基于天然气动态模型的电-气耦合网络稳定控制策略研究

孙秋野*, 于晓婷, 王睿, 马大中

东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819

* E-mail: sunqiuye@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2018-04-27; 接受日期: 2018-08-20; 网络版发表日期: 2018-10-18

国家自然科学基金重点项目(编号: 61433004)、国家自然科学基金(编号: 61573094)和中央高校基础科研业务费(编号: N140402001)资助项目

摘要 随着终端能源系统的快速变革, 天然气网络与电力网络的耦合程度日益增加, 燃气机组可快速响应可再生能源出力的不确定性, 同时也将引起天然气网络状况的巨大波动. 因此, 本文针对电-气耦合网络的相互作用, 提出了有效的模型和方法对其进行动态分析. 首先, 对偏微分方程模型进行改进, 使其能够有效反映天然气管道的端口特性. 该线性模型显著地减小了传统模型的复杂度与计算量, 更适用于电-气耦合网络的在线分析计算. 在此基础上, 计及压缩机的动态特性, 提出了基于可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法, 保证电-气耦合网络的安全稳定运行. 最后通过仿真算例, 验证了所提模型的准确性和控制方法的有效性.

关键词 电-气耦合网络, 动态模型, 压缩机, 稳定控制

1 引言

随着人类社会和经济的发展, 环境问题与能源危机日益突显. 发展清洁高效的能源系统成为各国能源发展的核心战略^[1]. 近年来, 风力发电和太阳能发电发展尤为迅猛. 然而, 风力发电和太阳能发电随机性强、波动性大, 仅依靠挖掘电力系统内部的潜力, 难以走出可再生能源消纳的困境^[2]. 随着新型燃气轮机和电转气(P2G)技术的快速发展, 电力网络和天然气网络之间的联系日趋紧密. 一方面, 燃气机组可提供快速的电力平衡, 目前得到了广泛关注^[3]. 另一方面, P2G技术为电力存储提供了新的方向, 从而保障可再生能源安全消

纳^[4], 进一步加强了天然气网络与电力网络的耦合程度.

目前, 国内外学者对天然气与电力耦合网络的运行开展了大量的研究. 研究成果主要分为气-电联合能量流计算、经济调度与规划及静态安全可靠分析三类. 在气-电联合能量流研究方面, 文献^[5]研究了电/气/热的耦合网络模型, 并在此基础上采用牛顿-拉夫逊法进行综合能量流计算. 除了确定性的多能源网络耦合建模外, 针对电、气、热负荷以及风电场出力的不确定性, 文献^[6]分析了电-气耦合网络中的概率能量流. 文献^[7]在文献^[6]的基础上, 考虑了不确定变量之间的相关性, 提出了一种综合能源系统概率最优能量流模

引用格式: 孙秋野, 于晓婷, 王睿, 等. 基于天然气动态模型的电-气耦合网络稳定控制策略研究. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 479–490
Sun Q Y, Yu X T, Wang R, et al. Research on stability control strategy of electricity-gas coupling network based on dynamic model of natural gas network (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 479–490, doi: [10.1360/N092018-00122](https://doi.org/10.1360/N092018-00122)

型. 在经济调度与规划方面, 文献[8]提出了长时期、多区域、多阶段最优调度模型. 文献[9]在计及静态安全运行约束后, 提出了以投资费用和运行费用最小为目标的天然气网络和电源、电网多阶段联合规划模型. 在气-电联合静态安全性分析方面, 文献[10]提出了多能流静态安全分析的安全运行约束、运行状态分类、预想事故集和流程. 文献[11]以不等式方程组设置安全约束, 辨识潮流越限, 计算可靠性指标.

上述研究主要是基于天然气网络稳态能量流模型, 其假设条件是天然气网络某节点状态发生变化会立刻反映到全网中, 忽略了其慢过程的动态特性, 这种处理方式在诸多应用场景中并不适用. 针对上述问题, 文献[12]将天然气管道的瞬态流动建模为偏微分方程, 在动态安全约束下, 实现电-气耦合网络的协调调度. 文献[13]在文献[12]的基础上使用矩阵形式建立了标准化的天然气管网动态方程, 提出双阶段的鲁棒优化方法. 文献[14]改进了燃气轮机的控制模型, 对微电网和小型天然气网络之间的相互作用进行动态仿真.

目前, 多数研究都聚焦于电-气耦合网络的最优运行、协调调度. 然而, 受可再生能源不确定性的影响, 电-气耦合网络的安全稳定问题日益凸显. 因此, 分析电力网络与天然气网络之间的相互作用, 并提出稳定控制策略尤为重要. 本文着眼于压缩机的动态特性, 关注电-气耦合网络的安全稳定问题, 改进了天然气网络动态模型, 并在此基础上, 提出基于可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法, 最终实现平抑可再生能源波动, 保证电-气耦合网络安全稳定运行的目的.

2 电-气耦合网络动态模型

2.1 单个天然气管道动态模型

2.1.1 天然气管道的PDE模型

天然气沿管道流动由压力驱动, 并与管道的属性、气体的成分、工作温度、传输路径的高度以及边界条件等因素相关. 本文主要考虑天然气管道因注入或输出燃气以及天然气负荷波动引起的慢暂态过程. 因此可以假设天然气沿管道传输为恒温过程, 能量守恒方程此时可以忽略^[12]. 如图1所示, 天然气管道模型表示为偏微分方程(PDE)形式^[15], 其连续性方程, 可表达气体在管道中的质量守恒, 如下所示:

图1 沿天然气管道的天然气流动

$$\partial_t P + \frac{c^2}{A} \partial_x M = 0, \quad (1)$$

式中, P 表示气体压力(Pa); M 表示气体质量流量(kg/s); A 表示管道的横截面积(m^2); c 表示天然气中声音传播的速度(m/s), 其表达式如下:

$$c^2 = ZRT, \quad (2)$$

式中, Z 表示压缩因子; R 指气体常数; T 为气体的热力学温度.

其动量方程描述了在连续气体中的动量传输, 方程形式如下:

$$\partial_t M + \frac{c^2}{A} \partial_x \left(\frac{M^2}{P} \right) + A \cdot \partial_x P + \frac{f c^2 M |M|}{2 D A P} = 0, \quad (3)$$

式中, f 表示摩擦系数; D 表示管道直径(m).

对于 $\forall t \in [0, \tau]$, $\forall x \in [0, L]$, 该模型的初始条件和边界条件为

$$\forall x \in [0, L]: M(0, x) = M_0(x), \quad (4)$$

$$\forall t \in [0, \tau]: M(t, 0) = q_{\text{in}}(t), M(t, L) = q_{\text{out}}(t), \quad (5)$$

$$P(0, 0) = P_0, \quad (6)$$

式中, $M_0(x)$ 是管道的初始流量; $q_{\text{in}}(t)$ 和 $q_{\text{out}}(t)$ 是管道入口和出口注入的流量; P_0 是管道入口的初始压力.

鉴于偏微分方程形式的天然气管道动态模型过于复杂, 本文将对PDE模型进行改进. 首先根据有限元的思想将偏微分方程转化为常微分方程, 进而利用小偏差理论将其转化为状态方程, 上述过程能够显著地降低模型的复杂度与计算量.

2.1.2 改进的天然气管道动态模型

动量方程中的对流项 $\partial_x \left(\frac{M^2}{P} \right)$ 对沿管道的压降影响很小, 因此此项可以忽略^[12]. 并且假设在负荷需求波动时, 天然气管道中流量的方向不发生改变,

即 $M|M| = M^2$, 则连续方程和动量方程可分别表示为

$$\partial_t P = -\frac{c^2}{A} \partial_x M, \quad (7)$$

$$\partial_x P = -\frac{1}{A} \partial_t M - \frac{fc^2 M^2}{2DA^2 P}. \quad (8)$$

根据文献[16], 在一个长度较短的小段管道内, 可做如下假设:

$$\partial_x P = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{\Delta L}, \quad (9)$$

$$\partial_x M = \frac{M_{\text{out}} - M_{\text{in}}}{\Delta L}, \quad (10)$$

式中, P_{in} 表示管道入口压力(Pa); P_{out} 表示管道出口压力(Pa); M_{in} 表示管道入口流量(kg/s); M_{out} 表示管道出口流量(kg/s).

将式(9)和(10)分别代入式(8)和(7)后, 令 $M=M_{\text{in}}$, $P=P_{\text{out}}$, 并且在稳态运行点 M_{st} 和 P_{st} 处进行小偏差线性化, 得到如下等式:

$$\partial_t \Delta P_{\text{out}} = \frac{c^2}{A \Delta L} (\Delta M_{\text{in}} - \Delta M_{\text{out}}), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \partial_t \Delta M_{\text{in}} = & \frac{A}{\Delta L} (\Delta P_{\text{in}} - \Delta P_{\text{out}}) - \frac{fc^2 M_{\text{st}}}{DA P_{\text{st}}} \Delta M_{\text{in}} \\ & + \frac{fc^2 M_{\text{st}}^2}{2DA P_{\text{st}}^2} \Delta P_{\text{out}}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\Delta P_{\text{out}} = P_{\text{out}} - P_{\text{st}}$ 表示 t 时刻管道的出口压力与稳态运行点 P_{st} 的偏差; $\Delta M_{\text{in}} = M_{\text{in}} - M_{\text{st}}$ 表示 t 时刻管道的入口流量与稳态运行点 M_{st} 的偏差.

将式(11)和(12)写成状态方程形式 $\dot{x} = Ax + Bu$ 的表达式如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{\text{out}} \\ \Delta \dot{M}_{\text{in}} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 0 & \frac{c^2}{A \Delta L} \\ \frac{fc^2 M_{\text{st}}^2}{2DA P_{\text{st}}^2} - \frac{A}{\Delta L} & -\frac{fc^2 M_{\text{st}}}{DA P_{\text{st}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{out}} \\ \Delta M_{\text{in}} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} -\frac{c^2}{A \Delta L} & 0 \\ 0 & \frac{A}{\Delta L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta M_{\text{out}} \\ \Delta P_{\text{in}} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (13)$$

一般情况下, 天然气管道的入口压力 P_{in} 是恒定的, 管道出口处天然气的流量需求变化 ΔM_{out} 是可测的. 将管道入口压力 ΔP_{in} 和出口流量 ΔM_{out} 作为输入变量; 将管道出口压力 ΔP_{out} 和入口流量 ΔM_{in} 作为状态变量. 状态方程(13)很好地刻画了天然气管道的端口特性, 如图2所示, 即管道入口、出口的压力及流量之间的

关系.

2.2 基于可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法

压缩机是天然气网络中常见的控制元件, 它可以在压力不足时, 通过做功对气体进行升压. 这里指的压缩机一般是压缩比恒定的, 不随时间变化. 然而, 为了响应可再生能源的不确定性, 燃气机组出力变化将引起天然气网络流量和压力的波动, 这时就需要调节压缩机的压缩比来控制管道内压力、流量稳定, 从而保证天然气网络安全稳定运行. 因此, 本节提出了基于可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法. 含压缩机的天然气管道结构如图3所示.

图3中, $P_i(t, 0)$ 为管道入口节点 i 处的压力; $P_j(t, L)$ 为管道出口节点 j 处的压力; 靠近节点 i 的梯形表示已安装的压缩机, 其压缩比为 $\alpha_{i \rightarrow j}(t)$; 靠近节点 j 的梯形表示未安装的压缩机, 其压缩比为 $\alpha_{j \rightarrow i}(t)$. 在分析中一般都是管道两端安装压缩机, 但是实际中一条管道只有一个压缩机^[17], 因此下文都是假设靠近节点 i 处安装一台压缩比为 $\alpha_{i \rightarrow j}(t)$ 的压缩机.

由于压缩机的存在, 为方便分析, 在图3所示的管道模型中增加了一个虚拟节点 i' . 因此, 我们要分析的是虚线框内的这段管道, 满足下式:

$$P_{i \rightarrow j} = P_i(t, 0) \times \alpha_{i \rightarrow j}(t), \quad (14)$$

$$P_{ij} = P_{i \rightarrow j}^2 - P_j(t, L)^2. \quad (15)$$

当流量沿着一个方向时, 阻力特性方程为^[18]

图2 天然气管道端口特性示意图

图3 (网络版彩图)含压缩机的天然气管道结构示意图

$$P_{ij} = K_{ij} M_{ij}^k, \quad (16)$$

式中, $P_{i \rightarrow j}$ 为节点 $i \rightarrow j$ 的压力, 下标 $i \rightarrow j$ 表示管道中流量从节点 i 流向节点 j ; P_{ij} 表示管道两端的压力平方差; M_{ij} 是从节点 i 流向节点 j 的支路流量; k 是由气体输送压力决定的系数, K_{ij} 是与气网管道各项参数有关的系数^[19].

如果把压缩机的压缩比 $\alpha_{i \rightarrow j}(t)$ 作为控制变量, 将管道中的流量 M_{ij} 作为控制目标, 则压缩机的动态控制框图如图4所示. 图4中, M_{ijref} 是管道中流量的稳定参考值, PI调节器是控制管道中的流量稳定在 M_{ijref} . 当管道的出口压力 $P_j(t, L)$ 发生波动时, 通过调节压缩比 $\alpha_{i \rightarrow j}(t)$ 的大小, 促使管道支路流量 M_{ij} 保持稳定, 从而保证了天然气网络安全稳定运行.

2.3 天然气网络动态模型

天然气网络动态模型可以看作是一个由顶点 V 和边 E 构成的有向图 $G=(V, E)$, 如图5所示. 其中, 每个顶点 $i \in V$ 表示一个天然气注入或消耗流量为 q_i 的节点; 每条边 $(i, j) \in E$ 表示一条流过流量为 M_{ij} 的管道.

天然气网络动态模型在 $\forall t \in [0, \tau], \forall x \in [0, L]$ 的时空域上是非线性的偏微分方程, 对于 $\forall i \in V, \forall (i, j) \in E$ 表示如下:

$$\partial_t P_{ij}(t, x) = -\frac{c^2}{A} \partial_x M_{ij}(t, x), \quad (17)$$

$$\partial_x P_{ij}(t, x) = -\frac{1}{A} \partial_t M_{ij}(t, x) - \frac{f c^2 M_{ij}^2(t, x)}{2 D A^2 P_{ij}(t, x)}, \quad (18)$$

式中, $P_{ij}(t, x)$ 和 $M_{ij}(t, x)$ 为在 t 时刻, 对于长度为 L 的管道位置 x 处的压力和流量.

天然气网络中任意一条 $i \rightarrow j$ 的管道, 可以划分为多个长度为 ΔL 的小段管道串联, 包含压缩机的小段管道满足如下条件:

$$P_{i \rightarrow j} = P_i(t, 0) \times \alpha_{i \rightarrow j}(t) = P_{in}, \quad P_j(t, \Delta L) = P_{out}, \quad (19)$$

图4 基于可压缩比的稳定控制框图

图5 6节点天然气网络结构示意图

$$M_i(t, 0) = M_{in}, \quad M_j(t, \Delta L) = M_{out}. \quad (20)$$

因此, 可作如下假设:

$$\partial_x P_{ij}(t, x) = \frac{P_j(t, \Delta L) - P_{i \rightarrow j}}{\Delta L}, \quad (21)$$

$$\partial_x M_{ij}(t, x) = \frac{M_j(t, \Delta L) - M_i(t, 0)}{\Delta L}. \quad (22)$$

将式(21)和(22)代入式(20)和(19)中, 并在稳态运行点 M_{st} 和 P_{st} 处线性化如下:

$$\partial_t \Delta P_j(t, \Delta L) = \frac{c^2}{A \Delta L} (\Delta M_i(t, 0) - \Delta M_j(t, \Delta L)), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \partial_t \Delta M_i(t, 0) = & \frac{A}{\Delta L} (\Delta P_{i \rightarrow j} - \Delta P_j(t, \Delta L)) \\ & - \frac{f c^2 M_{st}^2}{2 D A P_{st}^2} \Delta M_i(t, 0) \\ & + \frac{f c^2 M_{st}^2}{2 D A P_{st}^2} \Delta P_j(t, \Delta L). \end{aligned} \quad (24)$$

将式(23)和(24)写成如 $\dot{x} = Ax + Bu$ 的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_j(t, \Delta L) \\ \Delta \dot{M}_i(t, 0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{c^2}{A \Delta L} \\ \frac{f c^2 M_{st}^2}{2 D A P_{st}^2} - \frac{A}{\Delta L} & -\frac{f c^2 M_{st}^2}{D A P_{st}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_j(t, \Delta L) \\ \Delta M_i(t, 0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{c^2}{A \Delta L} & 0 \\ 0 & \frac{A}{\Delta L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta M_j(t, \Delta L) \\ \Delta P_{i \rightarrow j} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

不同于单个管道状态方程模型, 输入变量中 $\Delta P_{i \rightarrow j}$ 指经过变压缩比调节后的压力, 来充当入口压力 P_{in} . 因此天然气网络动态模型考虑了压缩机的动态控制过程.

3 电-气耦合网络的相互作用

除压缩机外, 燃气轮机也是常见的电-气耦合元件, 它通过天然气燃烧所产生的燃气推动燃气轮机组做功发电. 燃气机组可以用来平衡风电的波动从而满足电力的需求. 但是燃气机组的出力受其爬坡率的限制, 而燃气轮机的爬坡率约束与天然气网络的压力波动限值和压力变化率大小密切相关.

3.1 燃气机组约束

燃气机组的爬坡率指每台机组单位时间能增加或减小的出力, 它是由燃气机组的自身参数和运行特性决定的. 燃气机组建模需根据天然气的热值和能量转化效率, 能量转化效率表示如下^[20]:

$$\Delta P_{gen}^i = HR_i \cdot \eta_i, \quad (26)$$

式中, η_i 指热速率系数; HR 指天然气的热值.

燃气机组的流量变化率表示如下:

$$\Delta M_i = \frac{HR_i}{GHV}, \quad (27)$$

式中, GHV 指天然气的总热值.

燃气机组爬坡率约束如下:

$$|P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq P_{ramp,i}, \quad (28)$$

式中, $P_{ramp,i}$ 为第 i 个燃气机组的爬坡限制.

3.2 天然气网络约束

天然气网络除满足式(25)的状态方程模型外, 还包含以下约束条件.

(1) 边界条件约束

对于 $\forall t \in [0, \tau]$, $\forall x \in [0, L]$, 天然气网络运行应满足流量连续方程:

$$\sum_{(i,j) \in \sigma} M_{ij}(t, x) + q_i(t) = 0. \quad (29)$$

压力回路方程:

$$\sum_{(i,j) \in \text{loop}} P_{ij} = 0, \quad (30)$$

式中, σ 指天然气网络中以节点 i 为管道首端的管道集合; loop 指天然气网络中任意一条回路中所有管道的集合.

(2) 变量上下限约束

对于天然气网络中的气源节点, 在任意时刻 t , 其质量流量应满足:

$$M_{i,t} \geq 0, \quad \forall i \in \text{气源节点}. \quad (31)$$

对于非气源节点, 其压力应满足:

$$P_{i,t} \leq P_{i,t} \leq \bar{P}_{i,t}, \quad \forall i \in \text{非气源节点}, \quad (32)$$

$$\Delta P_{i,t} \leq \Delta P_{\max}, \quad \forall i \in \text{非气源节点}, \quad (33)$$

式中, $P_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的压力下限; $\bar{P}_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的压力上限. 式(33)中, 压力变化率指单位时间内压力的变化, 反映压力变化的快慢. $\Delta P_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的压力变化率, 即在 P - t 曲线上的斜率; $\Delta P_{\max}$ 为节点 i 的压力变化率最大允许值, 即 P - t 曲线上斜率的最大值.

3.3 电力网络约束

(1) 电网稳态模型

由于天然气网络的动态与电力网络的稳态具有相同的时间尺度, 因此, 本文采用电网稳态潮流模型, 如下:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \end{cases} \quad (34)$$

式中, P_i , Q_i 分别为节点 i 的有功和无功功率; G_{ij} , B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; V_i , V_j 分别为节点 i 和 j 的电压; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的电压相角差.

(2) 功率平衡约束

在由燃气机组和风电机组供电的电力网络中, 电-气耦合网络能量流动如图6所示.

其有功平衡约束及无功平衡约束为

$$\begin{cases} P_{i,t}^G + P_{i,t}^W - P_{L,i,t} - P_{i,t} = 0, \\ Q_{i,t}^G + Q_{i,t}^W - Q_{L,i,t} - Q_{i,t} = 0, \end{cases} \quad (35)$$

式中, $P_{i,t}^G$, $Q_{i,t}^G$ 为 t 时刻燃气机组 i 的有功和无功出力;

图6 电-气耦合网络能流情况

$P_{i,t}^W$, $Q_{i,t}^W$ 为 t 时刻风电机组 i 的有功和无功出力; $P_{L,i,t}$, $Q_{L,i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的有功、无功负荷; $P_{i,t}$, $Q_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 的有功、无功功率。

(3) 风电机组出力约束

根据风电机组出力预测, 其出力应满足:

$$\begin{cases} P_{\min} \leq P_{i,t}^W \leq P_{\max} \\ Q_{\min} \leq Q_{i,t}^W \leq Q_{\max} \end{cases} \quad (36)$$

式中, $P_{\min}$, $P_{\max}$ 分别为预测的风电机组出力最小值和最大值; $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ 分别为预测的风电机组无功出力最小值和最大值。

(4) 支路潮流约束

$$S_{ij,\min}^2 \leq P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij,\max}^2 \quad (37)$$

式中, $P_{ij,t}$, $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻线路 ij 的有功、无功功率; $S_{ij,\max}$, $S_{ij,\min}$ 为线路 ij 视在功率的上限和下限。

(5) 节点电压约束

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (38)$$

式中, V_i 为 t 时刻节点 i 的电压; $V_{i,\max}$, $V_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压幅值上下限。

(6) 相角差约束

$$|\delta_i - \delta_j| < |\delta_i - \delta_j|_{\max} \quad (39)$$

式中, δ_i , δ_j 分别为线路 ij 首末两端的相角。

3.4 电-气耦合网络的相互作用

电-气耦合网络的相互影响机理分析如图7所示。风电、太阳能等可再生能源发电具有很强的随机性、波动性, 燃气机组对电力系统削峰填谷和辅助调频具有积极作用。燃气机组是天然气网络的主要负荷, 由于天然气管网存在传输时延长、管道压力变化大、管道储气大的特点^[21], 当燃气机组的出力快速变化时不可避免地会引起天然气网络的压力波动。当天然气网

络的压力波动超过了其允许的压力上下限值或压力变化率最大值时, 如果采用本文提出的基于可压缩比的稳定控制方法, 能同时满足电力网络的电力供应平衡和天然气网络的压力稳定, 从而保证电-气耦合网络的安全稳定运行。如果不采用本文所提稳定控制方法, 就需要采取降低燃气机组爬坡率的措施来维持天然气网络的压力波动在允许范围内, 从而保证天然气网络安全稳定运行。同时, 由于燃气机组的出力不足以满足电力负荷的需求, 电力网络的电力供应平衡将遭到破坏, 需要采取切电负荷的措施保证电力网络的安全稳定运行。

如果风电、太阳能等可再生能源发电突然间断, 燃气机组的出力大幅度增加, 天然气管网压力急剧下降, 通过动态调节压缩比提高压力水平, 否则会严重影响其他燃气负荷的流量需求。如果可再生能源发电充足, 燃气机组出力大幅度减小, 天然气管网压力急剧上升, 采用压缩机动态控制方法降低压力值, 避免其对管道及其他设备造成损害。因此, 采用本文提出的基于可压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法, 能够保证燃气机组爬坡率的同时满足天然气管网压力上下限和压力变化率的运行约束, 在此基础上, 平抑可再生能源的波动, 满足电力负荷的需求, 保证电-气耦合网络的安全稳定运行。

4 仿真结果及分析

在本节中, 将对以下3个案例进行仿真研究。(1) 对改进的天然气管道模型进行仿真, 验证其准确性; (2) 测试基于可压缩比的稳定控制方法, 仿真结果能很好地反映电-气耦合网络的相互作用, 同时证明该方法的有效性; (3) 6节点天然气网络和7节点电力网络联合仿真, 说明采用稳定控制方法的必要性。

4.1 天然气管道模型仿真分析

天然气网络的参数数值相差很大, 甚至会产生几个数量级的差距, 因此需要对天然气网络参数进行标幺化处理。由天然气网络的基本特性, 根据式(16), 标幺化基准值选取需满足以下基本条件:

$$P_B^2 = K_B M_B^k \quad (40)$$

单个天然气管道结构如图8所示, 管道入口是恒压

图 7 电-气耦合网络的相互作用机理分析

图 8 单个天然气管道结构示意图

力控制，管道末端连接燃气轮机，引起出口流量的变化。

天然气管道参数如表1所示，假设天然气管道的稳态流量为50 kg/s，流量的基准值为30 kg/s；稳态压力为100 kPa，即1 bar，其中根据文献[18]，0.75 bar < P < 7 bar属于天然气的中压网络，则 $k=1.848$ ， $K_B = 27.24 \frac{L}{\varepsilon^{2D^{4.848}}}$ 。由式(40)得，压力的基准值为88 kPa。

为验证模型的准确性，将本文提出的状态方程模型与PDE模型仿真作为对比，当管道长度 L 为10 km时，出口压力的阶跃响应曲线如图9所示。

从图9可以看出，状态方程模型与PDE模型的仿真结果是非常相近的，误差约为0.019%，证明了所提模型的准确性。当 L 为10 km时，动态过程大约持续10 min后达到稳态。

当 L 为100 km时，天然气管道出口压力的阶跃响应曲线如图10所示。

在图10中，状态方程模型与PDE模型的仿真结果基本一致，误差约为0.005%。与图9对比可知，状态方程模型的误差随着管道长度增加而减小。 $L=100$ km时，天然气管道的动态过程大约在3 h达到稳态，相比 $L=10$ km时增长很多。由此可见，天然气管道的动态过程比电力系统要慢很多，并且动态过程持续时间随着管道长度的增加而增长。以上仿真结果表明，本文提

表 1 天然气管道参数

结构参数	数值	运行参数	数值
c	300 m/s	M_{st}	50 kg/s
f	0.003	P_{st}	100 kPa
D	0.6 m	M_B	30 kg/s
ε	0.98	P_B	88 kPa

图 9 (网络版彩图)管道长度为10 km时的归一化阶跃响应

图 10 (网络版彩图)管道长度为100 km时的归一化阶跃响应

出的状态方程模型能准确反映天然气管道的动态特性.

4.2 基于可变压缩比的稳定控制方法仿真分析

本节根据图11的拓扑结构进行仿真分析, 其中, 压

图 11 电-气耦合仿真结构图

缩机按照图4的控制框图搭建仿真模型.

仿真参数如下: 管道支路稳态流量为50 kg/s; 管道入口节点1处压力为3 MPa; 管道长度 L 为10 km; 管道直径 D 为0.6 m. 据文献[18], $P > 7$ bar属于天然气的高压网络, 则 $\varepsilon=0.98$, $k=1.854$, $K_{ij} = 18.43 \frac{L}{\varepsilon^2 D^{4.854}}$. 根据风电出力预测[13], 其出力下限为10 MW, 上限为40 MW, 设定风电机组和燃气机组的初始出力均为25 MW. 同时, 在48 s的仿真时间内, 电力负荷保持在50 MW. 仿真结果如图12所示.

由图12可知, 从0点到A点这4 s内, 风电机组和燃气机组的出力保持不变, 电力供应处于平衡状态, 这时管道支路流量保持在50 kg/s, 压缩机压缩比为1, 管道节点4处压力为3 MPa. 在A点, 风电机组出力从25 MW下降到15 MW, 为保证电力供应平衡, 燃气机组出力增加了10 MW, 从A点到B点这4 s内, 不考虑基于可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制过程, 导致出口压力下降到1.5 MPa, 支路流量为39.5 kg/s, 严重影响其他燃气负荷的正常供应.

从B点起, 计及图4中基于可变压缩比的稳定控制方法, 为保证支路流量 M_{ij} 无限靠近其参考值 M_{ijref} , 要求经过压缩机后的压力 $P_{i \rightarrow j}$ 与管道出口压力 P_j 的值非常接近, 因此, 压缩机的压缩比降为0.53, 然后从0.53上升到1.28, 促使管道出口压力从1.5 MPa上升到3.75 MPa, 支路流量从39.5 kg/s上升到49 kg/s, 基本接近稳态流量50 kg/s.

在C点, 风电机组出力增加5 MW, 为保证电力平衡, 燃气机组出力减小5 MW, 这时管道出口压力需要降低, 从C点到D点这段时间内, 压缩机的压缩比从1.28下降到0.93, 促使管道出口压力从3.75 MPa下降到2.7 MPa, 支路流量从49 kg/s上升到50 kg/s, 达到稳态

图 12 (网络版彩图)发电出力、支路流量、调压比以及出口压力变化情况。(a) 燃气机组和风电机组出力^[13]; (b) 支路流量; (c) 压缩比; (d) 出口压力

流量 50 kg/s。在 D 点以后, 风电机组出力和燃气机组出力发生微小改变时, 压缩比和出口压力在小范围内波动后, 支路流量始终稳定在 50 kg/s, 最终压缩比保持在 1.03, 出口压力稳定在 3 MPa。

由以上分析可知: 在保证电力供应平衡的前提下, 无论燃气机组出力增加还是减小, 基于可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法都能快速调节压缩比, 进而改变出口压力, 控制管道内的流量保持稳定, 保证了天然气网络的安全稳定运行。

4.3 电-气耦合网络相互作用仿真分析

本节用 6 节点天然气网络和 7 节点电力网络联合作为电-气耦合仿真网络。6 节点天然气网络如图 13(a) 所

图 13 电-气耦合仿真网络。(a) 天然气网络; (b) 电力网络

示, 节点 1 和 2 分别为恒流量控制和恒压控制的气源, 节点 3 和 4 是两个燃气机组负荷, 仿真中, 燃气机组模型采用计及 AGC 控制的改进分轴燃气轮机模型^[14]。天然气网络仿真参数如表 2 所示。

7 节点电力网络结构如图 13(b) 所示。其中有一个火电机组(母线 4)、两个风电机组(母线 1, 5)、两个燃气机组(母线 3, 6)和 5 个用电负荷。火电机组容量为 200 MW, 两个风电机组容量分别为 150 和 200 MW, 两个燃气机组容量均为 126 MW, 分别接到天然气网络的节点 3 和节点 4。5 个用电负荷功率如下: 负荷 1, 2 功率均为 60 MW, 负荷 3 功率为 40 MW, 负荷 4 功率为 165 MW, 负荷 5 功率为 100 MW。

表 2 6节点天然气网络仿真参数

支路参数						
支路	起点	终点	L (km)	f	D (m)	流量(kg/s)
1	1	2	37.0	0.010	0.50	27.6
2	2	3	48.6	0.011	0.44	26.4
3	3	4	15.7	0.010	0.50	8.4
4	5	4	36.6	0.013	0.60	22.1
5	1	5	21.4	0.011	0.39	34.4
6	5	6	46.6	0.011	0.60	10.6
7	2	6	42.8	0.012	0.48	14.6

节点参数						
节点	1	2	3	4	5	6
注入流量(kg/s)	50.0	32.0	-26.0	-18.0	-8.0	-6.0
压力(MPa)	3.01	3.00	2.73	2.78	2.80	3.03

支路参数的第7列是流量稳态值,可以看出由于节点1是恒流量注入点,所以支路5的稳态流量值最大.在节点参数中,节点1的注入流量为50 kg/s,节点2的压力保持在3 MPa.节点注入流量为正值表示注入流量,负值表示消耗流量,可以看出节点3消耗流量最多,同时它的压力值也最低.

在电力网络中,当风电机组G3出力减小5 MW时,为保证负荷5的用电需求,母线6的燃气机组G1出力增加5 MW.此时,天然气网络中节点5和节点4的出口压力响应情况分别如图14(a)和(b)所示.

在图14(a)和(b)中,节点5的压力下降了11.5 kPa,约2 h后达到稳态;节点4的压力下降了36 kPa,约1 h后达到稳态.显然地,相比节点5,节点4的压力快速地大幅下降,达到稳态的时间短.这是由于节点4距离G1较近,所以压力响应较快,压力变化量也更大.

当风电机组G3出力减小10 MW时,为保证负荷5的用电需求,母线6的燃气机组G1出力增加10 MW.天然气网络节点5和节点4的压力响应如图15所示.

在图14(a)和15(a)中,节点5的压力分别下降了11.5 kPa和2.9 MPa后达到稳定状态.可见燃气机组出力越大,导致天然气管道的压力波动越大.在图15(a)中,在0~72 min之间, G1的出力满足天然气管道压力变化的约束.在72 min处,节点5的压力下降到2.6 MPa,达到了压力下降的下限,如果沿着压力变化曲线的轨迹,下降到2.9 MPa达到稳态,而节点5的初始

图 14 (网络版彩图)G1出力增加5 MW时,天然气网络节点压力变化情况. (a) 节点5; (b) 节点4

压力为2.802 MPa,这将严重威胁天然气管网的安全稳定运行,所以G1的出力必须降低.

在72 min处,若将G1的出力减小20 kW,将导致母线6处电力不平衡.此时,母线6处的电压、电流及频率变化情况如图16所示.在72 min前三相电压、电流正常运行,频率保持在50 Hz.在72 min后,电压由327 V稍有降落到314 V,电流由32 A增大到135 A,在0.13 s处开始发生增幅振荡,非周期性失步.电网频率最终下降了0.8 Hz,电力网络失去稳定运行.

在图15(b),天然气网络节点4的压力变化率约为5 MPa/min,然而如M701F型的燃气轮机必须在压力变化率小于80 kPa/s的情况下运行,否则会跳闸.若在初始时刻将G1的出力降低2 MW,母线6处的电压、电流及频率变化情况如图17所示.由图17可知,在0时刻,三相电压相对正常运行电压降低为310 V、三相电流相对正常运行电流增大为285 A,随后在0.13 s处进入非周期性失步状态.电网频率由50 Hz降落到49 Hz,电力网络失去稳定运行.

在图14和15中,当不计及可变压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法时,节点5和节点4的压力变化情况与PDE模型仿真是非常相近的,证明了所提状态方程

图 15 (网络版彩图)G1出力增加10 MW时, 天然气网络节点压力变化情况. (a) 节点5; (b) 节点4

模型的准确性. 当计及可压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法时, 由于压缩机动态调节压缩比, 使得节点5和节点4的压力稍有降落, 基本保持稳定. 同时使得压力变化率很小, 燃气机组的爬坡率能够得到满足, 从而提供快速的电力平衡, 有效地避免了图16和17中出现的失稳状况, 保证了电-气耦合网络的安全稳定运行.

5 结论

针对电力网络中的随机性(特别是间歇性风电的随机性)通过燃气机组传播至天然气网络, 导致电力网络与天然气网络相互影响的问题, 本文改进了天然气网络动态模型, 使其能有效反映天然气管道的端口特

图 16 (网络版彩图)G1出力减少20 kW时, 母线6的电压、电流、频率变化情况

图 17 (网络版彩图)G1出力减少2 MW时, 母线6的电压、电流、频率变化情况

性. 该模型表示为线性的状态方程, 能够显著减小计算量, 更适用于电-气耦合网络的在线分析计算, 并且通过仿真验证了其准确性. 在此模型的基础上, 本文提出了基于可压缩比的电-气耦合网络稳定控制方法. 该方法计及压缩机的动态特性, 能对电-气耦合网络的相互作用进行动态分析, 并且可以平抑可再生能源的波动, 保证电-气耦合网络安全稳定运行.

参考文献

- 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 714–727
- 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 702–713
- 樊慧, 段兆芳, 单卫国. 我国天然气发电发展现状及前景展望. 中国能源, 2015, 37: 37–42
- 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 149–170
- 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. 中国电机工程学报, 2015, 35: 3634–3642
- 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. 中国电机工程学报, 2015, 35: 6331–6340
- 孙国强, 陈霜, 卫志农, 等. 计及相关性的电-气互联系统概率最优潮流. 电力系统自动化, 2015, 39: 11–17

- 8 Unsuhay-Vila C, Marangon-Lima J W, de Souza A C Z, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2010, 25: 1154–1168
- 9 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究. *中国电机工程学报*, 2017, 37: 45–53
- 10 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法. *电网技术*, 2016, 40: 1627–1634
- 11 余娟, 马梦楠, 郭林, 等. 含电转气的电-气互联系统可靠性评估. *中国电机工程学报*, 2018, 38: 708–715
- 12 Liu C, Shahidehpour M, Wang J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow. *Chaos*, 2011, 21: 025102
- 13 Yang J, Zhang N, Kang C, et al. Effect of natural gas flow dynamics in robust generation scheduling under wind uncertainty. *IEEE Trans Power Syst*, 2018, 33: 2087–2097
- 14 Xu X, Jia H, Chiang H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid. *IEEE Trans Power Syst*, 2015, 30: 1212–1221
- 15 Helgaker J F, Müller B, Ytrehus T. Transient flow in natural gas pipelines using implicit finite difference schemes. *J Offshore Mech Arct Eng*, 2014, 136: 031701
- 16 King A C, Billingham J, Otto S R. *Differential Equations Linear Nonlinear Ordinary Partial*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 527–536
- 17 Chertkov M, Backhaus S, Lebedev V. Cascading of fluctuations in interdependent energy infrastructures: Gas-grid coupling. *Appl Energy*, 2015, 160: 541–551
- 18 董今妮, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术. *电网技术*, 2017, 11: 10–16
- 19 Liu X, Mancarella P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems. *Appl Energy*, 2016, 167: 336–352
- 20 Zhou Y, Gu C, Wu H, et al. An equivalent model of gas networks for dynamic analysis of gas-electricity systems. *IEEE Trans Power Syst*, 2017, 32: 4255–4264
- 21 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望. *电力系统自动化*, 2018, 42: 11–24

Research on stability control strategy of electricity-gas coupling network based on dynamic model of natural gas network

SUN QiuYe, YU XiaoTing, WANG Rui & MA DaZhong

College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

With the rapid reform of the terminal energy system, the interdependency between the natural gas and the electricity networks is increasing. Gas-fired generating units can respond quickly to the uncertainty of the output of renewable energy, and cause great fluctuations in the natural gas networks at the same time. Therefore, this paper proposes an effective model and method to analyze the interaction of electricity-gas coupling network dynamically. First of all, this paper improves the partial differential equation model, which becomes a state equation model that can effectively reflect the characteristics of natural gas pipeline ports. Compared with the traditional model, this model can significantly reduce the complexity and calculation. Also, it is more suitable for online analysis of electricity-gas coupling networks. Based on this, taking into account the dynamic characteristics of the compressor, a stabilization control method based on variable compression ratio for the electricity-gas coupling network is proposed, which ensures safe and stable operation of the electricity-gas coupling network. Finally, through the simulation example, the accuracy of the proposed model and the effectiveness of the control method are verified.

electricity-gas coupling network, dynamic model, compressor, stabilization control

doi: [10.1360/N092018-00122](https://doi.org/10.1360/N092018-00122)