时变能量网络建模与分析

陈皓勇^{1*}, 李明¹, 邱明¹, 葛海麟², 黄龙¹

1. 华南理工大学电力学院, 广州 510641;

2. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 惠州 516025

* E-mail: eehychen@scut.edu.cn

收稿日期: 2018-03-31; 接受日期: 2018-10-23; 网络版发表日期: 2018-11-27

国家重点研发计划(编号: 2016YFB0900100)资助项目

摘要 不同类型的能源系统通过能量转换设备(感应电动机、离心泵等)相互耦合, 研究能源系统的动态特性及其仿真方法对综合能源系统优化设计及性能分析具有重要的实际意义. 为对时变能量网络进行建模和分析, 本文从能量本质的角度出发, 通过深入探讨能量传递及转换机理, 分别建立时变传递线(管)路和能量转换设备的能量网络等值模型. 在时变能量网络模型的基础上, 提出通过构建时变能量网络方程(包括状态方程和输出方程)对综合能源系统的动态特性进行建模仿真的分析方法, 最后通过具体算例对本文所提分析方法的有效性及其实用性进行验证. 本文的研究内容为时变能量网络的建模、分析、优化及规划奠定了基础.

关键词 广延量, 能量, 时变, 能量网络方程

1 引言

实现不同形式能源的综合利用, 在全球能源及环境危机的背景下, 已成为了必然的趋势^[1~4]. 工程中能源的生产、传输及利用, 大多采用网络化的方式进行, 如电网、热网、燃气管网等. 英国和爱尔兰成立的能源网络协会, 对电力和燃气输配管网的协调管理展开研究^[5]. 瑞士联邦理工学院在“未来能源网络远景”项目中, 首次提出了Energy Hub和Energy Interconnector的概念^[6,7]. 文献[8]指出由可再生能源、电力系统和信息通信技术组成的综合能源系统将成为第三次工业革命的核心. 综合能源系统不仅实现电能生产者和消费者之间的共享, 也实现不同形式能源之间的互联和共享.

为了得到综合能源系统整体性能的准确模拟, 需要从整体上对综合能源系统内各能源子网络进行统一建模与分析, 而当前多数关于综合能源系统的模型研究方法中^[9~11], 不同的能流系统采用原有的建模表达机制, 不同领域的模型互换性差, 数据表达不统一, 在时间尺度统一以及数据交换方面存在困难, 影响综合能源系统的统一建模及分析.

要实现不同形式能源物理层面上的真正互联与统一研究, 必须从能量的角度出发, 探讨能量的普遍化传递规律. 考虑到工程实践中, 多数人们更关心网络系统中各支路连接点处的广延量流以及强度量的特性, 以及它们受到输入的源项、支路的参数等的影响. 因此, 在保证精度的情况下, 将系统传输过程中的参数简化

引用格式: 陈皓勇, 李明, 邱明, 等. 时变能量网络建模与分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 243–254

Chen H Y, Li M, Qiu M, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 243–254, doi: 10.1360/N092018-00079

为定常参数, 无疑可以极大加快计算流程. 文献[12]在深入探讨能量本质的基础上, 研究了稳态传输过程中能量的耗散现象, 并以集中参数法将其等效为阻性元件, 建立了时不变(即直流)能量网络的基本理论. 然而, 工程上能源系统的状态往往千变万化, 并不能一直维持在稳定状态, 由于突发事件以及负荷侧需求的波动所导致的系统结构或运行方式的改变, 都会使系统发生动态变化, 此时系统状态参数往往与时间相关. 因此, 本文在时不变能量网络理论研究的基础上, 引入了能量的惯性现象以及弹性现象, 建立了动态情况下多能流传输系统的统一模型, 即时变能量网络理论. 值得一提的是, 本文研究对象为端口型时变能量网络, 与传统时变网络定义有所区别.

本文从能量本质的角度出发, 结合不同类型能量的具体传递特性, 建立时变传递线(管)路的能量网络等值模型. 不同类型的能源系统通过能量转换设备(感应电动机、离心泵等)相互耦合, 进一步建立能量转换设备的能量网络等值模型. 为考察时变能量网络的动态过程, 在时变能量网络模型的基础上, 提出通过构建时变能量网络方程(包括状态方程和输出方程)对综合能源系统的动态特性进行建模仿真的分析方法. 最后以一个数值算例证明所建立的理论及方法的正确性及实用性, 并阐述了其基本应用.

2 能量网络的基本参数

根据热力学知识可知, 描述热力学体系的状态参量可以分为强度量和广延量两类: 强度量是指与物质的量无关, 不具有加和性的量(如热力学温度、电势、流体压强); 广延量是指与物质的量有关, 具有加和性的量(如热力学熵、电荷量、流体体积). 广延量可分为基本广延量、能量及焓(如电荷量、电能及电焓, 又如热力学熵、热能及热焓), 基本广延量是另外两种广延量的传递载体. 常见能量子网中的具有共轭关系的广延量、强度量如表1所示.

自然界任何形式的能量和焓都可以表示成一个基本强度量和一个基本广延量的函数, 而且这两个基本参量的乘积正好具有能量的量纲(如电能可以表示成电势与电荷量的乘积, 热能可以表示成温度与熵的乘积)^[12,13].

为进一步引出时变能量网络基本参数, 下文将从

表1 常见能量子网中的广延量、强度量

能量子网	广延量 x	强度量 X
电网络	电流 i	电压 u
流体网络	体积流量 f	压强 p
热网络	熵 s	温度 T

基本广延量和能量的空间平衡方程出发, 通过严谨的数学推导, 对时变传递线(管)路的传递规律进行分析及讨论.

2.1 时变传递线(管)路的传递规律

能量网络由传递线(管)路组成, 因此须准确地把握能量在时变线(管)路中的传递规律. 工程中的线(管)路通常是圆柱形状的, 如电线、供热管道及天然气管道等, 本文将以图1所示的圆柱形传递线(管)路为对象, 对时变传递线(管)路的传递规律进行深入探讨.

基本广延量和能量的空间平衡方程分别为^[13]

$$\rho \frac{dx}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{J}_x + g_x, \quad (1)$$

$$\rho \frac{Xdx}{dt} = -\nabla \cdot (X\mathbf{J}_x) + g_{en}, \quad (2)$$

其中, ρ 为介质的密度, x 为单位质量介质中的基本广延量, X 为强度量, $\mathbf{J}_x$ 为基本广延量的流密度矢量, g_x 为单位体积介质中基本广延量的源强度, $g_{en} = \mathbf{J}_x \cdot X + Xg_x$ 为单位体积介质中能量的源强度. 对上两式分别进行体积积分, 则有

$$\frac{dx^*}{dt} = H_{x1} - H_{x2} + \int_0^L x_g dL, \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = X_1 H_{x1} - X_2 H_{x2} + \int_1^2 H_x dX + \int_1^2 X dx_g, \quad (4)$$

其中, x^* 为圆柱形传递线(管)内总的基本广延量, E 为圆柱形传递线(管)内的总能量, $H_x = \mathbf{J}_x \cdot A$ 为单位时间通过横截面积 A 的基本广延量流, x_g 为单位长度内基本广延量的产生量.

式(3)表明, 单位时间内一段圆柱形传递线(管)路中广延量的变化量, 等于通过横截面流入该段圆柱形传递线(管)路的广延量与广延量在这段圆柱形传递线

图1 圆柱形传递线(管)路

(管)路内流动时的产生量之和.

式(4)体现了不同形式能量的传递共性, 是研究时变线(管)路传递规律的重要依据. 该式中各项的物理意义: 左侧是单位时间内圆柱形传递线(管)路内总能量的变化量, 右侧第一、第二项是单位时间内经边界流入线(管)路的能量, 右侧的第三项代表与强度量下降相联系的能量减少量(强度量梯度推动下与其他形式能量之间的相互转换部分), 右侧第四项代表随着基本广延量的增加而增加的能量(伴随着基本广延量的产生, 而由其他形式能量转换过来的能量部分). 此外, 由分析力学的基本知识可知, 能量传递转换过程中还会产生广义动能(惯性现象)和势能(弹性现象)及其相互转化^[14].

2.2 能量网络的基本元件

为表示能量传递中存在着阻性、弹性(容性)、惯性(感性)效应, 下面引入3种基本元件.

(1) 阻性元件 R

自然界各种形式的能量, 在传递过程中都会普遍受到一种阻碍的作用, 使能量发生不可逆的耗散. 这种阻力效应, 对于不同形式的能量有着不同的表现形式, 例如电力网络中的电阻, 流体网络中的流阻与及热力网络中的热阻等^[15~17]. 能量在线(管)路内传递的过程中, 为克服这种普遍存在的阻力效应, 将产生一种与强度量随空间分布下降相联系的能量损耗.

与电阻定义相似, 阻性元件定义为传递线(管)路两端的强度量差 ΔX 与通过的广延量 H 之比, 即:

$$R = \frac{\Delta X}{H}. \quad (5)$$

(2) 容性元件 C

在传递过程中, 时变能量网络线(管)路内广延量和能量是时刻变化的. 广延量及能量的存储或消散, 均是通过传递介质来实现. 这种传递过程中普遍存在的将能量以势能的形式储存起来或释放效应, 可以通过一个容性元件 C 的参数来进行描述. 与电容定义相似, 容性元件 C 的定义为

$$C = H / \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right). \quad (6)$$

容性元件代表了广延量与能量在传递过程中的一种存储或消散效应, 其大小与强度量变化的快慢有关.

另外, 系统受到扰动, 广延量会偏离原稳态值, 从原状态过渡到新的稳定状态需要时间, 用容性元件来表示广延量在这段时间内偏离静平衡的效应.

(3) 感性元件 L

在时变能量网络中, 由于惯性的作用, 任何发生高速瞬态变化的地方将使广延量加速或减速并引起强度量变化. 这种传递过程中普遍存在的惯性效应, 可以用一个感性元件 L 的参数来描述, 其定义为

$$L = \Delta X / \left(\frac{dH}{dt} \right). \quad (7)$$

感性元件是能量传递惯性效应的一种反映, 其大小与广延量变化的快慢有关. 与阻性元件反映与强度量下降相联系的能量损失不同, 感性元件反映的是与强度量相联系的能量转换. 电力网络中电感将电场能转化为了磁场能, 流体网络流感将势能(压能)转换为了动能. 此外, 需要特别指出, 热运动能瞬间启动, 在热能传递过程中不存在惯性效应^[18].

除了以上3种基本元件, 为简易恰当地表示不同形式能量的转换, 还需引入2种二端口元件, 它们既不消耗能量, 也不储存能量, 只转换能量.

(1) 广义变压器 TF

能量流过理想的广义变压器功率不变, 但广延量和强度量发生变化, 两个广延量之间和两个强度量差之间都是成比例的. 设变换比以 r 表示, 则有 $\Delta X_2 = r \Delta X_1$; $H_1 = r H_2$. 其图形描述如图2(a)所示.

(2) 广义回转器 GY

作用于广义回转器输入侧的强度量差正比于输出的广延量, 而作用于广义回转器输出侧的强度量差正比于输入的广延量. 设回转比以 k 表示, 则有 $\Delta X_1 = k H_2$; $\Delta X_2 = k H_1$. 其图形描述如图2(b)所示.

3 能量传递的时变能量网络模型

结合不同形式能量的具体传递过程, 下文进一步

图2 广义变压器(a)和广义回转器(b)

建立能量传递的时变能量网络模型.

3.1 电能的传递过程

直导线有分布电容 C 、分布电感 L 和分布电阻 R 存在. 根据传输线理论^[19], 在不计电能漏阻的情况下, 电能平行圆柱形双传输线的时变能量网络等值模型如图3所示.

3.2 压能的传递过程

压能传递的介质有不可压缩液体和可压缩气体. 本文研究的液体满足以下条件:

- (1) 管流是均质流体且在图1所示的圆柱形传递管做一维运动;
- (2) 任何时刻管道中均充满液体, 没有因低压引起的沸腾现象及水柱分离现象发生;
- (3) 管道和流体不发生弹性、线性变形;
- (4) 非稳态下的摩擦阻力损失和稳态下的相同;
- (5) 管道处于同一水平面, 没有重力势能的变化.

液体运动可用Navier-Stokes方程描述:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial X}{\partial l} + u \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right), \quad (8)$$

其中, v 是流体流速; X 是流体压强; ρ 是流体的密度, 为恒值; r 是点到管轴的距离; u 是流体运动黏性系数; 式(8)等号右边第二项为黏性阻力项, 利用平均黏性概念^[20], 将黏性阻力项在圆截面上求平均, 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial x} &= -\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{2\pi\mu}{A} \int_0^R \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} \right) dr \\ &= -\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{2\pi\mu R}{A} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)_{r=R}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $A=\pi R^2$ 是横截面积, μ 是动力黏度. 假设有

图3 时变电能传输线的能量网络等值模型

$$\frac{\partial X}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{8\pi\mu}{A} \bar{v}. \quad (10)$$

两边同乘以 $2\pi r dr$, 并从0~ R 进行积分, 整理得

$$-\frac{\partial X}{\partial l} = \frac{\rho}{A} \frac{\partial H_v}{\partial t} + \frac{8\pi\mu}{A^2} H_v = L \frac{\partial H_v}{\partial t} + R H_v, \quad (11)$$

式中, H_v 是体积流量, 感性元件 $L=\rho/A$, 阻性元件 $R=\frac{8\pi\mu}{A^2}$, 不可压缩液体压能传递的能量网络等值模型如图4所示.

若考虑流体的可压缩性, 如天然气管网中流动的气体, 因其密度是随时间变化的, 故选质量流率作广延量, 压强做强度量, 流过直管的流动方程为

$$\frac{\partial H_m}{\partial t} + R_g H_m + A \frac{\partial X}{\partial l} = 0, \quad (12)$$

式中, H_m 是质量流量, A 是管道的横截面积, X 是压强, R_g 是管道沿程阻力系数.

对于长度为 ∂l 的管道, 由连续性公理可知, 流入和流出管道的质量相等, 可描述为

$$\frac{A}{a^2} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial H_m}{\partial l} = 0, \quad (13)$$

式中, a 为扰动波传递的速度^[16]. 由上式易得, 长度为 l 的管道容性元件 $C=\frac{Al}{a^2}$, 阻性元件 $R=\frac{R_g l}{A}$, 感性元件 $L=\frac{l}{A}$. 由式(12)和(13)易得如图5所示的可压缩流体压能传输管道的能量网络等值模型.

3.3 热能的传递过程

传热学理论中, 强度量是温度, 广延量是热流, 以

图4 液体压能传输管道的能量网络等值模型

图5 时变可压缩流体压能传输管道的能量网络等值模型

一维热传导为例, 由傅里叶导热定律得, 热流率为

$$\frac{\partial H_Q}{\partial t} = -kA \frac{\partial X_T}{\partial l}, \quad (14)$$

式中, H_Q 是热流, k 是导热系数, A 是导热面积.

考虑到材料的储热效应, 两截面间热流率的差值等于控制体温度升高所吸收的热量, 可得

$$\frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{\partial H_Q}{\partial t} \right) = -\rho A c \frac{\partial X_T}{\partial t}, \quad (15)$$

式中, ρ 是介质密度, c 是介质比热容.

类比电路的电阻、电容公式, 由式(14)和(15)可得热传导的等效电路如图6所示.

传热学框架下, 广延量与强度量的乘积不具有能量的量纲, 应在温度-熵的框架下研究热传导和对流传热. 这里提到的熵不是抽象、难以理解的克劳修斯积分, 而是一种类似物质的概念^[21,22]. 在此概念的基础上, 类比电荷, 把熵当做热荷. 下文将基于温度-熵建立热传导、对流传热的能量网络等值模型.

(1) 热传导. 假设总热阻为 R_E , 由傅里叶导热定律得, 流过热阻的热流率为

$$H_Q = \frac{X_1 - X_2}{R_E}. \quad (16)$$

热传导的过程实质上是在温差推动下熵流的运动, 流入一个平均温度为 X_M 的控制体的能流 H_E 等于流入熵流 H_S 与温度 X_M 的乘积, 即:

$$H_E = H_S X_M. \quad (17)$$

因此, 导热过程的熵增为

$$\Delta H_S = H_2 - H_1 = \frac{X_1 - X_2}{R_E X_2} - \frac{X_1 - X_2}{R_E X_1} = \frac{(X_1 - X_2)^2}{R_E X_1 X_2}. \quad (18)$$

值得注意的是, 从高温处 X_1 到低温处 X_2 , ΔH_S 总是大于零. 因此, 随着热量沿轴向流过热阻, 熵总是增加的, 符合热力学第二定律. 热传导的能量网络模型如图

图6 热传导的等效电路

7所示, 图中 S_h 是受控广延量源, 体现不可逆过程中熵的有源性. 当 X_1 等于 X_2 时, 熵流为0; 当熵阻无穷大时, 熵流为0.

(2) 对流传热. 对流传热的驱动力不是温差, 而是流体两端的压力差. 对流传热流体携带的热量为 $cH_m X_i$, 可知熵流大小等于工质比热容与质量流量的乘积, 因为流动过程中质量是守恒的, 此时熵流是守恒的. 考虑工质流过温度为 X_o 的控制体, 与控制体出口处温度一致, 如图8所示. 图中 c 是流体比热容, C 是流体的热容, H_m 是流体的质量流率, X_a 是环境温度, R_E 是管壁的热阻.

上述对流传热过程的能量平衡方程为

$$cH_m X_i = cH_m X_o + \frac{(X_o - X_a)}{R_E} + C \frac{dX_o}{dt}. \quad (19)$$

控制体内的熵变为^[23]

$$\dot{x}_{\text{int}} = \frac{cH_m X_i - cH_m X_o}{X_o} - \frac{(X_o - X_a)}{R_E X_o}. \quad (20)$$

式(20)右边第一项是工质流动引起的熵变化, 第二项是因热能耗散而流入环境中的熵.

为表达控制体流入面两边的流体的能量守恒, 加入回转器(GY), 其回转模量为

$$r = \frac{X_o}{H_{S_{\text{in}}}} = \frac{X_o}{cH_m}. \quad (21)$$

对流传热的能量网络模型如图9所示, 其中 S_{X_a} 是强度量源, 代表环境的温度. 该对流传热模型可为热

图7 热传导的能量网络等值模型

图8 对流传热的能量平衡示意图

图9 对流传热的能量网络等值模型

网管道、换热器的能量网络建模提供基础。

4 能量转换设备建模

能量转换设备是不同量子网络之间的耦合器件。多能流系统中常见耦合设备包括电动机、离心泵。为研究扰动发生时, 能量转换设备两端的广延量、强度量变化情况, 建立感应电动机、离心泵的能量网络等值模型。

4.1 感应电动机

感应电动机的工作是建立在电磁感应的基础之上, 其可以将电能转化为机械能。施加在感应电动机两端的电压感应出电机磁场线圈的速度流 H_ω , 而产生的转矩 ΔX_T 反馈形成电流 H_i , 其转换关系如式(22)所示。这种转换特性可以用回旋器 $GY(k)$ 来表示, 其中 k_m 为电动机转矩转换系数^[24~26]。

$$\begin{cases} \Delta X_E / k_m = H_\omega, \\ H_i \cdot k_m = \Delta X_T. \end{cases} \quad (22)$$

在建立感应电动机的动态模型时, 通常需要考虑能量的惯性、消耗和储存, 参考引入的基本元件, 建立感应电动机的能量网络等值模型, 该模型如图10所示。图中各元件表示的意义如下:

(1) R_{mw} 和 R_{mf} 是阻性元件, 代表电动机转速差、轴承摩擦及转子摩擦特性;

(2) L_{mx} 是与能量惯性的感性元件, 代表转子及轴的转动惯量特性;

(3) C_{mk} 是储存能量的容性元件, 代表机轴的柔度

图10 感应电动机的能量网络等值模型

等特性。

4.2 离心泵

离心泵是流体网络中常见的能量转换设备, 其可以将机械能转化为流体压能, 其能量转换特性能用回旋器 $GY(r_p)$ 来表示, 其能量转换关系见下式:

$$\begin{cases} \Delta X_T / r_p = H_{qv}, \\ H_\omega \cdot r_p = \Delta X_p, \end{cases} \quad (23)$$

其中, ΔX_T , H_ω 分别为转矩与角速度, X_p , H_{qv} 分别压力与体积流量, r_p 为叶轮回旋器模数^[27]。

在建立离心泵的动态模型时, 通常需要考虑能量的惯性和耗散, 参考引入的基本元件, 离心泵的能量网络等值模型如图11所示。图中各元件表示的意义如下:

(1) R_{pf} , R_{pc} 和 R_{pr} 为阻性元件, 分别对应离心泵转子摩擦特性、泄露特性与阀门出口压力损失特性;

(2) L_{px} 为储存能量的感性元件, 代表离心泵转子转动惯量特性。

5 时变能量网络方程的建立

5.1 典型时变能量网络

在流体网络理论中, 与基尔霍夫电压定律(KVL)和基尔霍夫电流定律(KCL)对应的分别是流体节点定律及流体回路定律, 能量网络理论中广义基尔霍夫定律的提出, 使得我们能像电网络理论一样, 列出能量网络方程。为考察时变能量网络的动态过程, 本章在时变能量网络模型的基础上, 提出通过构建时变能量网络方程(包括状态方程和输出方程)对综合能源系统的动态特性进行建模仿真的分析方法, 并通过算例分析对所提方法的有效性及其实用性进行验证。

为不失一般性, 本文以某热电联供系统为研究对象, 该系统如图12所示。热电联供系统存在着多种形式的能量传递(电能、压能、热能等); 这些能量除了通过传递线(管)路进行传递外, 还通过多个能量转换设备耦合在一起(离心泵、电热器、换热设备等)。由于电热器响应速率较快, 本文假设电热器能够迅速反馈并抵平供热系统由于波动所产生的热功率差额。

图12中实线代表电力网络, 传输电能; 虚线代表流体网络, 主要传输热能, 同时消耗压能; 电力网络与流

图 11 离心泵的能量网络等值模型

图 12 (网络版彩图)时变能量网络

体网络依靠离心泵 \$TM\$ (离心泵由感应电动机提供动力) 和热负荷 (\$P_T = P_{Th} + P_{Te}\$, 其中 \$P_{Th}\$ 代表用户侧换热器提供的热量, \$P_{Te}\$ 代表电热器提供的热量, 两类热量互不影响, 共同满足用户热负荷) 耦合在一起。\$S_e\$ 代表电源, \$S_T\$ 为热源, 输入流体的温度保持不变。热负荷处装有换热器, 在此处发生的热功率交换与换热器进出口温差有关。

在图 12 所示的时变能量网络中, 热能主要依靠流体网络进行传递。在管道不长、流量较小的情况下, 流体在管道传递过程中热量损失很小, 可认为流体温度仅在热源及用户侧换热设备发生热量交换时才发生变化。此外, 在实际交流电力网络中, 其电流与电压通常可表达为正弦或者余弦函数, 每时每刻都在发生变化, 但其作用在电动机与电热器的电压通常可以认为是恒定的。为分析方便, 在本文假定电力网络电压源 \$S_e\$ 为常量。

5.2 时变能量网络模型

根据以上分析, 结合网络相关知识, 将图 12 简化, 并将各个支路, 节点以及基本回路编号, 即可建立时变能量网络简化图。简化图如图 13 所示, 其中图 13(a) 为电力网络和流体网络简化图, 图 13(b) 为能量转换设备

(感应电动机和离心泵) 简化图。图 13(b) 的左端连接着图 13(a) 的 \$b_1\$, 图 13(b) 的右端连接着图 13(a) 的 \$b_4\$。

在时变能量网络简化图中, 选定 \$n_1, n_7\$ 为参考节点, 即可得到与之对应的关联矩阵 \$\mathbf{A}\$ 及基本回路矩阵 \$\mathbf{B}_f\$。

对于图 13, 其广延量矩阵为

$$\mathbf{H} = [H_1 \ H_2 \ \dots \ H_{15} \ H_{16}]^T.$$

支路两端强度量差值矩阵为

$$\Delta \mathbf{X} = [\Delta X_1 \ \Delta X_2 \ \dots \ \Delta X_{15} \ \Delta X_{16}]^T.$$

即有:

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{H} = 0, \\ \mathbf{B}_f\Delta \mathbf{X} = 0. \end{cases} \quad (24)$$

该方程组中, 共有 16 个方程, 有变量 32 个, 因此, 还差 16 个方程才能解此方程组。其中, \$\Delta X_1 \sim \Delta X_3\$ 为相应支路的电压差, \$H_1 \sim H_3\$ 为相应支路的电流; \$\Delta X_4 \sim \Delta X_7\$, \$\Delta X_{14} \sim \Delta X_{16}\$ 为相应支路的压强差, \$H_4 \sim H_7\$, \$H_{14} \sim H_{16}\$ 为相应支路的体积流量; \$\Delta X_8 \sim \Delta X_{13}\$ 为相应支路的转矩, \$H_8 \sim H_{13}\$ 为相应支路的转速; 在电力网络中, 电压源 \$S_e\$ 通常是已知的。在图 13 所示的时变能量网络中, 电力网络及流体网络通过离心泵(感应电动机)和电热器耦合在一起, 根据能量守恒定律, 离心泵(感应电动机)支路和电热器支路可以再列出 6 个方程。此外, 对于流体网络、感应电动机与离心泵的各个支路, 可再建立 9 条支路特性方程。

5.3 时变能量网络方程

系统在输入或扰动作用下的运动状态可用一组状态变量来描述, 状态变量是借以表征系统内部状态随时间变化的物理变量, 而描述状态变量随时间变化的数学表达式即状态空间方程。为考察时变能量网络的动态过程, 本文在时变能量网络模型的基础上, 进一步构建时变能量网络方程(包括状态方程与输出方程), 并利用数值仿真软件对热电联供系统进行动态仿真及分析。

(1) 控制变量 \$u\$ 与状态变量 \$x\$ 的选取

对于如图 13 所示的时变能量网络, 施加在电动机与电热器两端的电压源 \$S_e\$ 是外加的激励源, 因此控制量 \$u = \Delta X_2\$。

由于系统动态性能主要受惯性效应和容性效应的

图 13 (网络版彩图)时变能量网络简化图. (a) 电力网络和流体网络简化图; (b) 能量转换设备简化图

影响, 一般选取流过惯性元件的广延量 H 和容性元件两端的强度量差 ΔX 作为系统状态变量. 对于时变能量网络来说, 选取网络中的一组独立变量, 通常以网络中的储能元件作为状态变量. 考虑独立的状态变量, 一般指的是储能元件间没有彼此的约束、依赖关系, 因此, 能量网络的复杂度可以表示为

$$n = N_{LC} - B_C - Q_L, \quad (25)$$

式中, N_{LC} 为能量网络中储能元件 L , C 的个数之和; B_C 为仅由容性元件或感性元件与强度量源构成的独立回路总数; Q_L 为仅由容性元件或感性元件与广延量源组成的独立割集的总数.

对如图13所示的时变能量网络, 可分别选取感性元件支路的广延量值 H_5 , H_6 , H_7 , H_{10} , H_{12} 与容性元件支路的强度量差 ΔX_{11} 作为状态变量.

(2) 根据5.2节建立的时变能量网络方程, 进一步推导出如式(26)的时变能量网络状态方程及输出方程.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, t), \\ y &= g(x, u, t), \end{aligned} \quad (26)$$

式中, $g(x, u, t)$ 是代数函数. 特别地, 对于线性系统, 方程(26)可进一步写成方程(27)所示的标准形式:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mathbf{A}x + \mathbf{B}u, \\ y &= \mathbf{C}x + \mathbf{D}u. \end{aligned} \quad (27)$$

对于线性定常系统, 式(27)中系数矩阵为常数矩阵; 否则, 该系数矩阵中某些元素是关于时间的变量.

6 算例分析

6.1 时变能量网络基本参数

仍以上述热电联供系统为例, 该系统总的热负荷为 $P_T=300 \text{ kW}$, 该热负荷由热网和电热器共同承担. 为计算的简便, 热源可使加热处的温度保持不变. 该系统能量转换设备(感应电动机、离心泵)的基本参数如表2所示.

6.2 仿真分析

根据上一小节的研究内容, 即可建立时变能量网络的动态模型. 本文在上述模型的基础上, 对3种不同

表 2 能量转换设备的基本参数

元件	运行参数	描述
感应电动机	$R_{mw}=53 \text{ N m (rad s}^{-1}\text{)}^{-1}$	滑差系数
	$KR_{m1}=3.16 \times 10^{-7} \text{ N m (rad s}^{-1}\text{)}$	旋转摩擦系数
	$KR_{m2}=3.2 \times 10^{-5} \text{ N m (rad s}^{-1}\text{)}^{-1}$	轴摩擦系数
	$L_{mx}=33.0 \times 10^{-1} \text{ kg m}^2$	转子惯量
	$C_{mk}=2 \times 10^{-2} \text{ rad/(N m)}$	轴柔度
离心泵	$R_{pj}=8 \times 10^{-3} \text{ N m (rad s}^{-1}\text{)}^{-1}$	转子摩擦系数
	$L_{px}=2.3 \times 10^{-1} \text{ kg m}^2$	转子惯量
	$R_{pc}=5 \times 10^8 \text{ Pa (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}^{-1}$	泄露系数
	$R_{pr}=15$	阀门阻力系数

扰动发生后的能量网络响应进行时域仿真, 该3种扰动分别为: (1) 电网侧电压源 S_e 突变, 其电压有效值由220 V下降至218 V; (2) 增大热网侧离心泵的出口阀门开度, 阀门阻力系数突变为 $R_{pr}=10$; (3) 减小热网侧离心泵的出口阀门开度, 阀门阻力系数突变为 $R_{pr}=20$ 。

本文建立的时变能量网络方程(状态方程和输出方程), 由于考虑了流体网络与能量转换设备的非线性动态特性, 实质为一个刚性非线性微分方程组, 其解的分量数量级上差别很大。对于形如式(26)和(27)的微分方程组, 文献[28,29]提供了许多行之有效的解法。本文利用变步长的龙格库塔法进行求解, 并通过MATLAB进行仿真, 仿真时长为20 s。通过把感应电动机、离心泵的基本参数以及初始条件代入后, 经过迭代即可求得时变能量网络的动态响应。

三种不同扰动发生后电力网络、流体网络与感应电动机的动态响应分别如图14~16所示。图14为电力网络离心泵支路电流 H_1 与电热器支路电流 H_3 的动态响应, 图15为流体网络离心泵支路体积流量 H_4 与出口处压强 ΔX_{15} 的动态响应, 图16为感应电动机的转速 H_{12} 与

转矩 ΔX_{11} 的动态响应。

扰动1发生时, 在 $t=0$ 时刻电压源 S_e 从220 V突变为218 V, 电压水平下降, 导致离心泵支路电流 H_1 、离心泵出口压强 ΔX_{15} 、电动机的转矩 ΔX_{11} 与转速 H_{12} 均发生大幅度的脉动。扰动1发生后, 电压突变首先冲击感应电动机, 其转速 H_{12} 由155.8 rad/s突变至153.3 rad/s, 其输出转矩也由扰动前的10.2 N m下降至8.6 N m。由于感应电机自身的惯性作用, 振荡将持续数秒到十多秒不等, 最终感应电动机的转速 H_{12} 将稳定在154.3 rad/s, 输出转矩将稳定在9.8 N m。电动机转速与转矩的大幅度下降导致离心泵出口压力 ΔX_{15} 与体积流量 H_4 减小, 扰动1发生后电动机与离心泵输出功率均变小。供水量的减少导致供热量大幅下降, 在电压下降的情况下, 为满足热负荷需求, 电热器支路电流 H_3 出现较大幅度增加。电压的突变也导致感应电机的电枢电压发生突变, 此时感应电机的反电势大于电枢电压, 转子的动能转化为电能回馈到电网中。随着制动过程的发生, 电枢与转子重新趋于稳定, 达到新的平衡点。

扰动2发生时, 离心泵出口阀门开度突然增大, 阀门对离心泵产生的阻力减小, 离心泵体积流量 H_4 增大。根据离心泵的特性曲线可知, 通过离心泵的流量增大, 离心泵输出的有效扬程将减小, 该特性与图11流体网络动态响应相一致^[27]。流体网络运行工况的变化, 将反过来影响电力网络和感应电动机参数。扰动2发生后, 负载的变轻使得感应电机的运行受到冲击, 产生波动, 同时也使得离心泵支路电流 H_1 和感应电动机有效转矩 ΔX_{11} 逐步下降, 分别由初始时刻的8.0 A和10.2 N m依次下降至7.7 A和9.7 N m。此外, 由于离心泵供水量不断攀升, 电制热需求减少, 电热器支路电流 H_3 也发生持续性下降。

扰动3发生时离心泵出口阀门开度突然减小, 与扰动2相反, 阀门对离心泵产生的阻力增加, 离心泵体积

图 14 电力网络动态响应

图 15 流体网络动态响应

图 16 感应电动机动态响应

流量 H_4 减小, 出口压力 ΔX_{15} 增大. 扰动2发生后, 离心泵支路电流 H_1 和感应电动机有效转矩 ΔX_{11} 持续上升, 分别由初始时刻的8.0 A和10.1 N·m增大至8.3 A和10.5 N·m. 由图14可知, 当扰动2和3发生时, 由于电压源 S_e 恒定在220 V, 流体网络对电动机转速 H_{12} 的影响较小, 可近似认为转速恒定. 此外, 由于离心泵供水量变少, 电制热需求增大, 电热器支路电流 H_3 发生持续性上升.

由上述的分析可知, 基于本文所提方法的仿真结果与热电联供系统的运行特性是一致的, 由此证明了本文所提理论的有效性及其实用性. 本文提出的时变能量网络动态建模及仿真方法, 对综合能源系统的优化设计及性能分析具有重要的实际意义.

7 结论

在传统行业, 包括电力工业、航空工业、建筑测量、电子器件等, R/L/C等效模型已经有了广泛的应用以及成熟的经验. 然而, 除电力行业外, 大多数行业内对R/L/C等效模型的应用多采用热电比拟法, 并未从根本上解释模型的来源. 本文从公理化的角度描述了电力网络、流体网络以及热力网络中能量传递的共有特性,

从根本上解释了R/L/C等效模型的来源, 并可借鉴电力系统中成熟的模型求解工具对网络进行求解; 另一方面, 当前工程实践中, 对于R/L/C等效模型的应用大多局限于本行业领域内, 而时变能量网络理论则以不同能流系统之间的互联与共享为核心, 研究跨领域系统内的能量交互关系, 具有普适性, 贴合未来能源变革的发展方向.

本文初步研究了时变能量网络的建模和分析方法. 首先综合电路、流体力学、传热学的基本理论, 基于能量的普遍化表达式, 建立了时变传递线(管)路和综合能源系统主要耦合元件(感应电动机和离心泵等)的能量网络等值模型, 然后构建了时变能量网络方程(包括状态方程和输出方程), 以对综合能源系统的动态特性进行建模仿真. 最后以一个数值算例证实了本文所建立的理论及方法的有效性与正确性.

在后期的研究中, 将进一步基于非平衡态热力学(热动力学)、分析力学(包括拉格朗日力学和哈密顿力学)及连续统物理学, 采用公理化思路进一步发展和完善时变能量网络理论. 深刻揭示能量在多能流系统中流动过程的物理机理, 为综合能源系统的建模、分析、规划与运行奠定坚实的基础.

参考文献

- 1 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述. *电网技术*, 2003, 27: 71–75
- 2 Wu D W, Wang R Z. Combined cooling, heating and power: A review. *Prog Energy Combust Sci*, 2006, 32: 459–495
- 3 胡小坚, 王忠平, 张雪梅, 等. 分布式天然气CCHP系统应用研究现状与前景. *煤气与热力*, 2011, 31: 4–9
- 4 Liu X, Wu J, Jenkins N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks. *Appl Energy*, 2016, 162: 1238–1250
- 5 Energy Networks Association. Guide to the UK and Ireland energy networks. [2013-03-02]
- 6 Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Visions of future energy networks. [2014-02-20]
- 7 Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future. *IEEE Power Energy Mag*, 2007, 5: 24–30
- 8 Rifkin J. The third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World. New York: Palgrave Macmillan, 2011. 26–88
- 9 潘振宁, 王克英, 瞿凯平, 等. 考虑大量EV接入的电-气-热多能耦合系统协同优化调度. *电力系统自动化*, 2018, 4: 104–112
- 10 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度. *电力系统自动化*, 2018, 13: 12–19
- 11 Wei F, Wu Q H, Jing Z X, et al. Optimal unit sizing for small-scale integrated energy systems using multi-objective interval optimization and evidential reasoning approach. *Energy*, 2016, 111: 933–946
- 12 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程. *西安交通大学学报*, 2014, 48: 66–76
- 13 韩光泽. 寂态热动力学基础理论研究. 博士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2002. 55–69
- 14 梅凤翔. 高等分析力学. 北京: 北京理工大学出版社, 1991. 15–43
- 15 邱关源, 罗先觉. 电路. 北京: 高等教育出版社, 2006. 1–136
- 16 罗志昌. 流体网络理论. 北京: 机械工业出版社, 1988. 1–121
- 17 杨世铭, 陶文铨. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 2006. 1–160
- 18 Seeler K A. System Dynamics: An Introduction for Mechanical Engineers. New York: Springer-Verlag, 2014. 1–105
- 19 周省三. 电磁场基本教程. 北京: 高等教育出版社, 1995. 237–239
- 20 罗志昌, 张松. 均匀圆管中脉动压力梯度与流量关系的近似分析方法. *北京工业大学学报*, 1988, 14: 93–98
- 21 Fuchs H U. The Dynamics of Heat. New York: Springer-Verlag, 1996. 20–60
- 22 Fuchs H U. The Dynamics of Heat—A Unified Approach to Thermodynamics and Heat Transfer. New York: Springer-Verlag, 2010. 120–150
- 23 Shoureshi R, McLaughlin K M. Analytical and experimental investigation of flow-reversible heat exchangers using temperature-entropy bond graphs. *J Dyn Sys Meas Control*, 1984, 106: 170
- 24 Dransfield P. Hydraulic Control Systems—Design and Analysis of Their Dynamics. New York: Springer-Verlag, 1981. 23–46
- 25 Karnopp D, Margolis D, Rosenberg R. System Dynamics: A Unified Approach. New York: John Wiley & Sons, 1975. 1–58
- 26 吴大转, 王乐勤, 胡征宇. 离心泵快速启动过程瞬态水力特性的数值模拟. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39: 1427–1430
- 27 关醒凡. 泵的理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1987. 86–105
- 28 李荣华, 冯果忱. 微分方程数值解法. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1996. 50–60
- 29 李庆扬. 非线性方程组数值解法. 北京: 科学出版社, 1987. 38–76

Modeling and analysis of time-varying energy network

CHEN HaoYong¹, LI Ming¹, QIU Ming¹, GE HaiLin² & HUANG Long¹

¹ *Institute of Power Economics and Electricity Markets, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;*

² *Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516025, China*

Different types of energy systems are coupled by energy conversion devices (e.g., induction motors, centrifugal pumps, etc.). It is of great practical significance to study the dynamic characteristics and simulation method of multi-type energy system for the optimization design and performance analysis of integrated energy system. In order to model and analyze the time-varying energy network, from the point of view of the essence of energy, energy network equivalent models of time-varying transfer line (pipe) and energy conversion equipment are established through in-depth study of the mechanism of energy transfer and conversion. On the basis of the time-varying energy network model, a method of modeling and simulating the dynamic characteristics of the integrated energy system by constructing time-varying energy network equations (including state equations and output equations) is proposed, then the validity and practicability of which are verified by a practical example. The research of this paper lays the foundation for the modeling, analysis, optimization and planning of time-varying energy network.

extensive quantity, energy, time-varying, energy network equations

doi: [10.1360/N092018-00079](https://doi.org/10.1360/N092018-00079)