

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.030

区域综合能源系统潮流计算

董彦君¹, 张惠智², 马富齐², 马喜平³, 赵耀³, 刘冲⁴

(1. 中国农业大学, 北京 100083; 2. 西安理工大学, 西安 710048; 3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050;
4. 西安热工研究院有限公司, 西安 710065)

摘要:进行了区域综合能源系统潮流分析。根据电力网络、天然气网络的特点进行了综合能源系统网络潮流建模,并构造了能源集线器模型。研究了不同运行模式下,综合能源潮流模型的求解问题,实现了综合能源系统多能流的统一求解。并结合某开发区综合能源系统算例,根据约束条件分析不同运行模式下系统的运行状态,对不满足约束条件的运行状态提出了调整策略,并验证了所提潮流模型以及计算算法的有效性。
关键词:区域综合能源系统;潮流计算;电力网络;天然气网络;能源集线器

Power Flow Calculation of Community Integrated Energy System

DONG Yanjun¹, ZHANG Huizhi², MA Fuqi², MA Xiping³, ZHAO Yao³, LIU Chong⁴

(1. China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
3. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730050, China;
4. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Xi'an 710065, China)

Abstract: In this paper, the regional comprehensive energy system power flow analysis is carried out. Based on the characteristics of power network and natural gas network, the energy flow of the integrated energy system is modeled, and the energy hub model is constructed. Aiming at different operation, the problem of the integrated energy flow model is studied, and the unified solution of the multi-energy flow of the integrated energy system is realized. Based on the case study of a comprehensive energy system in a development zone, the operating status of the system under different operating modes is analyzed by constraints. The adjustment strategy is put forward without satisfying the constraints, verify the proposed power flow model and calculate the effectiveness of the algorithm.

Key words: integrated Community energy system(ICES); power flow calculation; power network; natural gas network; energy hub(EB)

0 引言

区域综合能源系统(integrated community energy system, ICES)是一个集中化、复杂性的综合系统,包含了电/气/热/冷等多种能源形式,涉及不同能源系统的运行模式、运行控制和耦合环节^[1]。ICES根据其多种能源的不同特点,对其进行协调互补和集成优化,从而提高能源利用率,改善能源结构,实现能源的阶梯式综合利用,对实现国家节能减排目标具

有重要意义。

为此,国内外相关研究学者在智能电网的基础上提出了以整体为对象的宏观综合能源系统,通过将电力、热力、储能等能源整合为整体资源,提高了能源子系统的灵活性、安全性、经济性及自愈能力,并且实现了能源的整体优化和关联系统的协同运行,从而提高了系统的能源利用效率^[2]。

包含了ICES的生产、协调运行与应用将推动多能源微网的发展,使微网的经济、环境效益进一步提高,同时也有利于整体的能源结构优化。综合能源

收稿日期:2017-12-20; 修回日期:2018-02-22

基金项目:国家电网科技项目(522722150012)。

Project Supported by State Grid Science and Technology Project(522722150012).

系统中的微电网作为分布式发电的有效管理单元和组织形式^[3],同时随着天然气网络和供热网络的耦合,综合能源系统还将承担冷、热供给的任务,进而把传统意义上的“微型电网”发展为更为广义的“区域综合能源网”。随着区域综合能源网的扩展,系统中的能源结构和设备耦合关系也将变的越来越复杂,从而大大增加了ICES的运行和管理的难度。由此可见,ICES的安全稳定运行具有深远的研究意义^[4],因此,对ICES潮流计算的研究极为必要。

文[5]中在考虑含有天然气系统静态安全约束的基础上进行了电力系统可用输电能力计算,然后对电力—天然气综合系统进行连续潮流分析;文[6]中研究了基于不同能量转换设备的能源集线器(energy hub, EB)模型,在不同运行模式下的混合潮流求解。但是3种模式下的用能需求与分配均为预定好的方式,不是综合能源的最优运行方式;文[7]中在分析典型的冷—热—电联供系统的基础上,提出了一种母线式结构用来描述其组成系统和结构形式,并围绕该系统结构设计了微网调度优化模型构架。基于该结构对各设备进行了独立建模,提高了冷热电联产(combined cooling heat and power, CCHP)系统运行模式的灵活性,通过对系统中各设备运行方式和工作状态进行调节,使系统的运行更加经济;文[8]中将概率潮流概念应用到综合能源系统的概率能量流分析中,考虑了负荷以及风电场出力的随机性,同时计及了天然气网络与电力网络之间的耦合,分析了天然气网络与电力网络不同的状态量概率分布。更多概率潮流方法的比较可参考文献[9-10]。文[11]中考虑了EB内热电联产机组热电比可调问题,构建了一种双层优化模型,上层以园区用能成本最小为目标,下层为EB的用能效率为目标,下层的决策变量为热电联产(combined heat and power, CHP)热电比,从而建立了EB机组内部能效特性与外部能源分配的联系,实现内部机组高效运行和外部能源经济分配。设置了常规运行模式,热电比可调模式,同时考虑了可转移负荷的调节作用,最终算例结果表明,EB双层优化运行模型可减少用能成本,提高用能效率。通过调节CHP热电比,同时利用广义弹性负荷参与响应,可以减小CHP热电比与区域内热电负荷比之间差距,从而提高CHP供能比例,实现区域综合能源系统高效经济运行。文[12-15]中对以能源集线器模型为代表的包含电力、天然气、热力系统的耦合关系和协同优化做出了具体的分析。

文中旨在分析包含电/气/热系统的ICES的潮流

计算,利用EB模型来描述ICES的能源耦合关系,寻找合适的潮流求解算法。

1 区域综合能源系统潮流计算模型

1.1 电力网络潮流计算模型

该节主要分析电力系统正常运行工况下的潮流分布模型,主要包含电压(幅值、相角)、功率(有功、无功)的分布。节点有功功率/无功功率平衡方程的直角坐标系下的表达式为^[16]

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^{j=n} [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \\ Q_i = \sum_{j=1}^{j=n} [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \end{cases} \quad (i \in S_n) \quad (1)$$

此外,由于系统中还有电压大小给定的PV节点,因此还需补充一组电压方程

$$e_i^2 + f_i^2 = U_i^2 \quad (2)$$

根据潮流计算结果,可得线路功率为

$$\tilde{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{U}_i [\dot{U}_i^* \dot{Y}_{ij} + (\dot{U}_i - \dot{U}_j) \dot{Y}_{ij}^*] \quad (3)$$

除此之外,电力网络潮流分布一般需满足一定的约束条件,如不满足约束条件,需要对潮流分布进行调整。

1) 电力网络节点功率平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{j \in i} P_{ij} = P_i \\ \sum_{j \in i} Q_{ij} = Q_i \end{cases} \quad (4)$$

2) 不平衡约束条件。在分析过程中,电源有功无功出力上下限约束、无功电源无功上下限约束、电网线路传输功率的约束、节点电压的上下限约束。电力潮流分布必须同时满足这些约束条件。对于综合能源系统,尤其需要关注,耦合节点(微型燃气轮机)在其他系统参数(天然气网络、电负荷参数)改变情况下对电力系统的影响,并且这种影响时双向性的,前章已经分析了这种互动特性,在潮流计算时需要交叉回推进行校正调整。

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (5)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (6)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (7)$$

$$P_l = P_{ij} \leq P_l^{\max} \quad (8)$$

$$Q_{ij} \leq Q_{ij}^{\max} \quad (9)$$

式(5)-(9)依次为电源的有功出力边界;无功电源出力边界;节点电压边界和线路传输功率潮流约束。 $P_l = P_{ij}$ 为*i*-*j*段线路的传输功率。

1.2 天然气网络潮流计算模型

对于天然气网络,假设在一个水平管道里是稳

定的等温气流,动能的变化忽略不计,在管道的整个长度内,摩擦系数和气体压缩因子都是恒定不变的。对于一个在高压网络的完全湍流,类比电力网络的支路功率方程,根据能量守恒,管道 $mn(m, n$ 为天然气节点)稳态条件下的流量 f_{mn} 可近似表示为^[8,17]

$$f_{mn} = K_{mn} s_{mn} \sqrt{s_{mn} (\pi_m^2 - \pi_n^2)} \quad (10)$$

式(10)中:

$$K_{mn} = \mu \frac{C_0 D_k^{5/2}}{\sqrt{\lambda Z_k G L_k T_{ka}}} \quad (11)$$

$$s_{mn} = \begin{cases} +1 & \pi_m - \pi_n \geq 0 \\ -1 & \pi_m - \pi_n < 0 \end{cases} \quad (12)$$

由于天然气管道存在摩擦阻力,传输过程中会造成一定的压力损失,为补偿天然气输送的压力损失,天然气系统中通常会配置一定数量的压缩机来提升该管道的压力。采用压缩机升高压力时,需要消耗额外的能量,采用燃气轮机驱动的压缩机是最经济的方式,燃气轮机消耗的流量可等效为加压站的气负荷,且主要由升压比以及流过加压站的流量决定: $T_0 = 288 \text{ K}$ 、 $\pi_0 = 101.03 \text{ kPa}$, H_k 为压缩机消耗的等效电能

$$H_k = B_k f_{kmn} \left[\left(\frac{\pi_m}{\pi_n} \right)^{\frac{r-1}{r}} - 1 \right] \quad (13)$$

式(13)中

$$B_k = \frac{25711 T_k}{\eta_k} \left(\frac{r}{r-1} \right) \quad (14)$$

式(14)中: f_{kmn} 为通过压缩机的流量, m^3/h ; Z_k 为气体在压缩机进气压缩因子; T_k 为压缩机温度, K ; η_k 为压缩机效率; r 为气体绝热指数(热容比: C_p/C_v),一般取 1.30。可得

$$f_{\tau k} = \alpha + \beta H_k + \gamma H_k^2 \quad (15)$$

式(15)中, $f_{\tau k}$ 为压缩机消耗的流量; α 、 β 、 γ 为能量转换效率常数。

天然气系统中节点的流量平衡方程为

$$\sum_{n \in C_m} f_{mn} + \sum_{k \in C_m} f_{\tau k} = f_m \quad (16)$$

其他约束条件包括:进气点、分气点的流量和压力上下限约束、压缩机出力能力约束和管道强度约束等。

$$f_m^{\min} \leq f_m \leq f_m^{\max} \quad (17)$$

$$\pi_m^{\min} \leq \pi_m \leq \pi_m^{\max} \quad (18)$$

$$H_k^{\min} \leq H_k \leq H_k^{\max} \quad (19)$$

$$k_{cp}^{\min} \leq k_{cp} \leq k_{cp}^{\max} \quad (20)$$

式(17)表示节点进(分)气量约束,进气站供应气量和用户用气量都在一定范围内;式(18)表示节点

进(分)气点压力约束;式(19)表示压气站出力能力约束, H_k 是第 k 个压气站的功率, $H_k^{\min}$ 、 $H_k^{\max}$ 分别是第 k 个压气站的允许最小功率和最大功率; k_{cp} 为天然气压缩机的压缩比。

1.3 综合能源系统的模型

在综合能源系统中,因耦合设备的不同,使得其能源系统组成与结构存在不同方式。将以上两种运行模式综合考虑,即以电力和天然气作为综合能源系统的能源输入,以电力负荷和供热负荷作为整个系统的输出,以设备级耦合和系统级耦合为节点,提出利用能源集线器来描述区域综合能源系统的能源耦合关系。其结构见图 1。

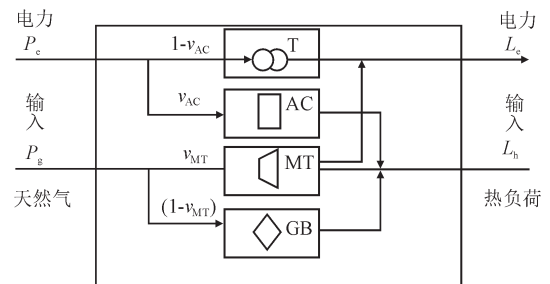


图1 能源集线器典型结构

Fig. 1 Typical structure of energy hub

能源集线器模型可视为综合能源系统的一个多输入、多输出单元,其主要功能为完成不同能量的调配、转换、调节、补充、存储等。通过能源集线器,将不同能源网络连接,其输入端为能源供应,包括了电能供应 P_e (其中电能可为常规电厂,也可为可再生能源供应)和天然气供应 P_g 。输出端为工业、民用等能源的利用,即负荷侧,主要包含电负荷 L_e 和冷热负荷(文中统一表示为 L_h)^[18]。

研究中所涉及到的热力设备,如空调(air conditioner, AC)、燃气锅炉(gas boiler, GB)和微型燃气轮机(microturbine, MT),前文已对由以上设备组成的两种运行模式下的互动特性进行了分析。综合两种运行模式构建的EB模型:EB的输入端包括电能和天然气,其中天然气作为 MT 和 GB 的能源供应,电能经变压器改变电压等级直接供用户使用,同时电能也可经 AC 转化成热能,作为热负荷供应;输出端为用户的电力负荷和冷热负荷,电力负荷缺额由变压器和 MT 供给,而所输出的冷热能则由 AC、MT、GB 共同产生。

根据 EB 所包含设备的能量转换效率与电能、燃气的分配比例可得如式(21)所示的耦合关系式

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} (1-v_{AC})\eta^T & v_{MT}\eta_{gc}^{MT} \\ v_{AC}\eta^{AC} & v_{MT}\eta_{gb}^{MT} + (1-v_{MT})\eta^{GB} \end{bmatrix}}_C \begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(21)中: P_e 和 P_g 分别为能源集线器与电网和天然气网络的能量交互值; L_e 和 L_h 分别为能源集线器所供应的电负荷和热负荷; η_{ge}^{MT} 和 η_{gh}^{MT} 分别为天然气经过MT转化为电力和热能的转换效率; η^T 为变压器效率; η^{AC} 为AC的制冷和制热的能效比; η^{GB} 为GB的效率; $0 \leq v_{AC} \leq 1$ 为电能分配系数, $v_{AC}P_e$ 则表示输入到AC中的电能, 则 $(1-v_{AC})P_e$ 表示直接供应电力负荷的电能; $0 \leq v_{MT} \leq 1$ 为天然气分配系数, $v_{MT}P_g$ 则表示输入到MT中的天然气, $(1-v_{MT})P_g$ 表示输入到GB中的天然气。

基于GB模型的综合能源系统, 将式(21)扩展到两个系统的节点网络中, 即考虑了两种运行模式下各系统间的耦合关系, 同时也将传统的电力平衡约束和供热负荷平衡约束联合起来。在满足两系统独立潮流约束的同时, 结合联合等式约束, 对潮流进行调整, 得到比较优化的潮流分布。

当首先计算电力潮流时 P_e^{MT} 、 P_e^{AC} 已知, f_{MT} 、 f_{GB} 则可经过EB进行求解, 从而可计算与电力耦合的天然气潮流。 P_e^{MT} 、 P_e^{AC} 分别为电气系统中MT有功出力, 和AC的有功负荷; f_{MT} 、 f_{GB} 分别为天然气系统中MT和GB的天然气流量。

$$\begin{cases} P_e^{MT} = v_{MT} \eta_{ge}^{MT} P_g \\ P_g^{MT} = v_{MT} P_g = \frac{P_e^{MT}}{\eta_{ge}^{MT}} \end{cases} \quad (22)$$

则可得:

$$f_{MT} = \frac{P_g^{MT}}{LHV} \quad (23)$$

$$\begin{cases} P_e^{AC} = v_{AC} P_e \\ P_h^{MT} = \frac{P_e^{MT}}{\eta_{ge}^{MT}} \eta_{gh}^{MT} \\ P_h^{AC} = v_{AC} \eta^{AC} P_e = \eta^{AC} P_e^{AC} \\ P_g^{GB} = (1-v_{MT}) \eta^{GB} = \frac{L_h - P_h^{MT} - P_h^{AC}}{\eta^{GB}} \end{cases} \quad (24)$$

则可得

$$f_{GB} = \frac{P_g^{GB}}{LHV} \quad (25)$$

并可计算EB与天然气系统交换的能量大小 P_g

$$P_g = P_g^{MT} + P_g^{GB} \quad (26)$$

$$\begin{cases} L_e = (1-v_{AC}) \eta^T P_e + P_e^{MT} \\ P_e^{AC} = v_{AC} P_e \end{cases} \quad (27)$$

联立求方程组, 可得 P_e 、AC所消耗的比例 V_{AC} 。

当首先计算天然气潮流时, f_{MT} 、 f_{GB} 已知, 则可经过能源集线器, 即式(22)-(27)反向进行求解 P_e^{MT} 、 P_e^{AC} , 从而可计算与电力耦合的电力潮流。

EB潮流约束条件, 即EB与配电网的交换功率

和与天然气系统交换的燃气功率上下限。

$$P_e^{\min} \leq P_e \leq P_e^{\max} \quad (28)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \quad (29)$$

2 区域综合能源系统潮流计算方法

文中所研究的综合能源系统多能流的潮流分布, 包含耦合环节的EB模型, 需要根据电力网络、天然气网络、电力负荷、供热负荷的已知变量进行求解。为一个高纬度, 高耦合性的复杂的非线性模型, 因此, 文中只计算稳定运行状态下, 各系统各节点的变量, 从而降低模型求解的复杂性。由于模型的非线性特性, 文中采用牛顿—拉夫逊算法进行求解。

对于天然气网络和电力网络, 潮流分布可分开进行运算, 只是在潮流分布结束一次之后, 结合EB进行一次转换, 然后交叉回推验证其边界条件, 满足约束条件则输出结果。模型求解流程图见图2。

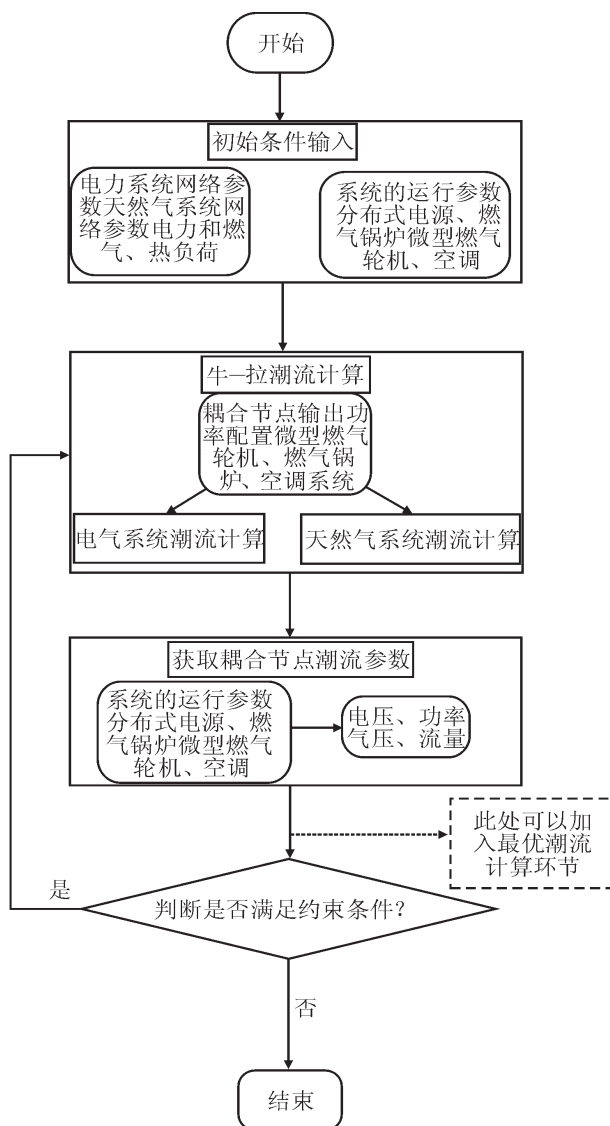


图2 模型求解流程图

Fig. 2 The flow chart of model

3 仿真算例

文中采用的综合能源系统算例结构见图3,是以某开发区综合能源系统为研究算例,将其抽象简化为一个10节点的电力系统作对象,同时为该区域规划了一个9节点天然气系统,以及一个能源集线器。图3中ES表示电气系统母线;GS表示天然气系统管网,其后数字为对应系统网络节点编号。该系统的节点配置与网络参数见表1-4。

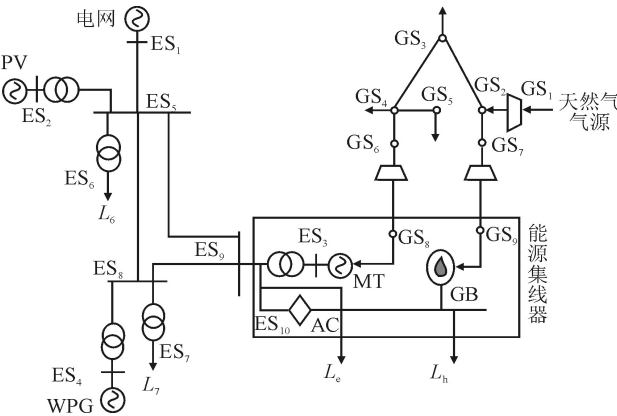


图3 综合能源系统(ICES)算例结构图
Fig. 3 The example structure chart of ICES

表1 电力系统支路参数

Table 1 Branch parameters of power system

首端号	末端号	阻抗有名值/ Ω	阻抗($\times 10^3$)/p.u.
1	5	$0.008+0.213i$	$0.008+0.213i$
2	5	$0.008+0.259i$	$0.008+0.259i$
5	6	$0.008+0.213i$	$0.008+0.213i$
3	9	$0.008+0.203i$	$0.008+0.203i$
5	9	$0.020+0.289i$	$0.020+0.289i$
5	8	$0.020+0.213i$	$0.020+0.213i$
4	8	$0.008+0.213i$	$0.008+0.213i$
8	7	$0.008+0.259i$	$0.008+0.259i$
8	9	$0.020+0.203i$	$0.020+0.203i$
9	10	$0.020+0.259i$	$0.020+0.259i$

表2 天然气管道参数

Table 2 Natural gas pipeline parameters

管道编号	管道长度 L_k /m	管道内径 D_k /mm	K_{mn}
1-2	600	50	0.001 2
2-3	400	50	0.001 5
2-7	500	70	0.003 1
3-4	400	50	0.001 5
4-5	300	50	0.001 7
4-6	500	70	0.003 1
6-8	200	50	0.002 1
7-9	200	50	0.002 1

表3 天然气网络节点参数设定

Table 3 Natural gas network node parameter setting

节点编号	参数值
1	$\pi_1 = 5 \text{ MPa}$
2	$f_2 = 0$
3	$f_3 = 200 \text{ m}^3/\text{h}$
4	$f_4 = 150 \text{ m}^3/\text{h}$
5	$f_5 = 250 \text{ m}^3/\text{s}$
8	$f_8 = _ \text{m}^3/\text{s} \pi_8 = 5.5 \text{ MPa}$
9	$\pi_8 = 6 \text{ MPa} f_9 = _ \text{m}^3/\text{s}$

表4 能源集线器参数

Table 4 Energy hub parameters

变量	大小
电负荷 L_e /kW	100
热负荷 L_h /kW	200
微型燃气轮机	功率上限/kW 100
MT	发电效率 η_{ge}^{MT} 0.3
	热效率 η_{gh}^{MT} 0.4
燃气锅炉	功率上限/kW 500
GB	效率 η^{GB} 0.75
空调	功率上限/kW 150
AC	效率 η^{AC} 0.6

根据式(21)所示的耦合关系式,其中耦合矩阵C中的耦合系数不仅与转换装置的转换效率有关,还与能源在不同转换装置中的分配比例有关,带入参数可得

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 100 \\ 200 \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} (1-v_{AC}) & 0.3 \times v_{MT} \\ 0.6 \times v_{AC} & 0.4 \times v_{MT} + 0.75 \times (1-v_{MT}) \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} P_e \\ P_g \end{bmatrix}}_P \quad (30)$$

当首先计算天然气潮流时,表1中的流量 f_8 、 f_9 给定一个初值,则通过能源集线器模型,可以求解与天然气网络耦合所对应的电气量 P_e^{MT} 、 P_e^{AC} ,从而可求解电力潮流,同时,也可以得到此时EB从电力系统和天然气系统分别获取的能量大小 P_e 、 P_g ;如此交叉求解,验证综合多能流综合潮流计算网络约束。调整系统参数,使系统安全稳定运行。

4 综合潮流算例仿真分析

为了分析电力系统和天然气系统经EB的耦合,在一侧系统输入变量发生变化以后对对侧系统的输入变量的影响,文中假设除耦合节点和平衡节点的输入输出改变以外,整个综合能源系统其他节点的电/气/热/负荷均不变。分两种模式4种运行情况进行分析:以电定热模式下的电量变化一次对两系统的影响,FEL-I型和FEL-II型,以热定电模式下的燃

气变化一次对两系统的影响 FTL-I 型, FTL-II 型。加上两种模式间的对比, 共对 3 组对比进行分析。首先给出潮流计算的初始解见表 5, 表 5 中阴影部分为未标阴影部分的量经过 EB

计算所得。

4.1 电力系统潮流运算结果

4 种运行模式下电力系统各节点电压与节点注入有功功率大小见图 4。

表 5 综合能源系统初始解

Table 5 Integrated energy system initial solution

运行方式	电气系统			燃气系统	
	P_e^{MT}/kW	P_e^{AC}/kW		$f_g/(m^3 \cdot h^{-1})$	$f_g/(m^3 \cdot h^{-1})$
FEL-I	50.0	30.000	→	17.182	15.853
FEL-II	60.0	20.000	→	20.620	14.850
FTL-I	30.0	162.000	←	10.000	10.000
FTL-II	52.3	35.058	←	18.000	15.000

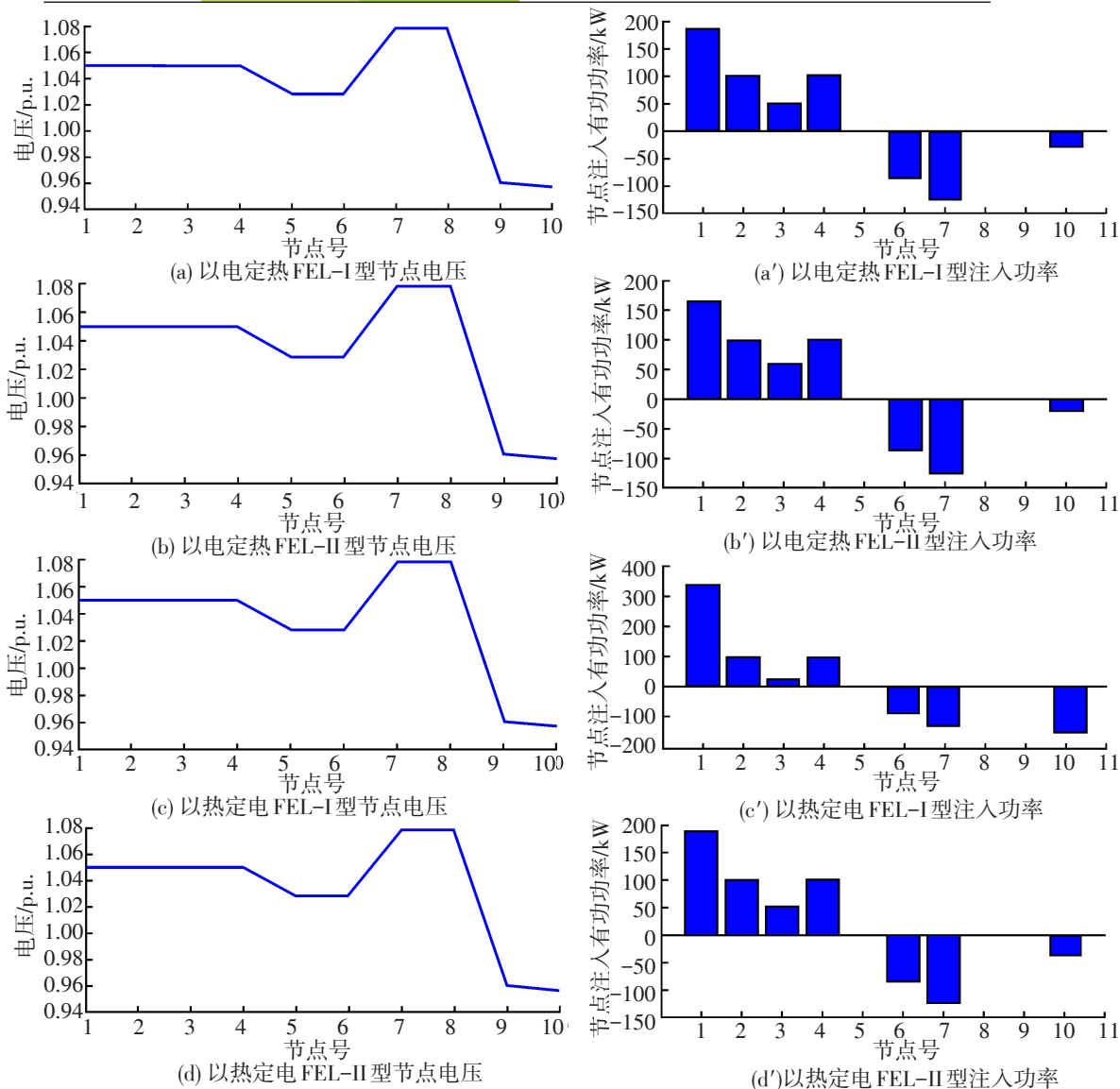


图 4 4 种运行模式下电力系统各节点电压与节点注入有功功率大小

Fig. 4 Four kinds of operating modes each node voltage of the power system and node injection active power size

由图 4 可知, 在保持各节点负荷不变的情况下, 节点电压幅值变化甚微, 这也与算例选取有关, 因为选取的是小范围低压配电网, 且维持在稳定范围之内。由图 4 中(a')、(b')对比可知, 当电力价格上升, 燃

气价格降低或者不变时, 增加 MT 的电能输出, 减少 AC 的带电负荷, 则由表 1 可得, 在 EB 节点热负荷和电负荷不变的情况下, MT 燃气量增加, GB 的燃气量减少。

对比图4中(c')、(d')可知,当MT和GB的天然气流量减小时,整个综合能源系统从电网中获取的能量大大增加,这是因为,天然气量的减少,通过GB和MT产生的热能减少,系统需要通过AC系统进行

补充。由图4(c')可知,在该运行状态下,AC出力已经越过了其最大出力上限,跳出了正常运行状态。因此需要对其调整,增加MT与GB的天然气流量。从而使系统达到另一个稳定的运行状态FTL-II。

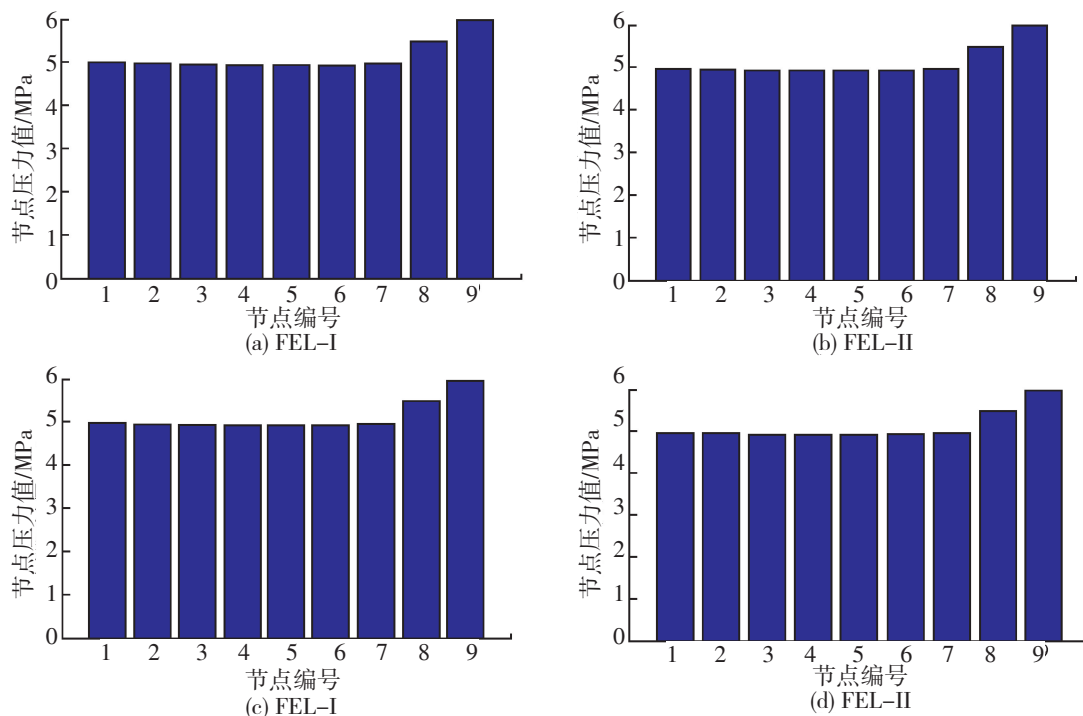


图5 4种运行模式下天然气系统各节点气压大小

Fig. 5 Four kinds of operating mode of gas system each node pressure size

表6 各系统间能量互动情况统计表

Table 6 Energy interaction statistics among systems

运行模式	电力系统供能		电气/燃气系统 与能源集线器交换功率		燃气系统供能	
	有功/kW	无功/kvar	电气/kW	燃气/kW	燃气功率/kW	压缩机压缩比
FEL-I	185.2	1 020.910	80.000	320.440 4	5 896.068 0	$k_{c2}=1.111$ $k_{c3}=1.206$
FEL-II	165.2	1 021.010	60.000	344.050 0	5 898.797 0	$k_{c2}=1.111$ $k_{c3}=1.206$
FTL-I	337.1	10.202	232.000	194.000 0	5 866.567 1	$k_{c2}=1.111$ $k_{c3}=1.206$
FTL-II	187.9	1 020.900	82.758	320.100 0	5 894.877 0	$k_{c2}=1.111$ $k_{c3}=1.206$

4.2 天然气系统潮流运算结果

4种运行模式下天然气系统各节点气压大小见图5,各系统间能量互动情况统计表见表6。

由图5可知,天然气系统各节点的压力维持在额定工作压力之下,这是因为在保持负荷不变的情况下,经EB的综合约束,从燃气系统所获取的燃气流量恰好与电力系统协调配合,满足了负荷需求。如果不经EB约束,而是两系统独立进行出力设计,可能造成电力网络的功率不平衡,从而引起频率

波动,也可能造成燃气网络的压缩比或者压力越限运行,造成安全隐患。

4.3 能源集线器潮流运算结果

运用牛顿拉夫逊法,以及电力天然气潮流运算结果可得,能源集线器与综合能源系统交换功率,以及综合能源系统从电网和天然气气源所获得的功率。

对于EB,由表5、6可得,在FEL模式下,增加燃气轮机有功出力,减小空调出力。此时,电力系统的电力负荷减小,所以从电网获取的能量将减小。电

气系统与EB交换的电能也减少,但是,同时也增加了能源集线器与天然气网路的交换功率,并且,由结果可以看出,GB与MT燃气负荷的增加不是正相关的。

5 结论

文中以综合能源系统为研究对象,考虑了多种能量系统间的耦合特性,对其进行了综合建模、仿真与潮流分析。取得了如下成果:

1)针对天然气网络对微型燃气轮机运行特性的影响,在其燃料控制环节加入天然气管网流量约束压力方程,将天然气管网压力对燃料流量的影响反应到电气环节,揭示了天然气管网与电气系统的互动特性。同时针对空调系统与燃气锅炉耦合模式建立了仿真模型。利用一个简单算例分析得到微型燃气轮机电气参数与天然气管网系统之间的相互影响特性。

2)基于能源集线器理论构建了包含天然气网络、电力网络以及两者之间耦合关系的综合能源系统模型,针对所建立的模型,提出了电力网络与天然气网络交叉回推求解算法。

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):3292-3306.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(12):3292-3306.
- [2] 王明俊. 智能电网与智能能源网[J]. 电网技术,2010,34(10):1-5.
WANG Mingjun. Smart grid and intelligent energy network[J]. Grid Technology, 2010, 34(10):1-5.
- [3] LASSETER R H. Smart distribution: coupled microgrids[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6):1074-1082.
- [4] STANISLAV P, BRYAN K, TIHOMIR M. Smart grids better with integrated energy system[C]//Electrical Power & Energy Conference (EPEC). [S.l.]:IEEE, 2009:1-8.
- [5] WEI Z, CHEN S, SUN G, et al. Probabilistic available transfer capability calculation considering static security constraints and uncertainties of electricity-gas integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167(5):305-316.
- [6] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
- [7] XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Regional integrated energy systems electricity/gas/heat hybrid flow algorithm[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(14):3634-3642.
- [8] 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. General modeling method for micro-network optimization and dispatching of hot and cold combined power generation[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(31):26-33.
- [9] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电—气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow in electric energy mixed electric energy system[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(24):6331-6340.
- [10] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报,2013,28(10):257-270.
ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10):257-270.
- [11] 刘宇,高山,杨胜春,等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(23):127-135.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23):127-135.
- [12] 施锦月,许健,曾博,等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术,2016,40(10):2959-2966.
SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. Study on double layer optimization of regional integrated energy system based on thermoelectric ratio adjustable mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2959-2966.
- [13] SHARIF A, ALMANSOORI A, FOWLER M, et al. Design of an energy hub based on natural gas and renewable energy sources[J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(3):363-373.
- [14] 徐飞,闵勇,陈磊,等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5063-5072.
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity

(下转第211页)

- ators in the world[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 1-8.
- [11] 王德顺, 杨 军, 华光辉, 等. 35 kV 光伏电站低电压穿越检测装置瞬态过电压抑制措施研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 19-23.
- WANG Deshun, YANG Jun, HUA Guanghui, et al. Study on measure to restrain transient over-voltage in 35 kV PV-LVRT experiment[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 19-23.
- [12] ZHANG L, BOLLEN M. H. J, MEMBER S. Characteristic of voltage dips(sags) in power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 827-832.
- [13] ZMOOD D N, HOLMES D G, BODE G H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(2): 2005-2008.
- [14] GUO Suxuan, LIU Dichen. Proportional-resonant based high-performance control strategy for voltage-quality in dynamic voltage restorer system[C]//The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. [S.l.]: IEEE, 2010: 721-726.
- [15] TEODORESCU R, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters[J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 2006, 153(5): 750.
- [16] ZENG G, RASMUSSEN T W, MODELA S. Design of current-controller with PR-regulator for LCL-filter based grid-connected converter[C]//2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. [S.l.]: IEEE, 2010: 490-494.
- [17] TWINING E, MEMBER S, HOLMES D G. Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
- [18] GARCÍA-GRACIA M, COMECH M P, SALLÁN J, et al. Voltage dip generator for wind energy systems up to 5 MW[J]. Applied Energy, 2009, 86(4): 565-574.
- [19] 胡书举, 李建林, 梁 亮, 等. 风力发电用电压跌落发生器研究综述[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 101-103.
- HU Shuju, LI Jianlin, LIANG Liang, et al. Review of voltage sag generator for wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 101-103.
- [20] NIIRANEN J. Experiences on voltage dip ride through factory testing of synchronous and doubly fed generator drives[C]//European Conference on and Applications. [S.l.]: IEEE, 2005: 11.
- 李官军(1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为储能应用技术。
- 鄢盛驰(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为储能应用技术。
- 崔红芬(1984—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为柔性直流输电技术、分布式新能源并网技术。
- 施 永(1985—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为分布式发电技术。

(上接第 204 页)

- thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [14] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2302-2311.
- [15] XU X, JIA H, WANG D, et al. Hierarchical energy management system for multi-source multi-product microgrids[J]. Renewable Energy, 2015(78): 621-630.
- [16] 陈 珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- CHEN Heng. Steady state analysis of power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [17] LI Q, AN S, GEDRA T W. Solving natural gas load flow problems using electric load flow techniques[C]// Proceedings of the North American Power Symposium. Rolla, USA: IEEE, 2003: 1-7.
- [18] GEIDL M, KOEPEL G, FAVRE-PERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- 董彦君(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源与微电网综合用能技术。
- 张惠智(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统自动化。
- 马富齐(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统新能源。
- 马喜平(1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统新能源。
- 赵 耀(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事电网的运行与故障检测。
- 刘 冲(1991—), 男, 工程师, 主要从事电网的运行与故障检测。