

电—气—热综合能源系统混合能量流仿真

操晨润¹, 姜双双², 王冬¹

(1. 国网浙江海盐县供电有限公司, 浙江 嘉兴 314000;

2. 浙江浙能嘉华发电有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 针对综合能源系统的子系统能源网络加复杂、耦合元件的能源转换机制多元等问题, 基于电—气—热综合能源系统主要单元的数学模型, 构建了混合网络多能流综合计算模型。考虑能量枢纽不同运行模式, 类比电力系统潮流解法, 在给出雅克比矩阵子块的计算方法基础上, 运用扩展Newton—Raphson算法进行多次迭代求解混合能量流, 分析了综合能源子系统耦合关系。仿真说明了子系统的功率波动通过耦合环节传递给其他系统, 能源供应单元具有一定的调节能力, 可为较广层面计及气—热惯性的综合能源系统优化调度问题提供理论指导, 同时验证了扩展算法的有效性。

关键词: 综合能源系统; 混合能量流; 扩展Newton—Raphson算法; 耦合关系

中图分类号: TM924

能量流分布能够准确地传达能源网络信息, 是综合能源系统稳态分析的核心环节^[1]。当前研究重点集中在电—气或电—热两个子系统耦合的层面, 且多数研究侧重于两种子系统的混合能量流顺序求解; 也有研究通过建立能量等值模型, 从优化的角度出发, 分析综合能源系统最优潮流。但同时计及电—气—热的混合网络能量流计算目前还较为少见, 相关的稳态分析工作尚需进一步开展^[2]。

对于电—气—热多能耦合的综合能源系统而言, 子系统复杂的能源网络加上多种耦合元件的能源转换机制, 使得混合能量流(multi-energy flow, MEF)成为互动特性分析的基础。如何有效地进行含电—气—热的综合能源系统混合能量流计算, 是包含调度者在内的电力研究人员研究的重点课题。

1 含电—气—热的综合能源系统

1.1 综合能源系统形态

综合能源系统形态如图1所示, 借助能量枢纽将供能区域内的电力系统、天然气系统以及热力系统有机融合, 实现能量梯级利用。作为能源转换的支撑骨架, 能量枢纽中包含各类耦合元件, 体现了能量等值的思想, 对于能量交互过程中的复杂关系, 利用能源耦合矩阵进行一定程度合理简化, 进而实现耦合系统的解耦, 便于混合能量流分析。

综合能源系统混合能量流计算当中系统的主要单元数学模型参考文献^[3], 电力系统模型由传统的交流模型表示, 热力系统模型采用工质流模型, 天然气系统管道模型采用等效动态模型, 除此之外还

需要考虑管网当中含压缩机的情况。

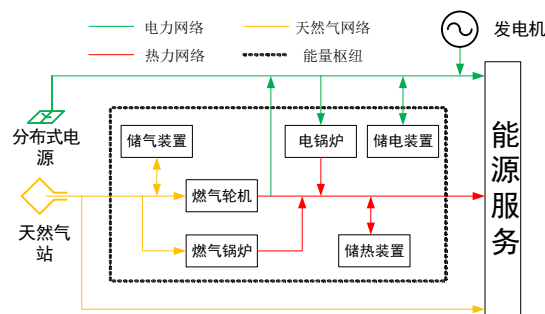


图1 综合能源系统形态

类比电力系统潮流计算, 在构建混合网络计算方程时, 需要注意综合能源系统内各节点的分类以及对应的已知条件和待求解变量。电力网、天然气网、区域热力网络的节点类型及求解过程中的已知条件与未知量如表1所示。

参考文献[4]对天然气系统仿真过程中边界条件及方程封闭性的处理方法进行了介绍。

1.2 运行模式分析及对应模型

含电—气—热的综合能源系统的能源来源为电能和天然气2种, 其CHP环节运行模式可分为3种, 分别为机组运行优先满足供热负荷的“以热定电”(following the thermal load, FTL)模式、燃气机组优先满足电负荷的“以电定热”(following the electric load, FEL)模式、机组出力兼顾电热负荷的混合运行(following hybrid electric-thermal load, FHL)模式。对于本文所提综合能源系统中的能量枢纽, CHP环节处于不同模式下耦合单元动作不同。

表1 混合能量流仿真中各节点关系

子系统	变量	已知	未知
电力系统	电压相角	平衡节点	PV节点PQ节点
	电压幅值	PV节点平衡节点	PQ节点
	有功功率	PV节点PQ节点	平衡节点
	无功功率	PQ节点	PV节点PQ节点
热力系统	水头压力	指定某一节点	其他节点
	热功率	其他节点	平衡节点
	供水温度	热源节点	热负荷节点
	输出温度	热负荷节点	—
	回水温度	—	所有节点
天然气系统	热水流量	—	所有热力管道
	节点压力	天然气平衡节点	其他节点
	节点天然气负荷	其他节点	平衡节点
	天然气流量	—	所有供气管道

“以热定电”模式下,当热负荷需求较小尚未超出燃气轮机的出力上限时,燃气轮机主要消耗天然气来满足热负荷,燃气锅炉不动作;当热负荷需求超出燃气轮机容量上限时,燃气锅炉消耗天然气产热进行补充。在此模式下,天然气耗量完全取决于热负荷,未满足电负荷由其他发电机补充。

2 综合能源系统多能流计算方法

2.1 混合能量流模型

结合综合能源系统主要单元数学模型及运行模式分析,电-气-热综合能源系统混合能量流模型可表示为

$$\begin{cases} 0 = E(x_e, x_g, x_h, x_{chp}) \\ 0 = G(x_e, x_g, x_h, x_{chp}) \\ 0 = H(x_e, x_g, x_h, x_{chp}) \\ 0 = CHP(x_e, x_g, x_h, x_{chp}) \end{cases}, \quad (1)$$

其中

$$x_e = [\theta, U, P, Q], \quad (2)$$

$$x_h = [m, (T_{s,load}, T_{r,load})], \quad (3)$$

$$x_g = [p, M], \quad (4)$$

$$x_{chp} = [P_{e,CHP}, P_{h,CHP}, L]. \quad (5)$$

式中: E 为电力系统方程; G 为天然气系统方程; H 为热力系统方程; CHP 为能量枢纽中 CHP 系统方程; x_e 为电力系统变量, 包含电压、相角、有功

率以及无功功率, 如表1所示; x_g 为天然气系统变量, 包含节点压力与管道气体流量, 如表1所示; x_h 为热力系统变量, 包含热水流量、供水温度以及输出温度, 如表1所示。 x_{chp} 为 CHP 环节变量, 包括能源服务中的各种电-气-热负荷、能量枢纽与子系统的能量交互值。

2.2 扩展Newton-Raphson算法

基于电-气-热耦合系统的主要单元数学模型建立电-气-热多能耦合混合网络的综合方程, 类比电力系统潮流计算方法, 将Newton-Raphson方法扩展到混合能量流的求解问题上, 通过多次迭代进行统一求解, 迭代公式可表示为

$$\Delta x^{(k+1)} = (J^{(k)})^{-1} \Delta F^{(k)}, \quad (6)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \Delta x^{(k)}. \quad (7)$$

式中: x 为综合能源系统变量; Δx 为综合能源系统变量增量; k 为迭代次数; J 为雅克比矩阵, 表征综合能源系统耦合关系; ΔF 为综合能源系统中与各子系统相关的偏差向量。

综合能源系统运行过程中电-气-热子系统网络交互关系可由雅克比矩阵来表示, 其中对角元素为独立子系统能量流与其对应变量之间的关系, 非对角元素表示子系统之间的耦合关系。

2.2.1 耦合矩阵子块计算方法

对角块元素当中, 电力系统子块的计算参考文献[4], 在此不再赘述。

热力系统子块 J_{hh} 的计算参考文献[5], 可表示为

$$J_{hh} = \begin{bmatrix} C_p \text{diag}\{(T_s - T_0)\} A_s & C_p \text{diag}\{A_s m\} & 0 \\ 2BK |m| & 0 & 0 \\ 0 & C_s & 0 \\ 0 & 0 & C_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: A_s 为热力系统网络关联矩阵; C_s 为热力系统供水网络中结构和流量相关矩阵; C_r 为热力系统回水网络中结构和流量相关矩阵。

由于天然气系统管道结构的固有特性, 其子块是非带状、非对称的稀疏矩阵, 在计算机求解时花费大量时间访问零元。将网格上的方程式写为下列形式

$$f_1(M_i, M_{i+1}, p_i, p_{i+1}) = 0, \quad (9)$$

$$f_2(M_i, M_{i+1}, p_i, p_{i+1}) = 0. \quad (10)$$

上述方程包含待求时间层面上的4个未知量,

参考文献[6]对天然气网络方程的处理,进一步将天然气系统方程简化,以减少迭代时间。假设天然气系统中有 n 个节点、 m 个剖分单元(包含管道与非管元件),则能提供的方程数量为 $2m+n$ 个。将 $2m$ 个方程排列在前面, n 个方程排列在后面,天然气系统雅克比矩阵子块可写作如式(11)形式。

$$J_{gg} = \begin{bmatrix} J_{gg1} & J_{gg2} \\ J_{gg3} & J_{gg4} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中: J_{gg1} 为带状矩阵, $\dim J_{gg1} = 2m \times 2m$; J_{gg2} 为稀疏矩阵, $\dim J_{gg2} = 2m \times n$; J_{gg3} 为稀疏矩阵, $\dim J_{gg3} = n \times 2m$; J_{gg4} 为零矩阵, $\dim J_{gg4} = n \times n$ 。

在仿真过程当中,将(9)代入迭代方程式中,可将原本 $2m+n$ 个方程减少为 n 个,在一定程度上减少了计算量。

非对角块元素体现了各能源网络之间的耦合关系。电力系统受热力系统和天然气系统的影响由 J_{he} 、 J_{ge} 表示,若取与配电网直接相连的节点为平衡节点,则电力系统的电功率波动将由配电网平衡,不会影响到热力系统与天然气系统,此时 J_{he} 、 J_{ge} 均为0;若取某与能量枢纽相连的节点作为电力系统平衡节点,则电力系统的电功率波动将传递到热力系统和天然气系统,此时CHP系统处于“以电定热”模式下,将电力系统网络模型及上述式代入混合能量流偏差计算式并求一阶导,可得

$$J_{he} = c_m \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\{jU_p Y_{pk}^* U_k^*\}, \\ \operatorname{Re}\{-jU_p Y_{pk}^* (\cos \theta_{pk} - j \sin \theta_{pk})\} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$J_{ge} = -c_m \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\{jU_p Y_{pk}^* U_k^*\}, \\ \operatorname{Re}\{-jU_p Y_{pk}^* (\cos \theta_{pk} - j \sin \theta_{pk})\} \end{bmatrix} / \eta_{ge}^{MT}. \quad (13)$$

式中: Y_{pk}^* 为节点导纳矩阵中的第 p 行第 k 列元素; θ_{pk} 为节点相角差。

热力系统受电力系统和天然气系统的影响由 J_{ch} 、 J_{gh} 表示,若取某连接能量枢纽的节点作为热力系统的平衡节点,则热力系统的热功率波动将传递到电力系统和天然气系统,此时CHP系统处于“以热定电”模式下,将热力系统网络模型以及上述式代入混合能量流偏差计算式并求一阶导,可得

$$J_{eh} = \operatorname{diag}\{(T_s - T_0)\} A_{source,i} / c_m, \quad (14)$$

$$J_{gh} = -\operatorname{diag}\{(T_s - T_0)\} A_{source,i} / c_m \eta_{ge}^{MT}. \quad (15)$$

式中: $A_{source,i}$ 为热力系统节点关联矩阵中与热源有关

的行。

天然气系统受电力系统和热力系统的影响由 J_{eg} 、 J_{hg} 表示,取气源点为作为天然气系统的平衡节点,则天然气系统的功率变化均由供气量的调整来应对,电力系统与热力系统不受其影响,故 J_{eg} 、 J_{hg} 均为0。

2.2.2 算法流程

基于扩展Newton-Raphson算法的电-气-热综合能源系统混合能量流计算的基本流程如图2所示。

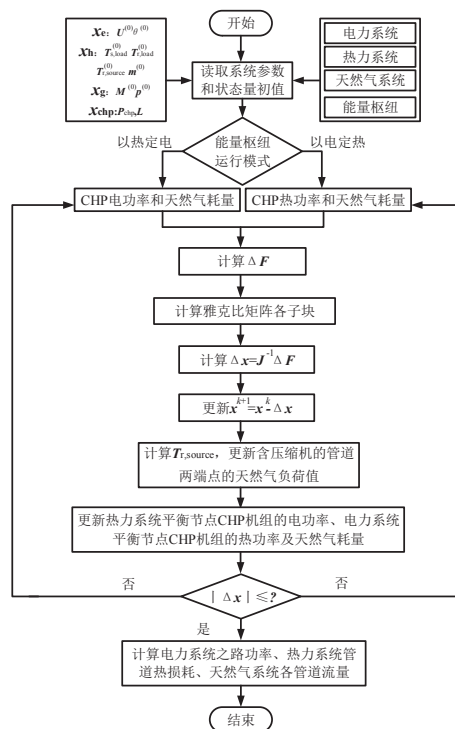


图2 扩展Newton-Raphson算法流程图

3 算例分析

3.1 算例系统参数设置

为分析同时含有电、气、热三种子系统的综合能源系统稳态运行时相互影响,本文在常用的区域型电-气互联系统结构基础上增加了热力网络,利用含CHP系统的能量枢纽连接各个子系统,作为混合能量流的算例系统进行仿真应用,分析复杂系统耦合机理,并验证所提扩展Newton-Raphson算法对含电-气-热的综合能源系统混合能量流计算的有效性。

算例结构图如图3所示,电力子系统共有13个节点,编号为EB1~EB13,其中EB1节点与配电网直接相连,EB13节点连接能量枢纽,EB11节点有

分布式电源接入；天然气子系统共有7个节点，编号为GB1~GB7，其中GB1节点与配电网直接相连，GB5节点处设置压缩机，GB4节点连接能量枢纽；热力子系统共有12个节点，编号HB1~HB12，其中HB1、HB11节点均连接能量枢纽。

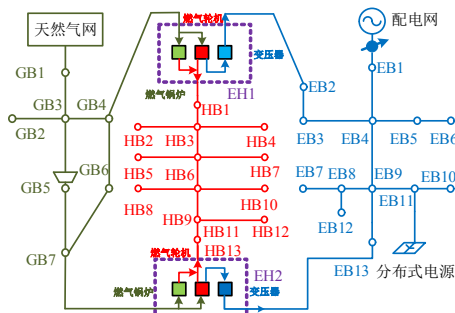


图3 电-气-热综合能源系统算例结构图

电力系统的线路参数、天然气系统及热力系统的管道参数、各类负荷数据如表2~表7所示。

3.2 仿真结果分析

为说明综合能源系统的供能子系统能源转换、消耗环节的耦合作用，首先不考虑热力系统网络结构影响，将热负荷等效为给定值。

表2 电力系统的负荷节点数据

节点 编号	负荷数据		节点 编号	负荷数据	
	有功/MW	无功/Mvar		有功/MW	无功/Mvar
1	0	0	8	0.80	0.40
2	0.23	0.13	9	1.15	0.66
3	0.50	0.12	10	0.58	0.46
4	0.20	0.11	11	0.17	0.15
5	0.80	0.40	12	0.12	0.08
6	0.80	0.29	13	0.10	0.05
7	0.17	0.08			

表3 热力系统的负荷节点数据

节点 编号	热负荷功 率/MW	输出温 度/℃	节点 编号	热负荷功 率/MW	输出温 度/℃
2	0.2	50	8	0.3	50
3	0.2	50	9	0.2	50
4	0.2	50	10	0.2	50
5	0.1	50	11	0.2	50
6	0.2	50	12	0.2	50
7	0.1	50			

表4 电力系统的线路参数

线路走向	线路阻抗标么值	旁路电容
4-1	0.02+j0.016	0
4-3	0.008205+j0.019207	0
4-9	0.008205+j0.019207	0
4-5	0.008205+j0.019207	0
9-8	0.008205+j0.019207	0
9-13	0.008205+j0.019207	0
5-11	0.008205+j0.019207	0
2	0.008205+j0.019207	0
5-6	0.008205+j0.019207	0
8-7	0.008205+j0.019207	0
8-12	0.008205+j0.019207	0
11-10	0.008205+j0.019207	0

表5 热力系统管道参数

管道 走向	长度/m	直径/mm	管道 走向	长度/m	直径/mm
1	500	200	4	150	200
6	400	200	6-5	180	200
6-9	600	200	6-7	150	200
11-9	400	200	9-8	100	200
111	600	200	9-10	110	200
2	200	200	11-12	90	200

表6 天然气系统负荷节点数据

节点编号	负荷/Nm ³ ·h ⁻¹	节点编号	负荷/Nm ³ ·h ⁻¹
3	0.00	7	1871.35
2	1100.00	6	2000.00
4	1647.12		

表7 天然气系统管道参数

管道 走向	长度/m	直径/mm	管道 走向	长度/m	直径/mm
1-3	500	150	4-6	600	150
5-7	2500	150	6-7	200	150
2	500	150	5	2500	150
4	400	150			

天然气系统节点压力分析结果如下图4所示。

压力结果都在合理范围之内,但耦合状态下节点压力值略低于非耦合状态,这是由于燃气轮机的存在,耦合状态下燃气轮机消耗额外的天然气使得系统负荷要略高于独立天然气系统时。其中GB1节点作为气源点压力差值较小,说明气源点具有一定调节能力;GB2节点负荷较大且距离气源点较远,压力差值表现明显;GB5节点由于压缩机的存在,耦合状态下依然能够保持相对较高的电压。

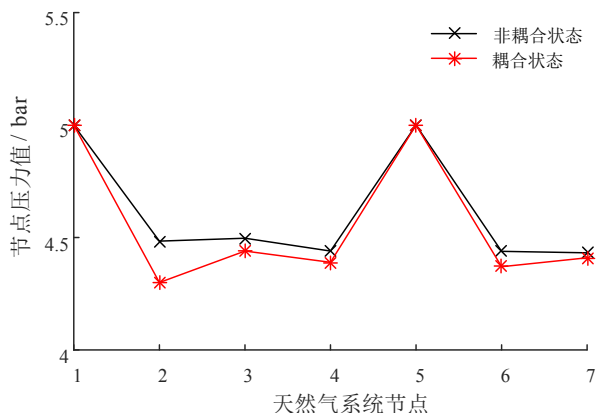


图4 天然气系统能量流计算结果

电压标幺值的结果都在合理范围之内,但耦合状态下节点电压值略高于非耦合状态,这是由于燃气轮机的存在,耦合状态下燃气轮机提供额外的电能使得系统出力要略高于独立电力系统时。在电力系统中,直接与电网相连的EB1节点电压变化较小,负荷较大且距离远的EB10节点则变化较大。

电力系统能量流计算结果如图5所示。

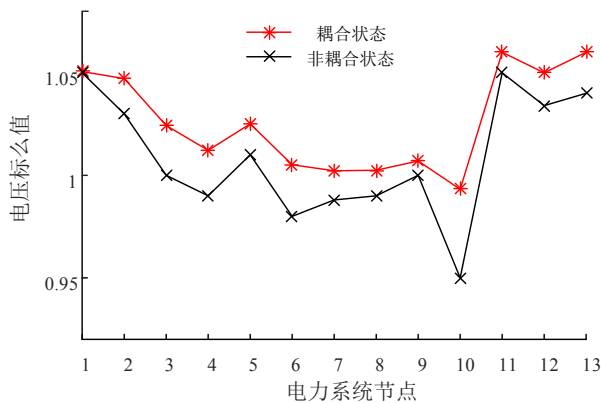


图5 电力系统能量流计算结果

更进一步地,为分析电-气-热多能耦合特性,计及热力系统进行能量流仿真,此时所有雅克比矩阵子块均为计算子块。设定EH1中CHP系统工作于

“以热定电”模式,EH2中CHP系统运行于“以电定热”模式;电力系统选择EB13节点为平衡节点,热力系统平衡节点选择HB1节点。综合能源系统混合能量流仿真结果如表8~表11所示。

表8 电力系统各节点电压

节点编号	电压标幺值	节点编号	电压标幺值
1	1.0600	8	1.0052
2	1.0500	9	1.0251
3	1.0472	10	0.9932
4	1.0506	11	1.0070
5	1.0243	12	1.0025
6	1.0122	13	1.0600
7	1.0022		

表9 天然气系统各节点压力

节点编号	压力/kpa	节点编号	压力/kpa
1	500.00	5	500.00
2	448.39	6	443.87
3	449.73	7	443.19
4	443.98		

表10 天然气系统管道供气量

管道	供气量Nm ³ ·h ⁻¹	管道	供气量Nm ³ ·h ⁻¹
1—3	6921.6	4	2539.2
5—7	3260.8	4—6	767.0
2	1100.0	7—6	1233.0

表11 热力系统各节点供水、回水温度

节点编号	供水温度/°C	回水温度/°C	节点编号	供水温度/°C	回水温度/°C
1	100.000	49.374	8	98.808	50.113
2	98.667	50.002	9	99.099	49.576
3	99.5339	49.579	10	98.622	50.900
4	98.880	50.011	11	99.550	49.557
5	95.989	50.210	12	99.154	50.442
6	93.421	49.693	13	100.124	49.362
7	96.221	50.233			

由表8可知,考虑热力网络影响,电力系统各节点电压仍在合理范围之内,EB10节点由于负荷较大且距离较远,电压值较其他节点相比要小;由表8、表9可知,天然气系统供气量满足负荷需求,且GB5节点由于压缩机的存在压力保持较高的水平且

压缩机的压缩比为1.23,运行在合理范围内;由于两个能量枢纽都可以作为热源,且热力网络存在一定的供热损耗,所以越靠近两侧热源的节点供水温度越高,供热温度最低点为处于网络中间的HB6节点。

由于两个能量枢纽中CHP机组的运行模式不同,其电功率、热功率及天然气耗量也不尽相同,如图6所示。

为分析热力系统负荷波动对电力系统的影响,将热力系统HB3节点与HB6节点处的负荷分别减少0.5 MW,仿真计算此时电力系统节点电压变化。为简化计算,忽略天然气系统,迭代时仅取与电热相关的雅克比矩阵子块。热负荷变化前后电力系统各负荷节点电压变化如图7所示。

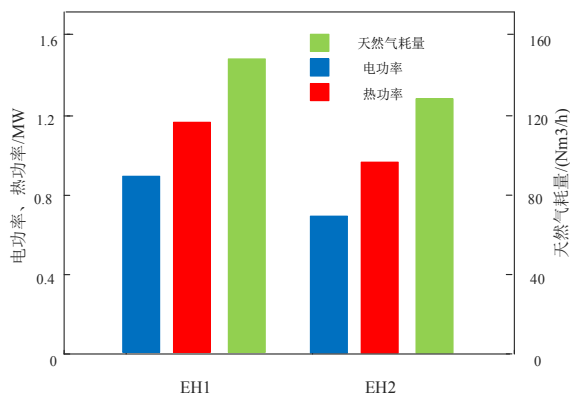


图6 能量枢纽电功率、热功率及天然气耗量

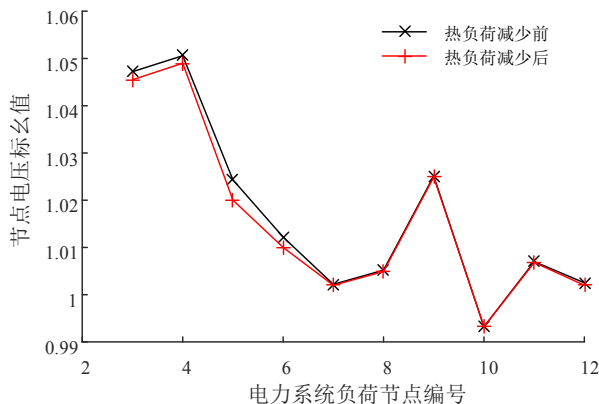


图7 电力系统负荷节点电压变化

由于CHP机组运行模式不同,电力系统各负荷节点电压受热力系统负荷变化影响不同。靠近“以热定电”机组的负荷节点在热力负荷减少后电压略微降低,而靠近“以电定热”机组的负荷节点在热

力负荷减少后电压无明显变化。

4 结束语

本文基于电-气-热综合能源系统主要单元的数学模型,构建了多能流综合计算模型;考虑能量枢纽并根据不同运行模式类比电力系统潮流解法,运用扩展Newton-Raphson算法进行多次迭代求解,并简化了雅克比矩阵子块的计算,使其能够根据不同耦合目标选择迭代子块。

算例采用以能量枢纽为骨架支撑的简单综合能源系统进行能量交互过程中的稳态分析,仿真说明了子系统的功率波动通过耦合环节传递给其他系统,能源供应单元具有一定的调节能力,可为较广层面计及气-热惯性的综合能源系统优化调度问题提供理论指导,同时验证了扩展算法的有效性。相较于单一系统的计算方法,同时计及电-气-热的混合能量流算法能够计及不同能源系统之间耦合互动关系,快速给出的混合能量流分布结果对解决调度问题有着重要的意义。

参考文献

- [1] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3303.
- [2] 于娜,操展润,黄大为,等.基于改进Line-Pack模型的综合能源系统优化调度[J/OL].现代电力.https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0227.
- [3] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J].中国电机工程学报,2017,37(24):7108-7120.
- [4] Liu X. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff:Cardiff University,2013.
- [5] 李长俊,黄泽俊.天然气管道输送[M].北京:石油工业出版社,2016.
- [6] 李庚银.电力系统分析基础[M].北京:机械工业出版社,2011:100-104.
- [7] 操展润.计及气-热惯性的综合能源系统日前调度[D].东北电力大学,2019.

作者简介

操展润(1993—),男,安徽池州人,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统运行与控制、综合能源系统。

王冬(1992—),男,江苏徐州人,硕士,助理工程师,研究方向为电力市场、电力营销技术。

(责任编辑:张峰亮)