7 所示包含改进 IEEE 14 节点电网、装有 4 台压缩机的 14 节点气网^[30]、15 节点热网及 2 个 EH 的 IES。其中,电网发电机 G1、G2 出力分别为 3 MW、8 MW;热网各节点回水温度为 30 °C,热源供水温度为 90 °C;气网 Gs1 为气源节点。EH1 输出热功率为热网平衡节点 Hs6 供热,EH2 输出电功率为电网平衡节点 Bs1 供电,分别接入 3 MW、4 MW 光伏和 2 MW、3 MW 风电,2 个 EH 的参数见表 5。设收敛精度为 10^{-3} ,所有仿真均通过 MATLAB R2020a 在配备 Intel Core i5 CPU 和 16 GB RAM 的个人计算机上进行。

由于压缩机 1 和 3,2 和 4 分别串联运行,无法直接对压缩机管道进行等效,因此算例 2 中的气网潮流均采用文中所提保留压缩机管道的计算方法进行求解。

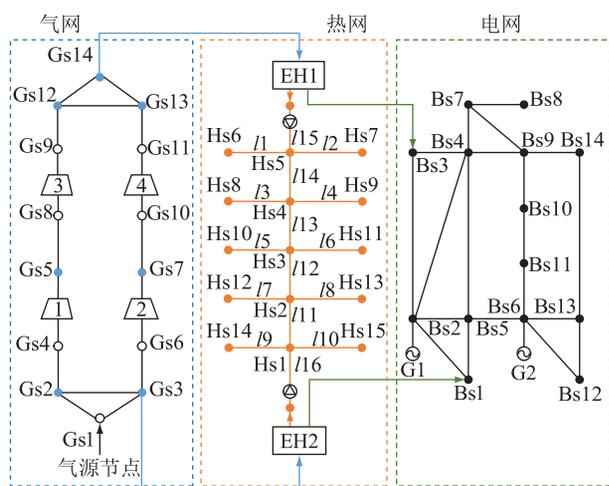


图7 43节点 IES 示意

Fig.7 Schematic diagram of 43-bus IES

表5 能量枢纽参数

参数	EH1	EH2	参数	EH1	EH2
α	0	0.3	η_{gb}	0.8	0.85
β_1	0.7	0.8	η_{hp}	0	5
η_{chp}^h	0.73	0.69	η_{chp}^e	0.35	0.3

选取有代表性的6个场景,各场景下压缩机的驱动方式、工作模式如表6所示。其中场景1—场景4中电压缩机从电网节点Bs2、Bs6取电,场景6中电压缩机从电网节点Bs2、Bs4、Bs8、Bs6取电。除场景4中的压缩机3为出口取气,其余场景下的气压缩机均默认入口取气。场景1中压缩机的工作参数分别为 $R_{c,1} = 1.1, f_{c,2} = 55$ MMCFD, $D_{c,3} = 80$ psia, $\pi_{j,0} = 400$ psia;场景2中压缩机的工作参数分别为 $D_{c,1} = 30$ psia、 $\pi_{p,0} = 500$ psia、 $R_{c,3} = 1.2, f_{c,4} = 55$ MMCFD;场景3中压缩机的工作参数分别为 $R_{c,1} = 1.2, R_{c,2} = 1.3, \pi_{p,0} = 550$ psia(压缩机3), $\pi_{p,0} = 570$ psia(压缩机4),场景4、5、6压缩机工作参数与场景1一致。

表6 不同场景下压缩机驱动方式和工作模式

Table 6 Driving mode and working mode of compressor under different scenarios

场景	压缩机1	压缩机2	压缩机3	压缩机4
1	电, I	气, III	气, II	电, IV
2	电, II	气, V	气, I	电, III
3	电, I	气, I	气, V	电, V
4	电, I	气, III	气, II*	电, IV
5	气, I	气, III	气, II	气, IV
6	电, I	电, III	电, II	电, IV

注:“*”表示该气压缩机为出口取气,其余气压缩机均为入口取气。

3.2.1 含多种压缩机的 IES 潮流计算结果

对场景1进行潮流计算,得到部分系统潮流和压缩机计算结果如表7、表8所示。进一步证明保留压缩机管道整体求解计算方法适用于气网中含有多台不同运行状态压缩机的 IES 潮流计算。

表7 场景1潮流计算结果

Table 7 Power flow calculation results in scenario 1

电网潮流		热网潮流		气网潮流	
节点	$ U /p.u.$	管道	$m/(kg \cdot s^{-1})$	节点	$\pi/psia$
Bs1	1.060	l1	9.173	Gs1	600.000
Bs2	1.045	l2	9.174	Gs2	500.094
Bs3	1.010	l3	9.187	Gs3	500.055
Bs4	1.038	l4	9.186	Gs4	444.761
Bs5	1.038	l5	9.188	Gs5	489.238
Bs6	1.070	l6	9.186	Gs6	459.048
Bs7	1.079	l7	7.588	Gs7	519.146
Bs8	1.078	l8	7.587	Gs8	399.294
Bs9	1.088	l9	7.584	Gs9	479.294
Bs10	1.084	l10	7.584	Gs10	400.000
Bs11	1.077	l11	10.536	Gs11	450.831
Bs12	1.070	l12	-4.639	Gs12	250.925
Bs13	1.071	l13	-23.013	Gs13	260.552
Bs14	1.079	l14	-41.386	Gs14	209.724
		l15	-59.734		
		l16	-25.703		

表8 场景1压缩机计算结果

Table 8 Calculation results of compressors in scenario 1

压缩机	$f_c/MMCFD$	$\tau_c/MMCFD$	H_c/kW
1	66.858	0	252.327
2	55.000	0.072	264.155
3	66.726	0.133	488.883
4	54.930	0	258.286

3.2.2 不同气网工况下算法的适用性

场景2、3在压缩机驱动方式不变的条件下,改变压缩机工作模式、取气点及相应的工作参数,以改变气网工况。压缩机工作模式及参数设置的不同,造成气网工况的差异,使得气网潮流计算结果大相径庭。3种场景下气网节点压力如图8所示,可见,在场景3中,气网节点整体压力水平远高于场景2,相应地,场景3中的压缩机消耗更多的功率,各压缩机耗气量及功率具体见表9。同时,由图8可以看出,在天然气网络中,由压缩机工作模式造成的工况差异,并不直接影响所有节点的压力,对于流经压缩机前的管道节点(Gs2、Gs3、Gs4、Gs6),在不同工况下节点压力的差异远小于流经压缩机后的其余管道节点。

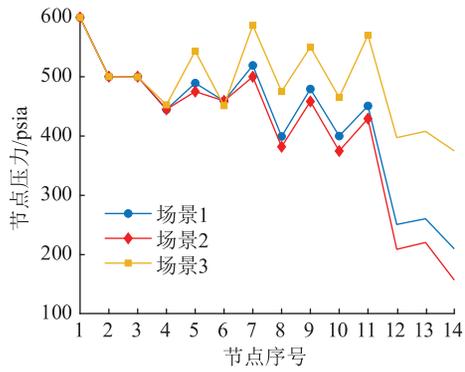


图 8 场景 1、2、3 气网节点压力

Fig.8 Node pressure of gas network in scenario 1,2,3

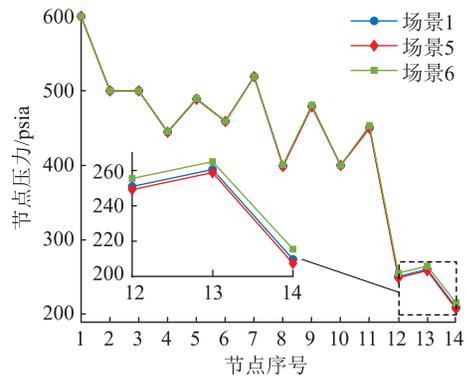


图 9 场景 1、5、6 气网节点压力

Fig.9 Node pressure of gas network in scenario 1,5,6

表 9 场景 2、3 压缩机计算结果

Table 9 Calculation results of compressors in scenario 2,3

压缩机	场景 2		场景 3	
	τ_c /MMCFD	H_c /kW	τ_c /MMCFD	H_c /kW
1	0	172.489	0	454.385
2	0.050	183.331	0.169	620.960
3	0.133	488.883	0.099	363.705
4	0	294.710	0	479.027

在场景 4 中,压缩机 3 改为从出口取气,相较于场景 1,气网节点压力平均升高 0.736 psia,压缩机总功率增加 3.232 kW。

上述研究表明,文中所提算法可以同时考虑压缩机 5 种工作模式和 2 种驱动方式,对于由压缩机运行状态的差异所造成的气网复杂多样的工况,表现出高度的适用性,可以进行精确、有效的气网潮流计算。

3.2.3 压缩机驱动方式对 IES 潮流的影响

为探讨压缩机驱动方式的改变给 IES 潮流带来的影响,构建除压缩机驱动方式不同,其余参数与场景 1 完全相同的场景 5、6。3 种场景下气网节点压力如图 9 所示,可见在压缩机全部为气驱动时,由于消耗了气网管道中的天然气,节点压力总体降低;而全部为电驱动时,压缩机由 IES 中电网供电,使气网节点压力总体升高,其中节点 Gs12、Gs13、Gs14 压力变化较为显著。

场景 1、5、6 的电网节点电压相角如图 10 所示,当气网中的压缩机由气驱动转变为电驱动,随着电负荷的增大,除电网平衡节点外,其余节点电压相角均呈滞后的趋势。同样,电网潮流的变化又通过 EH 中热电耦合设备传递到热网,并与气网运行状态的变化共同作用,改变热网潮流分布。

图 11 为场景 1、5、6 中热网节点的供热温度,可见气网压力水平和电网负荷水平的增高提升了热

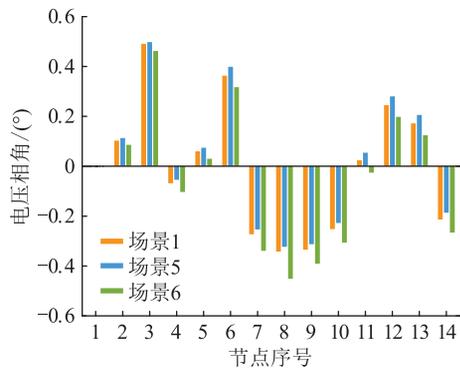


图 10 场景 1、5、6 电网电压相角

Fig.10 Voltage phase angle of power grid in scenario 1,5,6

网的能量水平,使得热网节点的供热温度相对上升。压缩机驱动方式的变化,通过 EH 中的耦合设备的能量传递,对 IES 各能源子网络潮流均造成了不同程度的影响,其中电网受到的影响最为明显,其次是气网,而热网受到的影响最小。对于由压缩机驱动方式变化造成的 IES 供能与负荷波动,电网相对于气网和热网表现出更高的灵敏性,一定程度上体现出不同能源子系统的能量惯性差异。

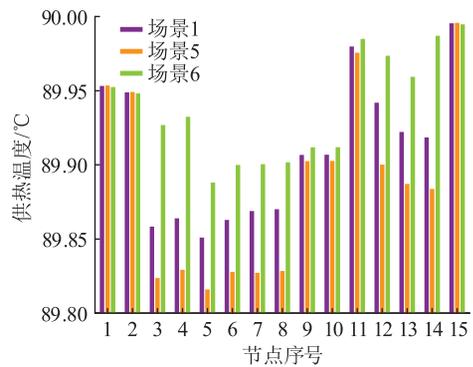


图 11 场景 1、5、6 热网供热温度

Fig.11 Supply temperature of heat network in scenario 1,5,6

表 10 为场景 1、5、6 中各 EH 输入天然气流量

和输出热、电功率计算结果。可见,随着气压缩机的接入,EH2 向电网平衡节点提供的电功率下降,其输出热功率随之下降,EH2 中耦合设备整体降低出力,所需的天然气流量减小;EH1 向热平衡节点提供的热功率上升,其输出电功率也随之上升,EH1 中耦合设备整体提高出力,所需的天然气流量增大。场景 5 中 2 个 EH 能量转换设备消耗的天然气流量之和最低,场景 6 中 2 个 EH 能量转换设备消耗的天然气流量之和最高。

表 10 场景 1、5、6 中 EH 计算结果

Table 10 Calculation results of EH in scenario 1,5,6

EH 输入、 输出	场景 1		场景 5		场景 6	
	EH1	EH2	EH1	EH2	EH1	EH2
f/MMCFD	1.655	1.723	1.724	1.602	1.510	1.975
Φ/MW	14.995	6.450	16.429	5.030	12.024	9.415
P/MW	5.739	6.972	5.982	6.482	5.237	7.992

4 结论

文中采用电、热、气网和能量耦合设备的稳态模型,针对含有多台不同运行状态压缩机的天然气网络,基于牛顿-拉夫逊法提出了保留压缩机管道的整体求解方法,拓展了分离压缩机管道的等效求解方法,并将其应用于 IES 潮流分布式计算。通过 2 个算例,验证了文中所提算法在不同气网工况下均可准确、快速得到气网潮流计算结果,进而求解 IES 全部潮流信息。由算例结果可以看出:

(1) 保留压缩机管道的整体求解方法收敛性强于分离压缩机管道的等效求解方法,在初值设置合理的情况下二者均可收敛,但后者收敛速度较慢,且通用性更差;

(2) 文中提出的气网潮流计算方法可以兼顾压缩机 5 种工作模式、2 种驱动方式和 2 种取气点选择,适用于含有多台不同运行状态压缩机的 IES 潮流计算,具有高度的通用性;

(3) 压缩机驱动方式的不同所带来的潮流变化,通过 EH 中的耦合设备在 IES 各能源子网络传递供能与负荷波动,对电网造成的影响远大于气网、热网,并大幅改变了 EH 的运行状态。

致 谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021149)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 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.

[2] 刘奇,周海全,张玉平,等. 基于统一潮流灵敏度的电气-热综合能源系统安全控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(22):87-97.
LIU Qi, ZHOU Haiquan, ZHANG Yuping, et al. Security control strategy of an electricity-gas-thermal integrated energy system based on uniform power flow sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22):87-97.

[3] 赵永凯,王靖韬,赵维,等. 计及多目标的园区级综合能源系统协同优化模型研究[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(11):123-130.
ZHAO Yongkai, WANG Jingtao, ZHAO Wei, et al. Multi-objective optimization of park-level integrated energy system: model and analysis[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(11):123-130.

[4] 于丽芳,李燕雪,朱明晞,等. 电-氢-碳综合能源系统协同经济调度[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6):63-69.
YU Lifang, LI Yanxue, ZHU Mingxi, et al. Coordinated economic dispatch of electricity-hydrogen-carbon integrated energy system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6):63-69.

[5] 黄彦彰,周宇昊,郑文广,等. 产业园区新型多能联供综合能源服务研究[J]. 发电技术, 2021, 42(6):734-740.
HUANG Yanzhang, ZHOU Yuhao, ZHENG Wenguang, et al. Research on new integrated energy system with multi-power combined supply of industrial parks[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(6):734-740.

[6] DONG L, WEI J, LIN H, et al. Distributed optimization of electricity-gas-heat integrated energy system with multi-agent deep reinforcement learning [J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(6):604-617.

[7] 帅挽澜,朱自伟,李雪萌,等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19):18-26.
SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. "Source-network-load-storage" coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19):18-26.

[8] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8):3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):3-11.

[9] 杨海柱,李梦龙,江昭阳,等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10):30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering de-

- mand side electricity heat and natural-gas loads response [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 30-37.
- [10] 李健强, 余光正, 汤波, 等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14): 11-20.
- LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14): 11-20.
- [11] 陈忠华, 高振宇, 陈嘉敏, 等. 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 32-40.
- CHEN Zhonghua, GAO Zhenyu, CHEN Jiamin, et al. Research on cooperative planning of an integrated energy system considering uncertainty [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 32-40.
- [12] 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.
- [13] 张义志, 王小君, 和敬涵, 等. 考虑供热系统建模的综合能源系统最优能流计算方法 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(3): 562-570.
- ZHANG Yizhi, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Optimal energy flow calculation method of integrated energy system considering thermal system modeling [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(3): 562-570.
- [14] 赵霞, 杨仑, 瞿小斌, 等. 电-气综合能源系统能流计算的改进方法 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(3): 467-477.
- ZHAO Xia, YANG Lun, QU Xiaobin, et al. An improved energy flow calculation method for integrated electricity and natural gas system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(3): 467-477.
- [15] 秦文萍, 逯瑞鹏, 高蒙楠, 等. 计及大规模新能源接入的电-气耦合综合能源系统稳定性评估 [J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1880-1891.
- QIN Wenping, LU Ruipeng, GAO Mengnan, et al. Stability assessment of electro-gas coupled integrated energy system considering large-scale new energy access [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1880-1891.
- [16] 张思德, 胡伟, 卫志农, 等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流 [J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(9): 121-128.
- ZHANG Side, HU Wei, WEI Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(9): 121-128.
- [17] 孙国强, 王文学, 吴奕, 等. 辐射型电-热互联综合能源系统快速潮流计算方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(13): 4131-4142.
- SUN Guoqiang, WANG Wenxue, WU Yi, et al. Fast power flow calculation method for radiant electric-thermal interconnected integrated energy system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(13): 4131-4142.
- [18] 赵霞, 谭红, 孙名轶, 等. 区域水-能耦合系统的电-气-水混合潮流模型 [J]. *电网技术*, 2020, 44(11): 4274-4284.
- ZHAO Xia, TAN Hong, SUN Mingyi, et al. Hybrid power-gas-water flow modeling for regional water-energy nexus [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(11): 4274-4284.
- [19] 潘益, 王明深, 叶昱媛, 等. 一种计及能量枢纽不同运行模式的综合能源系统混合能量流求解方法 [J]. *现代电力*, 2021, 38(3): 277-287.
- PAN Yi, WANG Mingshen, YE Yuyuan, et al. A multi-energy flow calculation method for integrated energy system considering different operation modes of energy hub [J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(3): 277-287.
- [20] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑多种耦合单元的电气热联合系统潮流分布式计算方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(22): 6594-6605.
- ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Distributed algorithm for the power flow calculation of integrated electrical, gas, and heating network considering various coupling units [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(22): 6594-6605.
- [21] 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.
- [22] LI J H, HUANG Y J, ZHU M S. Gradient descent iterative method for energy flow of integrated energy system considering multiple modes of compressors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 207: 112534.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] LIU X Z, JENKINS N, WU J Z, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. *Energy Procedia*, 2014, 61: 155-159.
- [26] 江茂泽, 徐羽镪, 王寿喜, 等. 输配气管网的模拟与分析 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 205-219.
- JIANG Maoze, XU Yutang, WANG Shouxi, et al. Simulation and analysis of gas transmission and distribution network [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 205-219.
- [27] 梅建春, 卫志农, 张勇, 等. 电-气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13):

- 36-42.
- MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Dynamic optimal dispatch with multiple time scale in integrated power and gas energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):36-42.
- [28] 胡幸集, 马俊, 王振南, 等. 区域气电综合能源系统同质化网络流优化方法[J]. 电力建设, 2020, 41(12):110-120.
- HU Xingji, MA Jun, WANG Zhennan, et al. Homogeneous network flow optimization for regional gas-electricity integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12):110-120.
- [29] 刘洪, 赵晨晓, 葛少云, 等. 基于精细化热网模型的电热综合能源系统时序潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4):63-72.
- LIU Hong, ZHAO Chenxiao, GE Shaoyun, et al. Sequential power flow calculation of power-heat integrated energy system based on refined heat network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4):63-72.
- [30] 闵庆久, 马兆兴, 马英姿. 基于 PSO-Newton 法的电气综合能源系统能流计算[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1):33-39.
- MIN Qingjiu, MA Zhaoxing, MA Yingzi. Energy flow calculation of integrated power-gas energy system based on PSO-Newton method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1):33-39.

作者简介:



陈茂云

陈茂云(1998),男,硕士在读,研究方向为综合能源系统可靠性评估(E-mail:45192862@qq.com);

郑建勇(1966),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为综合能源系统控制与规划等;

梅飞(1982),男,博士,讲师,研究方向为智能电网与分布式电源。

Distributed algorithm for the power flow calculation of gas network in integrated energy system considering different operation states of compressors

CHEN Maoyun¹, ZHENG Jianyong^{1,2}, MEI Fei³, WU Jianzhang²

(1. Suzhou Research Institute of Southeast University, Suzhou 215123, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The change in the operating state of the compressor will cause the variety of working conditions in gas network, affecting the steady-state power flow of electric-gas-heat integrated energy system. In order to calculate the gas network power flow of the comprehensive energy system under different operation states, the sub-networks and energy coupling links of integrated energy system are modeled respectively. Considering five working modes and two driving modes of the compressors, based on Newton-Raphson method, an integrated power flow calculation method which reserves the pipelines of compressors is proposed and an equivalent solution method which separates the pipelines of compressors is developed for gas network with multiple compressors under different operation states. The power flow of integrated energy system is calculated by distributed algorithm. The accuracy and effectiveness of the proposed integrated power flow calculation method are verified through two examples, which remedies the disadvantages of existing power flow calculation models of gas network that cannot deal with complex working conditions in gas network and lack convergence and universality. Then the impacts of the change in compressor operation states on power flow of integrated energy system are revealed.

Keywords: electricity-gas-heat integrated energy system; steady-state flow; compressor operation states; natural gas network; distributed algorithm; Newton-Raphson method

(编辑 方晶)