

综合能源系统中包含多加热空间的能量网络方程

李克成¹,何桂雄¹,闫华光¹,杨 硕²,陈皓勇³,韩光泽³

(1. 中国电力科学研究院有限公司 用电与能效研究所,北京 100192;2. 国网河北省电力有限公司,河北 石家庄,050022;3. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要:基于一种利用热水和电能联合给3个空间加热的模型,建立与之相应的能量网络,利用广义基尔霍夫定律建立能量网络方程,求解该方程得到能量网络中所有支路的工作状态。每增加一个加热空间,能量网络方程增加4个变量(2个强度量和2个广延量);相应增加2个强度量方程和由热负荷提供的2个约束条件,方程组封闭可解,表明建立的能量网络方程可推广到具有任意数量热负荷的能量网络。利用一组典型的数据计算3个热负荷能量网络中各设备的工作状态,结果与利用电网络和流体网络计算的结果相同,表明建立的能量网络方程及其求解方法可靠。本研究可为综合能源系统的分析和优化提供理论指导。

关键词:综合能源系统;能量利用效率;多能互补;能量网络方程

中图分类号:TK 01;TM 13 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2019.02.008

Energy Network Equations of Integrated Energy System Including Multiple Heating Spaces

LI Kecheng¹, HE Guixiong¹, YAN Huaguang¹, YANG Shuo², CHEN Haoyong³, HAN Guangze³

(1. Department of Power Consumption and Energy Efficiency, China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100192, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Supply Co. Ltd., Shijiazhuang 050022, China; 3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Based on a model of heating three spaces by hot water and electricity, the corresponding energy network was established, and the energy network equations were established according to the generalized Kirchhoff's laws. The working condition of all branches can be obtained by solving these equations. For each additional heating space, the energy network equation increases four variables (two intensive variables and two extensive variables). Two extensive equations and two constraints provided by the heat load are also added at the same time, the equations are closed and solvable, which indicates that the equations can be extended to the energy network with any number of heat load. A set of typical data is used to calculate the working status of each equipment in three heat load energy networks. The results are the same as those calculated by electric network and fluid network respectively. It shows that the established energy network equation and its solution method are reliable. This study can provide theoretical guidance for the analysis and optimization of integrated energy system.

Key words: integrated energy system; energy utilization efficiency; multi-energy supplementary; energy network equation

随着传统化石能源的逐渐枯竭及环境污染问题的日渐加剧,现有能源生产和消费模式与节能减排矛盾越来越突显,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系迫在眉睫。随着新能源开发技术的日臻成熟,以及电

收稿日期:2019-06-05

基金项目:国家电网公司科技项目资助项目(YD71-17-021)

作者简介:李克成(1989—),男,江苏徐州人,工程师,研究方向为综合能源规划设计、仿真技术、优化运行。

通信作者:韩光泽(1964—),男,河南新县人,教授,博士生导师,研究方向为工程热力学。

力市场改革和互联网技术的推动,智能电网与其他能源网的深度融合产生了“能源互联网”的新概念,为多能源系统理论分析提供了新思路^[1]。能源互联网的基础是综合能源系统,电、热、冷、气等各类能源统一规划、统一调度。能源供应呈现多样性,不同形式能源之间相互耦合,同时满足用户对多种形式的能源需求^[2-3]。近年来,综合能源系统研究的重点逐渐由单一形式的能量转变为多种形式的能量,如瑞士联邦理工学院提出的能源集线器理论^[4],美国北卡罗来纳州立大学提出的能量路由器概念^[5]。国内外已应用相关理论和技术成果建设了若干示范工程,如加拿大耶洛洛夫镇能源系统的改造^[6],河北科技园区光、热一体化示范工程等^[7]。陈皓勇等^[8]基于综合能源系统的物理本质,提出了能量网络的概念,初步建立了综合能源系统的统一描述理论。

在工程实践中,综合能源系统主要通过各种类型的网络为用户提供能量,包括电网、热网、冷网和气管网等。本质上这些网络传递的都是能量,所以称之为能量网络^[8]。不同形式能量之间的转换必然存在能量损失,通过能量网络研究根据用户需求选择用能的方式可有效减少能量损失。由于开采和加工的差别,不同形式能量价格各异,通过能量网络研究可保证在满足合理需求的情况下,通过合理使用不同形式的能量达到减小费用支出的目的。能量网络通常由能量转换设备、传输设备和用能设备组成,其中每种形式能量的传输、转换和使用设备称为能量网的子网(如电网和热网等),各种子网之间通过能量转换设备(如泵和换热器)相连。虽然能量子网中的能量传递转化规律在不同学科领域分别得到了研究,如电网络理论^[9]和流体网络理论^[10],但目前还未建立对多能源、多热负荷的能量网络传递规律的数学描述。

韩光泽等^[11-12]提出了能量公理和传递公理,这两个公理表明:任何形式的能量都可表示成一个基本强度量与一个基本广延量的乘积;任何形式的传递过程都是在基本强度量差的推动下基本广延量的传递,基本广延量的传递也是对应能量的传递。不同类型的能量传输网络中,传输过程中的强度量和广延量的物理意义不同,但从能量公理和传递公理的角度看,传递过程是完全相同的,可建立统一的模型。实际工程中能量的网络化传递主要依靠电网络和流体网络,因此文中基于一种利用热水和电联合给3个空间加热的模型,建立与之相应的能量网络;利用广义的基尔霍夫定律建立能量网络方程,并采用电网络理论方法对该能量网络方程进行求解,由此得到能量网络中所有支路的工作状态;利用一个典型的实例计算,证明该能量网络方程及其求解方法的正确性、有效性和普遍性。

1 能量网络模型及能量网络方程

利用热能和电能联合供热是一种常见的用能方式,其中的用能侧可能有多个热负荷。为表述方便,选择3个热负荷建立网络模型,该理论方法可以推广到包含多个热负荷的系统。如图1所示,利用热水和电联合给3个独立的空间加热,其中电源给3个电热器提供电能,热源通过管网给3个散热片提供热能,空间所需的热负荷由电热器和散热片分担。电网络将电源的电能传输到3个空间,通过3个电热器转化成热能。电网络同时向水泵提供电能,由水泵转化成热水的压能。热水网络将热源的热能通过换热器和管网分别传递到3个空间,同时消耗压能。2个量子网络通过水泵和加热空间相互耦合。根据网络理论,将图1所示的联合加热模型用能量网络表示,如图2。为方便分析,对图中各支路、回路和节点进行编号。其中: b_e 表示电网络中线路的等效电阻; b_{H1} 表示热水网络中管网的等效流阻。

电路中电流和电压只取决于电路的连接方式,与电路元器件的特性无关^[9]。电路元器件的特性决定支路两端电压与电流的关系。对于一个有 B 条支路的电网络,共有 $2B$ 个变量, B 个电压和 B 个电流。通过基尔霍夫定律可写出 B 个方程,联立 B 条支路上电路元件的路特性方程,可对该电网络实现求解。从能量公理和传递公理看^[11-12],电网络是能量网络的一个特例,能量网络与电网络有相似的连接方式。电网络中的电压就是能量网络中的强度量,电流就是能量网络中的广延量。为了能够写出类似于电网络方程的能量网络方程,文献[8]中提出了广义的基尔霍夫定律:

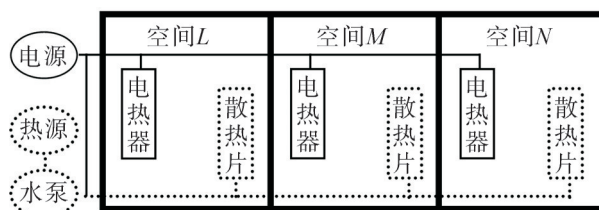


图1 利用电源和热源联合给3个空间加热的模型

Fig. 1 Model of heating three spaces with power and heat sources spaces

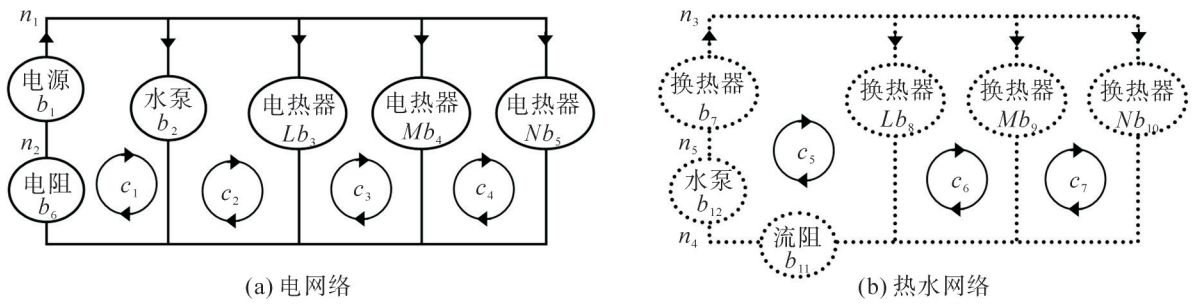


图2 能量网络支路*b*、回路*c*及节点*n*编号

Fig. 2 Number of branch *b*, closed loop *c* and node *n* of energy network

- 1) 基尔霍夫强度量定律 能量网络的任何一个回路中各段线路强度变化量之和为零;
- 2) 基尔霍夫广延量定律 流入能量网中任何一个节点的广延量等于流出该节点的广延量。

类似于电网络方程,利用广义基尔霍夫定律可写出能量网络的网络方程。选定节点 n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 , 利用基尔霍夫广延量定律写出5个通量方程(电子网络的通量 Φ 为是电流强度,热水子网络的通量 Φ 为热水体积流量: $\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_4 - \Phi_5 = 0, \Phi_6 - \Phi_1 = 0, \Phi_7 - \Phi_8 - \Phi_9 - \Phi_{10} = 0, \Phi_{11} - \Phi_{12} = 0, \Phi_{12} - \Phi_7 = 0$ 。

进一步将这5个方程写为网络关联矩阵、广延量流量矩阵和矩阵方程的形式

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Phi = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \Phi_3 \ \Phi_4 \ \Phi_5 \ \Phi_6 \ \Phi_7 \ \Phi_8 \ \Phi_9 \ \Phi_{10} \ \Phi_{11} \ \Phi_{12}]^T \quad (2)$$

$$A \cdot \Phi = 0 \quad (3)$$

针对回路 c_1 至 c_7 , 利用基尔霍夫强度量定律写出7个强度量方程: $\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_6 = 0, -\Delta X_2 + \Delta X_3 = 0, -\Delta X_3 + \Delta X_4 = 0, -\Delta X_4 + \Delta X_5 = 0, \Delta X_7 + \Delta X_8 + \Delta X_{11} + \Delta X_{12} = 0, -\Delta X_8 + \Delta X_9 = 0, -\Delta X_9 + \Delta X_{10} = 0$ 。其中:电子网络的强度量 X 是电压;热水子网络的强度量 X 是压强,将这7个方程写为网络关联矩阵、强度量差矩阵和矩阵方程的形式

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta X = [\Delta X_1 \ \Delta X_2 \ \Delta X_3 \ \Delta X_4 \ \Delta X_5 \ \Delta X_6 \ \Delta X_7 \ \Delta X_8 \ \Delta X_9 \ \Delta X_{10} \ \Delta X_{11} \ \Delta X_{12}]^T \quad (5)$$

$$B \cdot \Delta X = 0 \quad (6)$$

由式(3),(6)构成的方程组共12个方程,包含24个变量,完全求解还需12个约束条件,能量网络的约束条件有两类。

第一类约束条件是两个能量子网之间的耦合关系。水泵将电能转化为热水的压能,如

$$\Phi_2 \Delta X_2 + \Phi_{12} \Delta X_{12} = 0 \quad (7)$$

设已知3个空间的热负荷分别是 P_L, P_M 和 P_N , 热负荷中电网所占比例分别是 α_L, α_M 和 α_N 。则3个电热器的热功率分别是 $\alpha_L P_L = \Phi_3 \Delta X_3, \alpha_M P_M = \Phi_4 \Delta X_4$ 和 $\alpha_N P_N = \Phi_5 \Delta X_5$ 。3个换热器的输出功率分别是 $(1 - \alpha_L) P_L = \rho c \Phi_8 \Delta T, (1 - \alpha_M) P_M = \rho c \Phi_9 \Delta T$ 和 $(1 - \alpha_N) P_N = \rho c \Phi_{10} \Delta T$, 其中: ρ 和 c 分别是热水的密度和质量热容; ΔT 是换热器进出口的温差。

第二类约束条件是电源电动势 $\Delta X_1 = \varepsilon$ 已知以及设备的特征方程。由传递公理得设备的特性方程,

$$\Delta X_i = R_i \Phi_i (i = 6, 7, 8, 11) \quad (8)$$

其中 R_i 为电阻或流阻,由设备的特性决定。在稳定工作状态,并联电器两端的电压相同,换热器的进出口压

强差也相同,由1台换热器的特性即可推出压差,在工程应用上其他换热器的工作状态由旁路阀门调节。

利用方程(3)、(6)和12个约束条件可求解能量网络中所有设备的工作状况,即广延量通量和设备两端的强度量差。由联合加热模型(图1)、能量网模型(图2)以及能量网络方程(3)和(6)可知,每增加一个加热空间,能量网络方程组增加4个变量(2个广延量和2个强度量),相应增加2个强度量方程和由热负荷提供的2个约束条件,能量网络方程组仍然封闭可解。因此,该模型(图1)和能量网络方程组可推广到有任意数量热负荷的能量网络。

2 能量网络方程的求解及算例

能量网络方程(3)和(6)与约束条件一起构成了完备的方程组,可以利用网络理论中的方法对其进行求解。方程(3)中的广延量分别是体积流量和电流,方程(6)中的强度量分别是压强和电压,他们属于不同的物理量,在数值上无法直接比较运算;同时为简化计算,需引入电力系统分析中量纲为一的计算方法求解该能量网络方程。

文中选取一组典型的用能过程作数值计算。电源电压 $\Delta X_1 = -220 \text{ V}$, 电网线路中的等效电阻 $R_6 = 0.5 \Omega$, 热水管网中的等效流阻 $R_{11} = 0.17 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$, 2个换热器的流阻 $R_7 = 1.37 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$, $R_8 = 1.92 \times 10^8 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。3个空间的热负荷 $P_L = 20 \text{ kW}$ 、 $P_M = 25 \text{ kW}$ 和 $P_N = 30 \text{ kW}$, 电加热所占比例 $\alpha = 0.2$, 各换热器进回水温差 $\Delta T = 15 \text{ K}$ 。常温下水的密度和质量热容量分别取 $\rho = 980 \text{ kg/m}^3$ 和 $c = 4190 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

为将网络参数量纲化,选定网络基准值:功率 $P_b = 500 \text{ W}$, 电压 $V_b = 200 \text{ V}$, 电流 $\Phi_{b,e} = 2.5 \text{ A}$, 电阻 $R_{b,e} = V_b / \Phi_{b,e} = 80 \Omega$, 流量 $\Phi_{b,f} = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, 压强 $p_b = P_b / \Phi_{b,f} = 10^6 \text{ Pa}$, 流阻 $R_{b,f} = 2 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。利用网络基准值可写出已知参数量纲为一的值: $\Delta X_1^* = \Delta X_1 / V_b = -1.1$, $P_{L,e}^* = \alpha_L P_L / P_b = 8$, $P_{M,e}^* = \alpha_M P_M / P_b = 10$, $P_{N,e}^* = \alpha_N P_N / P_b = 12$, $P_{L,f}^* = (1 - \alpha_L) P_L / P_b = 32$, $P_{M,f}^* = (1 - \alpha_M) P_M / P_b = 40$, $P_{N,f}^* = (1 - \alpha_N) P_N / P_b = 48$, $R_6^* = R_6 / R_{b,e} = 0.00625$, $R_7^* = R_7 / R_{b,f} = 0.0685$, $R_8^* = R_8 / R_{b,f} = 0.0960$, $R_{11}^* = R_{11} / R_{b,f} = 0.0085$, $\Phi_8^* = \Phi_8 / \Phi_{b,f} = 0.52$, $\Phi_9^* = \Phi_9 / \Phi_{b,f} = 0.65$, $\Phi_{10}^* = \Phi_{10} / \Phi_{b,f} = 0.7794$ 。

将上述量纲为一的参数值代入约束方程组以及矩阵方程(3)、(6)中,解得:

$$\Phi^* = [34.319 \quad 0.440 \quad 9.034 \quad 11.293 \quad 13.552 \quad 34.319 \quad 1.949 \quad 0.52 \quad 0.65 \quad 0.779 \quad 1.949 \quad 1.949]^T \quad (9)$$

$$\Delta X^* = [-1.1 \quad 0.8855 \quad 0.8855 \quad 0.8855 \quad 0.8855 \quad 0.2145 \quad 0.1335 \quad 0.0499 \quad 0.0499 \quad 0.0499 \quad 0.0166 \quad -0.200]^T \quad (10)$$

将式(9)、(10)中量纲为一的量的计算值乘以基准值即可得到能量网络中各单元两端的电压或压强差和流经每个单元设备的电流或热水流量(国际单位制)

$$\Phi = 85.8 \quad 1.1 \quad 22.6 \quad 28.2 \quad 33.9 \quad 85.8 \quad 9.75 \times 10^{-4} \quad 2 \times 1.60^{-4} \quad 3.25 \times 10^{-4} \quad 3.9 \times 10^{-4} \quad 9.75 \times 10^{-4} \quad 9.75 \times 10^{-4} \quad]^T \quad (11)$$

$$\Delta X = [-220 \quad 177.1 \quad 177.1 \quad 177.1 \quad 177.1 \quad 42.9 \quad 1.34 \times 10^5 \quad 0.50 \times 10^5 \quad 0.50 \times 10^5 \quad 0.50 \times 10^5 \quad 0.166 \times 10^5 \quad -2.00 \times 10^5 \quad]^T \quad (12)$$

式(11)中的数据对应图(2)中通过各用电设备的电流强度和各换热器的热水流量,如85.8 A是通过电源的电流, $9.75 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 是通过热源的热水流量。式(12)中的数据对应图(2)中各用电设备两端的电压和换热器两端的压强差,如220 V是电源两端的电压;负号源自电网络计算选取的方向,与交直流无关; $1.34 \times 10^5 \text{ Pa}$ 是热源两端的压强差。所有计算数据均在用能设备的合理区间内。

图1模型中,能量网络方程包含3个热负荷,利用电网络理论和流体网络理论对其分别计算,两种方法所得结果与本文方法所得结果一致,表明本文建立的能量网络方程以及相应的求解方法是可靠的。对于较复杂的能量网络,虽无法利用电网络理论或流体网络理论计算,但利用本文方法建立相应的网络方程并进行求解,能够方便地得到网络中各设备的工作状态。在这个算例中,电热器和换热器的型号以及两种加热方式所占比例是可选择的,每一种选择对应一种工作状态,也就是不同的约束条件,每一种工作状态对应不同的能

耗和设备投资,由此可实现对能量网络的比较和优化。

3 实例模拟仿真

利用本文建立的能量网络方程对巴厘岛某电-热耦合的综合能源系统(如图3)进行稳态能流分析。该综合能源系统由3台热电联产机组共同供能以满足用户的电能与热能需求,并通过3台循环水泵进行热工质的循环传输。

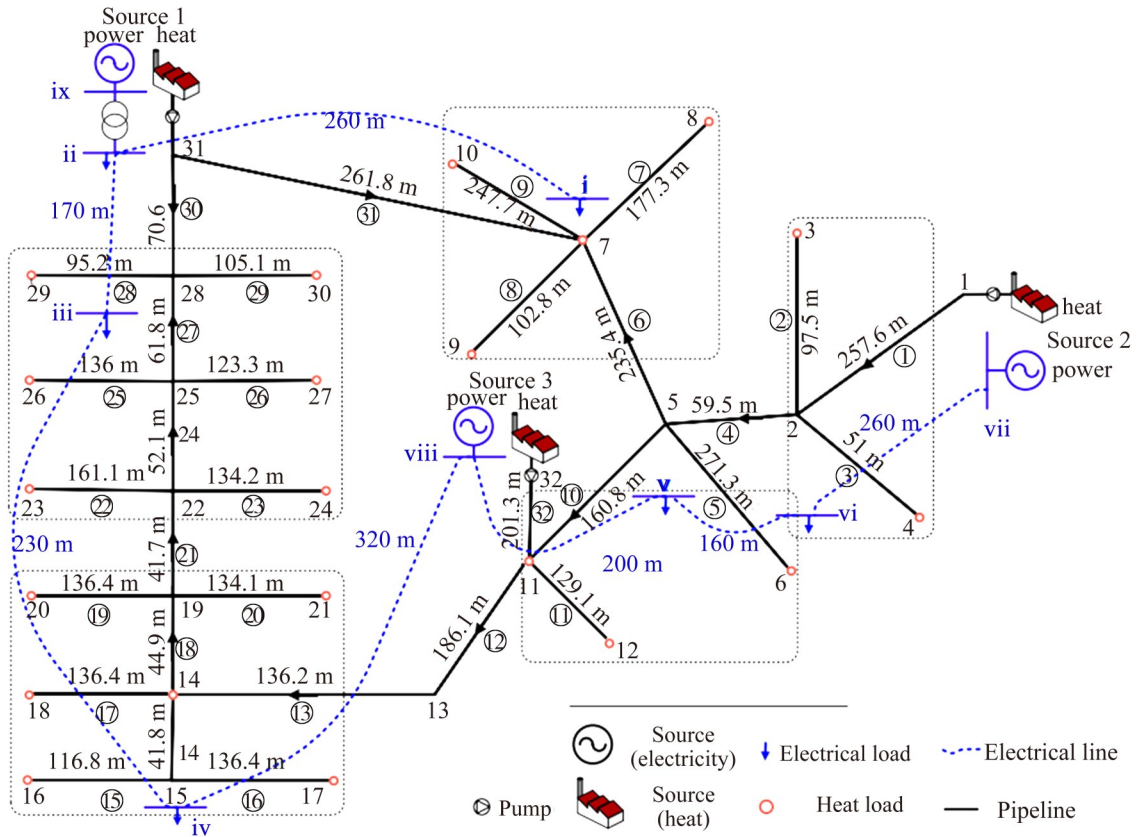


图3 巴厘岛某电-热耦合综合能源系统

Fig. 3 An electric-thermal coupling integrated energy system in Bali

在这个综合能源系统中,电网络脱离大电网孤网运行,并带有1台变压器用以调节系统各节点电压。机组1,3为燃气式热电联产机组,机组2为抽汽式汽轮机热电联产机组。该系统的供热网络模型拓扑含21个热负荷节点与32条供热管道,其电网络有5处电负荷节点及9处母线节点。各热负荷节点处换热器进回水温差 $\Delta T = 40\text{ K}$ 。为确保系统内能量潮流收敛,热-电耦合的综合能源系统需有2个平衡节点。令机组1所在节点为电网络的平衡节点,其电功率未知;节点3则为供热系统的平衡节点,其热功率未知。其他电负荷节点与热负荷数据如表1,2。

表1 电电热负荷

Tab. 1 Loads of electric energy

电网节点编号	电负荷/MW
1	0.2
3	0.5
4	0.5
5	0.2
6	0.2

电网络的稳态计算中,最常用的方法是Newton-Raphson法。对于一个综合能源系统,本质上属于网络的一种,只是由于网内能量之间不能直接互通,需通过耦合元件才能联系。故将Newton-Raphson法拓展到综合能源系统,用以求解能量网络方程,计算结果如图4,5内的 E_1 。为证明计算结果 E_1 的正确性与有效性,同时采用常用综合能源系统的建模方法对本综合能源系统进行稳态仿真分析,仿真结果如图4,5内的 E_2 。两种方法中,对于流体网络采用传统工程常用的达西公式,对于电网络采用传统的交流潮流模型进行计算仿真。

表2 热能负荷
Tab. 2 Loads of heating energy

热网节点编号	热负荷/MW	热网节点编号	热负荷/MW	热网节点编号	热负荷/MW
3	0.107	11	0.145 0	21	0.080 5
4	0.145	12	0.080 7	23	0.107 0
6	0.107	14	0.080 5	24	0.107 0
7	0.107	16	0.080 5	26	0.107 0
8	0.107	17	0.080 5	27	0.107 0
9	0.107	18	0.080 5	29	0.107 0
10	0.107	20	0.080 5	30	0.107 0

图4为两类仿真方法求解所得的电网络各节点电压幅值(标么值)。由图4可看出,基于能量网络理论的建模方法中,电网络建模部分几乎等同于传统建模方法,因此两种仿真计算方法所得电网络仿真曲线基本一致。图5为两类仿真方法求得的供热网络中各传输管道内的热工质质量流率。由图5可看出,两者的仿真曲线接近,计算误差在允许范围以内。由此说明基于能量网络的综合能源系统稳态分析方法是有效和可靠的。

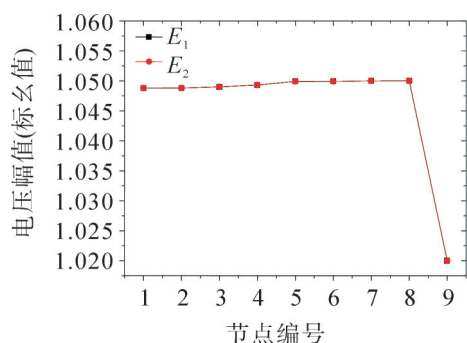


图4 节点电压幅值对比

Fig. 4 Comparison of the nodal voltage amplitude

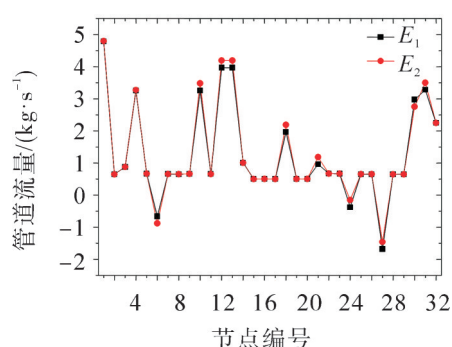


图5 管内质量流率对比

Fig. 5 Comparison of mass fluxes in pipe

4 结 论

1) 综合能源系统可同时向用户提供多种形式的能源,不同形式的能源具有共同的能量本质。基于能量公理可由综合能源系统建立能量网络,再结合传递公理和广义基尔霍夫定律可进一步建立能量网络方程。

2) 对于利用电和热水联合给3个空间加热的模型,建立相应的能量网络和能量网络方程。模型显示,每增加一个加热空间,能量网络方程组增加4个变量,相应增加2个强度量方程和2个约束条件,能量网络方程组仍然封闭可解。该模型和能量网络方程组可推广到有任意数量热负荷的能量网络。

3) 实例计算证明了该能量网络方程及其求解方法的有效性和普遍性。

参考文献:

[1] 李立涅,张勇军,陈泽兴,等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):1-9.
 [2] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
 [3] 华贲. 关于能源互联网层次架构的思考[J]. 南方能源建设,2017,4(4):1-7.
 [4] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2007:23-75.
 [5] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T. The future renewable electric energy delivery and management system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1):133-148.
 [6] WEIS T M, ILINCA A. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada[J]. Energy Policy, 2010, 38(10):5504-5511.
 [7] 程林,张靖,黄仁乐. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
 [8] 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.

- [9] 吴宁. 电网络分析与综合[M]. 北京: 科学出版社, 2003:30-80.
- [10] 刘剑, 贾进章, 郑丹. 流体网络理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002:20-130.
- [11] 韩光泽, 华贲, 陈清林, 等. 能量的普遍化表达式与能态公设[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001, 29(7):48-50.
- [12] 韩光泽, 华贲, 陈清林, 等. 传递过程的统一描述[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(6):1025-1027.

责任编辑: 何莉

(上接第 131 页)

- [16] XIA Q, LI Z, TAN C, et al. Multivariate metal-organic frameworks as multifunctional heterogeneous asymmetric catalysts for sequential reactions[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(24):8259-8266.
- [17] YUAN G Z, SONG K, RONG L L, et al. Synthesis, crystal structure, and photophysical properties of a double open cubane-like Cd(II) complex based on 2-substituted-8-hydroxyquinoline[J]. *Journal of Coordination Chemistry*, 2014, 67(7):1141-1155.
- [18] YUAN G Z, HU G L, SHAN W L, et al. Structural and luminescence modulation in 8-hydroxyquinolate-based coordination polymers by varying the dicarboxylic acid[J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44(140):17774-17783.
- [19] ZHANG L Y, SUN L Y, LI X, et al. Five 8-hydroxyquinolate-based coordination polymers with tunable structures and photoluminescent properties for sensing nitroaromatics[J]. *Dalton Transactions*, 2015, 44(1):401-410.
- [20] XU X F, ZHENG J J, TRUHLAR D G, et al. Ultraviolet absorption spectrum of malonaldehyde in water is dominated by solvent-stabilized conformations[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(35):8026-8029.

责任编辑: 丁吉海