

综合能源系统多能流准稳态分析与计算

钟俊杰, 李 勇, 曾子龙, 曹一家

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:多能流计算及互动分析是综合能源系统的重要基础,分析多能流交互机制,建立由电、气、热网和耦合元件组成的综合能源系统模型,提出针对多能流计算的分解法和统一法的求解框架和求解方法。针对目前基于牛顿法的多能流算法对初值较为敏感的不足,提出基于自适应步长因子的改进统一法,对比分析3种算法的准确性、收敛性和收敛时间。考虑扰动后的过渡过程和网络间的多时间尺度特性,将综合能源系统交互过程划分为4个准稳态阶段,分析基于准稳态多能流的交互作用。最后,基于一个双向耦合的综合能源系统,以电网支路开断为例对系统进行分析,验证了所提算法和准稳态分析的有效性。

关键词:综合能源系统;多能流;改进统一法;互动分析;准稳态分析

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908010

0 引言

能源攸关国计民生和国家安全,随着能源消耗的增加,传统能源架构凸显出供应结构隔阂、能源利用率低和环境污染等矛盾。为此,综合能源系统(IES)应运而生,给能源升级和变革提供一条重要的途径^[1]。IES由电、气、热等子网和耦合元件组成,是实现多能互补、能源梯级利用等理念的关键。

多能流计算是研究能流优化、协同规划、经济调度和多能互补等的重要基础。目前,国内外研究主要集中于模型建立和算法求解方面。对于电网模型,学者们一般采用经典交流模型^[2-3]。对于天然气网,文献[4]采用考虑压缩机的天然气稳态模型,文献[5]采用天然气管道暂态模型。由于热网相较于电网和气网具有更大惯性,学者们大多采用包含水力工况和热力工况的稳态模型^[6]。在耦合环节方面,学者们主要考虑热电联产(CHP)、燃气轮机、电锅炉、电转气(P2G)、热泵和能源集线器等。围绕IES的算法求解部分,主要有基于牛顿法的统一法^[7-9]和分解法^[10-12]。对于统一法,文献[7]利用优化模型来提升分布式能源的消纳能力;文献[8]提出对并网和孤岛2种运行模式统一求解的方法;文献[9]考虑IES中各子网的相互依赖性,提出了统一潮流模型及其求解方法。对于分解法,文献[10]基于分解协调算法来提升IES的风电消纳率和降低系统成本;文献[11]以能源集线器的完全解耦、部分耦合以

及完全耦合3种运行模式为基础提出多能流算法;文献[12]利用商业软件,将热网程序编译为动态链接库,再经PSASP反复调用来求解能量流。

现有研究大多关注IES的多能优化^[13]、经济调度^[14]和协同规划^[15]等。随着IES越来越复杂,多能流耦合的安全问题将更加突出。如当耦合元件发生故障时,一般会影响IES的正常运行;而当任一子网出现扰动时,该扰动通过耦合元件传递到其他子网的同时又可能反作用于原子网。文献[16]基于中心矩法评估热负荷急剧增加对供气稳定性的影响;文献[17]研究故障在IES间的传播及其对关键设施运行的影响;文献[18]以稳态模型为基础,提出IES的预想事故集和静态安全分析方法。文献[19]考虑热网的多时间尺度特性并分析电网-热网之间的准稳态过程,但局限于电网和热网的交互,未考虑气网的准稳态过程,且其求解算法的效率有待提升。综上,目前研究仍存在以下问题:在算法方面,求解算法以牛顿法为核心,其对初值要求较高,而气网初值较难给定;各子网之间数值差异较大易造成雅可比矩阵奇异,易导致算法不收敛。在交互作用方面,以稳态模型为主,忽略了扰动发生后过渡阶段的交互过程和各子网的多时间尺度特性;当前模型中耦合元件的联合运行较少使得子网之间耦合较弱,未充分考虑IES的双向耦合情形和互动特性。

鉴于此,本文分析IES交互机制,建立由电、气、热网和耦合元件组成的IES模型。提出用于多能流计算的分解法和统一法的求解框架和求解方法。针对基于牛顿法的多能流算法对初值较为敏感的问题,提出基于自适应步长因子的改进统一法,对比分析3种算法之间的准确性、收敛性和收敛时间。考虑扰动发生后的过渡过程和长时间尺度特性,将IES交互过程划分为4个准稳态阶段,分析基于准稳态多能流的交互作用。通过案例分析验证所提算法和

收稿日期:2018-09-04;修回日期:2019-05-31

基金项目:111引智计划(B17016);国家自然科学基金资助项目(51520105011,51607011);长沙优秀青年创新项目(KQ170-7003)

Project supported by the 111 Project of China(B17016), the National Natural Science Foundation of China(51520105011, 51607011) and the Excellent Innovation Youth Program of Changsha(KQ1707003)

准稳态分析的有效性。

1 IES交互机制分析

IES的交互机制可分为单向耦合和双向耦合,本文着重考虑双向耦合的情形。单向耦合类似于控制系统的开环作用,耦合元件将系统A的扰动传递给系统B后,系统B状态的改变不会反馈回系统A。当热网发生扰动时,热网平衡节点做出响应,导致耦合元件出力改变,进而引起电网和气网状态量变化,由电网和气网的平衡节点来平衡扰动,具体如图1(a)所示。双向耦合类似于控制系统的闭环作用。系统A状态量的改变,通过耦合元件的传递改变系统B状态,但系统B响应后又会通过耦合元件反馈影响系统A。因此,系统扰动会形成闭环作用直接和间接地影响原系统。热网发生扰动后引起电网和气网状态量变化,具体如图1(b)所示。此时,气网的扰动将由气网平衡节点来平衡;而电网平衡节点的响应会导致热网相应节点状态变化,进而热网平衡节点又需要重新来平衡,最终形成电-热能量的双向流动和闭环反馈。

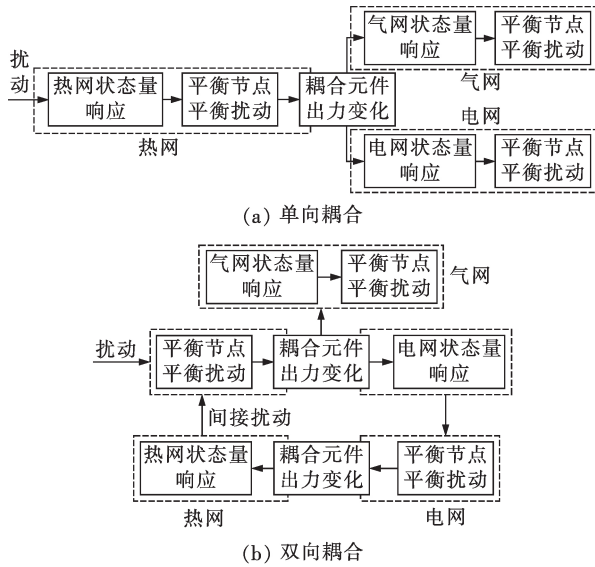


图1 IES交互机制

Fig.1 Coupling mechanism of IES

2 IES模型

2.1 电网模型

在IES中,本文用交流模型来描述电网:

$$\Delta P_i = P_i^{\text{sp}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{\text{sp}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

其中, ΔP_i 、 ΔQ_i 分别为节点 i 的有功、无功不平衡量; P_i^{sp} 、 Q_i^{sp} 分别为节点 i 的注入有功、无功功率; V 为节点电压幅值; G 、 B 分别为支路的电导和电纳; θ_{ij} 为支路 i 和 j 的电压相角差。

2.2 气网模型

2.2.1 气网稳态模型

天然气网络的稳态流量可表示为^[20]:

$$f = 7.57 \times 10^{-4} \text{sgn}_p(p_i, p_j) \frac{T_a}{p_n} \sqrt{\frac{(p_i^2 - p_j^2) D^5}{L \gamma_g T_{\text{gas}} Z_a F}} \quad (3)$$

其中, p_i 、 p_j 和 p_n 分别为节点 i 、 j 的气压和基准气压, 当 $p_i > p_j$ 时, $\text{sgn}_p(p_i, p_j)$ 取 1, 否则取 -1; T_a 为外部环境温度; D 为管道直径; L 为管道长度; γ_g 为相对气体比重; T_{gas} 为天然气气体平均温度; Z_a 为气体压缩因子; F 为摩擦因数。

管道间的压力降向量为:

$$\Delta \Pi = -A_g \Pi \quad (4)$$

其中, Π 为各节点压力的平方值向量; A_g 为天然气网络节点-支路邻接矩阵。

天然气网中主要的非管道元件是压缩机和调节器。本文主要考虑压缩机的作用, 其天然气消耗和压缩比的数学模型可描述为:

$$f_{\text{loss}} = \frac{k_{\text{cp}} f_{\text{com}} T_a}{q_{\text{gas}}} \left(\frac{a-1}{k_{\text{cp}}^a} - 1 \right) \quad (5)$$

其中, k_{cp} 为天然气压缩比; f_{com} 为流过压缩机的流量; q_{gas} 为天然气热值; a 为多变指数。

总之, 类比于基尔霍夫电流和电压定律, 天然气网流量平衡和压力平衡方程为:

$$A_g f = L \quad (6)$$

$$B_g \Delta \Pi = 0 \quad (7)$$

其中, f 为天然气管道流量向量; L 为各节点流出的流量向量; B_g 为天然气网中环-支路邻接矩阵。

2.2.2 气网动态模型

为描述气网准稳态过程中的动态阶段, 本文采用线性化气网动态模型^[5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial M}{A \partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\lambda \varpi}{2DA} M = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中, x 、 t 分别为距离和时间; M 为质量流量; A 为管道截面积; ρ 为气体密度; p 为气体压力; λ 为摩擦系数; ϖ 为气体平均流速。

为便于求解微分方程, 本文采用 Wendroff 差格式将其离散化为差分方程。令空间步长 Δx 为气网管道长度, 时间步长 Δt 为单位时间 1 s。求得差分后的质量平衡和动量平衡方程后, 还需联立气网的边界条件和初始状态作为约束。对于气网边界条件, 气源的压力和密度始终保持不变。在管道交汇节点处, 管道流量应满足质量守恒定律, 且管道交汇点的节点气压相等, 同时还需联立气体的状态方程。限于篇幅, 具体的差分格式和方程详见文献[5]。

2.3 热网模型

热网模型包括描述流量、压力分布的水力网,描述温度、供热量、回热量分布的热力网以及散热器和建筑物热力模型。

2.3.1 水力网模型

水力网属于流体网络,其模型可由流量连续性方程和回路压降方程描述:

$$\mathbf{A}_s \mathbf{m} = \mathbf{m}_q \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_h \mathbf{h}_f = 0 \quad (10)$$

其中, $\mathbf{A}_s$ 为供水网节点-支路邻接矩阵; $\mathbf{m}$ 为管道流量向量; $\mathbf{m}_q$ 为节点的负荷流量; $\mathbf{B}_h$ 为回路-支路邻接矩阵; $\mathbf{h}_f$ 为管道水头损失,其计算方程见式(11)。

$$\mathbf{h}_f = \mathbf{K} \mathbf{m} |\mathbf{m}| \quad (11)$$

其中, $\mathbf{K}$ 为各管道的摩擦系数矩阵。

2.3.2 热力网模型

热网功率与温度和流量的关系为:

$$\Phi = C_p m (T_s - T_o) \quad (12)$$

其中, Φ 为热功率负荷; m 为管道流量; C_p 为水的比热容; T_s 为供水温度; T_o 为出水温度。

考虑管道存在热损,其温度降落公式为:

$$T_{\text{end}} = (T_{\text{start}} - T_a) e^{\frac{-\lambda L}{C_p m}} + T_a \quad (13)$$

其中, T_{start} 、 T_{end} 分别为热水进入、流出管道时的温度。

在热水节点汇合点,其温度计算公式为:

$$\left(\sum m_{\text{out}} \right) T_{\text{out}} = \sum m_{\text{in}} T_{\text{in}} \quad (14)$$

其中, m_{out} 、 T_{out} 和 m_{in} 、 T_{in} 分别为流出和流入的热网管道中水的流量、温度。

2.3.3 热交换器热网模型

热交换器^[21]是一种将热能从热网传递到建筑物内的设备,其热网模型可表达为:

$$\Phi_r = \alpha_r F \left(\frac{T_s + T_o - 2T_a}{2} \right)^{1+b} \quad (15)$$

其中, α_r 为热交换器的吸收率; F 为散热器总散热面积; b 为热交换器的热转移系数。

2.3.4 建筑物热网模型

建筑物是热能传递的终端用能设备,相当于热负荷,其热网模型^[21]为:

$$\Phi_b = q_v V_b (T_n - T_a) \quad (16)$$

其中, q_v 为建筑物的容积热指数; V_b 为建筑物有效体积; T_n 为建筑物室内温度。

热网稳定后,建筑物热功率、热交换器吸收的功率和热源提供的功率三者应相等:

$$\Phi_b = \Phi_r = \Phi \quad (17)$$

2.4 耦合元件模型

CHP 机组能实现 IES 间的耦合。根据 CHP 类型的不同,可分为定热电比(如式(18)所示)和变热电比(如式(19)和式(20)所示)2种。

$$c_m = \frac{\Phi_{\text{CHP}}}{P_{\text{CHP}}} \quad (18)$$

$$Z = \frac{\Delta \Phi}{\Delta P} = \frac{\Phi_{\text{CHP}} - 0}{P_{\text{con}} - P_{\text{CHP}}} \quad (19)$$

$$P_{\text{con}} = \eta F_{\text{in}} \quad (20)$$

其中, c_m 为 CHP 的热电比例系数; Φ_{CHP} 、 P_{CHP} 分别为 CHP 机组的热功率和电功率; P_{con} 为 CHP 机组在全冷凝模式下的电功率; F_{in} 为天然气耗气量; η 为转化效率。

P2G 设备利用电能生产天然气实现电网-气网能量的双向流动,其耗电量 P_{P2G} 和产气量 G_{P2G} 的关系为:

$$G_{\text{P2G}} = \frac{3600 \eta_{\text{P2G}}}{f_{\text{LHV}}} P_{\text{P2G}} \quad (21)$$

其中, η_{P2G} 为效率; f_{LHV} 为天然气的低热值。

3 IES 准稳态分析

3.1 多时间尺度特性

IES 是由异质网络耦合而成的复杂网络,各网络间特性差异较大,使得各子网从受到扰动到准稳态间的时间尺度各异。IES 多时间尺度示意图如图 2 所示^[22]。电网能量以光速传播,其惯性最小,准稳态过程一般在秒级左右。天然气流动惯性比电能大,一般以声速响应扰动,其先经历动态阶段再过渡到水力工况,最终到准稳态过程所需时间在分钟级到小时级左右。热网的特性更加复杂,惯性也最大。热网水力工况中压强先发生变化,一般以声速响应扰动,其准稳态过程在秒级到分钟级左右。热网的热力工况受制于传热惯性,其响应速度一般仅为流质流速,往往需要数分钟到数小时才能到达准稳态。热网中的建筑物作为终端负荷,其响应速度最慢,取决于具体建筑物容量,因此其在受到扰动后到达准稳态过程的时间往往需要数小时以上。

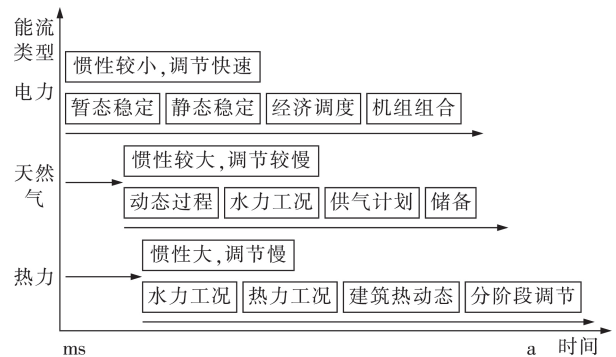


图2 IES多时间尺度示意图

Fig.2 Multi-time scale schematic diagram of IES

3.2 准稳态阶段

IES 各子网差异较大、响应速度各异,系统在扰动或故障后需较长时间才能到达稳态。在这段过程

中可能出现电压越限、流量越界、压强超标等问题,若仅对其进行稳态分析而忽略过渡过程,最终表现出的特性可能与稳态结果差异较大。因此,单纯采用稳态分析可能不够精确。而精确的 IES 动态分析,无疑对模型的精度提出更高的要求,同时需相当长的时间进行系统仿真,不能满足扰动或故障后系统状态快速估计的要求。根据图 2,本文将扰动过程解耦为 4 个过渡阶段,在考虑网络传输延迟的基础上利用稳态模型和气网动态模型来模拟过渡过程实现 IES 的准稳态分析。这种准稳态分析较稳态分析更加精确,而与动态分析相比更加省时,适用于扰动或故障发生后的在线安全评估。

IES 准稳态阶段划分,如表 1 所示。

表 1 IES 准稳态阶段划分

Table 1 Quasi-steady-state stage division of IES

阶段	气网	电网	热网
1	稳态	稳态	稳态
2	动态阶段	准稳态	水力工况准稳态
3	水力工况准稳态	准稳态	热力工况准稳态
4	准稳态	准稳态	建筑物准稳态

阶段 1 为 IES 在扰动前的稳定阶段。通过网络参数、拓扑关系和耦合元件特性,即可求得阶段 1 的多能流。阶段 2 为 IES 在扰动后的第一个准稳态。在扰动后,电力系统数秒内达到准稳态;气网处于动态阶段,可由式(8)所示的气网动态模型求解;由于热网具有较大的热惯性,这使得在数分钟内热网的流质未能全部输送到所有网络,因此其水力工况先于热力工况达到准稳态。此时,相较于阶段 1,阶段 2 中电网、气网和热网的水力工况发生改变,而热网的热力工况即热网节点温度和建筑物室内温度仍保持不变。阶段 3 为 IES 在扰动后的第二个准稳态。在数分钟到数小时内(具体数值需取决于网络规模),热网的流质已作用于全部供回水网络,热网中节点和热交换器的热力工况已经到达准稳态。考虑到建筑物温度变化最慢,因此相较于阶段 2,热网热力工况中的热网节点温度和热交换器状态发生改变而建筑物室内温度仍视为不变。而气网则由动态阶段过渡到气网水力工况准稳态,其状态较阶段 2 进一步发生变化,此时可由气网稳态模型描述。阶段 4 为扰动过程的最后一个阶段。在数小时后,建筑物的室内温度在热交换器的作用下发生改变并反过来影响热网和其他子网。因此,相较于阶段 1,阶段 4 中的电、气、热各子网状态发生全方位的变化,并都达到最终的新稳态。

3.3 准稳态模型求解方法

采用分解法依次对电、气、热网独立计算再循环迭代求解,如图 3(a)所示。分解法具有计算相对独立、模型维数较低、易于求解、单次求解时间短和收

敛性较好的特点,但其迭代次数较多,计算总耗时较大。采用统一法将电、气、热网作为整体来迭代求解,如图 3(b)所示。与分解法相比,统一法的模型维数较高。其优点是迭代次数少、计算耗时短。但统一法对初值要求很高,并且由于将异质网络耦合致使各子网的参数差异较大,易导致雅可比矩阵奇异而造成计算不收敛。

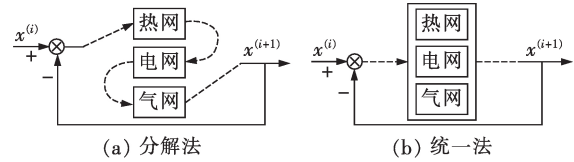


图 3 算法求解框架

Fig.3 Calculating framework of algorithm

3.3.1 分解法

分解法的计算步骤如图 4 所示。首先输入网络参数和初值,确定耦合设备的运行模式和连接关系;其次根据各准稳态阶段分析出扰动或故障对拓扑关系和系统参数的影响并修正网络;然后采用牛顿法对子网迭代求解,当该子网收敛后将其输出借助耦合元件传递给其他子网作为输入;最后对初值进行修正,直至程序收敛。

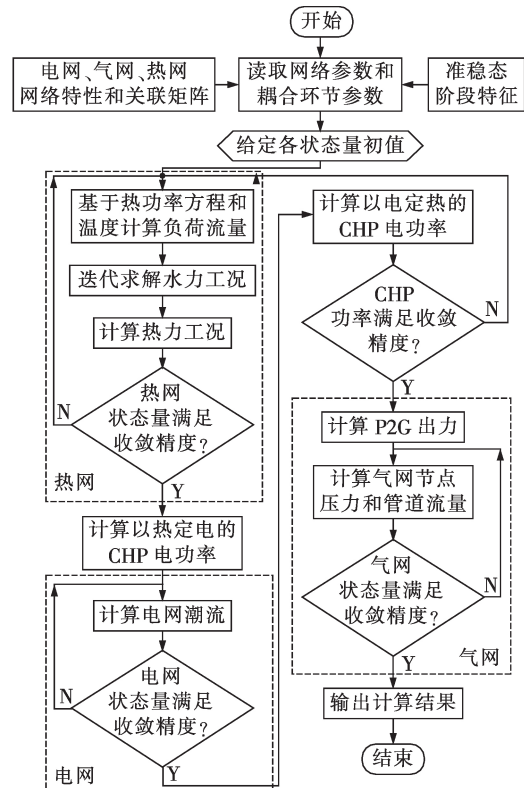


图 4 分解法准稳态计算流程图

Fig.4 Flowchart of quasi-steady-state calculation for decomposition method

3.3.2 统一法

基于第 2 节模型,构建各子网耦合后的 IES 模

型,其数学表达为:

$$\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta \Phi \\ \Delta p \\ \Delta T_s \\ \Delta T_r \\ \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i^{\text{SP}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i^{\text{SP}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ C_p A_s m (T_s - T_o) - \Phi^{\text{SP}} \\ B_h K m |m| - 0 \\ C_s T_{s, \text{load}} - b_s \\ C_r T_{r, \text{load}} - b_r \\ A_g \delta (-A_g \Pi) - L^{\text{SP}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, ΔP 、 ΔQ 分别为电网的有功、无功偏差向量; $\Delta \Phi$ 为热网节点热功率偏差向量; Δp 为热网回路压力降偏差向量; ΔT_s 、 ΔT_r 分别为热网的供、回热偏差向量; Δf 为气网节点的流量偏差向量; C_s 、 C_r 分别为与供热网、回热网的拓扑和流量有关的矩阵; $T_{s, \text{load}}$ 、 $T_{r, \text{load}}$ 分别为负荷节点的供、回热温度向量; b_s 、 b_r 分别为与供热温度、输出温度有关的列向量; A_g 为气网拓扑关联矩阵; δ 为符号函数; P_i^{SP} 、 Q_i^{SP} 、 Φ^{SP} 和 L^{SP} 分别为系统给定的有功功率、无功功率、热功率和天然气负荷向量。

系统的状态量为:

$$\mathbf{x} = [\theta \mid V \mid m \mid T_{s, \text{load}} \mid T_{r, \text{load}} \mid \Pi]^T \quad (23)$$

雅可比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} J_e & J_{eh} & J_{eg} \\ J_{he} & J_h & J_{hg} \\ J_{ge} & J_{gh} & J_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial |V|} & \frac{\partial \Delta P}{\partial m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial |V|} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial |V|} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial m} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial T_{s, \text{load}}} & \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial T_{r, \text{load}}} & 0 \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta p}{\partial |V|} & \frac{\partial \Delta p}{\partial m} & \frac{\partial \Delta p}{\partial T_{s, \text{load}}} & \frac{\partial \Delta p}{\partial T_{r, \text{load}}} & 0 \\ \frac{\partial \Delta T_s}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta T_s}{\partial |V|} & \frac{\partial \Delta T_s}{\partial m} & \frac{\partial \Delta T_s}{\partial T_{s, \text{load}}} & \frac{\partial \Delta T_s}{\partial T_{r, \text{load}}} & 0 \\ \frac{\partial \Delta T_r}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta T_r}{\partial |V|} & \frac{\partial \Delta T_r}{\partial m} & \frac{\partial \Delta T_r}{\partial T_{s, \text{load}}} & \frac{\partial \Delta T_r}{\partial T_{r, \text{load}}} & 0 \\ \frac{\partial \Delta f}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta f}{\partial |V|} & \frac{\partial \Delta f}{\partial m} & \frac{\partial \Delta f}{\partial T_{s, \text{load}}} & \frac{\partial \Delta f}{\partial T_{r, \text{load}}} & \frac{\partial \Delta f}{\partial \Pi} \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中,雅可比矩阵 J 被划分为9个子块,下标 e、h 和 g 分别为电网、热网和气网;主对角元素为网络本身的偏导数,非主对角元素则为该子网(第二个下标)对

其他子网(第一个下标)状态量的偏导数,表示耦合关系。本文讨论的电网处于孤岛模式,其平衡节点状态改变会影响热网和气网,因而 J_{he} 和 J_{ge} 都不等于 0;同理可知当热网平衡节点由 CHP 而不是独立热源提供时,电网和气网对热网状态量的偏导数 J_{eh} 和 J_{gh} 都不等于 0。

针对基于牛顿法的统一法对初值敏感易不收敛的缺陷,本文提出基于自适应步长因子来动态调整步长的方法。此方法既保留统一法的计算快速性,又弥补统一法不易收敛的缺陷。由于 $\mathbf{x}^{(k)}$ 中各状态量与真实值相比的偏移程度不一致,如电网采用平直启动法选取初值得使其状态量接近真实值,而气网和热网则较难给定初值。因此,本文根据 $\Delta x_i^{(k)}$ 中各个状态量的偏移程度,分别施加对应的自适应步长因子 α_{ij} 。该步长因子矩阵 $A(\alpha)$ 的元素表达式为:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} -\alpha^{(k)} \left| \frac{\Delta x_i^{(k)}}{x_i^{(k)}} \right| & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (25)$$

其中, $\alpha^{(k)}$ 通过一维搜索得到; $\Delta x_i^{(k)} / x_i^{(k)}$ 为 IES 状态量 x_i 在第 k 次迭代的相对修正量。

由式(25)可知,在迭代初期,各状态量偏离真实解较大,使得 $\Delta x_i^{(k)}$ 较大而对应的 α_{ij} 也较大,在步长因子作用下快速接近真实解;随着迭代次数的增加,各状态量逼近真实解, $\Delta x_i^{(k)}$ 逐渐减小并趋近于 0,因此 $A(\alpha)$ 也逐渐趋向于单位矩阵。这使得步长因子的作用在迭代初期较明显,而随着迭代次数的增加则逐渐减小甚至消失,实现了步长因子在迭代过程中的自适应调节,提高了统一法的收敛性。图 5 为改进统一法的计算流程,其迭代公式为:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - A(\alpha) (J^{(k)})^{-1} \Delta F^{(k)} \quad (26)$$

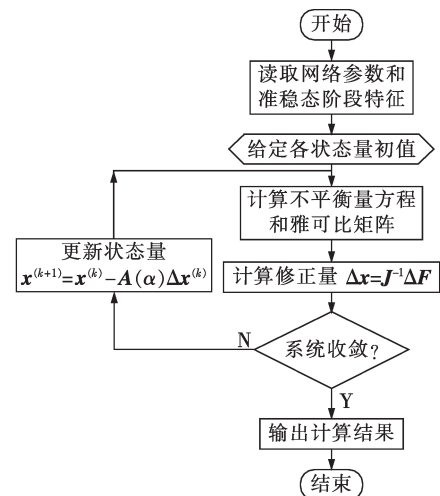


图5 改进统一法准稳态计算流程图

Fig.5 Flowchart of quasi-steady-state calculation for improved unified method

4 算例分析

4.1 算例介绍

本文以一个由 40 节点组成的电-气-热 IES 为例进行仿真分析, IES 拓扑如图 6 所示。图中, E_i 、 G_i 和 H_i 分别为 14 节点电网、12 节点气网和 14 节点热网的节点序号, 节点之间的连线数字表示支路或管道编号; 节点 G_1 、 E_{14} 和 H_{14} 分别为气网、电网和热网的平衡节点; CHP_1 、 CHP_2 分别工作于以电定热和以热定电模式, 以实现电-热网之间的双向耦合。需注意的是, $P2G$ 在本文中仅起分担节点 G_3 部分负荷的作用, 因而电网和气网仍为单向耦合。热网的热源供热温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 负荷节点的回热温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气网中安装有压缩机出口压力已知的燃气压缩机。各子网的参数详见附录。

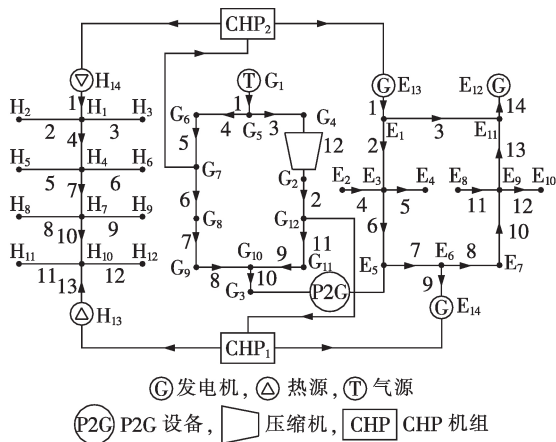


图 6 IES 拓扑

Fig.6 Topology of IES

4.2 算法比较

为比较分解法、常规统一法、改进统一法 3 种算法的特性, 在初值相同的情况下, 对图 6 所示算例的稳态阶段 1 进行计算分析。

4.2.1 准确性比较

通过 3 种算法计算得到的电网节点电压幅值(标幺值)、气网管道流量、热网管道流量分别如表 2—4 所示。可见计算结果的最大误差为 $0.028\ 39\text{ kg/s}$ (热网管道 4 的流量)。产生误差的主要原因是统一法中, 一般供热网和回热网的节点温度对管道流量的偏导数趋近于 0, 远小于其他雅可比矩阵元素的值^[23], 为计算简便可取为 0。通过比较计算结果, 验证了 3 种算法的准确性。

4.2.2 收敛性比较

3 种算法收敛性效果如图 7 所示。可见分解法中电、热、气网分别迭代 63、55 和 5 次, 共 123 次, 常规统一法迭代 30 次, 改进统一法迭代 11 次。由于统一法将各子网视作整体迭代并以超线性速率收敛, 而分解法将各子网依次独立迭代后再循环求解直至

收敛, 因而分解法比统一法迭代次数更多, 而改进统一法的收敛效果比常规统一法更优。

4.2.3 收敛时间比较

为比较各算法的迭代时间, 以增减热负荷设计 5 个场景: 场景 1 (减少 20% 热负荷)、场景 2 (减少 10% 热负荷)、场景 3 (热负荷不变)、场景 4 (增加

表 2 电网节点电压幅值

Table 2 Voltage amplitude of power grid node

电网节点	电压幅值		
	分解法	常规统一法	改进统一法
E_1	1.048 05	1.048 10	1.048 07
E_2	1.036 97	1.037 00	1.037 00
E_3	1.039 48	1.039 50	1.039 49
E_4	1.036 01	1.036 00	1.036 00
E_5	1.041 18	1.041 20	1.041 20
E_6	1.046 39	1.046 40	1.046 39
E_7	1.050 04	1.050 00	1.050 00
E_8	1.058 23	1.058 20	1.058 20
E_9	1.058 61	1.058 60	1.058 60
E_{10}	1.057 35	1.057 40	1.057 40
E_{11}	1.066 69	1.066 70	1.066 71
E_{12}	1.083 80	1.083 80	1.083 80
E_{13}	1.050 00	1.050 00	1.050 00
E_{14}	1.050 00	1.050 00	1.050 00

表 3 气网管道流量

Table 3 Flow of gas network pipeline

气网管道	管道流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		
	分解法	常规统一法	改进统一法
1	7774.143 23	7774.143 26	7774.143 25
2	3740.185 29	3740.185 27	3740.185 27
3	3840.645 61	3840.645 60	3840.645 61
4	3333.497 62	3333.497 62	3333.497 63
5	2333.497 62	2333.497 64	2333.497 63
6	1078.351 52	1078.351 55	1078.351 54
7	278.351 52	278.351 55	278.351 54
8	-321.648 48	-321.648 46	-321.648 46
9	1821.648 48	1821.648 46	1821.648 47
10	500.000 00	500.000 00	500.000 00
11	2821.648 48	2821.648 48	2821.648 48
12	3740.185 29	3740.645 55	3740.545 53

表 4 热网管道流量

Table 4 Flow of heat network pipeline

热网管道	管道流量 / ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	分解法	常规统一法	改进统一法
1	9.334 66	9.333 03	9.335 23
2	1.001 72	1.001 71	1.001 71
3	1.010 12	1.010 11	1.011 11
4	6.123 92	6.152 31	6.152 34
5	1.014 28	1.014 25	1.014 25
6	0.988 91	0.988 89	0.988 89
7	3.157 53	3.166 00	3.156 05
8	0.742 87	0.741 33	0.751 34
9	1.467 69	1.467 55	1.467 69
10	0.219 61	0.229 83	0.228 86
11	0.985 65	0.985 74	0.985 77
12	0.980 50	0.980 60	0.980 52
13	2.714 11	2.714 18	2.714 17

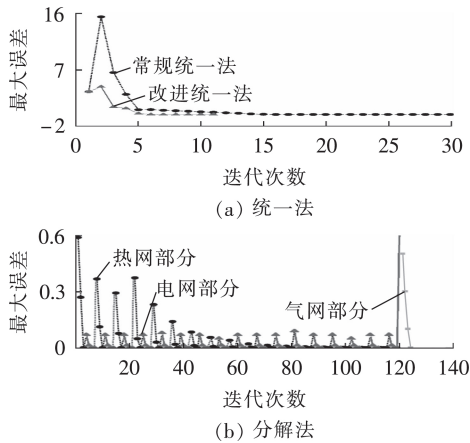


图7 算法收敛性效果

Fig.7 Convergence effect of algorithms

10%热负荷)和场景5(增加20%热负荷)。

3种算法的迭代次数及时间对比见表5。由表5可知,改进统一法和分解法在各场景下都能可靠收敛,但后者由于迭代次数较多,导致其迭代时间是前者的3倍左右;而常规统一法因对初值较敏感,在场景5中出现不收敛的情况。此外,改进统一法在各个场景下收敛时间基本一致,表明其在负荷波动情况下具备较好的适应性。

表5 迭代次数及时间对比

Table 5 Comparison of convergence times and time

场景	迭代次数			迭代时间 / s		
	分解法	常规统一法	改进统一法	分解法	常规统一法	改进统一法
1	129	32	14	1.232	0.837	0.436
2	128	34	11	1.243	0.825	0.421
3	124	30	11	1.187	0.830	0.429
4	132	38	13	1.214	0.846	0.433
5	137	不收敛	15	1.303	—	0.454

4.3 准稳态分析

为分析网络发生扰动或故障对 IES 各子网的交互影响,以电网节点 E_8 开断为例,应用改进统一法对算例进行准稳态分析。

当电网节点 E_8 开断导致电网负荷减少 0.15 MW 后,各发电机节点在扰动后的有功变化如图 8 所示。图中,节点 E_{12} 为 PV 节点,其出力不受扰动影响;节点 E_{13} 由工作于以热定电的 CHP_2 提供出力,而热网状态在扰动后阶段 2—4 都呈现波动,因此其出力也

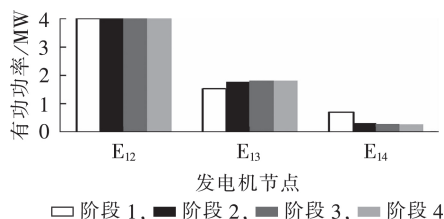


图8 发电机功率变化

Fig.8 Variation of generator power

在一直变化;电网平衡节点 E_{14} 从阶段 1 到 2 的有功功率明显减少以平衡负荷波动,同时由于热网状态变化带来的耦合影响也导致其出力在阶段 3 和 4 有略微下降。

气网状态变化如图 9 所示。可见电网故障后,气网节点压力和流量在阶段 2—4 都受到一定影响。阶段 2 为气网的动态阶段,此时取值时间设置在 1 min。由于阶段 2 采用差分方程,其描述精度较高,相较于稳态方程能更好地体现准稳态阶段 2 的气网状态量特征。总体而言,气网受节点开断影响程度比电网和热网小。这是因为气网平衡节点由独立气源提供,所以热网和电网可仅视作气网的负荷;扰动对气网仅为单向作用,在气网平衡节点 G_1 平衡扰动后不会再传递给电网和热网。由此可知,当子网的平衡节点独立时,在受到干扰后其鲁棒性更强。

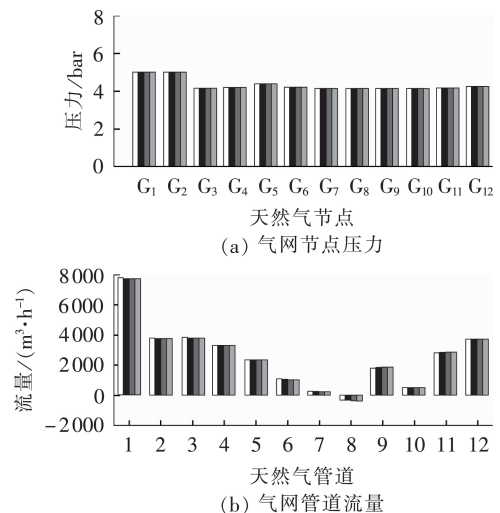


图9 气网状态变化

Fig.9 Variation of gas network states

热网状态变化如图 10 所示。由图 10(a)可知,靠近热源 H_{13} 的管道流量在各阶段逐渐减少而靠近热网平衡节点 H_{14} 相应增加。这是由于电网平衡节点 E_{14} 出力从阶段 1 到 4 逐渐减少,所以使连接在以电定热模式的 CHP_1 上的热源节点 H_{13} 在各阶段获得的热功率也相应减少。热网平衡节点 H_{14} 为平衡 H_{13} 出力减少而增加出力,使得邻近管道从阶段 1 到 4 流量逐渐增加。图 10(b)中阶段 2 的热网流质由于惯性作用未作用于热网节点,因此在阶段 2 各节点的温度保持不变;在阶段 3,热网处于热力工况准稳态,此时热交换器功率的改变导致热源在负荷处提供的功率发生变化,使得热网节点温度变化。节点温度变化会影响热网水力工况中的管道流量分布,该变化经耦合元件传递进一步影响电网和气网在阶段 3 的状态。图 10(c)描述建筑物在扰动后的室内温度变化。由图可知,室内温度在前 3 个阶段保持

不变,阶段4时在正常室温20℃基础上发生改变。其主要原因是热源出力变化导致流过建筑物的热网流质发生改变,若流质增加则温度上升,反之减少。在阶段4时,建筑物热功率变化影响热交换器的功率,进一步改变热源给负荷提供的功率,导致热网节点温度变化。最终,热网状态变化也影响电网和气网在阶段4的状态。此时,建筑物热功率、热交换器吸收的功率和热源提供的功率三者重新相等,达到新稳态。

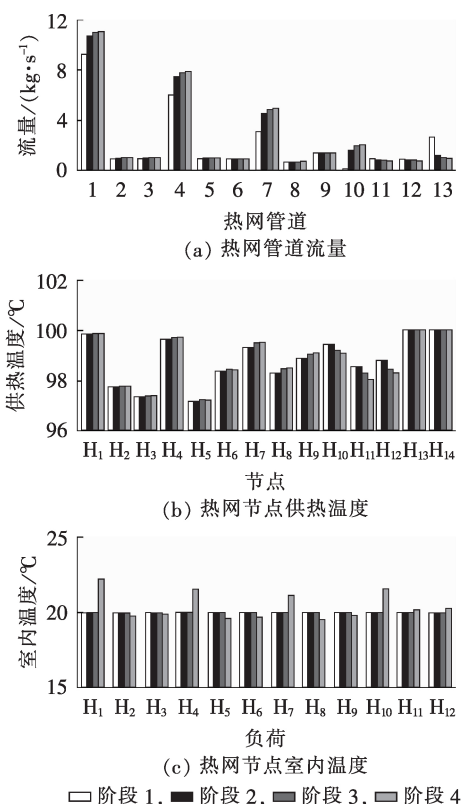


图10 热网状态变化图

Fig.10 Variation of heat network states

综上,当电网发生支路开断后会对电网状态产生影响,同时该扰动会通过耦合元件作用于热网和气网;惯性较大的热网进入准稳态阶段,使得热网在各阶段的状态变化反作用于电网和气网,体现了IES在准稳态阶段的耦合影响。

5 结论

本文对双向耦合的IES多能流计算和交互作用进行了准稳态分析。针对基于牛顿法的多能流计算存在的初值问题,提出基于自适应步长因子的改进统一法。考虑扰动后网络的多时间尺度特性和过渡过程,将交互过程分为4个准稳态阶段,分析基于准稳态多能流的交互作用,得到以下的结论。

(1)改进统一法既保留常规统一法的计算快速性,又弥补常规统一法收敛性差的缺陷,能较好地应对计算快速性和迭代收敛性的矛盾。

(2)扰动过程中较快速的水力工况准稳态和较慢速的热力工况准稳态阶段会对IES的运行状态产生影响,进而影响热用户的室内温度。

(3)当IES为双向耦合状态时,子网间存在双向交互,单个子网的状态变化会传递给耦合子网并反馈影响原子网;当平衡节点独立(如气网)时,其抗扰动的能力较强。需指出的是,耦合子网间的任一过渡阶段都会影响IES的状态,可能引发系统的安全问题,凸显出IES多时间尺度分析的重要性。

考虑到本文中电网和气网为单向耦合的局限性,下一步研究将在已有电-热双向耦合的基础上,增加电网和气网的双向互动,以实现多子网间的强耦合情形,为IES的安全性和可靠性研究提供支撑。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.
- [2] SHAO C, SHAHIDEHPOUR M, WANG X, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4418-4429.
- [3] 郝然,艾芊,朱宇超,等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):171-178.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [4] QIAO Zheng, HUANG Shangyuan, LI Rui, et al. Unified power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power[J]. Applied Energy, 2016, 103: 322-327.
- [5] 艾小猛,方家琨,徐沈智,等. 一种考虑天然气系统动态过程的气电联合系统优化运行模型[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 409-416.
AI Xiaomeng, FANG Jiakun, XU Shenchi, et al. An optimal energy flow model in integrated gas-electric systems considering dynamics of natural gas system[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 409-416.
- [6] 孙娟,卫志农,孙国强,等. 计及P2H的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.
- [7] ZENG Q, FANG J, LI J, 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.
- [8] 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):2942-2950.
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): 2942-2950.
- [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, 2015, 31(5):3636-3647.
- [10] LI J, FANG J, ZENG Q, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources[J]. Applied Energy, 2016, 167:244-254.
- [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.
- [12] 夏天, 陈瑜玮, 郭庆来, 等. 基于PSASP的电热耦合能源系统潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):55-61.
- XIA Tian, CHEN Yuwei, GUO Qinglai, et al. Power flow calculation based on PSASP for combined thermal and electric energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):55-61.
- [13] QU K, YU T, HUANG L, et al. Decentralized optimal multi-energy flow of large-scale integrated energy systems in a carbon trading market[J]. Energy, 2018, 149:779-791.
- [14] ZHENG J, ZHOU Z, ZHAO J, et al. Integrated heat and power dispatch truly utilizing thermal inertia of district heating network for wind power integration[J]. Applied Energy, 2018, 211:865-874.
- [15] 王珩, 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.
- WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):17-24.
- [16] FU X, ZHANG X. Failure probability estimation of gas supply using the central moment method in an integrated energy system[J]. Applied Energy, 2018, 219:1-10.
- [17] PAMBOUR K A, ERDENER B C, BOLADO-LAVIN R, et al. Development of a simulation framework for analyzing security of supply in integrated gas and electric power systems[J]. Applied Sciences, 2016, 7(1):47.
- [18] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1627-1634.
- PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1627-1634.
- [19] PAN Z, GUO Q, SUN H. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167:230-243.
- [20] ALBERTO M, CLAUDIO R F. 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.
- [21] ROY S S, ROY R, BALAS V E. Estimating heating load in buildings using multivariate adaptive regression splines, extreme learning machine, a hybrid model of MARS and ELM[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:4256-4268.
- [22] 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.
- [23] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162:1238-1250.

作者简介:



钟俊杰

钟俊杰(1994—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化与安全分析(E-mail:zhongjj@hnu.edu.cn);

李勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统运行与控制、电力电子系统与控制(E-mail:yongli@hnu.edu.cn);

曾子龙(1993—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化运行与大数据分析(E-mail:1006391270@qq.com);

曹一家(1969—),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统稳定与控制(E-mail:yjcao@hnu.edu.cn)。

Quasi-steady-state analysis and calculation of multi-energy flow for integrated energy system

ZHONG Junjie, LI Yong, ZENG Zilong, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The multi-energy flow calculation and interaction analysis are essential tools for an integrated energy system. The multi-energy flow interaction mechanism is formulated, and an integrated energy system model that consists of electricity, gas, heat networks and coupling units is established. Subsequently, the solution framework and method based on both decomposition and unified approaches are designed for multi-energy flow calculation. Moreover, to address the issue that the multi-energy flow algorithm using Newton's method is more or less sensitive to initial values, an improved unified approach that utilizes an adaptive step length factor is proposed. Meanwhile, the accuracy, convergence and computational efficiency of the three algorithms are compared. Considering the transition process after disturbance and multi-time scale characteristics of multi-energy networks, the interaction process are divided into four quasi-steady-state stages and the interaction based on quasi-steady-state multi-energy flow is analyzed. Finally, a bidirectional integrated energy system is employed as an example with the consideration of the outage of a line. Numerical results on this system verify the effectiveness of the proposed approach and quasi-steady-state analysis.

Key words: integrated energy system; multi-energy flow; improved unified approach; interaction analysis; quasi-steady-state analysis

附 录

表 A1 电网线路参数

Table A1 Line parameters of power grid

支路	线路阻抗/p.u.	支路	线路阻抗/p.u.
1	0.0014+j0.0085	8	0.0013+j0.0057
2	0.0012+j0.0101	9	0.0011+j0.0065
3	0.0037+j0.0198	10	0.0024+j0.0072
4	0.0022+j0.0089	11	0.0015+j0.0043
5	0.0018+j0.0073	12	0.0008+0.0029
6	0.0023+j0.011	13	0.0016+j0.0035
7	0.0016+j0.0069	14	0.0009+j0.0068

表 A2 电网节点负荷功率

Table A2 Load power of power grid nodes

节点	有功/ MW	无功/ Mvar	节点	有功/ MW	无功/ Mvar
E ₁	0.32	0.14	E ₈	0.15	0.04
E ₂	0.65	0.13	E ₉	0.42	0.12
E ₃	0.76	0.32	E ₁₀	0.46	0.33
E ₄	0.93	0.26	E ₁₁	0.38	0.05
E ₅	0.8	0.43	E ₁₂	0	0.132
E ₆	0.84	0.31	E ₁₃	0	0
E ₇	0.47	0.28	E ₁₄	0	0

表 A3 气网管道参数

Table A3 Pipeline parameters of gas network

管道	长度/ m	直径/ mm	管道	长度/ m	直径/ mm
1	500	150	7	300	150
2	2500	150	8	500	150
3	500	150	9	200	150
4	600	150	10	600	150
5	400	150	11	500	150
6	500	150	12	2500	150

表 A4 气网节点负荷

Table A4 Load of gas network node

节点	负荷/ (m ³ ·h ⁻¹)	节点	负荷/ (m ³ ·h ⁻¹)
G ₁	0	G ₇	1000
G ₂	0	G ₈	800
G ₃	500	G ₉	600
G ₄	1200	G ₁₀	1000
G ₅	600	G ₁₁	1000
G ₆	1000	G ₁₂	800

表 A5 热网管道参数

Table A5 Pipeline parameters of heat network

管道	长度/ m	直径/ mm	管道	长度/ m	直径/ mm
1	300	200	8	280	200
2	500	200	9	150	200
3	600	200	10	160	200
4	300	200	11	210	200
5	600	200	12	150	200
6	300	200	13	200	200
7	250	200			

表 A6 热网负荷节点功率

Table A6 Load of heat network node

节点	负荷/ MW	节点	负荷/ MW
H ₁	0.25	H ₇	0.15
H ₂	0.2	H ₈	0.15
H ₃	0.2	H ₉	0.3
H ₄	0.2	H ₁₀	0.2
H ₅	0.2	H ₁₁	0.2
H ₆	0.2	H ₁₂	0.2