

基于 PSASP 的电热耦合能源系统潮流计算

夏 天¹, 陈瑜玮², 郭庆来², 孙宏斌², 熊 文³, 刘育权³

(1. 清华大学 能源互联网创新研究院, 北京 100084; 2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和
仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620)

摘要: 针对以电/热/冷多类型能源耦合为特征的能源互联网系统, 建立了热力管网系统关键设备的稳态模型, 研究了电热耦合能源系统的潮流计算方法。同时基于目前国内电力系统分析普遍采用的电力系统分析综合程序(PSASP), 利用用户程序接口(UIP)开发了电热耦合能源系统的潮流计算程序, 充分利用成熟的电力系统分析商业软件的功能, 实现综合能源网络的稳态计算, 为能源互联网做进一步的系统分析奠定基础。

关键词: 能源互联网; 电热耦合能源系统; 潮流计算; PSASP; 用户程序接口

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.008

0 引言

近年来, 以能源互联网为特征的第三次工业革命已蓄势待发。能源互联网的特征是以电网为主干和平台^[1], 进行多种能源形式的耦合互补, 其中以热电联产机组作为清洁能源中枢进行电热耦合的综合能源系统应用最为普遍, 是能源互联网的主要表现形式之一, 也是目前我国分布式能源结构调整的重要方向。

多能耦合系统的网络分析是能源互联网领域的重要研究内容之一, 是进行运行调控、能源交易的计算依据与基础, 这里不仅要考虑系统中供/用能侧各自的能量转换互补, 更要考虑多能系统的网络平衡。目前, 在传统的电、热、气等各自领域, 各系统分析方法相对成熟。例如, 电力系统采用潮流计算^[2]; 热力系统遵循流体和热力学定律, 通过联立水力(或蒸汽)和热力 2 组方程计算^[3]; 天然气系统遵循流体力学定律, 用流体力学方程表征计算^[4]。此外, 随着风机、光伏和热电联供/冷热电联供等可再生能源/清洁能源的大量建设以及主动性配网、智能微网的兴起, 针对单个设备和小型电力网络的建模及仿真研究较多^[5-9], 部分微网系统由于存在多种能源形式的综合利用, 也考虑了相应的数学模型^[10-12]。然而, 大部分模型仅考虑了能量平衡, 部分考虑了动量平衡, 但均没有考虑网络平衡, 并不适用于系统级的分析计算。文献[13]和[14]分别研究了电网与天然气网络、热网的联合潮流分析。文献[15-16]使用网络流模型对美国的煤、天然气和电网进行了仿真分析。这些研究成果为本文实现电热耦合潮流计算提供了借鉴

和参考。然而, 上述文献主要考虑系统的多能特性, 其中电网部分的设备模型种类不够丰富, 算法以传统的牛顿-拉夫逊法为主, 未充分利用现有较为成熟的电力系统分析模型及算法, 对于电网设备种类丰富或采用交直流混联电网结构等情况, 上述文献并未进行仿真验证。

另一方面, 目前在电、热各自的领域都有专业的仿真软件进行辅助分析, 例如电领域中的 PSASP、BPA、PSCAD 等, 热领域中的 Thermoflow、Ansys、Cycle-Tempo 等, 然而这些软件并未考虑多能之间的耦合, 对于综合能源系统, 仍然没有成熟的分析工具可供使用, 上述各专业软件中先进的模型、算法、功能等还无法在多能耦合系统分析中得到应用。

本文基于当前国内电力领域普遍采用的 PSASP 软件, 利用用户程序接口(UIP)功能, 建立了热力管网系统关键设备的模型, 研究了电热耦合能源系统的潮流计算方法并用程序实现, 开发了基于 PSASP 的电热耦合能源系统潮流计算功能。

1 热力系统模型

热力系统是通过工质(流体)在管网中的流动完成热量的传输和交换的, 因此, 热力系统涉及两方面的网络建模工作, 即流体力学建模和热力工况建模。本文所研究热力系统的流体工质为水。

1.1 网络拓扑分析

与电力系统类似, 热力系统也是基于图论进行网络拓扑分析。热力管网主要由热力管道和连接件构成, 分析中可以将热力系统抽象成图, 热力管道对应图的边, 连接件对应图的顶点, 每个管道定义流量正方向, 例如取为热网设计时的流体流向, 从而可用图的矩阵描述热力系统拓扑结构。管道与节点的属性如表 1 所示。热网抽象后, 可得到热网关联矩阵 A_0 、降阶关联矩阵 A 、上关联矩阵 $\tilde{A}$ 、下关联矩阵 $\underline{A}$

收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-05-02

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

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901300) and the National Natural Science Foundation of China(51537006)

和回路矩阵 B_i 。关于用图论进行网络拓扑分析的内容,在文献[17-18]中有详细介绍,本文不再赘述。

表 1 管道与节点的属性
Table 1 Attributes of pipe and node

设备	属性
管道	长度,管径,导热率,粗糙度,首末端高度差,流量,首端温度,末端温度,首末端压力差
节点	热负荷,节点温度,流量

1.2 流体力学稳态方程的建立

根据图论,结合管道的压力损失方程、管道压降方程以及热力系统遵循的节点流量方程和回路压降方程,列出包含 N 个节点及 B 条管道的热力系统流体力学稳态方程如下^[18-19]:

$$\begin{cases} AM=Q \\ B_i \Delta H=0 \\ \Delta H_b+Z-H_p-\Delta H=0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, M 为 B 阶管道流量列向量(kg/s); Q 为 N 阶节点流入流量列向量(kg/s); ΔH 为 B 阶管道压差列向量; ΔH_b 为 B 阶管道压力损失列向量(mH₂O); Z 为 B 阶管道首末端节点高度差列向量(m); H_p 为 B 阶泵扬程列向量(m)。

式(1)共有 $2B$ 个方程,其中 M 、 Q 、 ΔH 、 ΔH_b 、 H_p 均为状态量, ΔH_b 、 H_p 为 M 的函数,故有 $2B+N$ 个待求量,需要给定其中 N 个已知量,方程可解。

1.3 热力工况稳态方程的建立

上述系统热力工况稳态方程如下^[18-19]:

$$\begin{cases} T_e-T_a-E(\tilde{A}^T T_n-T_a)=0 \\ C_p \tilde{A} \text{diag}(M) T_e - C_p \tilde{A} \text{diag}(M) \tilde{A}^T T_n - Q_j = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E = \text{diag}[e^{-\lambda_1 L_1 / (C_p m_1)}, e^{-\lambda_2 L_2 / (C_p m_2)}, \dots, e^{-\lambda_B L_B / (C_p m_B)}] \quad (3)$$

其中, T_e 为 B 阶管道末端温度列向量(℃); T_n 为 N 阶节点温度列向量(℃); Q_j 为 N 阶节点热负荷列向量(W); T_a 为 B 阶环境温度列向量(℃); C_p 为流体比热容(J/(kg·℃)); E 为 B 阶温度衰减系数对角阵; λ_i 、 L_i 和 m_i ($i=1, 2, \dots, B$) 分别为第 i 条管道的单位长度的导热率(W/(m·℃))、长度(m)和流量(kg/s)。

式(2)共有 $B+N$ 个方程, T_e 、 T_n 、 Q_j 为状态量,共有 $B+2N$ 个待求量,需给定其中 N 个已知量,方程可解。

1.4 热力系统稳态模型

根据式(1)与式(2),可得热力系统稳态模型如下:

$$\begin{cases} AM-Q=0 \\ B_i \Delta H=0 \\ \text{diag}(S)M|M|+Z-H_0+S_p M^2-\Delta H=0 \\ T_e-T_a-E(\tilde{A}^T T_n-T_a)=0 \\ C_p \tilde{A} \text{diag}(M) T_e - C_p \tilde{A} \text{diag}(M) \tilde{A}^T T_n - Q_j = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, S 为 B 阶管道阻力系数列向量; H_0 为 B 阶泵静

扬程列向量(m); S_p 为 B 阶泵阻力系数列向量。

1.4.1 模型讨论

式(4)共有 $3B+N$ 个方程,状态量为 M 、 Q 、 ΔH 、 T_e 、 T_n 、 Q_j ,共 $3B+3N$ 个待求量,需要给定其中 $2N$ 个已知量,方程才能求解。通常情况下,对于非阀门、负荷类的一般管道连接件节点,可以不考虑流体泄漏情况,上述状态量 Q 为 0。另外,根据系统调节模式是采用定温调节还是定功率调节,可进一步给定 T_n 、 Q_j 中 N 个已知量:对于定温调节,则节点温度 T_n 已知;对于定功率调节,则节点热功率 Q_j 已知。

此外,式(4)为非线性方程组,需要采用数值解法求解,本文采用经典的牛顿-拉夫逊法,该方法对于节点数不多的园区级综合能源系统潮流计算具有足够的收敛性。计算过程中,由于 S 及 E 均为 M 的函数,在每步迭代前先由上一步计算的流量结果计算该系数,再将其作为定值参与本次迭代,这是一个显式计算的过程。式(4)用函数关系式表示为:

$$F(X)=0 \quad (5)$$

其中, F 为误差函数; $X=[M^T, Q^T, \Delta H^T, T_e^T, T_n^T, Q_j^T]^T$ 。定义系统的雅可比矩阵 J 为:

$$J = \partial F / \partial X \quad (6)$$

设计式(6)的求解流程如图 1 所示。

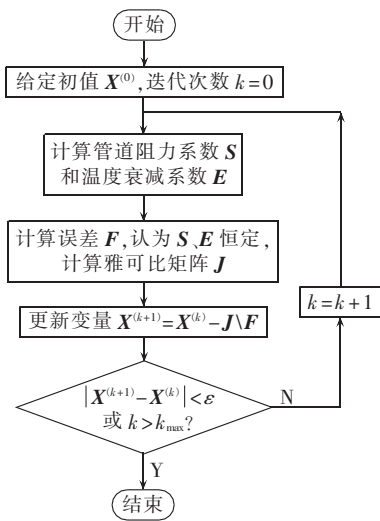


图 1 热网潮流计算流程

Fig.1 Flowchart of thermal flow calculation

1.4.2 关键设备的处理

热力系统关键设备包括热源(如联供机组、锅炉等)、热负荷、热力管道及连接件(含一/二次管网)、换热器、阀门、泵等。在系统稳态模型中,热源、热负荷、管道连接件、换热器及阀门均被处理为节点,管道被处理为有向边。各设备稳态模型处理如下。

a. 热源/热负荷。节点温度 t_n 、热负荷 q_j 一般都不为 0,且二者符号相反,定温调节下 t_n 给定,定功率调节下 q_j 给定。如无回水网络,流入流量 q 不为 0。

b. 管道连接件。不考虑节点泄漏,则节点属性

中 q_j, q 为 0, t_n 为待求状态量。

c. 泵。泵一般装设在管道上,可作为依附在管道上的设备,扬程 h_p 为管道属性之一。通常情况下泵阻力系数很小,则有 $h_p \approx h_0$,若管道上没有泵,则 $h_p=0$ 。

d. 换热器。换热器是热力系统中进行热量传输交换的设备,也是一/二次管网之间的耦合设备。对于单独的一次或二次管网而言,换热器可看作是 q_j 不为 0 的热负荷或热源元件。一般换热器采用定温调节,因此在热网潮流计算中,换热器节点温度为已知量。

e. 阀门。阀门是热力系统中进行管道连接和流体流量调节的设备。与一般管道连接件不同的是,阀门虽被处理成节点,但其流入流量 q 及节点热功率 q_j 并不一定为 0,随着阀门开度的变化, q 和 q_j 的大小也会变化。阀门开度与 q, q_j 的关系可描述为以下线性关系:

$$q = k_q m_{in} (1 - \omega) \quad (7)$$

$$q_j = C_p q (t_{e,in} - t_a) \quad (8)$$

其中, ω 为阀门开度,取 0~1; k_q 为流量系数; m_{in} 为流入节点管道流量(kg/s); $t_{e,in}$ 为流入节点管道末端温度(°C); t_a 为环境温度(°C)。 ω 值可通过系统遥测信号得到,在热力系统稳态模型中被当作已知量,从而 q 已知, q_j 可由 $t_{e,in}$ 求出,因此阀门模型未增加新的状态量。

2 基于 PSASP 实现电热耦合联合潮流计算

2.1 PSASP 程序简介

PSASP 是中国电科院开发的一套用于电力系统离线仿真分析的大型综合软件包,具有包括潮流计算、暂态稳定计算、短路计算、小干扰计算、电压稳定计算、静态安全分析在内的十余种计算模块,基本涵盖了一般电力系统分析所需要的各项功能,目前在我国超过 70% 的网、省、地调中均有应用,是我国电力行业进行电网仿真的常用工具之一。

利用 PSASP 的 UPI 功能,可以实现 PSASP 与用户程序模块兼容,使 PSASP 变成一个开放的软件包。其中潮流计算用户程序接口(LF/UPI)实现潮流计算模块和用户程序模块交替运行,共同完成一项基于潮流计算的新任务。

2.2 电热耦合系统潮流计算

在得到前述热力系统模型的基础上,将电力系统模型一并代入,并考虑电热耦合器件的输出特性方程,就可以对电热耦合能源系统进行联合潮流求解。

电力系统潮流方程如下^[18]:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n; P_i, Q_i$ 分别为节点 i 的注入有功、无功功率; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点 i, j 之间的互

电导和互电纳; δ_{ij} 为节点 i, j 之间的相角差; U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压。

用 $F_e=0$ 表示式(9)的电网潮流模型, $F_h=0$ 表示式(4)的热网潮流模型, $F_{eh}=0$ 表示电热耦合器件模型,则电热耦合能源系统潮流模型如下^[18]:

$$F = \begin{bmatrix} F_e \\ F_{eh} \\ F_h \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

2.2.1 模型讨论

式(10)所述的系统潮流模型中,最为关键的是电热耦合器件模型,即 $F_{eh}=0$,这是进行电热潮流统一计算的前提和基础。电热耦合器件包括联供机组、水泵、热泵、电锅炉、制冷机等。这些设备内部的工作机制各自不同且较为复杂,但对于电热耦合潮流计算而言,只需用功率输出外特性方程表征各器件,便可建立电网潮流与热网潮流间的关系,实现联合求解。

2.2.2 电热耦合器件功率外特性建模

a. 联供机组。热电联供机组可分为背压式、抽凝式 2 种类型,其电-热出力运行可行域均可近似描述为多边形区域,发电出力和供热出力的关系可表示为:

$$P_G = f(Q_G) \quad (11)$$

其中, P_G, Q_G 分别为联供机组电、热功率(W); f 关系式通过机组出厂测试结果曲线得到。

b. 水泵。水泵工作时满足如下功率关系^[18]:

$$P_p = \frac{mgh_p}{10^6 \eta_p} \quad (12)$$

其中, P_p 为水泵电功率(MW); g 为重力加速度(m/s²); η_p 为水泵效率; m 为流量(kg/s); h_p 为扬程(m)。

c. 热泵/电锅炉/制冷机。热泵、电锅炉、制冷机的功率外特性模型类似,表示为如下形式:

$$\begin{cases} Q_{hp} = C_{hp} P_{hp} \\ Q_{eb} = C_{eb} P_{eb} \\ Q_c = C_c P_c \end{cases} \quad (13)$$

其中, Q_{hp}, Q_{eb}, Q_c 分别为热泵、电锅炉、制冷机的热功率(W); P_{hp}, P_{eb}, P_c 分别为热泵、电锅炉、制冷机的电功率(W); C_{hp}, C_{eb}, C_c 分别为热泵、电锅炉、制冷机的热电功率比系数。

联立式(11)~(13),构成了电热耦合器件的潮流模型,即 $F_{eh}=0$ 。

2.3 基于 PSASP 的电热耦合系统潮流计算流程

电力系统与热力系统,二者在系统构成、运行机理、响应时间尺度、输出特性等方面有着显著的差别,实际运行过程中的系统控制相对独立。式(10)所示的电热耦合能源系统潮流模型中,电、热两部分通过电热耦合设备关联,二者是一种松耦合的关系。根据电热耦合系统的这个特征,在具体计算过程中,不需要在一次迭代中对两部分进行联合求解,而是电、热部分的计算单独进行,仅在每次电或热潮流收敛后,

根据电热耦合器件的输出特性方程进行部分状态量的调整,再转入另一种能源潮流迭代计算,如此反复,达到整体收敛。这样做可以避免将电热作为整体考虑导致计算收敛性差、耗时长和占用较多计算机内存空间的问题,且使得计算机程序易于设计实现。

电热耦合能源系统潮流模型的求解理念与 PSASP/UPI 的开发理念相一致,由此可以基于 PSASP 实现电热耦合联合潮流计算,将式(10)中的 $F_e=0$ 交予 PSASP 潮流计算模块去完成,可以采用收敛性较好的算法(如最优乘法),也适用于具有多种类型设备的电力网络(如交直流混联系统); $F_h=0$ 以及 $F_{ch}=0$ 通过编制用户程序实现。求解流程如图 2 所示。

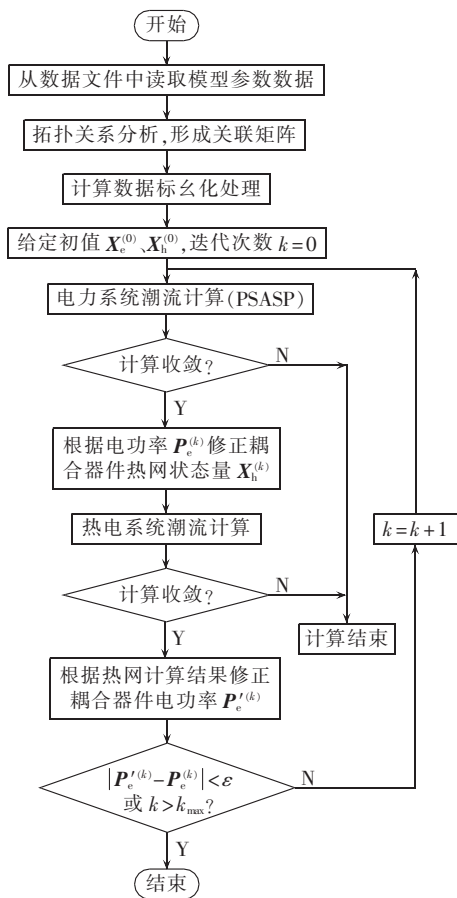


图 2 电热耦合系统潮流计算流程

Fig.2 Flowchart of power flow calculation for combined thermal and electric energy system

2.4 关键环节说明

本文基于 PSASP 实现电热耦合潮流计算,关键是设计电热潮流接口及编制热网潮流计算用户程序。

2.4.1 电热潮流接口

热网潮流计算的用户程序用 C++ 语言编写,并被编译成动态链接库(DLL)方式,被 PSASP 潮流程序(WMLFUPI.exe)访问调用。接口函数形式为:LF_UP(Markend, Ntime, NPar, F1, nf1, F2, nf2, F3, nf3, V1, nv1, IVP, NVP, nnvp)。其中,Markend 为电热交替迭代计算结束标记;F1 及 nf1 分别为电网潮流计算得到的电

热耦合器件电功率数组及维数;F2 及 nf2 分别为热网潮流计算得到的电热耦合器件电功率数组及维数;其余变量预留。

如图 2 所示的计算流程,先由 PSASP 进行电网潮流计算,计算收敛后将电热耦合器件电功率结果通过 F1 传入热网潮流计算用户程序,根据 $F_{ch}=0$ 修正热网状态量并进行热网潮流计算,收敛后,再根据 $F_{ch}=0$ 重新计算电热耦合器件电功率并通过 F2 送出至 PSASP。若前后 2 次计算得到的耦合器件功率误差满足精度要求,则停止计算,否则刷新 PSASP 电网数据中的电热耦合器件电功率,继续进行计算。

2.4.2 热网潮流计算用户程序

图 2 所示的计算流程中,除电网潮流计算环节外,其余各步组成了热网潮流计算用户程序。其中,热网潮流计算环节采用经典牛顿-拉夫逊法,如图 1 所示。

a. 数据读写。通过文件实现数据读写操作,设计字符串处理功能类,编写读文件函数实现计算数据录入。用户程序输出结果包括迭代信息、热网各状态量及电热耦合器件电功率,电网计算结果通过 PSASP 输出。

b. 计算数据标么化处理。为便于数据交互,同时也为简化计算、提高收敛性及便于进行结果分析,热网潮流计算应采用标么值。设定各变量基值如下:

$$\begin{cases} \Delta H_b = \Delta H_{lb} = Z_b = H_{pb} = m_b^2 \\ Q_{lb} = C_p m_b \\ P_{pb} = m_b g H_{pb} \\ Q_{lhp} = C_{lp} P_{lhp}, Q_{elb} = C_{eb} P_{elb}, Q_{cb} = C_c P_{cb} \end{cases} \quad (14)$$

其中, m_b 为流量基值(kg/s),取流体流量相当的数量级数值; $\Delta H_b, \Delta H_{lb}, Z_b, H_{pb}, Q_{lb}$ 分别为 $\Delta H, \Delta H_b, Z, H_p, Q_l$ 中变量对应的基值; P_{pb} 为水泵功率基值(W); Q_{lhp}, Q_{elb}, Q_{cb} 分别为热泵、电锅炉、制冷机热功率基值(W); P_{lhp}, P_{elb}, P_{cb} 分别为热泵、电锅炉、制冷机电功率基值(W)。

标么制下电热耦合器件的潮流模型可表示为:

$$\begin{cases} P_G^* = f(Q_G^*) \\ P_p^* = m^* H_p^* / \eta \\ Q_{lp}^* = P_{lp}^*, Q_{eb}^* = P_{eb}^*, Q_c^* = P_c^* \end{cases} \quad (15)$$

其中, P_G^*, Q_G^* 分别为联供机组电、热功率标么值; P_p^*, m^*, H_p^* 分别为水泵功率、流量、扬程标么值; η 为泵效率,取 0~1; $Q_{lp}^*, Q_{eb}^*, Q_c^*$ 分别为热泵、电锅炉、制冷机热功率标么值; $P_{lp}^*, P_{eb}^*, P_c^*$ 分别为热泵、电锅炉、制冷机电功率标么值。

采用标么制后,式(4)可以简化为:

$$\begin{cases} AM^* - Q^* = 0 \\ B_t \Delta H^* = 0 \\ \text{diag}(S)M^* | M^* | + Z^* - H_0^* + S_p M^{*2} - \Delta H^* = 0 \\ T_e - T_a - E(A^T T_n - T_a) = 0 \\ \tilde{A} \text{diag}(M^*) T_e - \tilde{A} \text{diag}(M^*) A^T T_n - Q^* = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中,除温度变量 T_e 、 T_n 、 T_a 以外,其他状态量都用标幺值表示。

c. 程序架构。考虑到不同物理设备属性的异同,采用面向对象的程序架构进行开发,设计管道(pipe)及节点(node)2 个基类,设计依赖于上述两基类的设备模型类(EquipModel)用于指代一类设备,设计设备模型类的子类模型实例类(ModelInstance)用于指代实际设备,设计模型实例类的子类模型实例集合类(ModelInstances)实现各实际设备模型对象的集合,形成系统。类的依赖和继承关系如图 3 所示。

3 算例验证

如图 4 所示,设计如下算例:热力系统包括供回水网络,共有 15 个节点、20 条管道,其中包括 2 个热源、3 个热负荷、3 个换热器、2 个阀门、2 个泵。电力

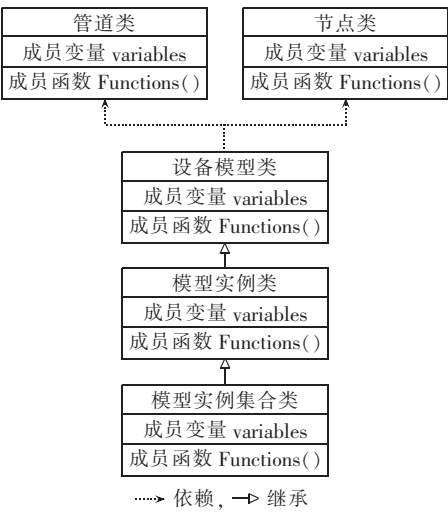


图 3 类依赖和继承关系图
Fig.3 Dependent or inheriting relationship between classes

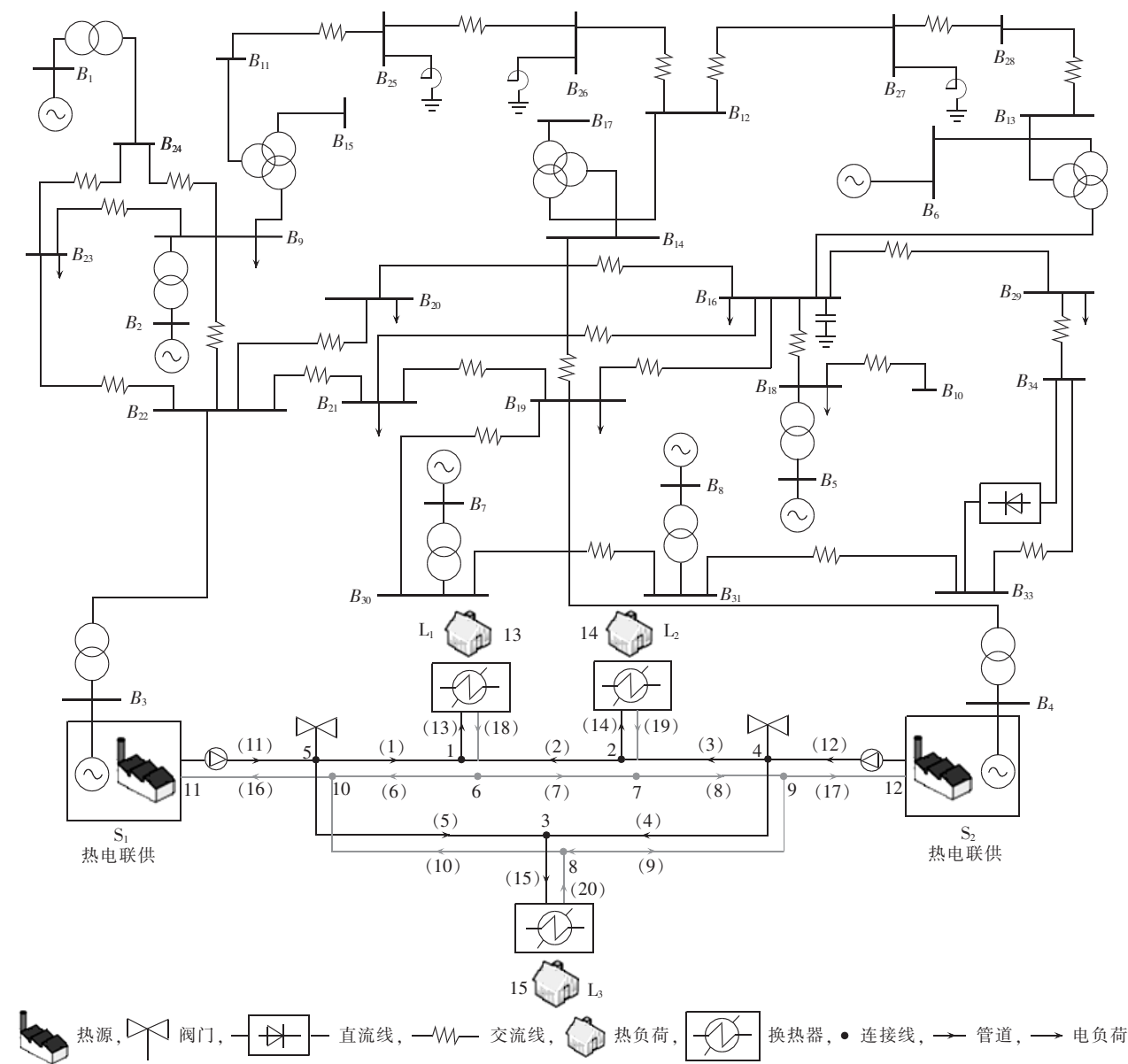


图 4 电热耦合系统算例
Fig.4 Combined thermal and electric energy system for case study

系统采用 EPRI-36 节点交直流混联电网算例。电热耦合器件为母线 B_3 、 B_4 上的热电联产机组,分别对应热力系统中的 S_1 、 S_2 。热网及电热耦合器件主要参数如下:热负荷均为 0.34 MW,节点温度均为 30℃;热源,节点温度均为 70℃, $P_{e,S1}=0.15-2Q_{JS1}$, $P_{e,S2}=-0.77Q_{JS2}$, 其中 $P_{e,S1}$ 、 $P_{e,S2}$ 分别为 S_1 、 S_2 的电功率, Q_{JS1} 、 Q_{JS2} 分别为 S_1 、 S_2 的热功率;管道, $\lambda=0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, 管径为 0.15 m, 管道粗糙度为 0.001 25 m, 流体运动粘度为 $0.294\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, $L_{4,5,9,10}=600\text{ m}$, $L_{1,2,3,6,7,8,11,12,16,17}=400\text{ m}$, $L_{13,14,15,18,19,20}=50\text{ m}$;泵的扬程为 1 m。电网参数略。

环境温度为 10℃, 阀门开度为 1, 热网采用定温调节。迭代误差限值取 0.000 1, 迭代上限次数为 50 次。

若电网计算采用最优乘子法, 热网计算采用牛顿-拉夫逊法, 潮流计算经过 4 次迭代达到收敛, 如图 5 中实线所示。若电网、热网计算均采用牛顿-拉夫逊法, 潮流计算经过 7 次迭代达到收敛, 如图 5 中虚线所示, 这也与文献[18]中将电网、热网作为整体进行统一迭代计算的结果一致。

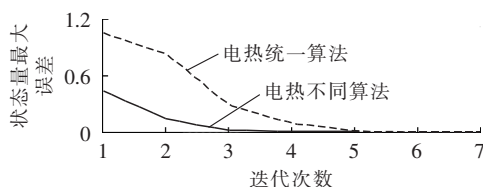


图 5 迭代过程
Fig.5 Iterative process

由此可见, 本文开发的基于 PSASP 的电热耦合能源系统潮流计算程序, 因为电网与热网计算相对独立, 将电网计算交予 PSASP 执行, 充分利用 PSASP 强大的计算功能, 可以处理更多的电网设备模型, 采用更先进的迭代算法, 从而提高电热耦合系统潮流计算的整体效率和可靠性。

4 结论

在“互联网+”智慧能源快速发展的今天, 进行多能耦合系统分析是能源互联网领域重要的研究方向之一。潮流计算是系统分析的基础, 本文选取电热耦合系统作为分析对象, 在研究其稳态模型和求解方法的基础上, 基于 PSASP 程序 UPI 功能, 开发了电热耦合系统的潮流计算程序。一方面利用现有成熟电力系统仿真软件计算功能, 可以进行包括直流系统、新能源电场、FACTS 器件等在内的多种电网设备仿真, 减少了程序开发的工作量, 同时可以采用更为先进的计算方法, 保证了计算的收敛性和可靠性; 另一方面, 拓展了电力系统仿真软件(PSASP)的功能, 使其能够进行多能耦合系统的仿真计算; 再一方面, 可

以依托 PSASP 强大的模型库, 在联合潮流计算基础上对多能耦合系统进行进一步的稳态或动态分析。

本文在综合能源系统分析方面进行了初步的尝试, 在将现有研究理论在商业化仿真软件中实际应用的方面做了一定的工作。接下来将进一步研究电、热(冷)、气耦合系统的模型和算法并开发程序, 由于气网与热网有很多相似的特性, 本文也为气网分析提供了一定的基础与借鉴。此外, 还将在动态连续潮流以及考虑电力系统中长期动态过程下的综合能源系统动态稳定分析等方面开展进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 周孝信. 构建我国新一代能源系统[R]. 北京: 2015 年中国电机工程学会年会智能电网 & 新一代电力系统专题研讨会, 2015.
- [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: 172-187.
- [3] 石兆玉. 供热系统运行调节与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 89-107.
- [4] 张勇. 燃气管网的稳态分析与模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009. ZHANG Yong. Steady state analysis and simulation of gas network [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [5] 王毅, 朱晓荣, 赵书强. 风力发电系统的建模与仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 64-81.
- [6] REKIOUA D, MATAGNE E. Optimization of photovoltaic power systems-modelization, simulation and control [M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 121-143.
- [7] 赖中练. 热电冷联产系统准稳态模拟[D]. 北京: 清华大学, 2009. LAI Zhonglian. Quasi-steady-state simulation for combined cooling heating and power system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [8] LIU P, GEROGIORGIS D I, PISTIKOPOULOS E N. Modeling and optimization of polygeneration energy systems [J]. Catalysis Today, 2009, 127(1-4): 347-359.
- [9] 周林, 邵念彬. 大型光伏电站无功电压控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 116-122. ZHOU Lin, SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 116-122.
- [10] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33. WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [11] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27. WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [12] 支娜, 肖曦, 田培根, 等. 微网群控制技术研究现状与展望 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 107-115. ZHI Na, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. Research and prospect of multi-microgrid control strategies [J]. Electric Power Automation

- Equipment,2016,36(4):107-115.
- [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): 2156-2166.
- [14] LIU X,JENKINS N,WU J,et al. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Energy Procedia,2014,61: 155-159.
- [15] QUELHAS A,GIL E,MCCALLEY J D,et al. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system:part I-model description[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(2):829-836.
- [16] QUELHAS A,MCCALLEY J D. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system:part II-simulation results[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007, 22(2):837-844.
- [17] 李堃. 热水集中供热系统热力工况研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- LI Kun. Research on thermal condition of hot water heat supply system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2011.
- [18] 陈瑜玮. 电-热耦合多能流系统的潮流计算和优化调度研究 [D]. 北京:清华大学,2016.
- CHEN Yuwei. Research on power flow calculation and optimized dispatching of the thermoelectric multi-energy system[D]. Beijing:Tsinghua University,2016.
- [19] 秦芳芳. 供热管网水力计算模型研究[D]. 保定:华北电力大学, 2009.
- QIN Fangfang. The research on hydraulic calculational model for the heat-supply network[D]. Baoding:North China Electric Power University,2009.

作者简介:



夏 天

夏 天(1981—),男,山西大同人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统分析(E-mail:summersummer@tsinghua.edu.cn);

陈瑜玮(1994—),男,浙江金华人,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析(E-mail:chenyw16@mails.tsinghua.edu.cn);

郭庆来(1979—),男,吉林吉林人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析(E-mail:guoqinglai@tsinghua.edu.cn)。

Power flow calculation based on PSASP for combined thermal and electric energy system

XIA Tian¹,CHEN Yuwei²,GUO Qinglai²,SUN Hongbin²,XIONG Wen³,LIU Yuquan³

(1. Energy Internet Research Institute,Tsinghua University,Beijing 100084,China;2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,Department of Electrical Engineering,Tsinghua University, Beijing 100084,China;3. Guangzhou Power Supply Co.,Ltd.,Guangzhou 510620,China)

Abstract: As to the energy internet system characterized by the combination of different energy sources, such as electric,heating and cooling,multiple steady-state models are built for the key equipments of thermal network and a power flow calculation method of combined thermal and electric energy system is studied. Based on the UPI function of PSASP(Power System Analysis Software Package),which is a well-proven commercial software widely used in the domestic electric power system analysis,a power flow calculation program is developed for the combined thermal and electric energy system to realize the steady-state calculation of integrated energy network for the further analysis of energy internet system.

Key words: energy internet; combined thermal and electric energy system; power flow calculation; PSASP; UPI