

电—气互联下燃气状态对电力系统 小干扰稳定的影响

马 瑞¹, 杨 汉¹, 吕振华², 李 强², 韩华春², 侯 佳³

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;
3. 湖南省送变电工程有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘 要:针对电—气互联下燃气压力和流量变化对电力系统小干扰稳定影响问题, 建立考虑天然气传输延迟和天然气管道、燃气发电机组动态特性的电气互联系统小干扰稳定模型; 提出了天然气传输延迟下燃气压力、流量变化与相关特征值的数学关系, 从而揭示燃气状态对电力系统小干扰稳定影响机理; 通过获取燃气变化影响相关振荡模式的参与因子, 从而定量评估燃气流压力和流量对系统小干扰稳定的影响程度。天然气发电 CHP 接入无穷大电网和含 2 台 CHP 的改进 IEEE 9 节点系统算例仿真结果表明, 该文提出的模型和方法正确有效。

关 键 词:电—气互联系统; 传输延迟; 燃气发电机组; 小干扰稳定

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.001 中图分类号: TM93 文章编号: 1673-9140(2021)01-0003-10

Research on the impact of gas status on small signal stability of power system for combined electricity and gas system

MA Rui¹, YANG Han¹, LV Zhenhua², LI Qiang², HAN Huachun², HOU Jia³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;
3. Hunan Electric Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: Aiming at the problem of the impact of gas pressure and flow change on the small signal stability of power system for combined electricity and gas system, a small signal stability model of combined electricity and gas system considering the gas transmission delay, dynamic characteristics of natural gas pipeline and gas generator set is established. Firstly, the mathematical relationship of gas pressure changes to relevant eigenvalues and flow changes to relevant eigenvalues is derived under the delay of gas transmission to reveal the mechanism of the influence of gas status on the small signal stability of power system. Then the participation factor method of gas changes related oscillation mode is proposed. Through developing the participation factors of gas changes that affect the relevant oscillating modes, it is possible to quantitatively evaluate the influence of gas flow pressure and flow on the small signal stability of the system. The simulation results of CHP driven by natural gas access infinity system and the improved IEEE 9 node system with two CHPs show that the proposed model and method are correct and effective.

Key words: combined electricity and gas system; transmission delay; gas generator set; small signal stability

收稿日期: 2019-08-10; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51977012); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019047)

通信作者: 马 瑞(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定与控制、综合能源系统规划和运行等研究; E-mail: marui818@126.com

随着能源互联网建设推进,电、气、热多种能源耦合日趋紧密,以天然气为一次能源的热电联产(combined heat and power, CHP)和冷热电联产(combined cooling heating and power, CCHP)可提升高比例可再生能源电网调峰能力和综合能源利用率,预计2020年中国天然气发电装机容量将达到 1.1×10^8 kW^[1]。然而,电一气互联下,燃气系统扰动或故障会通过CHP或CCHP耦合影响电力系统安全稳定运行,如2017年中国台湾地区大停电事件起因是天然气系统阀门误关导致6台CHP机组脱网,引发电力系统故障,影响该地区85%人口正常生活^[2]。随着能源互联网建设推进,电一气互联下相互耦合影响成为亟待研究的问题。

电一气互联系统稳态和动态研究已经得到学者们高度关注。一类是考虑电、气特性进行电一气互联系统优化,如文献[3]构建了计及可转移负荷的电一气综合能源系统多目标优化模型,借鉴模糊集理论将多目标转化成单目标进行求解;文献[4]构建了考虑气热网延时效应、网管存效应与热网热量损失的综合能源系统优化协调规划的混合整数非线性优化模型;文献[5]考虑了天然气流的瞬态过程,有效逼近了其最优能量流的动态特征。另一类是进行耦合系统交互影响研究,如文献[6]考虑天然气管道动态模型,根据两时间尺度法,研究电、气耦合系统的交互影响;文献[7]考虑了燃气内燃机、蓄水箱、余热换热器、余热锅炉和燃气锅炉的动态特性,研究电、热系统中的交互作用;文献[8]推导了用于综合能源系统的静态电压稳定性分析的降维矩阵,探究了能源载体负荷波动对区域综合能源系统及电压稳定性指标的影响;文献[9]考虑了天然气管网N-1故障经能量枢纽耦合传播的多能流系统中的静态安全问题;文献[10]则针对自然灾害等极端事件下电一气耦合影响的恢复能力进行研究。

上述研究为电一气互联系统耦合影响提供一定基础,但很少有关于电一气互联下燃气流量和压力变化对电力系统小干扰稳定影响研究,为此该文建立了考虑天然气传输延迟的电一气互联系统小干扰稳定模型,通过分析燃气的流量和状态变化与电力系统特征值之间的关系来揭示其对小干扰稳定的影

响机理,并获取其余振荡模态参与因子评估不同CHP机组对振荡的参与程度,从而有望提供电一气互联系统小干扰稳定分析新方法。

1 燃气发电系统小干扰稳定模型

1.1 考虑传输延迟的天然气管道模型

天然气在入口压力的驱动下沿管道流动,其管道结构如图1所示^[11]。假设天然气沿管道传输为恒温过程^[12],天然气管道模型可以表示为偏微分方程形式^[13]:

$$\frac{A}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = - \frac{\partial M}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho\omega^2)}{\partial x} - \frac{2f\rho\omega^2}{D} \quad (2)$$

式中 P 为压力, Pa; A 为管道的截面积, m^2 ; c 为天然气中的声速, m/s ; D 为管道直径, m ; M 为质量流量, kg/s ; f 为摩擦系数; ρ 为天然气的密度, kg/m^3 ; ω 为沿管道的天然气流速, m/s ; x 为距离, m ; L 为管道长度, m 。

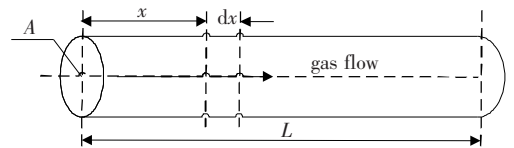


图1 天然气管道结构

Figure 1 Structure of gas pipeline

天然气传输过程中,由于管道内存储一部分天然气,即管存,所以天然气在管道中传输具有一定延迟。天然气从入口到出口延时时间为

$$t_d = \mu \frac{L}{\omega} \quad (3)$$

式中 μ 为延迟系数。因此,在 t_d 时刻,管道压力、流量达到稳态值 $P_{in}(t_d)$ 、 $M_{in}(t_d)$ 。

令 $P = P_{out}$, $M = M_{out}$, 根据文献[14], 可将式(1)、(2)从原有的偏微分形式转化为常微分形式:

$$\frac{d\Delta P_{out}}{dt} = \frac{c^2}{A\Delta L} (\Delta M_{out} - \Delta M_{in}) \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta M_{out}}{dt} = \frac{A}{\Delta L} (\Delta P_{in} - \Delta P_{out}) - \frac{f c^2 M_{in}(t_d)}{D A P_{in}(t_d)} \Delta M_{out} + \frac{f c^2 M_{in}(t_d)^2}{2 D A P_{in}(t_d)^2} \Delta P_{out} \quad (5)$$

式中 P_{out} 为管道出口压力, Pa; P_{in} 为管道入口压力, Pa; M_{out} 为管道出口流量, kg/s; M_{in} 为管道的入口流量, kg/s; $\Delta P_{\text{out}} = P_{\text{out}} - P_{\text{in}}(t_d)$, $\Delta M_{\text{out}} = M_{\text{out}} - M_{\text{in}}(t_d)$ 。

1.2 燃气轮机模型

该文着重研究天然气网络侧状态变化对于整个系统的影响, 暂忽略燃气轮机内部状态影响。

根据文献[15]可知, 燃气轮机消耗的天然气流量 M_{out} 和电功率 P_{T} 的关系为

$$M_{\text{out}} = a_G + b_G P_{\text{T}} + c_G P_{\text{T}}^2 \quad (6)$$

式中 a_G, b_G, c_G 为燃气轮机消耗系数, $\text{m}^3/\text{MW} \cdot \text{h}$ 。一般 a_G, c_G 取 0, 则可得到天然气管道出口流量 M_{out} 与电功率 P_{T} 的关系为

$$P_{\text{T}} = \frac{3\ 600 M_{\text{out}}}{\rho b_G} \quad (7)$$

1.3 燃气发电机模型

记及励磁调节系统, 发电机采用三阶模型。则电磁暂态方程:

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_f - [E'_q + (x_d - x'_d)I_d] \quad (8)$$

式中 T'_{d0} 为励磁绕组时间常数; E'_q 为暂态电动势; E_f 为强制空载电动势; x_d 为 d 轴同步电抗;

x'_d 为 d 轴暂态电抗; I_d 为定子电流。

励磁系统传递函数:

$$\Delta E_f = \frac{-K_e}{1 + T_e p} \Delta U_G \quad (9)$$

式中 K_e 为放大倍数; T_e 为励磁系统调节常数; U_G 为发电机机端电压。

转子运动方程为

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \quad (10)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_{\text{T}} - P_{\text{E}}) \quad (11)$$

式中 δ 为功角; ω 为转子角速度; ω_0 为同步电角速度; T_J 为发电机惯性时间常数; P_{E} 为电磁功率。

1.4 燃气发电系统小干扰稳定模型

由以上分析可知, 天然气系统接入后的小干扰模型由一组非线性方程组组成。将方程式(4)~(5)、(7)~(11)在其稳态运行点处线性化, 得到整个系统的小干扰稳定模型。

线性化后的状态方程:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{u} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{x} = [P_{\text{out}} \ M_{\text{out}} \ \delta \ \omega \ E'_q \ E_f]^T$, $\mathbf{u} = [M_{\text{in}} \ P_{\text{in}}]^T$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{c^2}{A\Delta L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{fc^2 M_{\text{in}}(t_d)^2}{2DAP_{\text{in}}(t_d)^2} - \frac{A}{\Delta L} & -\frac{fc^2 M_{\text{in}}(t_d)}{DAP_{\text{in}}(t_d)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3\ 600}{T_J \rho b_G} & -\frac{K_1}{T_J} & 0 & \frac{K_2}{T_J} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{1}{K_3 T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & 0 & -\frac{K_e K_5}{T_e} & 0 & -\frac{K_e K_5}{T_e} & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{c^2}{A\Delta L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A}{\Delta L} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$K_1 = \frac{E'_q U}{x'_d \Sigma} \cos \delta_0 + U^2 \frac{x'_d \Sigma - x_q \Sigma}{x'_d \Sigma x_q \Sigma} \cos 2\delta_0,$$

$$K_2 = \frac{U}{x'_d \Sigma} \sin \delta_0, K_3 = \frac{x'_d \Sigma}{x_d \Sigma},$$

$$K_4 = \frac{x_d \Sigma - x'_d \Sigma}{x'_d \Sigma} U \sin \delta_0, K_5 = \frac{U_{Gd|0|} U x_q \cos \delta_0}{U_{Gd|0|} x_q \Sigma} -$$

$$\frac{U_{Gq|0|} U x'_d \sin \delta_0}{U_{G|0|} x'_d \Sigma}, K_6 = \frac{U_{Gq|0|}}{U_{G|0|}} \left(\frac{x_d \Sigma - x_d}{x'_d \Sigma} \right)$$

式中 U 为无穷大母线电压; $x_{d\Sigma}$ 为 d 轴等值同步电抗; $x_{q\Sigma}$ 为 q 轴等值同步电抗; $x'_{d\Sigma}$ 为等值暂态电抗; $U_{G|0|}$ 为正常状态发电机端电压。

2 燃气压力和流量变化对电力系统小干扰稳定影响分析

2.1 燃气变化对特征值影响分析

压力和质量流量是燃气状态描述主要指标, 压力和质量流量任意一个变化都会导致天然气管道出口压力和出口流量的变化, 进而对燃气轮机的入口燃料量产生影响, 导致燃气发电机组的有功出力发生变化, 最终对电力系统小干扰稳定性产生影响。

对线性化后的状态方程进行特征值分析, 探究燃气变化影响系统小干扰稳定的机理。令 $|\lambda E - A| = 0$, 特征方程:

$$\left(\lambda^2 + \frac{fc^2 M_{in}(t_d)}{DAP_{in}(t_d)} \lambda - \frac{fc^4 M_{in}(t_d)^2}{2DA^2 \Delta LP_{in}(t_d)^2} + \frac{c^2}{\Delta L^2}\right) \cdot (\lambda^4 + D_1 \lambda^3 + D_2 \lambda^2 + D_3 \lambda + D_4) = 0 \quad (13)$$

其中

$$D_1 = \frac{1}{K_3 T'_{d0}} + \frac{1}{T_e}$$

$$D_2 = \frac{1}{K_3 T'_{d0} T_e} + \frac{K_e K_5}{T_e T'_{d0}} + \frac{K_1 \omega_0}{T_J}$$

$$D_3 = \frac{\omega_0}{T_J} \left(\frac{K_1}{K_3 T'_{d0}} + \frac{K_1}{T_e} + \frac{K_2 K_4}{T'_{d0}} \right)$$

$$D_4 = \frac{\omega_0}{T_J T'_{d0} T_e} \left(\frac{K_1}{K_3} + K_1 K_e K_5 + K_2 K_4 - K_2 K_e K_5 \right)$$

与燃气压力和流量相关的特征值:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{fc^2 M_{in}(t_d)}{DAP_{in}(t_d)} \pm \right.$$

$$\left. j \sqrt{4 \frac{c^2}{\Delta L^2} - \left(\frac{fc^2 M_{in}(t_d)}{DAP_{in}(t_d)} \right)^2 - \frac{2fc^4 M_{in}(t_d)^2}{DA \Delta LP_{in}(t_d)^2}} \right) \quad (14)$$

式(14)体现了 P_{in} 、 M_{in} 影响特征值变化。

2.2 燃气变化对小干扰稳定参与因子分析

参与因子是探究某个振荡模式与某个状态变量的参与程度, 由定义 $p_{ki} = \partial \lambda_i / \partial \alpha_{kk}$ [16] 可得:

$$p_{\Delta M_{out}} = \frac{1}{2} \left(1 \pm j \frac{\frac{fc^2 M_{in}(t_d)}{DAP_{in}(t_d)}}{\sqrt{4 \frac{c^2}{\Delta L^2} - \left(\frac{fc^2 M_{in}(t_d)}{DAP_{in}(t_d)} \right)^2 - \frac{2fc^4 M_{in}(t_d)^2}{DA \Delta LP_{in}(t_d)^2}}} \right) \quad (15)$$

式中 $p_{\Delta M_{out}}$ 为特征值 $\lambda_{1,2}$ 对状态矩阵 A 的对角元素 $-fc^2 M_{in}(t_d)/DAP_{in}(t_d)$ 的灵敏度。同样, 上式也体现了 P_{in} 、 M_{in} 影响参与因子变化。

3 算例仿真及结果分析

3.1 单机无穷大系统

天然气管道和耦合部件 CHP 通过变压器和线路与无穷大电网相连, 如图 2 所示。

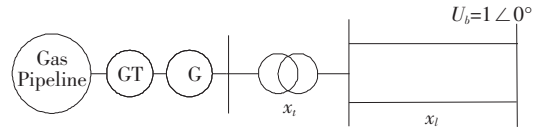


图 2 天然气发电系统接入单机无穷大系统

Figure 2 Gas power generation system connected to an infinite bus system

设系统基准容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 天然气管道参数: $L = 500 \text{ m}$; $f = 0.003$; $D = 0.1 \text{ m}$; $P_{in} = 3 \text{ MPa}$; $M_{in} = 5 \text{ kg/s}$; $\rho = 0.8 \text{ kg/m}^3$; $c = 300 \text{ m/s}$; $\Delta L = 50 \text{ m}$; $\mu = 1.05$ 。

燃气轮机参数: $b_G = 167.1 \text{ m}^3 / (\text{MW} \cdot \text{h})$ 。

同步发电机参数: $U_N = 0.4 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $r = 0.001$; $x_q = 1.1$; $x_d = 0.9$; $x'_d = 0.12$; $T'_{d0} = 6 \text{ s}$; $p = 1$; $T_J = 10$; $\cos \theta = 0.99$ 。

励磁系统: $K_e = 20$; $T_e = 0.5 \text{ s}$ 。

系统参数: $U_b = 1 \angle 0^\circ$; $x_l = 0.03$; $x_r = 0.04$ 。

1) 燃气入口压力变化。

该算例在 500 s 处设置入口压力变化。入口压力变化将会引起出口流量变化, 进而影响燃气轮机的进气量, 最终导致燃气机组有功变化。

仿真结果如表 1 所示, 模态 1 为与 ΔP_{out} 、 ΔM_{out} 强相关的特征值, 说明所提模型能正确反映电气互联系统的小干扰稳定; 模态 2 为与 ω_{CHP} 强相关的特

征值。由表 1 可得天然气发电 CHP 系统与电力系统呈弱阻尼。随着燃气入口压力增大,阻尼越来越

强。同时模态 2 特征值向左上半平面移动,移动轨迹如图 3 所示。

表 1 入口压力变化时特征值

Table 1 Eigenvalue when P_{in} changes

入口流量增量/(kg/s)	管道出口流量/(kg/s)	燃气机组有功/MW	模态 1		模态 2	
			特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%
0.5	4.537 3	122.190 1	-0.268 7±j5.993 9	4.478 0	-0.195 5±j7.452 4	2.571
1.0	5.035 5	135.607 2	-0.252 9±j5.994 6	4.215 0	-0.204 4±j7.587 7	2.423
1.5	5.547 6	149.395 6	-0.238 9±j5.995 2	3.981 7	-0.219 9±j7.842 2	2.272
2.0	6.097 8	164.212 9	-0.226 3±j5.995 7	3.771 2	-0.238 9±j8.193 5	2.115
2.5	6.634 2	178.659 0	-0.215 0±j5.996 1	3.583 3	-0.262 2±j8.710 3	1.969
3.0	7.165 4	192.963 5	-0.204 7±j5.996 5	3.411 7	-0.286 0±j9.396 7	1.835

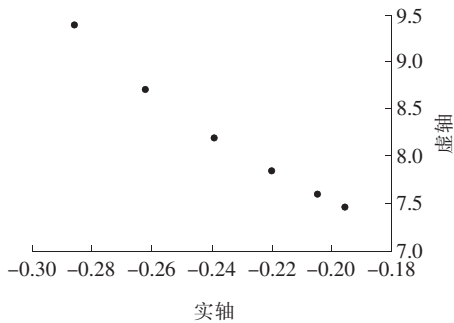


图 3 入口压力变化时特征值变化趋势

Figure 3 Trend of eigenvalues when P_{in} changes

2) 燃气入口流量变化

该算例在 500 s 处设置入口流量变化。由于入口流量变化将会引起出口流量变化,进而影响燃气轮机的进气量,最终导致燃气机组有功变化。

仿真结果如表 2 所示,模态 1 为与 ΔP_{out} 、 ΔM_{out} 强相关的特征值,模态 2 为与 ω_{CHP} 强相关的特征值。由表 2 可得天然气发电 CHP 系统与电力系统呈弱阻尼。随着燃气入口流量增大,阻尼越来越弱。同时模态 2 特征值向右下半平面移动,移动轨迹如图 4 所示。

表 2 入口流量变化时的特征值

Table 2 Eigenvalues when M_{in} changes

入口流量增量/(kg/s)	管道出口流量/(kg/s)	燃气机组有功/MW	模态 1		模态 2	
			特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%
0.5	4.537 3	122.190 1	-0.315 3±j5.991 6	5.255 1	-0.189 4±j7.363 2	2.571
1.0	5.035 5	135.607 2	-0.343 9±j5.990 0	5.731 8	-0.173 0±j7.138 9	2.423
1.5	5.547 6	149.395 6	-0.372 6±j5.988 3	6.211 0	-0.157 9±j6.947 2	2.272
2.0	6.097 8	164.212 9	-0.401 3±j5.986 4	6.688 5	-0.143 3±j6.775 5	2.115
2.5	6.634 2	178.659 0	-0.429 9±j5.984 4	7.165 2	-0.130 7±j6.635 1	1.969
3.0	7.165 4	192.963 5	-0.458 6±j5.982 3	7.643 5	-0.119 6±j6.516 9	1.835

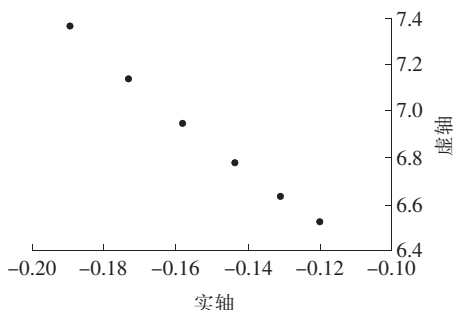


图 4 入口流量变化时特征值变化趋势

Figure 4 Trend of eigenvalues when M_{in} changes

3.2 2 区域天然气发电系统接入 IEEE 9 节点系统

本例用 2 个区域天然气发电系统分别接入 IEEE 9 节点电力系统,如图 5 所示,主要分析其对电力系统的影响及 2 个区域天然气系统的相互影响及其参与程度。算例设置 2 个天然气系统分别接入 IEEE 9 节点电力系统的 5、6 节点,2 区域参数一致。设系统基准容量为 $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $x_{t1}=0.2$, $x_{t2}=0.03$, $x_1=0.16$,其他参数同上例。IEEE 9 节点电力系统参数详见参考文献[17]。分别改变区域 1、2

的燃气入口压力和入口流量。

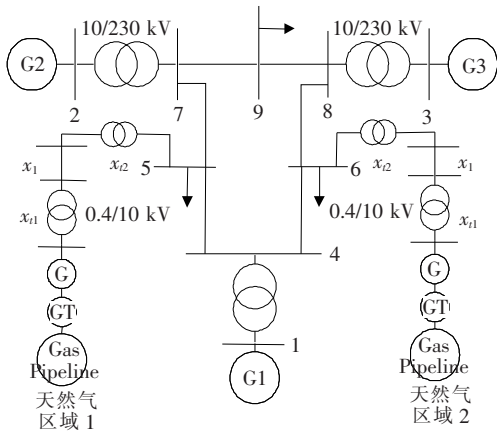


图5 两区域天然气系统接入IEEE 9节点系统

Figure 5 Access to IEEE 9-node system of gas system in two regions

3.2.1 改变区域1燃气变量

模态1是区域1燃气机组角速度 ω_{region1} 的主导模式,模态2是 ω_{region2} 的主导模式,模态3是 ω_{G2} 的主导模式,模态4是 ω_{G3} 的主导模式。

1) 改变区域1入口压力。

仿真结果如表3所示,天然气系统接入IEEE 9节点电力系统后,随着区域1的燃气入口压力增大,模态1特征值移动轨迹如图6所示,特征值无明显变化趋势;模态2、3的特征值移动轨迹如图7、8所示,特征值向右下方移动;而模态4特征值基本无变化。因此天然气系统接入IEEE 9节点系统后,区域1燃气入口压力变化对系统其他机组小干扰稳定有一定影响,而对自身小干扰稳定影响不大。

2) 改变区域1入口流量。

天然气系统接入IEEE 9节点电力系统后,随着区域1的燃气入口流量增大,模态1特征值移动轨迹如图9所示,特征值持续移动接近正半平面,说明区域1燃气发电机组小干扰稳定越来越差;模态2、3的特征值移动轨迹如图10、11所示,特征值无明显变化趋势;而模态4特征值基本无变化。因此天然气系统接入IEEE 9节点系统后,区域1燃气入口流量变化对自身小干扰稳定影响较大,对其他机组影响较小。仿真结果如表4所示。

表3 区域1入口压力变化时特征值

Table 3 Eigenvalues when P_{in} changes of region 1

入口压力/MPa	管道出口流量/(kg/s)	燃气机组有功/MW	模态1		模态2		模态3		模态4	
			特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%
0.2	4.361 0	117.441 9	$-0.320 \pm j8.249$	3.876	$-0.175 \pm j7.810$	2.240	$-0.177 \pm j6.765$	2.616	$-0.642 \pm j12.800$	5.009
0.4	4.119 6	110.942 1	$-0.304 \pm j8.388$	3.622	$-0.195 \pm j7.845$	2.485	$-0.182 \pm j6.781$	2.683	$-0.641 \pm j12.801$	5.001
0.6	3.719 1	100.154 5	$-0.290 \pm j8.681$	3.339	$-0.220 \pm j7.873$	2.793	$-0.188 \pm j6.802$	2.763	$-0.641 \pm j12.802$	5.001
0.8	3.260 6	87.807 2	$-0.293 \pm j9.082$	3.224	$-0.236 \pm j7.888$	2.991	$-0.194 \pm j6.819$	2.844	$-0.640 \pm j12.804$	4.992
1.0	2.726 0	73.411 4	$-0.313 \pm j9.626$	3.250	$-0.246 \pm j7.897$	3.114	$-0.198 \pm j6.832$	2.897	$-0.639 \pm j12.807$	4.983
1.2	2.186 2	58.874 2	$-0.351 \pm j10.252$	3.422	$-0.252 \pm j7.902$	3.187	$-0.202 \pm j6.841$	2.951	$-0.637 \pm j12.812$	4.966

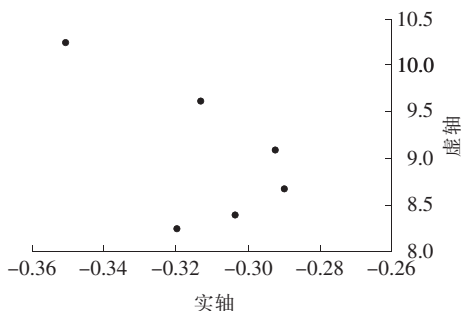


图6 入口压力变化时模态1特征值变化趋势

Figure 6 Trend of eigenvalues on model 1 when P_{in} changes

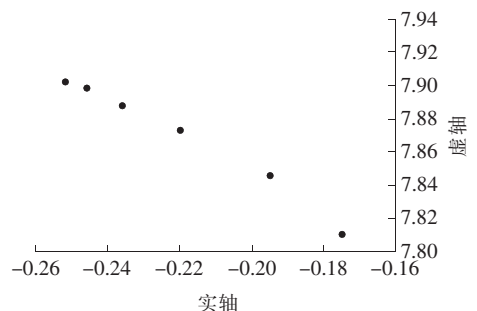


图7 入口压力变化时模态2特征值变化趋势

Figure 7 Trend of eigenvalues on model 2 when P_{in} changed

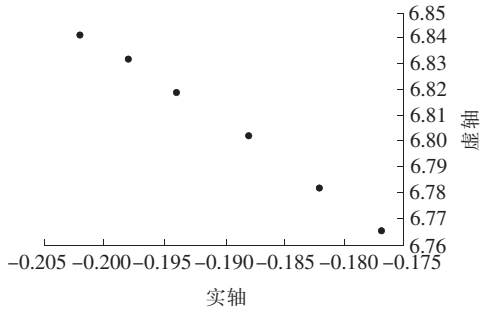


图 8 入口压力变化时模式 3 特征值变化趋势
Figure 8 Trend of eigenvalues on model 3 when P_{in} changes

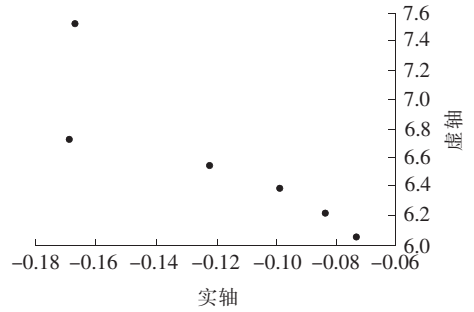


图 9 入口流量变化时模式 1 特征值变化趋势
Figure 9 Trend of eigenvalues on model 1 when M_{in} changes

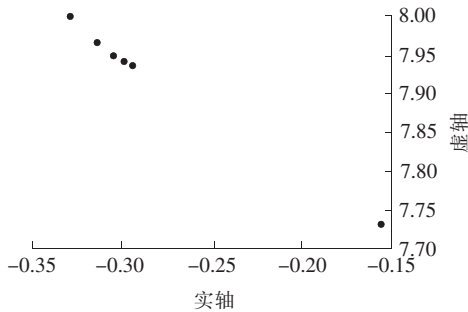


图 10 入口流量变化时模式 2 特征值变化趋势
Figure 10 Trend of eigenvalues on model 2 when M_{in} changes

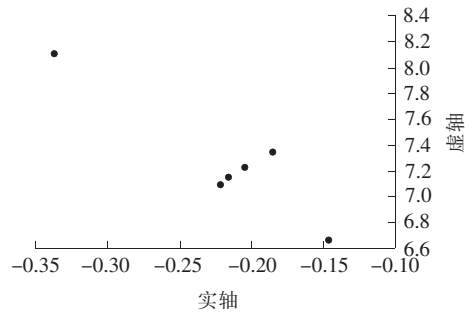


图 11 入口流量变化时模式 3 特征值变化趋势
Figure 11 Trend of eigenvalues on model 3 when M_{in} changes

表 4 区域 1 入口流量变化时的特征值

Table 4 Eigenvalues when M_{in} changes of region 1

入口流量增量/ (kg/s)	管道出口流量/ (kg/s)	燃气机组有功/MW	模态 1		模态 2		模态 3		模态 4	
			特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%	特征值	阻尼比/%
0.5	4.6856	126.1832	$-0.169 \pm j6.737$	2.508	$-0.155 \pm j7.730$	2.005	$-0.337 \pm j8.117$	4.148	$-0.642 \pm j12.799$	5.010
1.0	5.3075	142.9318	$-0.167 \pm j7.517$	2.221	$-0.329 \pm j8.000$	4.109	$-0.147 \pm j6.657$	2.208	$-0.642 \pm j12.798$	5.010
1.5	5.9371	159.8853	$-0.122 \pm j6.541$	1.865	$-0.314 \pm j7.967$	3.938	$-0.185 \pm j7.349$	2.517	$-0.642 \pm j12.798$	5.010
2.0	6.5532	176.4764	$-0.099 \pm j6.385$	1.550	$-0.305 \pm j7.951$	3.833	$-0.205 \pm j7.225$	2.836	$-0.643 \pm j12.797$	5.018
2.5	7.1564	192.7214	$-0.083 \pm j6.213$	1.336	$-0.299 \pm j7.943$	3.762	$-0.216 \pm j7.152$	3.019	$-0.643 \pm j12.797$	5.018
3.0	7.7357	208.3213	$-0.073 \pm j6.047$	1.207	$-0.295 \pm j7.938$	3.714	$-0.221 \pm j7.109$	3.107	$-0.643 \pm j12.797$	5.018

3.2.2 改变区域 2 燃气变量

模态 1 是区域 2 燃气机组角速度 $\omega_{region2}$ 的主导模式,模态 2 是 $\omega_{region1}$ 的主导模式,模态 3 是 ω_{G2} 的主导模式,模态 4 是 ω_{G3} 的主导模式。

1)改变区域 2 入口压力。

仿真结果如表 5 所示,天然气系统接入 IEEE 9 节点电力系统后,随着区域 2 的燃气入口压力增大,模态 1、2 特征值移动轨迹如图 12、13 所示,特征值无明显变化趋势;模态 3 的特征值移动轨迹如图 14 所示,特征值向左上方移动,但变化范围较小;而模

态 4 特征值基本无变化。因此天然气系统接入 IEEE 9 节点系统后,区域 2 燃气入口压力变化对自身及其他机组影响不大。

2)改变区域 2 入口流量。

天然气系统接入 IEEE 9 节点电力系统后,随着区域 2 的燃气入口流量增大,模态 1 特征值移动轨迹如图 15 所示,特征值持续移动接近正半平面,说明区域 2 燃气发电机组小干扰稳定越来越差;模态 2、3 的特征值移动轨迹如图 16、17 所示。

表 5 区域 2 入口压力变化时的特征值

Table 5 Eigenvalues when P_{in} changes of region 2

入口压 量/MPa	管道出 口流量/ (kg/s)	燃气机 组有功/ MW	模态 1		模态 2		模态 3		模态 4	
			特征值	阻尼 比/%	特征值	阻尼 比/%	特征值	阻尼 比/%	特征值	阻尼 比/%
0.2	4.368 9	117.654 6	$-0.162 \pm j7.868$	2.059	$-0.336 \pm j8.193$	4.098	$-0.174 \pm j6.751$	2.577	$-0.642 \pm j12.806$	5.007
0.4	4.119 6	110.942 1	$-0.320 \pm j8.292$	3.856	$-0.185 \pm j7.952$	2.316	$-0.178 \pm j6.758$	2.633	$-0.641 \pm j12.812$	4.997
0.6	3.719 1	100.154 5	$-0.292 \pm j8.554$	3.412	$-0.228 \pm j8.008$	2.846	$-0.181 \pm j6.765$	2.675	$-0.641 \pm j12.824$	4.992
0.8	3.260 6	87.807 2	$-0.291 \pm j8.933$	3.256	$-0.250 \pm j8.205$	3.046	$-0.184 \pm j6.771$	2.716	$-0.641 \pm j12.842$	4.985
1.0	2.726 0	73.411 4	$-0.315 \pm j9.427$	3.340	$-0.261 \pm j8.033$	3.247	$-0.187 \pm j6.775$	2.759	$-0.640 \pm j12.868$	4.967
1.2	2.186 2	58.874 2	$-0.358 \pm j9.963$	3.591	$-0.267 \pm j8.037$	3.320	$-0.189 \pm j6.776$	2.788	$-0.640 \pm j12.902$	4.954

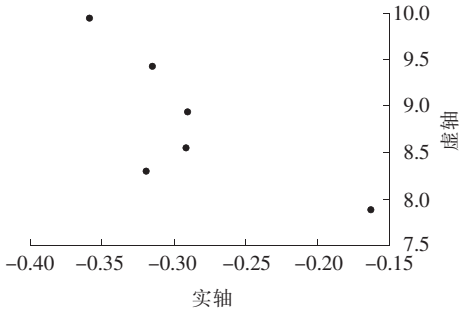


图 12 入口压力变化时模态 1 特征值变化趋势

Figure 12 Trend of eigenvalues on model 1 when P_{in} changes

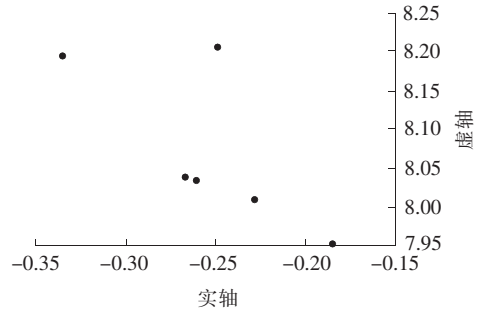


图 13 入口压力变化时模态 2 特征值变化趋势

Figure 13 Trend of eigenvalues on model 2 when P_{in} changes

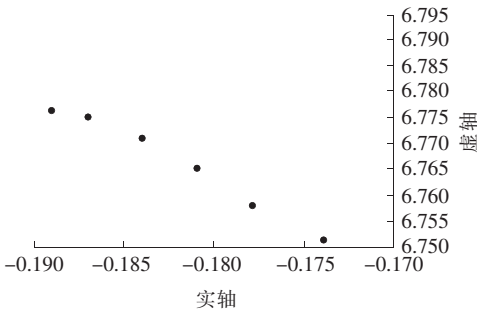


图 14 入口压力变化时模态 3 特征值变化趋势

Figure 14 Trend of eigenvalues on model 3 when P_{in} changes

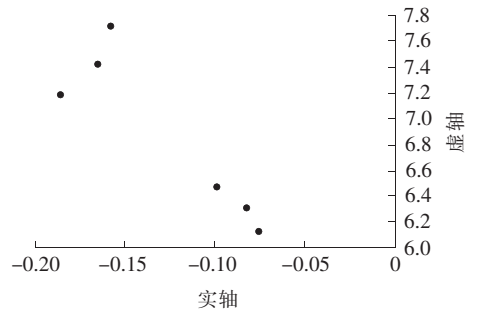


图 15 入口流量变化时模态 1 特征值变化趋势

Figure 15 Trend of eigenvalues on model 1 when M_{in} changes

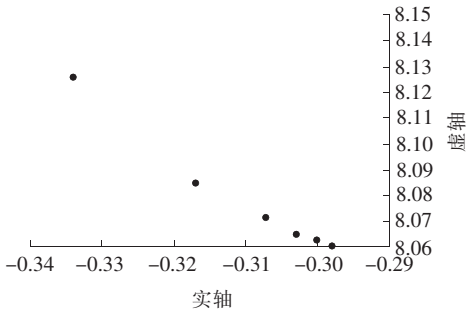


图 16 入口流量变化时模态 2 特征值变化趋势

Figure 16 Trend of eigenvalues on model 2 when M_{in} changes

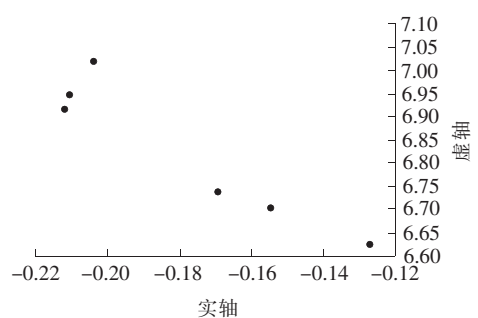


图 17 入口流量变化时模态 3 特征值变化趋势

Figure 17 Trend of eigenvalues on model 3 when M_{in} changes

特征值变化趋势不明显;而模态 4 特征值基本无变化。因此天然气系统接入 IEEE 9 节点系统后,区

域 1 燃气入口流量变化对自身小干扰稳定影响较大,对其他机组影响较小。仿真结果如表 6 所示。

表 6 区域 2 入口流量变化时的特征值

Table 6 Eigenvalues when M_{in} changes of region 2

入口流 量增量/ (kg/s)	管道出 口流量/ (kg/s)	燃气机 组有功/ MW	模态 1		模态 2		模态 3		模态 4	
			特征值	阻尼 比/%	特征值	阻尼 比/%	特征值	阻尼 比/%	特征值	阻尼 比/%
0.5	4.685 6	126.183 2	-0.158±j7.719	2.046	-0.334±j8.126	4.144	-0.169±j6.740	2.507	-0.642±j12.798	5.010
1.0	5.307 5	142.931 8	-0.165±j7.425	2.222	-0.317±j8.085	3.918	-0.155±j6.700	2.313	-0.642±j12.788	5.014
1.5	5.937 1	159.885 3	-0.185±j7.168	2.580	-0.307±j8.071	3.801	-0.127±j6.622	1.917	-0.642±j12.779	5.018
2.0	6.553 2	176.476 4	-0.099±j6.478	1.528	-0.303±j8.065	3.754	-0.204±j7.019	2.905	-0.642±j12.772	5.020
2.5	7.156 4	192.721 4	-0.083±j6.295	1.318	-0.300±j8.062	3.719	-0.211±j6.949	3.035	-0.643±j12.767	5.030
3.0	7.735 7	208.321 3	-0.075±j6.113	1.227	-0.298±j8.060	3.695	-0.212±j6.915	3.064	-0.643±j12.764	5.031

3.2.3 区域 1、2 参与因子

区域 1、2 入口压力、流量分别增大时的参与因子如表 7、8 所示。

横向对比区域 1、2 入口压力各自增大时的参与因子,可看出大小及变化趋势大致相同。说明燃气压力变化对燃气发电机组接入地点影响区别不大。

表 7 区域 1、2 入口压力分别增大时的参与因子

Table 7 Participation factors of region 1 and 2 when P_{in} increases separately

入口压力 增量/MPa	参与因子	
	区域 1	区域 2
0.2	0.265	0.245
0.4	0.321	0.257
0.6	0.377	0.365
0.8	0.408	0.404
1.0	0.427	0.417
1.2	0.438	0.418

表 8 区域 1、2 入口流量分别增大时的参与因子

Table 8 Participation factors of region 1 and 2 when M_{in} increases separately

入口流量 增量/(kg/s)	参与因子	
	区域 1	区域 2
0.5	0.077	0.318
1.0	0.232	0.324
1.5	0.207	0.243
2.0	0.276	0.273
2.5	0.321	0.338
3.0	0.345	0.344

而横向对比区域 1、2 入口流量各自增大时的参与因子,天然气区域 1 参与因子变化幅度较大,而天然气区域 2 参与因子变化不大。说明燃气流量变化对燃气发电机组接入地点有一定影响。

4 结语

该文针对燃气状态对电力系统小干扰稳定影响问题,通过燃气发电单机无穷大系统和改进的含 2 台 CHP 的 IEEE 9 节点系统仿真及其结果分析,得到如下结论。

1) 考虑传输延迟的电—气互联系统小干扰模型可有效进行小干扰稳定分析。

2) 燃气压力和流量与系统特征值的数学描述可有效揭示其影响机理,推导获得的燃气压力和流量与参与因子的数学描述,可定量评估不同 CHP 系统燃气状态对振荡模式的影响程度。

3) 算例系统单机系统中,燃气发电机组与电力系统呈弱阻尼,燃气入口压力增大有利于其小干扰稳定,而燃气入口流量增大不利于其小干扰稳定。多机系统中,燃气入口压力增大对自身和其他机组小干扰稳定影响不大,而燃气入口流量增大则不利于其小干扰稳定,但对其他机组影响较小。

该文燃气轮机模型还较为简化,后续将进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 天然气发展“十三五”规划[R]. 北京:国家发展改革委,国家能源局,2016.
- [2] 李佩杰,张钧,黄淑晨,等. 一种基于小干扰稳定约束最

- 优潮流的实用化校正控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 49-55.
- LI Peijie, ZHANG Jun, HUANG Shuchen, et al. A practical method for corrective control based on small-signal stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 49-55.
- [3] 徐晨博, 薛友, 林紫菡, 等. 计及可转移负荷的电-气综合能源系统多目标优化[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 13-23.
- XU Chenbo, XUE You, LIN Zihan, et al. Multi-objective optimization of an integrated electricity-gas energy system considering transferable loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 13-23.
- [4] 张利军, 王一铮, 陈飞, 等. 计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 3-13.
- ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [5] Liu W J, Li P Y, Yang W T, et al. Optimal energy flow for integrated energy systems considering gas transients [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 34(6): 5076-5079.
- [6] Xu X, Jia H J, Chiang H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [7] 解大, 陈爱康, 顾承红, 等. 并网式热电联供系统的时域建模与动态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3735-3747+4015.
- XIE Da, CHEN Aikang, GU Chenghong, et al. Time-domain modeling and dynamic simulation of the grid-connected CHPs [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3735-3747+4015.
- [8] 黄雨佳, 孙秋野, 王睿, 等. 面向综合能源系统的静态电压稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1): 44-53.
- HUANG Yujia, SHUN Qiuye, WANG Rui, et al. Static voltage stability analysis for integrated energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 44-53.
- [9] 马瑞, 王大朔. 考虑天然气 $N-1$ 的多能流系统静态安全耦合分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1627-1636+1859.
- MA Rui, WANG Dashuo. Static security coupling analysis of multi-energy flow system considering natural gas system $N-1$ contingency [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1627-1636+1859.
- [10] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 极端事件下电-气混联综合能源系统的恢复力分析[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 41-51.
- QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, et al. Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-51.
- [11] 张义斌. 天然气-电力混合系统分析方法研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [12] 沈海平, 陈铭, 钱磊, 等. 计及电转气耦合的电-气互联系统机组组合线性模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 34-41.
- SHEN Haiping, CHEN Ming, QIAN Lei, et al. Linear model research of unit commitment for integrated electricity and natural-gas systems considering power-to-gas coupling [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 34-41.
- [13] Helgaker J F, Müller B, Ytrehus T. Transient flow in natural gas pipelines using implicit finite difference schemes [J]. Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering, 2014, 136(3): 0317. 1-0317. 11.
- [14] 苗长越, 王维庆, 王海云, 等. 光伏接入对系统小干扰稳定的影响研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 211-215.
- MIAO Changyue, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Research of the influence of photovoltaic access on small disturbance stability of the system [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 211-215.
- [15] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑多种耦合单元的电气热联合系统潮流分布式计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6594-6605.
- ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Distributed algorithm for the power flow calculation of integrated electrical, gas, and heating network considering various coupling units [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6594-6605.
- [16] 王祺, 卢艳超, 刘一江, 等. 面向综合能源系统的投资评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 20-27.
- WANG Qi, LU Yanchao, LIU Yijiang, et al. Investment evaluation method of integrated energy system [J]. Smart Power, 2020, 48(6): 20-27.
- [17] 张瑞. 多端柔性直流输电系统中下垂控制对小干扰稳定影响机理分析及参数优化[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 81-88.
- ZHANG Rui. Effect of droop control in VSC MTDC on mechanism analysis and parameter optimization of small signal stability [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 81-88.