

多能源网络的广义电路分析理论 ——(二)网络模型

杨经纬^{1,2}, 张 宁^{1,2}, 康重庆^{1,2}

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084;
2. 清华大学电机与应用电子技术系, 北京市 100084)

摘要: 以电力、热力、燃气网络为代表的多能源网络是世界上最为复杂的物理网络之一,是连接能源生产和消费的重要传输环节,也是多能源系统耦合的重要途径。文中借鉴电力系统分析中“矩阵化”与“外端口等值”的思想,基于多能源网络支路层的广义电路模型,提出了网络层的广义电路分析理论。首先,针对多能源网络高维动态特性难以描述的问题,以支路广义电路模型为基础提出了拉普拉斯域通用多能源网络建模方法,并建立了矩阵化的紧凑模型。其次,提出了多能源网络的外端口等值方法,等效地将复杂的内部信息转换为等值的边界条件,既能解决多能源网络的联合分析难题,同时又很好地保护各能源系统数据信息隐私。最后,分别结合热力网络与燃气网络的实际特点,提出了热力网络与燃气网络的全网络广义电路模型与边界等值方法。

关键词: 多能源系统; 广义电路; 能源互联网; 热力网络; 燃气网络; 电热耦合; 电气耦合

0 引言

多能源系统的全网络特性是各个支路传输特性的高维组合,建立多能源网络的传输特性模型与分析方法是多能源系统相关研究的重要理论任务,是支路层广义电路分析理论^[1]的自然延伸与拓展。从电力系统的运行决策视角来看,燃气网络(下文简称气网)和热力网络(下文简称热网)等多能源系统网络增加了电力系统的实际决策约束,但其慢动态特性也提供了额外的灵活性资源。通过多能源系统网络模型理解电力系统决策的真实边界,感知电力系统内部决策对于外部能源系统的影响至关重要。

然而,多能源网络特性的表征面临2个难题。一方面,多能源网络包含诸多支路与节点,每一条支路和每一个节点都需要复杂的偏微分方程描述传输特性,缺乏代数矩阵描述的标准化网络方程,不便于计算机建模实现;另一方面,仅建立全网络动态特性模型仍难以满足多能源系统协同决策的要求。目前,世界各国的电力、热力、燃气系统多为分立决策而非全局优化,由支路模型构成的多能源系统全网

络模型包含各个能源系统的具体参数和详细信息,其他系统的决策主体难以获得;即使能够掌握也将大大增加计算量,不利于实际的运行优化决策。因此,建立能够考虑动态特性的多能源网络等值端口模型,将复杂的内部信息转换为等值的边界条件,可以为多能源系统协同优化奠定网络传输动态特性部分的描述基础,可以为多能源协同决策增加类似于电力系统转移分布因子的实际工具,具有重要的理论价值与现实意义。

目前学者对于多能源网络分析建模的研究主要集中于能量流的计算。在热网模型方面,文献[2-3]建立了稳态热网方程,考虑了热网损耗但忽略了热网传输时延。文献[4-5]提出了有限元法(element method),考虑热网动态特性,即将偏微分方程时空离散化为代数方程组,结合相应的边界条件、初值条件,采用高斯-赛德尔迭代等方法直接求解代数方程组获得热力流的动态传输过程。文献[6-7]则提出了单元表征法(node method)描述热力流动态特性,将热力流空间离散为若干互相独立的“水包”,利用管道入口水包序列的温度组合表征管道出口的温度。值得注意的是,有限元法和单元表征法中的支路模型均较为复杂,难以形成代数矩阵化描述的标准化网络方程。在气网模型方面,文献[8-9]提出了稳态气网模型的核心方程,但忽略了气网中燃气流的动态特性。文献[10-11]研究了燃气流的暂

收稿日期: 2020-02-09; 修回日期: 2020-03-24。

上网日期: 2020-04-09。

国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1766212); 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(51620105007)。

态特性,并利用空间和时间有限元离散化的方法将偏微分方程转化为代数方程组进行分析;文献[12]研究了燃气流动态传输过程带来的储气效益(line-pack),将燃气管道的储气量作为独立变量进行建模。同样的,对于燃气动态特性的研究多聚焦于偏微分方程差分得到的支路方程,缺乏矩阵化描述的标准网络方程。

此外,部分学者研究了热网与气网的网络简化分析方法。文献[13]基于单元表征法提出了一种降低网络拓扑复杂度的热网简化方法,将原始复杂网络简化为树状简单支路,简化热网的分析过程。文献[14]采用变换的思想将辐射状热网变换为星形热网,从而可以直接得到热力系统的源-荷函数关系,并结合热力负荷惯性提出了热网的惯性模型。文献[15]提出了一种线性敏感因子矩阵的计算方法,该矩阵可表征稳态下气网节点气压和流量注入的关系。文献[16-17]则研究了燃气管道的动态特性表征,针对状态转移方程进行简化,提出了燃气管道的近似状态转移方程与气网的二端口模型。然而,该方法处理传递函数涉及空间和时间离散化,难以使用显式的数学公式表示气网的边界等值信息。文献[18-19]提出了气网与热网的动态特性建模与等值方法,但尚未从统一建模的高度进行分析和抽象。

本文作为多能源网络的广义电路分析理论姐妹篇中的第2篇,基于支路层拉普拉斯域集中参数广义电路模型^[1],进一步提出了网络层的广义电路分析理论。这里“广义”有2层含义:①“模型”方面的广义,指多能源网络并非实际电路网络,但能够比拟复杂电路网络,转化为广义电路网络开展分析;②“方法论”方面的广义,指该理论借鉴类比了电力网络(下文简称电网)的特有分析方法,例如矩阵化表征和外端口等值等方法,将电网分析理论拓展到多能源网络分析领域。本文首先就第一、二类边界条件下的多能源网络全网络动态特性建模与等值方式进行了分析,分别提出了基于矩阵表示的热网与气网的全网络广义电路模型并解析化地给出了边界等值方程。

1 基于矩阵的多能源网络广义电路建模

1.1 第一类边界条件

在第一类边界条件下,支路方程可以等效为 π 形等值电路,其支路方程为:

$$\zeta_1(s) = \zeta_b(s) + \psi_1(s)y_s \quad (1)$$

$$\zeta_2(s) = \zeta_b(s) - \psi_2(s)y_s \quad (2)$$

$$\zeta_b(s) = y_b(\psi_1(s) - \psi_2(s)) \quad (3)$$

式中: $\zeta_1(s)$ 和 $\zeta_2(s)$ 分别为 π 形等值电路首端与末端的广延量; $\psi_1(s)$ 和 $\psi_2(s)$ 分别为线路首端和末端的强度量值; $\zeta_b(s)$ 为支路广延量; y_s 为支路的单侧接地导纳; y_b 为支路导纳。

对于此类 π 形电路组成的网络,不妨设节点数为 N ,支路数为 M ,节点 i 的接地导纳为 $y_{s,i}$,支路 $i-j$ 的导纳为 $y_{b,ij}$ 。其中节点的接地导纳是与该节点相连支路的单侧接地导纳之和,支路导纳是支路阻抗的倒数。为了方便后续矩阵描述,令向量 $\mathbf{y}_s = (y_{s,i})_{N \times 1}$, $\mathbf{y}_b = (y_{b,ij})_{M \times 1}$ 分别表示所有节点的接地导纳和所有支路的支路导纳;令 $\boldsymbol{\zeta}_b = (\zeta_{b,ij})_{M \times 1}$ 表示支路广延量向量; $\boldsymbol{\zeta} = (\zeta_i)_{N \times 1}$, $\boldsymbol{\psi} = (\psi_i)_{N \times 1}$ 分别表示节点广延量注入量和强度量向量。

本文使用节点-支路关联矩阵来表示此类复杂网络的拓扑结构,关联矩阵 $\mathbf{A} = (A_{ij})_{N \times M}$ 的定义如下。

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{支路的起始节点是 } i \\ -1 & \text{支路的终端节点是 } i \\ 0 & \text{支路与节点无关联} \end{cases} \quad (4)$$

基于关联矩阵,多能源系统网络的节点平衡方程如式(5)所示,即节点广延量注入值等于相连支路的广延量与该节点接地支路广延量之和,其中,符号“ \cdot ”表示向量的哈达玛积(Hadamard product)。

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\zeta}_b(s) + \boldsymbol{\psi}(s) \cdot \mathbf{y}_s = \boldsymbol{\zeta}(s) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{y}_s = (y_v)_{|V| \times 1}$ 为气网节点 v 的等效接地导纳。

支路特性方程同样可以写成矩阵形式,即

$$\mathbf{y}_b \cdot \mathbf{A}^T \boldsymbol{\psi}(s) = \boldsymbol{\zeta}_b(s) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{y}_b = (y_e)_{|E| \times 1}$ 为气网支路 e 的等效导纳。

合并式(5)和式(6)可得:

$$\mathbf{A}\mathbf{y}_b \cdot \mathbf{A}^T \boldsymbol{\psi}(s) + \boldsymbol{\psi}(s) \cdot \mathbf{y}_s = \boldsymbol{\zeta}(s) \quad (7)$$

令

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\text{diag}(\mathbf{y}_b)\mathbf{A}^T + \text{diag}(\mathbf{y}_s) \quad (8)$$

则式(7)可以写为:

$$\mathbf{Y}\boldsymbol{\psi}(s) = \boldsymbol{\zeta}(s) \quad (9)$$

其中, \mathbf{Y} 为 $N \times N$ 矩阵,拥有与电力系统节点导纳矩阵相同的结构,其中第 i 行第 j 列的元素为 $y_{s,i} + \sum_{j \neq i} y_{b,ij}$,第 i 行第 $j(j \neq i)$ 列的元素为 $-y_{b,ij}$,具体结构见附录A式(A1)。不同之处在于,矩阵 \mathbf{Y} 的元素含有拉普拉斯算子 s ,电力系统节点导纳矩阵的元素为复数常数。为了便于描述,后文将统一称 \mathbf{Y} 为能源网络的节点导纳矩阵。

式(9)即为第一类边界条件下多能源系统全网络的广义电路模型,描述了整个网络中各个节点强

度量与节点注入广延量的关系,反映了多能源网络的动态传输特性。由于方程是拉普拉斯域中的模型,因此求解后需要做拉普拉斯反变换,将其转化为时域中的结果使用,即

$$\mathcal{L}^{-1}(Y\psi(s)) = \mathcal{L}^{-1}(\zeta(s)) \quad (10)$$

式中: $\mathcal{L}^{-1}(\cdot)$ 为拉普拉斯反变换算子。

1.2 第二类边界条件

在第二类边界条件下,支路方程可以等效为有损时延电路(阻抗匹配情形)。在这种情况下,支路的末端广延量和强度量均为始端变量与损耗项、时延项的函数。与第一类边界条件下的模型不同,第二类边界条件下的支路末端强度量仅为关于首端强度量的函数,因此在多条支路末端的交汇节点强度量会发生改变,即每条支路末端相异的强度量变为交汇节点唯一的强度量,这一点使得基于强度量的建模比较困难。但是注意到第二类边界条件下强度量与广延量有严格的数学函数关系,而广延量仅须满足支路特性方程和节点平衡方程,在支路相交处不会发生突变,因此可取广延量作为模型变量对全网络进行建模。此外,第二类边界条件下支路首末端广延量的关系与广延量传输方向直接相关,因此需要在建模时考虑根据每一条支路广延量的传输方向。

根据网络结构和支路广延量传输方向定义有向图 $G=(V,E)$,其中 V 为节点集合, E 为支路集合。由于第二类边界条件下广延量的时延和损耗与传输方向直接关联,因此定义支路始端广延量向量为 ζ_e^{in} ,末端广延量向量为 ζ_e^{out} ,节点注入的广延量为 ζ 。定义 Ω_v^+ 和 Ω_v^- 分别表示从节点 $v \in V$ 流出和流入的支路集合。根据广延量流出/流入节点的关系定义节点-支路关联矩阵 $A^+ = (a_{ve}^+)_{|V| \times |E|}$ 和 $A^- = (a_{ve}^-)_{|V| \times |E|}$,其元素分别为:

$$a_{ve}^+ = \begin{cases} 1 & e \in \Omega_v^+ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$a_{ve}^- = \begin{cases} 1 & e \in \Omega_v^- \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

定义支路特性矩阵 Z 表征支路始端、终端广延量的关系如式(14)所示。其中系数 z_e 表示每一条支路损耗和时延的拉普拉斯算子 s 的常数。

$$Z = \text{diag}((z_e)_{|E| \times |E|}) \quad \forall e \in E \quad (13)$$

定义广延量分布系数矩阵 D 如式(14)所示。其中系数 d_e ($0 \leq d_e \leq 1$)表示支路 e 的始端广延量占同节点流出的总广延量之比。

$$D = \text{diag}((d_e)_{|E| \times |E|}) \quad \forall e \in E \quad (14)$$

基于支路特性矩阵,支路始末端的广延量关系可表示为:

$$\zeta_e^{\text{out}}(s) = Z\zeta_e^{\text{in}}(s) \quad (15)$$

节点平衡方程可以表示为:

$$\zeta_e^{\text{in}}(s) = D(A^+)^T(A^-\zeta_e^{\text{out}}(s) + \zeta(s)) \quad (16)$$

将式(15)代入式(16),用 ζ_e^{out} 代替 ζ_e^{in} 可得:

$$\zeta_e^{\text{out}}(s) = Y\zeta(s) \quad (17)$$

其中

$$Y = (Z^{-1} - D(A^+)^T A^-)^{-1} D(A^+)^T \quad (18)$$

式(17)即为第二类边界条件的多能源系统全网络动态特性方程。由于方程是拉普拉斯域中的模型,因此求解后需要做拉普拉斯反变换,将其转化为时域中的结果使用,即

$$\mathcal{L}^{-1}(\zeta_e^{\text{out}}(s)) = \mathcal{L}^{-1}(Y\zeta(s)) \quad (19)$$

需要强调的是,本章仅研究了统一数学方程下单层网络的建模,实际多能源网络的建模与各个系统网络特点相关,后文将具体阐述。

2 全网络广义电路模型的边界等值方法

根据网络节点的重要性与物理属性划分,全网络模型可以降低至仅包含关键节点的边界等值模型。本文将系统节点分为2类。

1)关键边界节点集合 B 。此类节点的广延量和强度量变化对该系统或与之耦合的其他系统较为关键,例如电力系统中连接联络线的母线、气网中燃气机组所在节点等。

2)非关键节点集合 I 。此类节点为除关键边界节点以外的系统节点,可结合具体系统特性和应用需求进一步划分。例如根据是否与关键节点相连划分,或强度量/广延量是否恒定划分等。

根据关键边界节点与非关键内部节点的划分,全网络广义电路模型方程式(9)与式(17)中的矩阵 Y 可相应地进行分块,然后利用矩阵运算、高斯消元等方法生成仅包含关键边界节点的全网络广义电路模型的边界等值方程。

2.1 第一类边界条件下的边界等值方法

将节点强度量和广延量注入值按照节点类型划分为 $\psi_B(s)$, $\psi_I(s)$ 和 $\zeta_B(s)$, $\zeta_I(s)$,式(9)可写为:

$$\begin{bmatrix} Y_{BB} & Y_{BI} \\ Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_B(s) \\ \psi_I(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_B(s) \\ \zeta_I(s) \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: Y_{BB} , Y_{BI} , Y_{IB} , Y_{II} 为 Y 的分块矩阵。

利用高斯消元法可得:

$$(Y_{BB} - Y_{BI}Y_{II}^{-1}Y_{IB})\psi_B(s) = \zeta_B(s) - Y_{BI}Y_{II}^{-1}\zeta_I(s) \quad (21)$$

2.2 第二类边界条件下的边界等值方法

将节点广延量注入按照节点类型划分为 $\zeta_B(s)$ 和 $\zeta_I(s)$,将支路末端广延量划分为 $\zeta_{e,B}^{\text{out}}(s)$ 和 $\zeta_{e,I}^{\text{out}}(s)$,分别表示连接边界节点的支路以及无边界节点无连接的支路,则式(17)可写为:

$$\begin{bmatrix} Y_{BB} & Y_{BI} \\ Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_B(s) \\ \zeta_I(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{e,B}^{\text{out}}(s) \\ \zeta_{e,I}^{\text{out}}(s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

同理可得:

$$(Y_{BB} - Y_{BI}Y_{II}^{-1}Y_{IB})\zeta_B(s) = \zeta_{e,B}^{\text{out}}(s) - Y_{BI}Y_{II}^{-1}\zeta_{e,I}^{\text{out}}(s) \quad (23)$$

同样需要强调的是,本章仅研究了统一数学方程下单层网络的边界等值方法,实际多能源网络的边界等值与各个系统网络特点以及与其他系统的边界耦合特性相关,后文将具体阐述。

3 热网广义电路模型与分析方法

3.1 热网基本结构

热网是供水网与回水网耦合的双层网络。供水网温度较高,将热量从热源输送至热负荷,负荷消耗热量后,温度较低的工质进入回水网,返回热源再次加热并进入供水网。供水管道与回水管道一般材质相同、平行埋置,在研究中可认为两者的管道参数相同、拓扑结构对称。热网中的节点和支路的一般结构如图1所示,图中, $\varphi_e^{s,\text{in}}$ 和 $\varphi_e^{s,\text{out}}$ 分别为供水网支路 e 始端和终端热流功率; $\varphi_v^{s,g}$ 和 $\varphi_v^{s,d}$ 分别为注入和流出供水网节点 v 的热流功率; φ_v^g 和 φ_v^d 分别为节点 v 处热源和热负荷功率; $\varphi_v^{r,g}$ 和 $\varphi_v^{r,d}$ 分别为流回和注入回水网节点 v 的热流功率; $\varphi_e^{r,\text{in}}$ 和 $\varphi_e^{r,\text{out}}$ 分别为回水网支路 e 始端和终端热流功率;每个节点的热源与热负荷值可以为0。

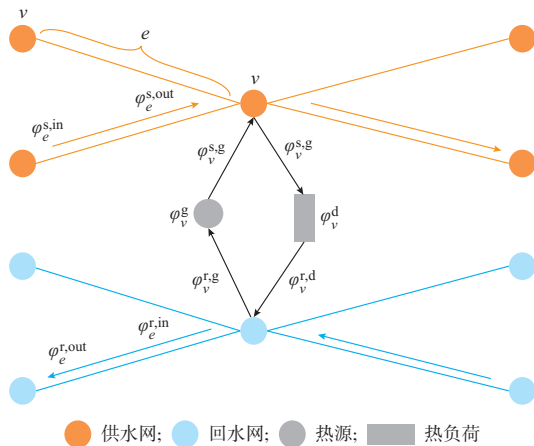


图1 热网中节点和支路的一般结构与相关变量
Fig. 1 General structure and relevant variables of nodes and branches in heat network

定义有向图 $G=(V,E)$ 表示供水网的拓扑,其中,有向图的方向由质调节模式下的水流方向确定。由于供水网和回水网完全镜像,因此同样可以用 G 表示回水网结构。

下文以第二类边界条件下通用网络建模方法为基础,结合热网的双层耦合网络特性,推导矩阵表达的热网全网络广义电路模型。

首先,定义供水网和回水网的节点-支路矩阵来描述网络的拓扑结构。对于供水网,根据工质的流动方向按照式(11)和式(12)定义节点-支路关联矩阵 $A^{s+}=(a_{ve}^{s+})_{|V|\times|E|}$ 和 $A^{s-}=(a_{ve}^{s-})_{|V|\times|E|}$ 。由于回水网与供水网完全镜像,拓扑一致,仅工质流动方向相反,因此回水网节点-支路关联矩阵分别为 $A^{r+}=A^{s-}$ 和 $A^{r-}=A^{s+}$ 。

根据热力流支路特性,定义热网支路特性矩阵 Z 为:

$$Z = \text{diag} \left(\exp \left(- \frac{\lambda_e + c\rho A_e s}{cm_e} L_e \right) \right)_{|E|\times|E|} \quad \forall e \in E \quad (24)$$

式中: λ_e 为支路 e 的管道导热系数; c 为工质比热容; ρ 为工质密度; A_e 为支路 e 的管道横截面积; L_e 为支路 e 的管道长度; m_e 为支路 e 的质量流量。

可以看到,支路矩阵的对角元素是包含拉普拉斯算子 s 的常数,其描述了支路热力流的损耗和时延,即支路末端热流功率与首端热流功率比为 $\exp(-\lambda_e L_e / (cm_e))$,支路时延为 $(\rho A_e / m_e) L_e$ 。

由于热网中不同支路、不同温度的工质在汇入节点处经过混合得到唯一节点温度,所以流出节点各支路水温一致,热流功率根据各支路质量流量按比例分配,据此定义供水网与回水网的分配系数矩阵分别为:

$$D_1^s = \text{diag} \left(\frac{m_e}{m_v^d + \sum_{e \in \Omega_v^+} m_e} \right)_{|E|\times|E|} \quad \forall e \in E \quad (25)$$

$$D_2^s = \text{diag} \left(\frac{m_v^d}{m_v^d + \sum_{e \in \Omega_v^+} m_e} \right)_{|V|\times|V|} \quad \forall v \in V \quad (26)$$

$$D_1^r = \text{diag} \left(\frac{m_e}{m_v^g + \sum_{e \in \Omega_v^+} m_e} \right)_{|E|\times|E|} \quad \forall e \in E \quad (27)$$

$$D_2^r = \text{diag} \left(\frac{m_v^g}{m_v^g + \sum_{e \in \Omega_v^+} m_e} \right) \quad \forall v \in V \quad (28)$$

式中： D_1^s 和 D_1^r 分别为供水网和回水网每个节点流向后继支路的热流功率占比； D_2^s 和 D_2^r 分别为供水网中每个节点流向负荷的热流功率占比和回水网中每个节点流向热源的热流功率占比； m_v^d 和 m_v^g 分别为节点 v 处经过负荷与热源的质量流量。

3.2 热网全网络广义电路模型

首先,推导矩阵化热力网络广义电路模型,则表征支路热损耗和时延特性的方程为:

$$\varphi^{s,\text{out}}(s) = Z\varphi^{s,\text{in}}(s) \quad (29)$$

$$\varphi^{r,\text{out}}(s) = Z\varphi^{r,\text{in}}(s) \quad (30)$$

式中： $\varphi^{s,\text{out}} = (\varphi_e^{s,\text{out}})_{|E| \times 1}$ ； $\varphi^{s,\text{in}} = (\varphi_e^{s,\text{in}})_{|E| \times 1}$ ； $\varphi^{r,\text{out}} = (\varphi_e^{r,\text{out}})_{|E| \times 1}$ ； $\varphi^{r,\text{in}} = (\varphi_e^{r,\text{in}})_{|E| \times 1}$ 。

供水网和回水网由各个节点的热负荷、热源产生直接耦合,其中供水网工质经热负荷放热后流入回水网,回水网工质经热源加热后流入供水网,数学关系如下。

$$\varphi^g(s) = \varphi^{s,g}(s) - \varphi^{r,g}(s) \quad (31)$$

$$\varphi^d(s) = \varphi^{s,d}(s) - \varphi^{r,d}(s) \quad (32)$$

式中： $\varphi^g = (\varphi_v^g)_{|V| \times 1}$ ； $\varphi^d = (\varphi_v^d)_{|V| \times 1}$ ； $\varphi^{s,g} = (\varphi_v^{s,g})_{|V| \times 1}$ ； $\varphi^{s,d} = (\varphi_v^{s,d})_{|V| \times 1}$ ； $\varphi^{r,g} = (\varphi_v^{r,g})_{|V| \times 1}$ ； $\varphi^{r,d} = (\varphi_v^{r,d})_{|V| \times 1}$ 。

支路热流功率在节点处满足能量功率平衡定律,即汇入节点的热量与流出节点的热量相等。结合热网节点温度混合特性,进一步得到支路热流功率的数学关系如下。

$$\varphi^{s,\text{in}}(s) = D_1^s (A^{s+})^T (A^{s-} \varphi^{s,\text{out}}(s) + \varphi^{s,g}(s)) \quad (33)$$

$$\varphi^{s,d}(s) = D_2^s (A^{s-} \varphi^{s,\text{out}}(s) + \varphi^{s,g}(s)) \quad (34)$$

$$\varphi^{r,\text{in}}(s) = D_1^r (A^{r+})^T (A^{r-} \varphi^{r,\text{out}}(s) + \varphi^{r,d}(s)) \quad (35)$$

$$\varphi^{r,g}(s) = D_2^r (A^{r-} \varphi^{r,\text{out}}(s) + \varphi^{r,d}(s)) \quad (36)$$

式(29)一式(36)即为基于矩阵表示的热力系统全网络广义电路模型。

3.3 热网换热器建模

一次热网通过换热器在各个节点与热源和负荷发生热交换。本节以最常见的对流换热器为例,描述换热器数学模型并分析其对一次热网支路与节点方程的影响。图2为对流换热器的示意图,其中 T_{hi} 和 T_{ho} 分别为高温侧的入端与出端温度； T_{ci} 和 T_{co} 分别为低温侧的入端与出端温度； m_h 和 m_c 分别为高温侧与低温侧的质量流量。热力负荷端的高温侧是一次热网,低温侧是二次热网;供热热源端的高温侧

是热电联供机组、电锅炉等,低温侧则是一次热网。

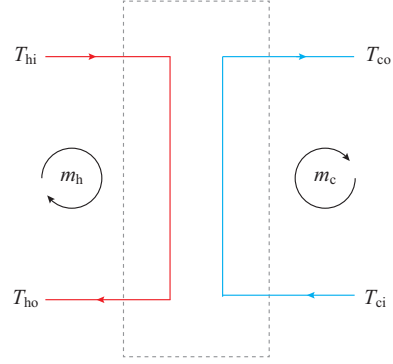


图2 对流换热器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of convective heat exchanger

对流换热器涉及的方程有3个,包括高温侧工质释放的热功率 φ_h 、低温侧工质接受的热功率 φ_c 和换热器传热功率 φ_{hex} ,分别如式(37)一式(39)所示。

$$\varphi_h = cm_h (T_{hi} - T_{ho}) \quad (37)$$

$$\varphi_c = cm_c (T_{co} - T_{ci}) \quad (38)$$

$$\varphi_{\text{hex}} = kA \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \left(\frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}} \right)} \quad (39)$$

式中： k 为换热器传热系数； A 为换热器面积。

当高温侧与低温侧的温度或流量改变时,换热器会经历短暂的动态过程,一般1~2 min即可达到稳态^[20-21],远远小于热量沿热网支路迁移的时间,在本文提出的热网动态模型中可以忽略。当换热器处于稳态时,上述3个热功率值相等,即 $\varphi_h = \varphi_c = \varphi_{\text{hex}}$,可得到换热器高温侧与低温侧出口温度分别为:

$$T_{ho} = (1 - \eta)T_{hi} + \eta T_{ci} \quad (40)$$

$$T_{co} = (1 - \gamma)T_{hi} + \gamma T_{ci} \quad (41)$$

其中

$$\eta = \frac{\exp(a) - 1}{\exp(a) - \frac{m_c}{m_h}} \quad (42)$$

$$\gamma = \frac{1 - \frac{m_c}{m_h}}{\exp(-a) - \frac{m_c}{m_h}} \quad (43)$$

式中： $a = kA \{ [1/(cm_h)] - [1/(cm_c)] \}$,为与换热器换热面积、工质流量相关的常数。

从换热器高温侧与低温侧出口温度表达式(40)和式(41)可以看到,换热器高温侧与低温侧的进出口温度有一定的范围,即 $T_{ci} \leq T_{ho} \leq T_{hi}$, $T_{ci} \leq T_{co} \leq T_{hi}$,同时需要满足关系式(40)和式(41),具体

的系数 η 和 γ 与换热器的换热系数、换热面积等参数相关。这些反映在本文所提热网模型中,即供水网与回水网每个节点的温度是有上、下限约束的,但并不影响热网支路和节点方程的具体形式。若以每个节点处供回水网的热流功率为变量,则换热器对全网络模型的影响可以表示为:

$$cm_v^d \underline{T}_v^{s,d} \leq \varphi_v^{s,d} \leq cm_v^d \bar{T}_v^{s,d} \quad (44)$$

$$cm_v^d \underline{T}_v^{r,d} \leq \varphi_v^{r,d} \leq cm_v^d \bar{T}_v^{r,d} \quad (45)$$

$$cm_v^g \underline{T}_v^{s,g} \leq \varphi_v^{s,g} \leq cm_v^g \bar{T}_v^{s,g} \quad (46)$$

$$cm_v^g \underline{T}_v^{r,g} \leq \varphi_v^{r,g} \leq cm_v^g \bar{T}_v^{r,g} \quad (47)$$

式中: $\bar{T}_v^{s,d}$, $\underline{T}_v^{s,d}$ 和 $\bar{T}_v^{r,d}$, $\underline{T}_v^{r,d}$ 分别为节点 v 处考虑负荷侧二次热网温度限制的一次热网供水和回水温度上、下限; $\bar{T}_v^{s,g}$, $\underline{T}_v^{s,g}$ 和 $\bar{T}_v^{r,g}$, $\underline{T}_v^{r,g}$ 分别为节点 v 处考虑热源侧温度限制的一次热网供水和回水温度上、下限。

3.4 热网边界等值方法

在热网中,关键节点通常是供热节点和热负荷节点,管道交汇点等节点则为内部非关键节点。热负荷的变化如何影响供热是电-热系统协同分析乃至多能源系统优化中的重要问题。

首先,将式(29)和式(30)代入式(33)和式(35),基于式(18)的证明和推导可知:

$$\varphi^{s,out}(s) = Y_1^s \varphi^{s,g}(s) \quad (48)$$

$$\varphi^{r,out}(s) = Y_1^r \varphi^{r,g}(s) \quad (49)$$

其中

$$Y_1^s = (Z^{-1} - D_1^s (A^{s+})^T A^{s-})^{-1} D_1^s (A^{s+})^T \quad (50)$$

$$Y_1^r = (Z^{-1} - D_1^r (A^{r+})^T A^{r-})^{-1} D_1^r (A^{r+})^T \quad (51)$$

将式(48)和式(49)代入式(34)和式(36),消去支路变量、保留节点变量,得

$$\varphi^{s,d}(s) = Y_2^s \varphi^{s,g}(s) \quad (52)$$

$$\varphi^{r,g}(s) = Y_2^r \varphi^{r,d}(s) \quad (53)$$

其中

$$Y_2^s = D_2^s (A^{s-} Y_1^s + I) \quad (54)$$

$$Y_2^r = D_2^r (A^{r-} Y_1^r + I) \quad (55)$$

式中: I 为单位矩阵。

最后推导得到热源热功率 $\varphi^g(s)$ 和负荷热功率 $\varphi^d(s)$ 之间的边界等值关系为:

$$\begin{aligned} \varphi^g(s) &= \varphi^{s,g}(s) - \varphi^{r,g}(s) = \varphi^{s,g}(s) - Y_2^r \varphi^{r,d}(s) = \\ &= \varphi^{s,g}(s) - Y_2^r (\varphi^{s,d}(s) - \varphi^d(s)) = \varphi^{s,g}(s) - \\ &= Y_2^r (Y_2^s \varphi^{s,g}(s) - \varphi^d(s)) = \\ &= Y_2^r \varphi^d(s) + (I - Y_2^r Y_2^s) \varphi^{s,g}(s) \end{aligned} \quad (56)$$

式(56)即为拉普拉斯域中热网的边界等值模

型,解析表达了计及热网动态储能特性下热源和负荷热功率的数学关系。式(56)中除了热源热功率 $\varphi^g(s)$ 和负荷热功率 $\varphi^d(s)$ 这2个变量外,还存在辅助变量 $\varphi^{s,g}(s)$,其具体含义是热源注入供水网的热流功率,与供水网相应节点温度成正比,一般由区域热力供应商或热源运行机构设定调整,是用来控制整个热网温度的指标。这里需要再次强调,注入供水网的热流功率不等于热源的供热功率,热源的供热功率是注入供水网的热流功率与回水网流出的热流功率之差。

应用拉普拉斯反变换可得时域中的热网边界等值模型为:

$$\varphi^g(t) = \mathcal{L}^{-1}(Y_2^r \varphi^d(s) + (I - Y_2^r Y_2^s) \varphi^{s,g}(s)) \quad (57)$$

热网的边界等值模型可以应用于多能源系统的协同分析,特别是电-热系统的耦合优化运行。使用热网边界等值模型代替全网络特性模型可以解析地展示热力系统的源-荷函数关系,同时隐藏热网的细节参数,在不降低分析精确度的情况下大幅减少多能源系统间的信息交互,降低协同分析计算量,同时保护热力系统的数据隐私。

需要指出的是,热网的广义电路分析理论有一定的应用前提。一方面,本文提出的全网络模型将热负荷、热源简化为了节点热功率注入,没有考虑换热器的影响。若考虑换热器的动态换热过程,需要进一步研究供回水温度变化约束。换热器模型将另文研究。另一方面,本文假定了热网模型工质流量不变,因此热网广义电路模型中的电抗与接地导纳均为常数,当热网处于流量与温度同时调节的“质量调节”模式下,支路参数为时变参数,需要进一步研究分析方法。

4 气网广义电路模型与分析方法

4.1 气网基本结构

气网是由输气管道组成的单层网络,分为跨区高压输气网和区域低压配气网络。高压输气网的压力一般为几十个大气压,跨度为几十至上百千米不等,主要为燃气电厂、城市门站供气;低压配气网则一般为几个大气压的区域内辐射状网络,通常为居民供气。由于燃气系统和电力系统的耦合主要发生在燃气电厂环节,因此本文将主要研究高压输气网。高压输气网的一般结构如图3所示,要素包括节点、支路和压缩机。图中, t_e 为气网支路 e 的压缩机变比; Δf_e 为支路 e 的燃气流量(变化量); $\Delta \pi = (\Delta \pi_v)_{|V| \times 1}$ 为气压节点 v 的压力变化量向量; $\Delta f =$

$(\Delta f_v)_{|V| \times 1}$ 为气压节点 v 注入流量变化量向量。气源节点一般为定压力节点, 即由压缩机固定压力向气网输气。压缩机则视为燃气系统中的“变压器”, 其通过抽取部分管道内燃气燃烧或消耗电力作为动力输入, 改变管道压力, 保证管网末端压力在运行范围内。

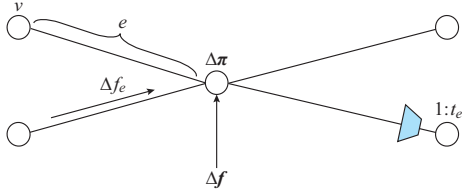


图3 高压输气网一般结构

Fig. 3 General structure for high-pressure gas transmission network

4.2 气网全网络广义电路模型

燃气流支路模型满足第一类边界条件, 可近似等效为一阶 RC 电路, 因此可以根据通用网络建模方法建立全网络动态模型。但是, 气网部分支路含有压缩机, 因此需要结合气网特性进行相应的修正。

首先, 根据支路拓扑连接关系定义式(4)所示的关联矩阵 $A = (a_{ve})_{|V| \times |E|}$ 。接着, 结合支路拓扑关系和支路压缩机变比定义修正关联矩阵 $A' = (a'_{ve})_{|V| \times |E|}$, 其元素如式(58)所示。如果支路 e 无压缩机, 则相应的 $t_e = 1$ 。

$$a'_{ve} = \begin{cases} 1 & e \in \Omega_v^+ \\ -\frac{1}{t_e} & e \in \Omega_v^- \\ 0 & \text{无连接} \end{cases} \quad (58)$$

根据第一类边界条件下的全网络模型式(5)一式(9)可知, 气网的全网络广义电路模型为:

$$Y\Delta\pi(s) = \Delta f(s) \quad (59)$$

式中: $Y = A \text{diag}(\mathbf{y}_b)(A')^T + \text{diag}(\mathbf{y}_s)$ 。

式(59)即为燃气系统的全网络的动态特性模型, 描述了整个网络中各个节点气压变化量与节点注入气流量变化量的关系。由于方程是拉普拉斯域中的模型, 因此求解后需要做拉普拉斯反变换, 将其转化为时域中的结果使用, 即

$$\Delta f(t) = \mathcal{L}^{-1}(Y\Delta\pi(s)) \quad (60)$$

4.3 气网边界等值方法

在高压输气网中, 燃气机组具有流量大、变化快的特点, 是最为重要的负荷之一。一方面, 燃气机组的出力变化会改变燃气系统全网络的压力分布, 继而影响在网燃气机组的发电安全性, 是多能源系统集成电-气系统耦合中的重要问题。另一方面, 燃

气机组往往处于城市门站上游, 节点压力变化会对下游压力产生显著影响, 必须重点监控。因此, 本文将燃气机组所在节点定义为关键边界节点, 相应节点集合记为 B 。除去关键节点, 非关键节点可分为 2 类: ①压力恒定的节点, 例如部分气源所在节点, 此类节点集合记为 C ; ②负荷恒定(或相比燃气机组变化幅度小、变化速度慢)的节点, 此类节点集合记为 I 。将节点按照分类重新排序, 式(59)可写为:

$$\begin{bmatrix} Y_{BB} & Y_{BI} & Y_{BC} \\ Y_{IB} & Y_{II} & Y_{IC} \\ Y_{CB} & Y_{CI} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\pi_B(s) \\ \Delta\pi_I(s) \\ \Delta\pi_C(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_B(s) \\ \Delta f_I(s) \\ \Delta f_C(s) \end{bmatrix} \quad (61)$$

式中: $Y_{BC}, Y_{IC}, Y_{CB}, Y_{CI}, Y_{CC}$ 为 Y 的分块矩阵; $\Delta\pi_B, \Delta\pi_I, \Delta\pi_C$ 为 $\Delta\pi$ 的分块向量; $\Delta f_B, \Delta f_I, \Delta f_C$ 为 Δf 的分块向量。

利用高斯消元法可以得到:

$$(Y_{BB} - Y_{BI}Y_{II}^{-1}Y_{IB})\Delta\pi_B(s) = \Delta f_B(s) - Y_{BI}Y_{II}^{-1}\Delta f_I(s) \quad (62)$$

即燃气电厂所在边界节点的压力变化量可以用所有燃气负荷节点的注入流量变化量线性表示。如果认为节点集合 I 的负荷变化量可忽略不计, 即 $\Delta f_I(s) = 0$, 则式(62)可进一步简化为:

$$(Y_{BB} - Y_{BI}Y_{II}^{-1}Y_{IB})\Delta\pi_B(s) = \Delta f_B(s) \quad (63)$$

式(63)即为反映燃气系统动态特性的等值边界模型, 描述了关键节点气压变化量与节点注入气流变化量的关系。由于方程是拉普拉斯域中的模型, 因此求解后需要做拉普拉斯反变换, 将其转化为时域中的结果使用, 即

$$\Delta f_B(t) = \mathcal{L}^{-1}((Y_{BB} - Y_{BI}Y_{II}^{-1}Y_{IB})\Delta\pi_B(s)) \quad (64)$$

气网的边界等值模型可以应用于多能源系统的协同分析, 特别是电-气系统的耦合优化运行。使用气网边界等值模型可以有效表征全网络动态特性对于边界关键端口影响, 从而大幅减少多能源系统间的信息交互, 降低协同分析计算量, 同时保护燃气系统的数据隐私。由于本理论使用了基准点线性和主导时间常数近似的方法推导燃气流支路模型, 气网边界等值模型与非线性偏微分方程计算结果存在一定差距, 应用时可以通过持续更新基准点和保留多个主导时间常数的方法降低误差。

此外, 气网的广义电路分析理论有一定的应用前提。本文提出的全网络模型将压缩机简化为“变压器”, 没有考虑压缩机可能直接使用管道燃气作为燃料, 对于管道燃气流量可能存在影响。此外, 本文提出的气网边界等值模型是高阶传递函数, 实际应用时可以对传递函数矩阵进行低阶近似, 具体的近

似阶数没有标准数值,需要根据实际需求的计算精度和复杂度进行权衡。

5 算例分析

5.1 热网建模与等值

1) 单热源辐射状热网算例

本节首先使用图4所示的4节点热网说明全网络和边界等值动态模型的建立过程和应用方法。该算例包含1个热源和3个热负荷,热负荷的日变化曲线已知,如图5所示,需要求解热源的供热函数。算例中热网参数如附录A表A1所示。

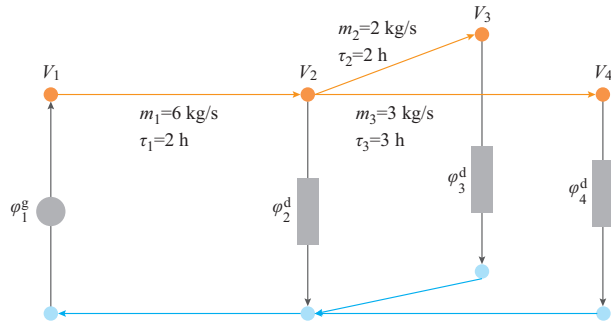


图4 四节点热网算例
Fig. 4 Case of 4-node heat network

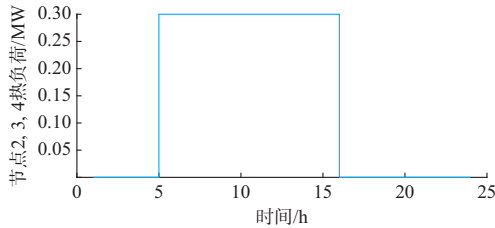


图5 热负荷日变化曲线
Fig. 5 Daily variation curve of heat load

根据式(11)和式(12)可知,供水网和回水网的节点-支路关联矩阵为:

$$\begin{aligned} \varphi_1^s(t) = & 0.96\varphi_2^d(t-2) + 0.92\varphi_3^d(t-4) + 0.90\varphi_4^d(t-5) + \varphi_1^s(t) - 0.154\varphi_1^s(t-4) - \\ & 0.283\varphi_1^s(t-8) - 0.407\varphi_1^s(t-10) \end{aligned} \quad (70)$$

如果本文不考虑热网的动态特性,则支路特性矩阵 Z 退化为实常数矩阵,可表示为:

$$Z = \text{diag} [0.96 \quad 0.96 \quad 0.94] \quad (71)$$

相应的热源与热负荷的显式函数关系为:

$$\begin{aligned} \varphi_1^s(t) = & 0.96\varphi_2^d(t) + 0.92\varphi_3^d(t) + 0.90\varphi_4^d(t) + \\ & 0.156\varphi_1^s(t) \end{aligned} \quad (72)$$

进一步的,如果本文不考虑热网支路的热损耗,则支路特性矩阵 Z 退化为单位矩阵,相应的热源与热负荷的显式函数关系为:

$$\varphi_1^s(t) = \varphi_2^d(t) + \varphi_3^d(t) + \varphi_4^d(t) \quad (73)$$

在这种情况下,热源与热负荷的显式函数关系

$$A^{s+} = A^{r-} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$A^{s-} = A^{r+} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (66)$$

根据式(24)可求得该热网的支路特性矩阵为:

$$\begin{aligned} Z = \text{diag} \left(\exp \left(-\frac{\lambda_e + c\rho A_e s}{cm_e} L_e \right) \right)_{|E| \times |E|} = \\ \text{diag} [0.96e^{-2s} \quad 0.96e^{-2s} \quad 0.94e^{-3s}] \quad \forall e \in E \end{aligned} \quad (67)$$

以矩阵 Z 的第1个元素 $0.96e^{-2s}$ 为例,其说明支路 V_1 - V_2 的时延为2 h,网损为4%。

根据式(25)一式(28)可求得供水网和回水网的分配系数分别为:

$$\begin{cases} D_1^s = \text{diag} [1 \quad 0.333 \quad 0.5] \\ D_2^s = \text{diag} [0 \quad 0.167 \quad 1 \quad 1] \\ D_1^r = \text{diag} [1 \quad 1 \quad 1] \\ D_2^r = \text{diag} [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{cases} \quad (68)$$

以矩阵 D_1^s 为例,其第2个元素表示支路 V_2 - V_3 的始端功率占从节点 V_2 流出的总功率的33.3%,第3个元素表示支路 V_2 - V_4 的始端功率占从节点 V_2 流出的总功率的50%。

根据式(56)可知,热源与热负荷在拉普拉斯域的显式函数关系为:

$$\begin{aligned} \varphi_1^s(s) = & 0.96e^{-2s}\varphi_2^d(s) + 0.92e^{-4s}\varphi_3^d(s) + \\ & 0.90e^{-5s}\varphi_4^d(s) + (1 - 0.154e^{-4s} - \\ & 0.283e^{-8s} - 0.407e^{-10s})\varphi_1^s(s) \end{aligned} \quad (69)$$

应用拉普拉斯反变换可得时域表达式为:

等同于热源与热负荷直接连接,因此满足最基本的能量守恒定律。

热源的供热曲线与供水温度直接相关,这一点反映在式(56)中,即为 $\varphi_1^s(t)$ 与 $\varphi_1^s(t)$ 直接相关。假设外界环境温度为0,供水网节点 V_1 的水温为 90°C ,则 $\varphi_1^s(t) = cm_1 T = 2.27 \text{ MW}$,相应的热源供热曲线如图6所示。可以看到,当热网的稳态特性和动态模型均考虑了网损,因此即使在0~5 h和20~24 h负荷为0的阶段,热源依然保持供热。此外,热网动态模型考虑了热源感知不同负荷变化的时延,因此热源供热曲线为阶梯形。相反的,在稳态

化的过程和传递函数矩阵近似,实际应用中可以通过不断更新基准点和提高传递函数矩阵近似阶数减少误差。

6 结语

本文基于支路层的多能源网络广义电路模型,提出了拉普拉斯域中多能源系统全网络动态特性通用广义电路模型与边界等值方法,并分别就第一、二类边界条件下的全网络模型进行了分析。本文还结合热网和气网的特性推导了热网和气网的全网络动态特性模型与等值边界模型,解析化地描述了热流与热负荷的数学关系和热网的整体储热动态特性,描述了气网关键节点压力与节点注入流量的动态数学关系。算例证明,热网和气网等值模型能够准确刻画复杂系统的边界外端口信息。本文研究表明,多能源网络的边界等值模型可有效表征关键节点的物理量变化过程,为边界局部耦合的多能源系统分析提供了新思路,为多能源系统协同优化决策奠定了“网络传输动态特性”部分的描述基础。

本文与姐妹篇^[1]共同组成了多能源网络的广义电路分析理论,运用电路比拟的思想建立了统一的数学方程和电路模型,揭示了异质能量流的共性和数学、物理层面的联系。多能源网络的广义电路分析理论在方法论层面也做出了创新,提出了基于拉普拉斯变换的网络建模与分析方法,在拉普拉斯域完成了多能源网络复杂动态特性的代数化描述,运用边界端口模型完成了对全网络动态传输特性的等值表征。审稿过程中,审稿人与作者的讨论见附录B

作为阶段性研究成果,本理论是在一定的前提下假设下成立的,如何“打破”这些假设,使得广义电路模型更加具有普适性是未来的重要研究方向。此外,多能源网络的广义电路理论如何应用于多能源系统的联合分析、协同运行和优化规划也有待进一步研究。本文工作扩展了多能源系统网络分析理论,为多能源系统协同运行优化决策提供了模型基础。希望本文工作能够推进多能源系统网络分析与协同运行决策方法的研究,服务中国综合能源系统的实际建设与运行。

在本文撰写过程中,清华大学工程力学系工程热物理所陈群教授与作者进行了深入讨论,就热网与气网的建模与分析提出了很多专业性指导意见,在此表示特别感谢。

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

参考文献

- [1] 杨经纬,张宁,康重庆.多能源网络的广义电路分析理论:(一)支路模型[J].电力系统自动化,2020,44(9):21-32.
YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Generalized electric circuit analysis theory for multi-energy networks: Part one branch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32.
- [2] LIU X, WU J, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-1250.
- [3] 顾伟,陆帅,王珺,等.多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1315.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modelling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315.
- [4] MANSON J R, WALLIS S G. An accurate numerical algorithm for advective transport [J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 1995, 11(12): 1039-1045.
- [5] IDELSOHN S R, HEINRICH J C, ONATE E. Petrov-Galerkin methods for the transient advective-diffusive equation with sharp gradients [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(9): 1455-1473.
- [6] BENONYSSON A, BÖHM B, RAVN H F. Operational optimization in a district heating system [J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(5): 297-314.
- [7] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 7(1): 12-22.
- [8] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, FU Y, et al. Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1523-1536.
- [9] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [10] ZLOTNIK A, ROALD L, BACKHAUS S, et al. Coordinated scheduling for interdependent electric power and natural gas infrastructures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(1): 600-610.
- [11] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow [J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2011, 21(2): 025102.
- [12] LIU C, LEE C, SHAHIDEHPOUR M. Look ahead robust scheduling of wind-thermal system with considering natural gas congestion [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 544-545.
- [13] LARSEN H V, PÁLSSON H, BÖHM B, et al. Aggregated dynamic simulation model of district heating networks [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(8): 995-1019.
- [14] LU S, GU W, MENG K, et al. Thermal inertial aggregation

- model for integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2374-2387.
- [15] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTIN P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1780-1787.
- [16] REDDY H P, NARASIMHAN S, BHALLAMUDI S M. Simulation and state estimation of transient flow in gas pipeline networks using a transfer function model [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(11): 3853-3863.
- [17] ZHOU Y, GU C, WU H, et al. An equivalent model of gas networks for dynamic analysis of gas-electricity systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4255-4264.
- [18] YANG J, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. Situation awareness of electricity-gas coupled systems with a multi-port equivalent gas network model [J]. Applied Energy, 2020, 258: 114029.
- [19] YANG J, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 560-570.
- [20] DAI Y, CHEN L, MIN Y, et al. Dispatch model of combined heat and power plant considering heat transfer process [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1225-1236.
- [21] WAKUI T, YOKOYAMA R. On-line model-based performance monitoring of a shell-and-tube type heat exchanger using steam and water [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2669-2677.
- [22] SCHMIDT M, ABMANN D, BURLACU R, et al. Gaslib—a library of gas network instances[J]. Data, 2017, 2(4): 40.

杨经纬(1992—),男,博士研究生,主要研究方向:多能源系统、新能源、电力负荷预测。E-mail: yjw15@mails.tsinghua.edu.cn

张宁(1985—),男,副教授,主要研究方向:新能源、电力系统规划及运行、多能源系统。E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn

康重庆(1969—),男,通信作者,教授,主要研究方向:电力规划与运行、可再生能源、能源互联网、低碳电力技术等。E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

(编辑 鲁尔姣)

Analysis Theory of Generalized Electric Circuit for Multi-energy Networks —Part Two Network Model

YANG Jingwei^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}, KANG Chongqing^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The multi-energy networks represented by power, gas and heat networks are one of the most complex physical networks in the world, which are also the key components connecting energy production and consumption, as well as the important way of the coupling of multi-energy systems. Based on the generalized electric circuit model of the branch layer in multi-energy systems, this paper proposes the generalized electric circuit analysis theory for the network layer. Firstly, according to the difficulty of representing the high-dimensional dynamic characteristics of multi-energy networks, a generalized modeling method for multi-energy networks in Laplace domain is proposed based on the generalized electric circuit model at branch layer, and the corresponding compact matrix model is also proposed. Secondly, external-port equivalent method of multi-energy networks is proposed, which can transform the complex internal information into equivalent boundary conditions to simplify the coordinated analysis of multi-energy networks and protect the data privacy of each energy system. Finally, combined with the practical characteristics of the heat network and the gas network, the generalized electric circuit model and the boundary equivalent method are proposed for the whole network with heat network and gas network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China-State Grid Joint Fund for Smart Grid (No. U1766212) and the Major International (Regional) Joint Research Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51620105007).

Key words: multi-energy system; generalized electric circuit; Energy Internet; heat supply network; gas network; electricity-heat coupling; electricity-gas coupling

