DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200647

文章编号:0258-8013(2020)15-4820-11

中图分类号:TM 71

综合能源系统分析的统一能路理论(三): 稳态与动态潮流计算

陈彬彬,孙宏斌,吴文传,郭庆来,乔铮

(清华大学电机系,北京市 海淀区 100084)

Energy Circuit Theory of Integrated Energy System Analysis (III): Steady and Dynamic Energy Flow Calculation

CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, GUO Qinglai, QIAO Zheng

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: As a basic application of energy network different energy networks have developed analysis, fully-fledged but not unified models and methods for energy flow calculation. To improve the disciplinary integration of different energy network research, an energy flow calculation method based on the energy-circuit theory was proposed for natural gas networks and heating networks. In addition, an iteration method for correcting base value was supplemented to improve accuracy, and an equivalent method from boundary conditions to initial conditions was employed to set initial conditions in an implicit manner. The proposed method unifies not only energy flow calculations in different energy networks, but the steady and the dynamic energy flow calculations, which establishes the basis for the multi-time-scale integrated analysis of heterogeneous energy flows. Furthermore, the proposed method outperforms the conventional energy flow calculation methods in terms of computational performance.

KEY WORDS: integrated energy system; energy-circuit theory; energy flow calculation; natural gas network; heating network

摘要:潮流计算作为能源网络分析的基础性应用,在各能源 网络已形成成熟但不统一的计算模型与方法。为促进不同能 源网络研究的学科融合,该文基于统一能路理论,针对天然 气网络与供热网络,提出了相适应的潮流计算方法。在此基 础上,补充了基值修正的迭代方法以提高潮流计算的精度, 并应用了"边值-初值"等效的方法以在动态潮流计算中隐 式地给定初始条件。基于统一能路的潮流计算方法不仅统一 了不同能源网络的潮流计算,还统一了同一能源网络内的稳 态潮流计算与动态潮流计算,奠定了多异质能流在多时间尺度上统一分析的应用基础。此外,相较以有限差分方法为代表的传统动态潮流计算方法,文中所提出的方法在计算性能上实现了显著的提升。

关键词 : 综合能源系统 ; 统一能路理论 ; 潮流计算 ; 天然气 网络 ; 供热网络

0 引言

能源网络的潮流计算,指给定网络的结构、参数与边界条件,确定网络的运行状态,是能源网络运行、规划的重要基础。根据网络运行状态是否发生变化,潮流计算可分为稳态潮流计算和动态潮流计算,表1给出了两者在相关属性上的区别^[1]。

表1	稳态潮流计算与动态潮流计算的对比

Tab. 1Contrast between steady energy flowcalculation and dynamic energy flow calculation

属性	稳态潮流计算	动态潮流计算
运行状态	不变	时变
边界条件	单个断面	时间序列
供需关系	要求平衡	允许不平衡
数学模型	代数方程	偏微分方程
变量维度	空间维度	时间、空间维度
时间尺度	ĸ	短

作为能源网络分析的基础性应用,电力网络、 天然气网络和供热网络已各自形成相对成熟的潮 流计算模型与方法。文献[2]针对电力网络稳态潮 流,介绍了高斯-塞德尔方法、牛顿-拉夫逊方法、 快速分解法等潮流计算方法。文献[3]基于 Weymouth 方程和图论方法,建立了天然气网络的 稳态潮流模型,并基于牛顿法提出了一种迭代计算

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0901300);国家自然科 学基金项目(51537006)。

National Key R&D Program of China (2016YFB0901300); National Natural Science Foundation of China (51537006).

第15期

方法,文献[4]将其推广到了多压力等级的天然气网的稳态 络稳态潮流计算;考虑天然气的慢动态特性,文模型与 献[5]基于流体力学方程提出了天然气管道的动态模后的 仿真模型,并使用最小平方频谱方法进行了计算,依赖有 文献[6]将其从管道推广到网络,建立了天然气网络稳定性 的动态潮流模型,并在有限元计算软件 COMSOL

Multiphysics 上实现了动态潮流计算。文献[7-8]建 立了供热网络水力分析的稳态潮流模型,并应用改 进平方根方法进行了稳态潮流计算,而文献[9]建立 了供热网络热力分析的稳态潮流模型;考虑热力迁 移的长时延效应,文献[10-11]基于热力学方程提出 了供热网络热力分析的动态潮流模型,使用不同的 有限差分格式进行了求解,并分析了差分稳定性。

近年来,集成电力网络、天然气网络和供热网 络的综合能源系统受到越来越多研究者的关注(本 文的研究范畴限于电、气、热构成的综合能源系统): 文献[12]研究了电-热综合能源系统中电网潮流与 热网潮流之间的交互影响; 文献[13-14]针对电-气 综合能源系统的稳态潮流计算,分别提出了集中式 和分布式的求解方法; 文献[15-16]将相关的潮流计 算方法推广到了电-气-热综合能源系统;文献[17] 基于能源集线器理论,分析了电-气-热综合能源系 统在不同耦合形式下的稳态潮流计算方法。在上述 研究中,不同能源网络的潮流计算模型与方法相互 迥异,这在综合能源系统分析中形成了天然的学科 壁垒,给相关理论与应用的发展带来了挑战。基于 这一出发点,国内外一些学者开展了不同能源网络 统一建模分析的先驱工作: 文献[18]对天然气网络 进行了类电路建模,并基于拉普拉斯变换在复频域 建立了用传递函数描述的动态潮流模型; 文献[19] 类比电力网络的潮流计算方法,提出了相统一的热 力网络稳态潮流计算方法,而文献[20]通过电路比 拟的方法来刻画电-热综合能源系统中的能量输运 规律,提出了热力网络稳态潮流计算的能量流模 型;同样基于类电路建模的方法,文献[21]建立了 刻画供热网络热力动态潮流的等效电路, 文献[22] 建立了刻画供热网络水力稳态与热力动态的等效 电路,并在 PSCAD 中实现了供热网络动态潮流计 算; 文献[23]通过总结能量网络的传递规律, 建立 了不同能源网络统一的能量网络方程,并在文 献[24-25]中分别用于供热网络的稳态潮流计算与 动态潮流计算。

上述工作在很大程度上实现了不同能源网络 潮流计算模型与方法的统一。但是,同一能源网络 的稳态潮流计算与动态潮流计算仍未统一,两者在 模型与方法层面均是相互割裂的。此外,类电路建 模后的天然气网络、供热网络的动态潮流计算仍然 依赖有限差分方法,计算复杂度较高,且存在差分 稳定性问题。

针对上述问题,本文在上述研究基础上,结合 文献[26-27]中提出的统一能路模型,发展出基于统 一能路理论的潮流计算方法,旨在:1)统一不同 能源网络的潮流计算模型与方法;2)统一同一能 源网络的稳态潮流计算与动态潮流计算;3)将时 域中动态潮流的偏微分方程转换为频域中若干组 用相量描述的代数方程,提高计算性能。

1 基于统一能路的稳态潮流计算

从数学上说,稳态潮流计算的本质是求解一组 刻画网络状态变量在空间上关系的代数方程。对于 天然气网络的稳态潮流、供热网络的水力稳态潮流 和热力稳态潮流,这组代数方程依次是气路刻画的 网络方程、水路刻画的网络方程和热路刻画的网络 方程中的零频率分量。

1.1 天然气网络的稳态潮流计算

根据文献[26],对于 N 个节点的天然气网络, 气路刻画的零频率网络方程记为

$$\boldsymbol{Y}_{g}^{0}\boldsymbol{p}_{g}^{0} = \boldsymbol{G}_{g}^{0} \tag{1}$$

式中: Y_g^0 为 N 阶的广义节点导纳矩阵,表征网络的结构与参数; p_g^0 为 N 维的节点压力向量; G_g^0 为 N 维的广义节点注入向量,表征网络的运行状态。 本文约定各变量第一个下标区分不同能源网络,上标区分不同频率分量。

上述矩阵方程包含 N 个标量方程和 2N 个状态 变量,故还需给定 N 个状态变量取值作为边界条件 以确保潮流可解。类比电力网络潮流计算的边界条 件给定,根据天然气网络的运行实际将所有节点划 分为定压力节点与定注入节点,如表 2 所示,从而 给定 N 个状态变量以求取剩余 N 个状态变量。

表 2 天然气网络的节点分类

Tab. 2 Classification of nodes in natural gas networks

实际节点	节点类型	节点压力	节点注入
定压力气源	定压力节点	给定	待求
定流量气源	定注入节点	待求	给定
负荷	定注入节点	待求	给定
中间节点	定注入节点	待求	给定(零注入)

按照节点类型,对网络方程(1)中的行进行重排,改写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{g,gg}^{0} & \mathbf{Y}_{g,gp}^{0} \\ \mathbf{Y}_{g,pg}^{0} & \mathbf{Y}_{g,pp}^{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{g,g}^{0} \\ \mathbf{p}_{g,g}^{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{g,g}^{0} \\ \mathbf{G}_{g,p}^{0} \end{bmatrix}$$
(2)

式中: $G_{g,g}^{0}$ 为定注入节点的节点注入; $p_{g,p}^{0}$ 为定压 力节点的节点压力,二者为已知的边界条件; $p_{g,g}^{0}$ 为 定注入节点的节点压力; $G_{g,p}^{0}$ 为定压力节点的节点 注入,二者为待求的状态变量; $Y_{g,gg}^{0}$ 、 $Y_{g,gp}^{0}$ 、 $Y_{g,pg}^{0}$ 、 $Y_{g,pp}^{0}$ 是广义节点导纳矩阵 Y_{g}^{0} 中的相应划分。

根据式(2)可解出定注入节点的节点压力和定 压力节点的节点注入,分别如式(3)和式(4)所示。

$$\boldsymbol{p}_{g,g}^{0} = (\boldsymbol{Y}_{g,gg}^{0})^{-1} \cdot (\boldsymbol{G}_{g,g}^{0} - \boldsymbol{Y}_{g,gp}^{0} \boldsymbol{p}_{g,p}^{0})$$
(3)

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{g},\mathrm{p}}^{0} = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{g},\mathrm{pg}}^{0} \boldsymbol{p}_{\mathrm{g},\mathrm{g}}^{0} + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{g},\mathrm{pp}}^{0} \boldsymbol{p}_{\mathrm{g},\mathrm{p}}^{0}$$
(4)

潮流解(3)、(4)成立的前提是定注入节点对应的 节点导纳矩阵 $Y_{g,g}^0$ 非奇异。当天然气网络中存在定 压力节点时,该前提是自然满足的,即有:

$$\boldsymbol{Y}_{g,gg}^{0} \cdot \boldsymbol{1} \neq \boldsymbol{0} \tag{5}$$

式(5)的物理意义是,同时向所有定注入节点增 加单位压力,会在这些定注入节点上产生非零的注 入增量,即,改变定注入节点的注入值。因为网络 中存在定压力节点,改变定注入节点的压力,会改 变定压力节点与定注入节点构成支路的气流,从而 引起定注入节点的气流注入改变。这和电力网络节 点导纳矩阵非奇异的物理意义是相统一的。

反之,若网络中仅存在定注入节点,这些节点 的注入和为零,从而网络方程(1)中的N个标量方程 线性相关,表现为节点导纳矩阵 $Y_{g,gg}^{0}$ 非满秩,即 奇异。

在解得全网的节点状态变量之后,可根据支路 方程^[26]进一步获取全网的支路状态变量(流量),如 式(6)。

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{g},\mathrm{b}}^{0} = \boldsymbol{y}_{\mathrm{g},\mathrm{b}}^{0} (\boldsymbol{A}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{p}_{\mathrm{g}}^{0} + \boldsymbol{E}_{\mathrm{g},\mathrm{b}}^{0} - \boldsymbol{k}_{\mathrm{g},\mathrm{b}}^{0} \boldsymbol{A}_{\mathrm{g}+}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{p}_{\mathrm{g}}^{0})$$
(6)

式中: $G_{g,b}^{0}$ 为支路流量向量; $y_{g,b}^{0}$ 为支路导纳矩阵; A_{g} 为刻画网络拓扑的节点—支路关联矩阵; $A_{g^{+}}$ 为 流出节点-支路关联矩阵,即保留 A_{g} 中的非负元素; $E_{g,b}^{0}$ 和 $k_{g,b}^{0}$ 为各支路气压源与受控气压源参数组成 的列向量;相关变量的计算方式参照文献[26]。

1.2 供热网络的水力稳态潮流计算

供热网络的水力稳态潮流计算和天然气网络 的稳态潮流计算是完全相仿的。根据文献[27],对 于 N 个节点的供热网络,水路刻画的零频率水力网 络方程记为

$$\boldsymbol{Y}_{h}^{0}\boldsymbol{p}_{h}^{0} = \boldsymbol{G}_{h}^{0}$$
(7)

式中: Y_h^0 为 N 阶的水力节点导纳矩阵; p_h^0 为 N 维的节点压力向量; G_h^0 为 N 维的节点注入向量。

同样将节点划分为定压力节点和定注入节点, 如表 3 所示。

表 3 供热网络的节点分类(水力潮流)

Tab. 3 Classification of nodes in heating networks (hydraulic energy flow)

实际节点	节点类型	节点压力	节点注入
定出口压力热源	定压力节点	给定	待求
其他热源、负荷	定注入节点	待求	给定
中间节点	定注入节点	待求	给定

从而式(7)改写为

式中: $G_{h,g}^{0}$ 为定注入节点的节点注入; $p_{h,p}^{0}$ 为定压 力节点的节点压力; $p_{h,g}^{0}$ 为定注入节点的节点压力; $G_{h,p}^{0}$ 为定压力节点的节点注入; $Y_{h,gg}^{0}$ 、 $Y_{h,gp}^{0}$ 、 $Y_{h,pg}^{0}$ 、 $Y_{h,pg}^{0}$ 为广义节点导纳矩阵 Y_{h}^{0} 中的相应划分。

从式(8)中解得供热网络的节点水力状态变 量为:

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{h,g}}^{0} = (\boldsymbol{Y}_{\mathrm{h,gg}}^{0})^{-1} \cdot (\boldsymbol{G}_{\mathrm{h,g}}^{0} - \boldsymbol{Y}_{\mathrm{h,gp}}^{0} \boldsymbol{p}_{\mathrm{h,p}}^{0})$$
(9)

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{h,p}}^{0} = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{h,pg}}^{0} \boldsymbol{p}_{\mathrm{h,g}}^{0} + \boldsymbol{Y}_{\mathrm{h,pp}}^{0} \boldsymbol{p}_{\mathrm{h,p}}^{0}$$
(10)

当供热网络中存在定压力节点时,定注入节点 的节点导纳矩阵非奇异,潮流解(9)、(10)成立。特 别地,供热网络作为一种闭式网络,当热源处的水 泵均运行在定压差或定转速模式时,网络中不存在 定压力节点。在这种情况下,可任意选取一个节点 作为压力参考节点,将其压力给定为零,则式(9) 计算得到的是其余节点相对该节点的压力差,此时 全网的绝对压力是不可知的。这种处理方法和电力 网络直流潮流计算中选取相角参考节点的思想是 一致的。

最后根据节点状态变量与水力支路方程^[27]计 算支路状态变量,如式(11)。

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{h,b}}^{0} = \boldsymbol{y}_{\mathrm{h,b}}^{0} (\boldsymbol{A}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{p}_{\mathrm{h}}^{0} - \boldsymbol{E}_{\mathrm{h,b}}^{0})$$
(11)

式中: $G_{h,b}^0$ 为支路流量向量; $y_{h,b}^0$ 为支路导纳矩阵; A_h 为节点—支路关联矩阵; $E_{h,b}^0$ 为各支路水压源参数组成的列向量。 第15期

1.3 供热网络的热力稳态潮流计算

根据文献[27],对于 *M* 条支路的供热网络,热路刻画的零频率热力网络方程为

$$(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_{t}^{0}\boldsymbol{A}_{h+}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{A}}_{h-})\boldsymbol{T}_{tt}^{0} = \boldsymbol{K}_{t}^{0}\boldsymbol{A}_{h+}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{T}}_{tn}^{0} - \boldsymbol{E}_{th}^{0}$$
(12)

式中: I 为 M 阶单位矩阵; K_t^0 为管道传热因子矩 阵; A_{h+} 为流出节点-支路关联矩阵, \tilde{A}_{h-} 为加权流 入节点-支路关联矩阵; $\tilde{T}_{t,n}^0$ 为节点水流注入的流量 加权温度向量; $E_{t,b}^0$ 为支路热压源两侧的温差向量; $T_{t,t}^0$ 为支路末端温度向量;相关变量的计算方式参 照文献[27]。本文中所有温度变量均指实际温度减 去环境温度表征的过余温度。

为统一数学形式,可将式(12)记为

$$\boldsymbol{Y}_{t}^{0}\boldsymbol{T}_{tt}^{0} = \boldsymbol{h}_{t}^{0} \tag{13}$$

式中: Y_t^0 为包含传热因子矩阵与节点—支路关联矩阵,表征了网络结构与参数; h_t^0 为包含节点注入温度与换热器工质温差,表征了网络运行的边界条件; T_{tt}^0 为表征了网络运行的状态变量。

式(13)包含 M 个标量方程与 M 个状态变量,故可直接解得

$$\boldsymbol{T}_{t,t}^{0} = (\boldsymbol{Y}_{t}^{0})^{-1} \boldsymbol{h}_{t}^{0}$$
(14)

热力稳态潮流解(14)要求 Y_t^0 非奇异。这一前提 总是成立的,即有

$$\boldsymbol{Y}_{t}^{0} \cdot \boldsymbol{1} \neq \boldsymbol{0} \tag{15}$$

式(15)的物理意义是,为提高所有支路末端温度,则需要在功率注入上产生非零增量,即改变边界条件,因为更高的运行温度意味着更大的散热损耗。

在得到支路末端温度之后,根据热力支路方 程^[27]可得到支路的首端温度,如式(16)所示。

$$\boldsymbol{T}_{tf}^{0} = (\boldsymbol{K}_{t}^{0})^{-1} \boldsymbol{T}_{tt}^{0}$$
(16)

式中 T_{tf}^0 为支路首端温度向量。

1.4 稳态潮流计算的基值修正方法

天然气网络与供热网络水力的原始稳态潮流 方程中包含非线性代数方程^[2,6]。文献[19-20]在推导 气路和水路时,于支路流量基值处,采用了一阶泰 勒展开进行线性化处理。该近似的精度完全取决于 支路流量基值与支路流量实际值的接近程度:当基 值恰好等于实际值时,该近似不引入任何误差。为 提高基于统一能路的稳态潮流计算方法的精度,可 采用基值修正的方法实现迭代计算,消除基值偏离 实际值带来的线性化误差: 1)按照历史数据或经验值给定一组支路流量 基值的初值 x₀。

2)按照当前支路流量基值 x_k,更新气路/水路
 中的网络矩阵与稳态网络方程,并计算稳态潮流解
 (3)—(6)/(9)—(11)。

3) 从稳态潮流解中取出当前支路流量基值 x_k 下的支路流量实际值 \hat{x}_k ,并计算两者的距离:若 $\|\hat{x}_k - x_k\| \le \varepsilon$ (ε 是根据精度需要给定的收敛阈值), 则认为当前基值足够准确,并结束迭代;否则,按 照式(17)更新基值,并回到 2)。

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = (1-\lambda)\boldsymbol{x}_k + \lambda \hat{\boldsymbol{x}}_k \tag{17}$$

式中 $\lambda \in (0,1]$ 是基值更新的步长。

可以证明,在上述迭代格式下,基于统一能路 的稳态潮流计算方法等价于用牛顿法或阻尼牛顿 法求解原始的非线性稳态潮流方程。当 $\lambda=1$ 时等价 于牛顿法;当 $\lambda \in (0,1)$ 时等价于阻尼牛顿法。更新步 长 λ 越大,则迭代速度增大而收敛性变差;反之, 则收敛性改善而迭代速度变慢。为兼顾迭代收敛性 与迭代速度,可在迭代初始时设置较小的 λ ,随着 迭代次数的增加逐渐增大 λ 。

供热网络的热力稳态潮流方程本就是线性的, 故不涉及基值选取的问题,可直接求解。

2 基于统一能路的动态潮流计算

从数学上说,动态潮流计算的本质是求解一组 刻画网络状态变量在时间、空间上关系的时域微分 --代数方程组。对于天然气网络的动态潮流,这组 方程是天然气的流体力学方程^[6];对于供热网络的 动态潮流,这组方程是水的热力学方程^[10-11]。

在文献[26-27]中,已分别将时域中微分方程刻 画的天然气网络动态潮流和供热网络动态潮流等 价为频域中若干不同频率的正弦稳态的叠加,对于 每一个频率下的正弦稳态过程,由一组相量描述的 代数方程刻画。因此,基于统一能路的动态潮流计 算,归结为若干组复数代数方程的求解;每组复数 代数方程求解得到响应相量,通过傅里叶反变换恢 复成时域中对应频率的正弦稳态响应;叠加所有正 弦响应,即得到原能源网络的时域动态潮流。这一 过程由图1给出示意。

得益于天然气网络和供热网络中激励波形相 对光滑平整(毛刺少),较少的频域分量即可还原出 原始时域激励,从而相较基于有限差分技术的动态 潮流计算方法,这一方法的方程数量显著减少,提 升了计算效率与稳定性。同时,由于各频域分量下



4824



的网络方程求解彼此独立,故基于统一能路的动态 潮流计算方法具有天然的可并行性。

特别地,当所有网络激励均为时不变激励时, 其频谱仅包含零频率分量,此时动态潮流计算退化 为稳态潮流计算,故二者在模型与方法上均是统 一的。

2.1 天然气网络的动态潮流计算

根据文献[26],对于 N 节点的天然气网络,频 域分量 *i* 对应的气路网络方程为

$$\boldsymbol{Y}_{g}^{i} \cdot \dot{\boldsymbol{p}}_{g}^{i} = \dot{\boldsymbol{G}}_{g}^{i} \tag{18}$$

相较零频率的气路网络方程(1),动态潮流计算 中的各分量网络方程从实数推广到复数(相量)。仿 照电力网络潮流计算的符号表示,本文约定在变量 上方加"·"表示复数变量。

在正弦激励下,天然气管道的 π 型等值气路^[26] 中两条接地支路在实际节点与大地节点之间形成 通路,故上述矩阵阶数、向量维数从N扩展到N+1。 大地节点是一个虚拟节点,其物理意义是天然气网 络的"管存"效应:某条管道通过接地支路向大地 节点注入气流,表示该管道入口气流量大于出口气 流量,管道处于"充气"的动态过程,管道内天然 气被压缩,如图2所示;反之大地节点的注入为负 则表示出口气流量大于入口气流量,管道处于"放 气"状态。

类似零频率网络方程的求解,按照节点分类对 网络方程的行进行重排,得到形如式(3)、(4)的频域 潮流解为

$$\dot{\boldsymbol{p}}_{g,g}^{i} = (\boldsymbol{Y}_{g,gg}^{i})^{-1} \cdot (\dot{\boldsymbol{G}}_{g,g}^{i} - \boldsymbol{Y}_{g,gp}^{i} \dot{\boldsymbol{p}}_{g,p}^{i})$$
(19)

$$\dot{\boldsymbol{G}}_{g,p}^{i} = \boldsymbol{Y}_{g,pg}^{i} \dot{\boldsymbol{p}}_{g,g}^{i} + \boldsymbol{Y}_{g,pp}^{i} \dot{\boldsymbol{p}}_{g,p}^{i}$$
(20)



Fig. 2 Ground node and "line-pack" effect 零;时域边界条件要先经过离散傅里叶变换换算成 不同频率的频域边界条件。

在激励的交流分量网络方程求解中,由于大地 节点的存在,网络中至少有1个定压力节点,这保 证了节点导纳矩阵的非奇异性质。上述数学结论的 物理意义是在已知全网注入波动的情况下,可以计 算全网的压力波动,这对于调整潮流的计算有重要 意义。

完成所有频域分量下的网络方程求解之后,将 频域潮流解(19)、(20)反变换回时域,叠加得到原网 络的时域潮流解:

$$p_{g,g}(t) = \sum_{i=0}^{n} \operatorname{Re}(\dot{p}_{g,g}^{i}) \cdot \cos(\omega_{i}t) - \operatorname{Im}(\dot{p}_{g,g}^{i}) \cdot \sin(\omega_{i}t) (21)$$
$$G_{g,p}(t) = \sum_{i=0}^{n} \operatorname{Re}(\dot{G}_{g,p}^{i}) \cdot \cos(\omega_{i}t) - \operatorname{Im}(\dot{G}_{g,p}^{i}) \cdot \sin(\omega_{i}t) (22)$$

式中:Re(·)、Im(·)分别为复数变量的实部与虚部; ω_i 为频域分量 *i* 对应的角频率;*t* 为时间;*n*+1 是 频域分量总数;向量变量不加粗指代向量中的一个 元素。

支路状态变量的时域潮流可按相同方法计算 得到,不再赘述。

2.2 供热网络的动态潮流计算

基于时不变电路的分析方法,本文研究的供热 网络动态潮流限于水力稳态下的热力动态,即质调 节工况下的动态潮流。类似式(13),频域分量 *i* 对 应的热路网络方程记为

$$\boldsymbol{Y}_{t}^{i} \boldsymbol{\dot{T}}_{t,t}^{i} = \boldsymbol{\dot{h}}_{t}^{i}$$
(23)

式中: Y_t^i 为与频率 ω_i 相关的网络参数矩阵; \dot{h}_t^i 为时域边界条件经傅里叶变换之后在频率 ω_i 下的分量; \dot{T}_{tt}^i 为频率 ω_i 下的支路末端温度相量。

因为 Y_t^i 总是非奇异的,所以直接求逆得到支路

末端温度的频域潮流解为

$$\dot{\boldsymbol{T}}_{tt}^{i} = (\boldsymbol{Y}_{t}^{i})^{-1} \dot{\boldsymbol{h}}_{t}^{i}$$
(24)

将所有分量下的频域潮流解反变换回时域并 叠加,即得到支路末端温度的时域潮流解:

$$T_{t,t}(t) = \sum_{i=0}^{n} \operatorname{Re}(\dot{T}_{t,i}^{i}) \cdot \cos(\omega_{i}t) - \operatorname{Im}(\dot{T}_{t,i}^{i}) \cdot \sin(\omega_{i}t) \quad (25)$$

其余状态变量如支路首端温度的时域潮流可 按相同方法计算得到,不再赘述。

2.3 动态潮流计算的初值等效方法

天然气网络与供热网络的动态潮流方程中包 含偏微分方程,这意味着动态潮流的定解条件不仅 是前述的边界条件(网络激励),还包括初始条件。 但是计算机实现的离散傅里叶变换实际处理的是 经周期延拓后的时域无限信号,故基于统一能路的 动态潮流计算方法无法显式地给定初始条件。

在连续运行的实际系统中,*T*₀时刻的初始条件 并不是凭空产生的,而是由*T*₀时刻前所有的历史边 界条件决定的。考虑到动态过程的衰减,可以近似 假设*T*₀时刻的初始条件由*T*₀-*T*时刻到*T*₀时刻的历 史边界条件等效决定,如图 3 所示。历史边界条件 的长度*T*决定了"边值-初值"等效的精度。特别 地,对于热源运行在定出口温度模式的供热网络, 取管网最大时延作为历史边界条件的长度可将等 效误差完全消除。



图 3 "边值-初值"等效



基于上述等效,在计算时间区间[T_0, T_1]内的动 态潮流时,应取时间区间[T_0-T,T_1]内的边界条件进 行傅里叶变换,然后求解各频域分量对应的网络方 程得到频域潮流解,最后反变换回时域并叠加,得 到时间区间[T_0-T,T_1]内的动态潮流。如果 T_0 时刻的 动态潮流断面与给定初值足够接近,则时域潮流解 在[T_0, T_1]内的片段就是给定初始条件与边界条件 下的目标解;否则增大 T并重新计算。

这种用历史边值替代初值的等效方法在工程 上有较强的实用性。因为对于天然气网络和热力网 络,大部分工程现场并未配备齐全的量测,所以给 定准确的初始条件本就是困难的。相对地,给定准 确的历史边界条件(气井供气、热源出力、负荷消耗) 更加符合工程实际。

2.4 动态潮流计算的基值修正方法

在天然气网络的动态潮流方程中,动量守恒方 程是非线性的,文献[26]在推导气路时,于支路流 量基值处,采用了一阶泰勒展开进行线性化处理。 为提高该近似的精度,应使各支路流量基值处于动 态潮流中各支路流量波动区间的中心(不同于稳态 潮流计算,各支路流量是一个定值,线性化误差可 完全消除;动态潮流计算中,线性化误差只能尽可 能减小,无法消除)。基于这一思路,设计考虑基值 修正的动态潮流计算迭代方法如下:

1)按照历史数据或经验值给定一组支路流量 基值的初值 *x*₀。

2)按照当前支路流量基值 *x_k*,更新各个频率下的节点导纳矩阵与网络方程,解出频域潮流解之后,将其反变换回时域并叠加,得到形如(21)、(22)的时域潮流解。

3) 从时域潮流解中取出当前支路流量基值 x_k 下各支路流量的时间序列,并计算各支路流量的平 均值 \hat{x}_k 。计算两者距离以判断收敛:若 $\|\hat{x}_k - x_k\| \le \varepsilon$ (动态潮流计算中 ε 应稍大以避免计算震荡),则认为 当前基值足够准确,并结束迭代;否则,按照式(17) 更新基值,并回到2)。

供热网络的动态潮流方程本就是线性的,故不 涉及基值修正的问题。

3 算例分析

为验证基于统一能路的潮流计算方法,在7节 点天然气网络、6节点供热网络、华东某省天然气 网络、东北某省供热网络上进行了测试(包含稳态潮 流计算和动态潮流计算)。

所有算例测试均在 CPU 为 Intel i7-8650U、内存为 8GB 的个人电脑中完成,开发环境为 Python 3.7,频域各分量网络方程的计算未采用并行化。2 组小规模算例的数据与代码开源在文献[28]中。

3.1 7节点天然气网络

如图 4 所示, 7 节点天然气网络包含总长度为 130km 的 6 根管道, 在节点 4、7 处设有 2 个气源, 在节点 1、3、5 处设有 3 个负荷, 在节点 2 与节点 6 之间的支路上设有一个压气机。2 处气源均按照 定压力模式运行, 3 处负荷则按照定流量方式模拟。

根据文献[26]中的气路模型,将各天然气管道 建模为π型等值气路,将压气机建模为气压源,将



Fig. 4 7-Node natural gas network and

its gaseous circuit model

气源和负荷视为节点注入,得到该网络的气路模型 如图 4(b)所示。依据此气路图,可以方便地建立该 天然气网络的节点导纳矩阵。

在稳态潮流计算中,设置气源1保持出口压力 1MPa,气源2保持出口压力0.8MPa,3个负荷保 持流量5kg/s,压气机保持增压0.2MPa。对应气路 模型,即节点4、7是定压力节点;节点1、3、5 是注入为-5kg/s的定注入节点;节点2,6是零注 入的定注入节点。

给定各支路流速基值的初值均为 5m/s,收敛阈 值与修正步长分别设置为 10⁻³和 0.5。经 15 次迭代 之后,稳态潮流计算收敛,用时 0.06s。图 5 给出了 6 条支路流速基值的迭代过程(支路 1-2 和支路 5-6 曲线重合),以及流速基值与实际流速的失配误差收 敛曲线。从该图中可以观察到基于统一能路的天然



气网络稳态潮流计算表现出超线性收敛的特性,这 是由阻尼牛顿法的数学性质决定的。

稳态潮流计算得到定压力节点 4、7 的注入分 别为 7.12kg/s 和 7.88kg/s;定注入节点 1、2、3、5、 6 的压力分别为 0.851MPa、0.919MPa、0.925MPa、 0.651MPa、0.732MPa。节点 2 压力相对节点 6 压力 的增量略小于压气机增压,这部分损耗来自支路 6-2 的流动摩擦。

此外,测试了上述稳态潮流计算在不同更新步 长 *λ* 下的收敛速度与收敛性,表4给出了相应的测 试结果。其中,初值点远离潮流解指初始支路流速 基值均设置为 50m/s;初值点靠近潮流解指初始支 路流速基值均设置为 5m/s。

表 4 不同更新步长下的稳态潮流计算性能

 Tab.4
 Computational performance of steady energy flow calculation under different step sizes

迭代次数/计算时间	初值点靠近潮流解	初值点远离潮流解
<i>λ</i> =0.2	43/0.16s	54/0.19s
λ =0.4	20/0.08s	24/0.10s
λ =0.6	12/0.05s	14/0.05s
λ =0.8	7/0.03s	8/0.03s
$\lambda = 1.0$	6/0.03s	不收敛

在动态潮流计算中,保持气源1、负荷1、压 气机处于稳态运行,设置气源2进行1次压力调整, 设置负荷2、负荷3在±20%范围内以1小时为间隔 进行阶梯跃变。气源2、负荷2、负荷3的边界条 件如图6、图7中彩色虚线所示(出于作图需要,负 荷注入取了绝对值);网络的初始条件设置为稳态运 行断面;时间窗长度取为12小时。

为等效初始条件,在0时刻之前附加了6小时 的历史边界条件(因为初值是稳态断面,所以历史边 界条件取稳态激励)。从图6与图7中可以看出,由 于激励被周期延拓,-06:00时刻系统中各状态变量





图 7 动态潮流中的节点压力

Fig. 7 Node pressure in dynamic energy flow 并未处于稳态值;在-06:00 至-04:00 区间内,各状 态变量存在向稳态值迁移的过程。在历史边界条件 作用下,系统各状态变量在0时刻达到了预设的稳 态初值。

设定各支路流速基值的初值均为 5m/s,修正步 长固定为 0.6, 收敛阈值设定为 0.1, 在每轮迭代中 使用边界条件进行傅里叶分解之后的前 200 个频域 分量进行动态潮流计算。经6次迭代后计算收敛, 得到 2 个气源节点的注入和 3 个负荷节点的压力分 别如图 6、图 7 中的彩色实线所示。为体现精度, 使用时、空步长为 0.5s、1.25km 的有限差分方法进 行对比:有限差分方法得到的动态潮流解用黑色虚 线标于图 6 与图 7 中。观察到,基于统一能路计算 出来的曲线和有限差分方法计算出来的曲线几乎 完全重合,两者最大误差处的部分曲线放大于图6、 图 7 左上方的子图中。具体地,以有限差分解为基 准,所有状态变量的统一能路解的平均误差在 0.33%内;有限差分方法的用时为 48.72s,而统一 能路方法的 6 次迭代用时共计仅 1.89s。统一能路方 法在计算性能上的巨大优势来源于时域偏微分方 程向频域代数方程的化简^[26]。除了计算速度上的提 升,统一能路方法还避免了有限差分方法面临的差 分稳定性问题:当时、空步长不匹配(如 0.5s、1km) 时,有限差分计算会出现发散的问题;文献[27]推 导了有限差分方法在计算天然气网络动态潮流时, 其时、空步长应满足的稳定性关系。

上述精度的实现很大程度上归功于支路流速 基值的修正。图 8 用红色折线标出了 6 次迭代后各 支路流速的基值,用蓝色菱形标出了实际流速的均 值,两者是非常接近的,证明了基值修正方法的有 效性。此外,用盒图显示了各支路流速的时间序列 的统计特征(每个盒图从上到下的 5 条水平线依次



为最大值、75%分位数、中位数、25%分位数、最 小值)。可以直观地看出,即使是流速波动最为剧烈 的5号支路(节点5与节点6之间的支路),在50% 的时间内,支路流速处于基值±10%的范围内;在 100%的时间内,支路流速处于基值±20%的范围 内:这确保了线性化近似的精度。

3.2 6 节点供热网络

如图 9 所示,测试的供热网络包含对称的 6 节 点供水网和 6 节点回水网,单侧管道总长度为 19km。在节点 1、7 之间设有 1 处热源,在节点 6、 12,4、10、5、11 之间各设有 1 处热负荷;支路 2-6 上设有 1 个调节阀;支路 3-4、3-5 上各设有 1 个增压泵。热源运行在定出口压力、定出口温度的 运行模式;负荷处的流量由压力决定,换热功率给 定;调节阀运行在定开度模式;增压泵运行在定转



速模式。根据文献[27]中的水路模型与热路模型, 建立该供热网络的水路图和热路图,如图9下方所 示,依据其可方便地形成相关的网络矩阵。

在水力稳态潮流计算中,各支路流量基值的初 值均给定 50kg/s,并设置收敛阈值为 10⁻³,修正步 长为 0.8,经 9次迭代后计算收敛,共计用时 0.02s。 在图 10 中给出了供水网 5 条支路的流量基值迭代 过程,以及支路实际流量与基值之间的失配误差收 敛曲线(同样表现出超线性收敛)。在热力稳态潮流 计算中,仅单次线性代数方程组求解即完成计算, 用时小于 0.01s。





在动态潮流计算中,设置热源出口温度、负荷 换热功率(等价于供热工质换热前后的温差)按各种 形状波动,如图 11 所示。值得注意的是,图 11 给 出的是原始激励在傅里叶分解之后用前 300 个频域 分量恢复出来的波形,这和原始激励几乎是完全重 合的,表明了统一能路方法引入的频域截断误差是 可以忽略不计的。除上述边界条件外,设置网络运 行的初始条件为稳态断面;动态潮流的时间窗长度 取为 12 小时。为等效稳态断面的初始条件,在 0 时刻之前附加了 12 小时长度的历史边界条件(稳态 激励)。

在稳态水路计算结果的基础上,用 300 个频域 分量计算上述边界条件、初始条件下的动态潮流。 图 12 展示了供水网中支路 1-2、支路 3-5 和回水网 中支路 11-9、支路 8-7 的末端温度曲线。从图中可 以观察到,经过约9小时的历史边界条件作用,系 统各状态变量达到稳态初值,这一时间实际上对应 了管网的最大时延。供水网中仅发生热水的分流, 故各支路末端温度的波形保持了热源激励的波形, 仅发生了时延与热损,体现为原波形向右下方的移











动:以支路 1-2 末端温度的波形为例,是热源激励 波形向右平移 67min,向下平移 2 得到的;回水 网中由于发生多次热水的汇流,以及相应的混温过 程,所以支路末端波形相对各激励波形发生了较显 著的变化。

最后,使用时、空步长为1s、10m的有限差分 方法进行了精度校验,相应的解在图12中用黑色 虚线标出,这和统一能路计算出来的曲线两两重 合。具体地,以有限差分解为基准,由统一能路方 法计算的各状态变量潮流解的平均误差在0.29%以 内,这样的精度是符合工程需要的。在计算效率方 面,有限差分方法用时363.27s,而统一能路方法仅 用时1.03s。供热网络动态潮流计算的有限差分方法 同样存在涉及时、空步长选取的计算稳定性问题, 当二者不匹配时会导致有限差分计算出现发散的 问题;文献[30]基于 Courant-Friedrichs-Levy 稳定性 准则,给出了有限差分方法在计算供热网络动态潮 流时,时、空步长应满足的稳定性关系。 第15期

4829

3.3 大规模算例

为验证本文方法在更大规模系统上的有效性, 在华东某省天然气网络和东北某省供热网络上对 原始潮流方程进行了基于统一能路的稳态、动态潮 流计算。

华东某省天然气网络算例包括 150 个节点与 149 条支路,管道全长 1653km。在收敛阈值为 10⁻³、 修正步长为 0.6 的设定下,稳态潮流计算经 25 次迭 代后收敛,用时共计 0.79s。在收敛阈值为 0.1、修 正步长为 0.6、历史边界条件长度为 12 小时、频域 分量总数为 200 的设定下,动态潮流计算经 6 次迭 代后收敛,用时共计 42.53s。

东北某省供热网络算例包括 138 个节点和 150 条支路,管道全长 92.72km。在收敛阈值为 10⁻³、 修正步长为 0.3 的设定下,水力稳态潮流经 38 次迭 代后收敛,用时共计 0.78s 热力稳态潮流无需迭代, 单次计算共用时 0.03s。在历史边界条件长度为 12 小时、频域分量总数为 300 的设定下,热力动态潮 流计算共用时 16.65s。

4 结论

本文基于统一能路理论,提出了天然气网络与 供热网络的稳态、动态潮流计算方法,分析了其中 相关的数学问题。为提高该方法的计算精度,补充 了基值修正的迭代方法;为隐式地给定初始条件, 应用了"初值-边值"等效的方法。相关结论如下:

1)基于统一能路的潮流计算方法统一了不同能 源网络的潮流计算,体现为相同的数学模型与计算方 法,有利于综合能源系统中不同学科知识的融合。

2)基于统一能路的潮流计算方法统一了同一 能源网络的稳态潮流计算与动态潮流计算,将二者 归结为不同数量频域分量网络方程的求解,有利于 相关工作的复用。

3)基于统一能路的潮流计算方法在满足工程 精度需要的前提下,显著提升了动态潮流计算的效 率,并避免了传统方法面临的差分稳定性问题。此 外,该方法天然的可并行性有助于计算速度的进一 步提升。

基于线性时不变电路的分析方法,本文中供热 网络的潮流计算是在"质调节"工况假设下完成的, 将统一能路理论扩展到供热网络在"量调节"工况 下的潮流计算将是下一步的研究内容。

致 谢

感谢清华大学工程力学系陈群教授在讨论中

针对供热网络运行建模提出的有益建议。

参考文献

- 胡枭,尚策,程浩忠,等.综合能源系统能流计算方法 述评与展望[J/OL].电力系统自动化.https://kns.cnki. net/kcms/detail/32.1180.TP.20200430.2110.006.html. Hu Xiao,Shang Ce, Cheng Haozhong, et al. Review and prospect of energy flow calculation methods for integrated energy system[J/OL]. Automation of Electric Power Systems. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.118 0.TP. 20200430.2110.006.html(in Chinese).
- [2] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析[M].2版. 北京:清华大学出版社,2007:167-208.
 Zhang Boming, Chen Shousun, Yan Zheng. Advanced electricity network analysis[M].2nd ed.Beijing :Tsinghua University Press,2007:167-208(in Chinese).
- [3] Abeysekera M, Wu Jianzhong, Jenkins N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas[J]. Applied Energy, 2016, 164:991-1002.
- [4] Cavalieri F . Steady-state flow computation in gas distribution networks with multiple pressure levels[J]. Energy, 2017, 121: 781-791.
- [5] Dorao C A , Fernandino M . Simulation of transients in natural gas pipelines[J] . Journal of Natural Gas Science and Engineering , 2011 , 3(1) : 349-355 .
- [6] Hafsi Z ,Elaoud S ,Mishra M .A computational modelling of natural gas flow in looped network : effect of upstream hydrogen injection on the structural integrity of gas pipelines[J] . Journal of Natural Gas Science and Engineering , 2019 , 64 : 107-117 .
- [7] Stevanovic V D , Prica S , Maslovaric B , et al . Efficient numerical method for district heating system hydraulics
 [J] . Energy Conversion and Management , 2007 , 48(5) : 1536-1543 .
- [8] Yan Aibin , Zhao Jun , An Qingsong , et al . Hydraulic performance of a new district heating systems with distributed variable speed pumps[J] . Applied Energy , 2013 , 112 : 876-885 .
- [9] Wang Jinda , Zhou Zhigang , Zhao Jianing . A method for the steady-state thermal simulation of district heating systems and model parameters calibration[J] . Energy Conversion and Management , 2016 , 120 : 294-305 .
- [10] Stevanovic V D , Zivkovic B , Prica S , et al . Prediction of thermal transients in district heating systems[J] . Energy Conversion and Management , 2009 , 50(9) : 2167-2173 .
- [11] Zhou Shoujun, Tian Maocheng, Zhao Youen, et al. Dynamic modeling of thermal conditions for hot-water district-heating networks[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(4): 531-537.
- [12] Pan Zhaoguang , Guo Qinglai , Sun Hongbin . Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multienergy flow[J] . Applied Energy , 2016 , 167 : 230-243 .
- [13] 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 , $27(4):2156{\text -}2166$.

[14] 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):1293-1304.

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) : 1293-1304(in Chinese) .

- [15] 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.
- [16] Massrur H R ,Niknam T ,Aghaei J ,et al .Fast decomposed energy flow in large-scale integrated electricity – gas – heat energy systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2018 , 9(4) : 1565-1577 .
- [17] 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) .

- [18] Whalley R ,Abdul-Ameer A .Energy-efficient gas pipeline transportation[J] . Systems Science & Control Engineering : An Open Access Journal , 2014 , 2(1) : 527-540 .
- [19] Liu Xuezhi , Wu Jianzhong , Jenkins N , et al . Combined analysis of electricity and heat networks[J] . Applied Energy , 2016 , 162 : 1238-1250 .
- [20] 陈群,郝俊红,陈磊,等.电-热综合能源系统中能量的整体输运模型[J].电力系统自动化,2017,41(13): 7-13,69.
 Chen Qun, Hao Junhong, Chen Lei, et al. Integral transport model for energy of electric thermal integrated

transport model for energy of electric-thermal integrated energy system[J] . Automation of Electric Power Systems , 2017 , 41(13) : 7-13 , 69 (in Chinese) .

- [21] Hao Ling , Xu Fei , Chen Qun , et al . A thermal-electrical analogy transient model of district heating pipelines for integrated analysis of thermal and power systems[J]. Applied Thermal Engineering , 2018 , 139 : 213-221.
- [22] Lan Tian, Strunz K. Modeling of the enthalpy transfer using electric circuit equivalents :theory and application to transients of multi-carrier energy systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1720-1730.
- [23] 陈皓勇,文俊中,王增煜,等.能量网络的传递规律与网络方程[J].西安交通大学学报,2014,48(10):66-76.
 Chen Haoyong, Wen Junzhong, Wang Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J].
 Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014,48(10):

66-76(in Chinese).

 [24] 葛海麟,陈皓勇,文俊中,等.基于能量网络理论的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(in Chinese).

[25] 陈皓勇,李明,邱明,等.时变能量网络建模与分析[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(3):243-254.
Chen Haoyong, Li Ming, Qiu Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network[J]. Scientia Sinica Technologica,2019,49(3):243-254(in Chinese).

[26] 陈彬彬,孙宏斌,陈瑜玮,等.综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J].中国电机工程学报,2020,40(2):436-443.
 Chen Binbin, Sun Hongbin, Chen Yuwei, et al. Energy

circuit theory of integrated energy system analysis(I) : gaseous circuit[J] .Proceedings of the CSEE ,2020 ,40(2) : 436-443(in Chinese) .

- [27] 陈彬彬,孙宏斌,尹冠雄,等.综合能源系统分析的统一能路理论(二):水路与热路[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2133-2142.
 Chen Binbin,Sun Hongbin,Yin Guanxiong, et al .Energy circuit theory of integrated energy system analysis(II): hydraulic circuit and thermal circuit[J].Proceedings of the CSEE,2020,40(7):2133-2142(in Chinese).
- [28] 陈彬彬 . 算例数据与源码[CP/OL] . [2020-04-22] . https://github.com/AsprinChina/EnergyCircuitTheory-EnergyFlowCalculation .
- [29] 乔铮.大规模电-气耦合系统多时间尺度安全预警与控制[D].北京:清华大学,2020.
 Qiao Zeng. Multi-timescale security warning and control of large-scale electricity and natural gas coupled system
 [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020(in Chinese).
- [30] Duquette J , Rowe A , Wild P . Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow[J]. Applied Energy , 2016, 178: 383-393.



在线出版日期:2020-07-13。 收稿日期:2020-05-07。 作者简介:

陈彬彬(1996),男,博士研究生,研究 方向为多能流系统的综合能量管理, cbb18@mails.tsinghua.edu.cn;

Pホイヤシイヤシ

孙宏斌(1969),男,博士,教授,博士 生导师,IEEE Fellow,教育部长江学者, 研究方向为多能流系统的综合能量管理、 电力系统信息论和无功电压优化控制, shb@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Energy Circuit Theory of Integrated Energy System Analysis (III): Steady and Dynamic Energy Flow Calculation

CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, GUO Qinglai, QIAO Zheng

(Tsinghua University)

KEY WORDS: integrated energy system; energy-circuit theory; energy flow calculation; natural gas network; heating network

Energy flow calculation is a basic application for energy network analysis. Nowadays, electricity networks, natural gas networks, and heating networks have established and developed but not unified models and methods for energy flow calculation respectively, which brings challenges to the development of theory and applications for integrated energy system analysis. Based on the energy-circuit theory, a novel energy flow calculation method is proposed in this paper, aiming at (1) unifying the models and methods for energy flow calculation of different energy networks, (2) unifying the models and methods for steady energy flow calculation and dynamic energy flow calculation, and (3) improving computational performance of dynamic energy flow calculation.

First, 0-frequency network equations derived by the energy-circuit theory are employed to characterize the steady energy flows of natural gas networks and heating networks, which have a unified form for different energy networks. Like solving the network equation of electricity network, a unified solving method is provided and the singularity of admittance matrices is analyzed. To improve the solving accuracy, an iterative strategy is proposed to correct the base value, which is proved to be equivalent to Newton's method or damped Newton's method under different step sizes.

To expand the energy-circuit method to calculate dynamic energy flow, the network encourages are all decomposed into multiple sine components with different frequencies by Fourier transform. For each sine component, the corresponding network equation is solved to obtain the response, whose solving method is similar to that of steady energy flow calculation. Finally, all responses of different components are mapped into time domain through inverse Fourier transform and then superposed together to recover the original response, i.e., the dynamic energy flow wanted. The above process is illustrated in Fig. 1.

An equivalent method from boundary conditions to initial conditions is employed to set initial conditions in



Fig. 1 Dynamic energy flow calculation based on energy circuit an implicit manner, as demonstrated in Fig. 2. In addition, the iterative strategy for correcting the base value is applied to realize a higher accuracy.



Fig. 2 "Boundary Condition – Initial Condition" equivalence

To verify the above energy-circuit-based energy flow calculation method, a 7-node natural gas network, a 6-node heating network, an actual natural gas network in Eastern China, and an actual heating network in Northern China are tested for both steady and dynamic energy flow calculation.

Regarding the steady energy flow calculation, the proposed method converges at the accurate solution after several iterations, and the mismatch error shows a characteristic of super-linear convergence. Regarding the dynamic energy flow calculation, the proposed method maintains the average error of less than 1% in all cases, compared to the finite difference method (FDM) with spatial and temporal step sizes small enough, while the computational time reduced for more than tens of times and even hundreds of times.