

# 含DFIG风电场电-气耦合系统的概率连续混合潮流方法及其负荷裕度分析

马 瑞,秦佳倩

(长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410007)

**摘要:**针对含双馈感应式风机(DFIG)风电场电-气耦合多能流系统的最大负荷裕度及其耦合影响问题,考虑天然气管网的动态特性,建立考虑DFIG稳态模型和能源路由器(EH)的含参连续混合潮流模型;采用随机响应面法(SRSM)拟合DFIG出力,结合预估-校正及电-气系统耦合交替迭代获取电力系统负荷节点的有功功率-电压曲线、天然气系统流量-气压曲线及其负荷裕度期望值;定义电压-负荷、气压-流量灵敏度,可分别跟随电力系统负荷节点有功功率-电压曲线、天然气系统气流量-气压曲线的获取,定义电-气耦合环节中天然气系统节点压强-EH节点注入电功率和电力系统节点电压-EH节点天然气注入流量灵敏度,从而定量评估电-气耦合下电力系统、天然气系统和电-气耦合环节的薄弱环节及EH耦合程度。含DFIG风电场的IEEE 14节点电力系统和22节点天然气系统通过11个EH耦合而成的电-气系统的算例仿真结果验证了所提模型、算法和所定义负荷裕度灵敏度指标的正确性和有效性。

**关键词:**电-气耦合系统;动态特性;灵敏度分析;随机响应面法;连续潮流;双馈感应式风机;负荷裕度

**中图分类号:**TM 761;TM 614

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201908044

## 0 引言

风电等高比例不确定性可再生能源消纳以及冷/热/电综合能源高效利用是能源转型的主要途径,采用含天然气发电或冷热电联供机组的能源路由器EH(Energy Hub)是提升综合能源能效的主要方式<sup>[1]</sup>。随着上述设备的大量接入,电-气多能流系统的耦合日趋紧密且存在不确定性,多能流系统最大负荷裕度的求取、耦合系统薄弱环节的识别和EH耦合程度的定量评估等多能流系统稳态生存能力的关键问题亟待深入研究。

与电力网络相比,天然气网络存在慢动态特性<sup>[2]</sup>,文献[3]在多能系统运行中考虑了电、气网络的不同时间尺度问题,建立了多能系统的多时段优化运行模型。文献[4]考虑了电、气系统的不同响应时间,建立了考虑电力稳态潮流模型和天然气暂态潮流模型的多能系统动态最优潮流模型。文献[5]考虑了时空相关的天然气网动态特性,并采用多时间尺度进行模型预测控制。文献[6]基于天然气传输速度慢且可压缩的特点,证明了利用天然气管道存储气体可以作为短时间内的能源供应。

电-气耦合多能源系统中的静态电压/气压薄弱环节和EH耦合灵敏度信息可为多能流系统的安

全运行提供决策支持。文献[7]分析了电力、天然气一方网络的故障对电-气耦合系统安全稳定运行的影响;文献[8]基于气网的稳态状态估计模型,实现了对电-气耦合系统的状态估计;文献[9]定义了天然气压力-负荷灵敏度指标,侧重于分析天然气网络状态的变化对综合能源系统的影响,但未进一步考虑电-气耦合交互影响以及综合能源系统中的薄弱环节;文献[10]提出了电-气耦合综合能源系统的燃气压力-节点注入功率灵敏度指标,分析了电网节点注入功率对燃气压力的影响,并可以定位综合能源系统的薄弱环节,但并未充分考虑电-气之间的交互影响,无法识别电-气之间的耦合程度。上述文献中的灵敏度指标暂未考虑系统负荷增长且都以确定性描述。

多能流系统的混合潮流、最优混合潮流及连续混合潮流等是能源互联网分析的基础性工具。在电-气耦合多能源系统的潮流研究方面,文献[11]考虑EH模型作为平衡节点,提出了多能流混合潮流的求解算法;文献[12]以传统电力系统作为对象的潮流计算方法,扩展到电-热-气多能流潮流计算方法中。针对多能流最优混合潮流问题,文献[13]在网络运行约束的基础上提出了电-气耦合系统的最优能流模型;文献[14]给出了日前优化调度的多目标优化混合最优潮流算法。目前有关研究多能流系统连续潮流问题的文献还较少,文献[15]基于连续潮流法采用优化算法和线性预测方法求解电-气耦合系统的可用输电能力。传统的含风电场电力系统的连续潮流模型主要以异步风机风电场进行建模,

收稿日期:2019-04-01;修回日期:2019-07-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677007);湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40298)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51677007) and Hunan Provincial Natural Science Foundation (2019JJ40298)

本文基于随机响应面法 SRSM (Stochastic Response Surface Method), 综合考虑双馈感应式风机 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) 风电场和 EH 接入多能流系统, 获取电力系统负荷节点有功功率-电压曲线、天然气系统流量-气压曲线。

本文提出一种基于 SRSM 的含 DFIG 风电场和 EH 的电-气耦合多能流系统连续混合潮流新方法, 并提出一种识别耦合系统薄弱环节和定量评估 EH 耦合程度的灵敏度新指标。考虑天然气管网的动态特性, 建立考虑 DFIG 和 EH 的电-气耦合多能流系统的含参连续潮流模型; 利用 SRSM 拟合风速的随机性, 采用确定性潮流预估-校正结合电-气耦合交替迭代对模型进行求解; 基于连续混合潮流计算雅可比矩阵, 定义能跟随电力系统负荷节点有功功率-电压曲线和天然气系统流量-气压曲线的电-气耦合下电力系统、天然气系统和 EH 电-气耦合环节的灵敏度指标; 最后采用由改进的含 DFIG 风电场的 IEEE 14 节点电力系统和 22 节点天然气系统通过 11 个 EH 耦合而成的电-气系统进行模型、算法及灵敏度指标仿真验证。

## 1 考虑天然气管网动态特性的含 DFIG 和 EH 的多能流系统混合连续潮流模型

### 1.1 考虑天然气网络动态特性的天然气系统连续潮流模型

由于天然气的传输速度慢, 具有一定的时间延迟, 一部分天然气就会存储在天然气管道中, 称为“管存<sup>[3]</sup>”。考虑以管存为特征的天然气网络的动态特性如图 1 所示。图中,  $\Delta t$  为时间间隔;  $S_t^i$  为  $t$  时刻在时间周期  $T$  内天然气管道注入的流量, 即管存; 虚线部分表示从  $t$  时刻到  $t+\Delta t$  时刻流出管道的天然气流量为  $f_{t+\Delta t}^{\text{out}}$ , 流入管道的天然气流量为  $f_{t+\Delta t}^{\text{in}}$ 。

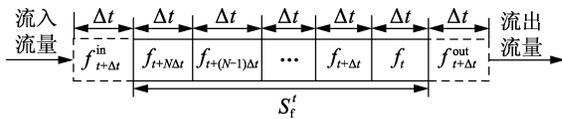


图 1 天然气网络的动态特性示意图

Fig.1 Schematic diagram of dynamic characteristic of natural gas network

管道  $k$  在  $t$  时刻的管存  $S_{t,k}^i$  可表示为:

$$S_{t,k}^i = \frac{\pi L_k (D_k/2)^2 \bar{p}_{k,t}}{KMGZ} \quad (1)$$

$$S_{t,k}^i = \sum_{m=0}^N f_{t+m\Delta t} \quad (2)$$

$$S_{t,k}^{i+\Delta t} = S_{t,k}^i + f_{t+\Delta t}^{\text{in}} - f_{t+\Delta t}^{\text{out}} \quad (3)$$

其中,  $L_k$ 、 $D_k$  分别为管道  $k$  的长度和直径;  $\bar{p}_{k,t}$  为管道  $k$  在  $t$  时刻的平均压强;  $K$  为常数;  $M$  为气体的平均温度;  $G$  为气体的相对密度;  $Z$  为气体的平均可压缩系

数;  $N$  为天然气流量的时刻数;  $S_{t,k}^{i+\Delta t}$  为天然气管道  $k$  在  $t+\Delta t$  时刻的管存。

在稳态情况下, 天然气网络管道  $k$  的气体流量  $f_g^k$  可表示为:

$$f_g^k = F_{ij} N_k \sqrt{F_{ij} (p_i^2 - p_j^2)} \quad (4)$$

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & p_i - p_j \geq 0 \\ -1 & p_i - p_j < 0 \end{cases}$$

其中,  $N_k$  为天然气管道常数;  $F_{ij}$  为管道中气体流动的方向;  $p_i$ 、 $p_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  处的压强。

有压缩机的天然气管道还需要消耗电能和天然气。压缩机、发动机和燃气轮机组成加压站, 其消耗的电能和天然气分别为:

$$E_{c,k} = k_c f_{\text{com}} (R_c^z - 1) \quad (5)$$

$$f_c = a + b E_{c,k} + c E_{c,k}^2 \quad (6)$$

其中,  $E_{c,k}$  为管道  $k$  的压缩机消耗的电能;  $k_c$ 、 $z$  均为常数;  $f_{\text{com}}$  为通过压缩机的天然气流量;  $R_c$  为压缩机的压缩比;  $f_c$  为有压缩机的天然气管道所消耗的天然气流量;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为常数。

天然气网络中的含参流量平衡方程为:

$$f_G = (A + U) f_g + W (1 + \alpha_c \lambda_g) - f_c \tau (1 + \beta_c \lambda_g) = 0 \quad (7)$$

其中,  $\lambda_g$  为天然气系统的负荷参数;  $A$  和  $U$  分别为去除压缩机管道的支路节点关联矩阵和压缩机节点关联矩阵;  $\alpha_c$  和  $\beta_c$  分别为不同方式下负荷和压缩机的增长方向;  $W$  为天然气气体输入量;  $\tau$  为常数。

### 1.2 含 DFIG 电力系统的概率连续潮流模型

DFIG 的稳态模型方程可以参考文献[16]。含 DFIG 风电场节点的电力系统含参潮流方程组如式(8)所示。

$$\begin{cases} f_p = P_{Gi} + \alpha_E^i P_{Gi} \lambda_e - P_{Li} - \beta_E^i P_{Li} \lambda_e + P_W - \\ \quad V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ f_Q = -Q_{Li} - \beta_E^i \tan \phi_i Q_{Li} \lambda_e + Q_W - \\ \quad V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $f_p$ 、 $f_Q$  分别为电力系统有功功率、无功功率的平衡方程;  $\lambda_e$  为电力系统的负荷参数;  $\alpha_E^i$ 、 $\beta_E^i$  分别为不同方式下发电机和负荷的增长方向;  $n$  为电力系统中的节点数;  $P_{Gi}$ 、 $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  分别为初始点常规发电机发出的有功功率、有功负荷、无功负荷;  $P_W$ 、 $Q_W$  分别为风电机组的有功出力、无功出力;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为线路的电导和电纳;  $V_i$ 、 $\theta_{ij}$  分别为节点电压和相角;  $\phi_i$  为负荷的功率因数角。

不含 DFIG 风电场节点的电力系统含参连续潮流方程即在式(8)中删除与风电相关的项。

### 1.3 电-气耦合含参连续潮流方程

为了满足多种能源负荷的输出, EH 将多种形式

的能源进行分配、转化和储存。本文的EH模型中考虑电功率和天然气的输入(分别为 $P_e$ 、 $P_g$ )、电负荷和热负荷的输出(分别为 $L_e$ 、 $L_h$ )。EH的耦合元件包括变压器、热电联产CHP(Combined Heat and Power)机组和天然气炉, EH模型如图2所示。图中,  $v$ 为天然气调度系数, 可根据需要对天然气进行分配。

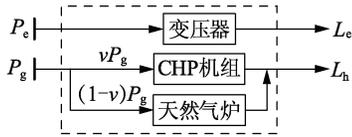


图2 EH模型  
Fig.2 EH model

$f_{EH}(P_e, P_g)$ 为EH的方程, 为了简化求解, 热负荷暂为定值, 则EH的含参潮流方程为:

$$\begin{cases} f_{EH-L_e} = L_e(1 + \alpha_{EH}\lambda_e) - \eta_{Trans}P_e(1 + \beta_E\lambda_e) - \\ v\eta_{CHP,e}P_g(1 + \beta_G\lambda_g) = 0 \\ f_{EH-L_h} = L_h - \eta_{CHP,Th}P_g - (1-v)\eta_{Fur}P_g = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\eta_{Trans}$ 、 $\eta_{CHP,e}$ 、 $\eta_{CHP,Th}$ 、 $\eta_{Fur}$ 分别为EH中变压器、CHP机组发电部分、CHP机组供热部分、天然气炉的转化效率;  $\alpha_{EH}$ 为EH中电负荷的变化方向。

## 2 多能流系统静态电压-负荷裕度、静态气压-流量裕度灵敏度、EH电-气耦合灵敏度

### 2.1 电-气耦合下电力系统的灵敏度定义

灵敏度分析可以反映系统节点电压的变化对系统节点负荷的影响,  $f_E(P_L, V) = 0$ 为电力系统的含参潮流方程, 其中 $V$ 为电力系统的节点电压矩阵,  $P_L$ 为任意负荷增长方式下对应的负荷矩阵, 求取含参潮流方程对 $V$ 的偏导可得到:

$$\frac{\partial f_E}{\partial V} + \frac{\partial f_E}{\partial P_L} \frac{dP_L}{dV} = 0 \quad (10)$$

令电力系统的节点电压-负荷参与因子矩阵 $S_{V-P_L} = dP_L/dV$ , 由于负荷一般已知, 则节点电压-负荷灵敏度为:

$$S_{V-P_L} = -\left(\frac{\partial f_E}{\partial P_L}\right)^{-1} \quad (11)$$

$$S_{V-P_L} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (12)$$

其中,  $S_{V-P_L}$ 和 $S_{V-P_L}$ 分别为特定运行点下电力系统中节点电压对电力系统中负荷(即EH接入节点)的灵敏度矩阵及其对应的元素。

### 2.2 电-气耦合下天然气系统的灵敏度定义

与电力系统相似, 天然气管道的流量将会随着管道压强的改变而发生变化。将天然气系统的潮流方程表示为 $f_G(p, f_g) = 0$ , 其中 $p$ 为天然气节点压强矩阵,  $f_g$ 为天然气流量矩阵, 求取潮流方程对 $p$ 的偏导可得到:

$$\frac{\partial f_G}{\partial p} + \frac{\partial f_G}{\partial f_g} \frac{df_g}{dp} = 0 \quad (13)$$

令天然气系统的节点气压-负荷参与因子矩阵为 $S_{p-f_g} = df_g/dp$ , 由于负荷一般已知, 则节点气压-流量灵敏度矩阵为:

$$S_{p-f_g} = -(\partial f_G / \partial p)^{-1} = (A + U)C(A + U)^T \quad (14)$$

$$C = \text{diag}\left(\frac{f_i}{2p_i}\right) \quad (15)$$

其中,  $S_{p-f_g}$ 为某运行状态下天然气系统节点气压对天然气系统中负荷(即EH中输入的天然气流量)的敏感程度。气压-负荷灵敏度矩阵的相关信息可为天然气系统负荷的调节位置优选提供帮助, 同时也能为电-气耦合系统的能源耦合信息调整提供重要依据。

### 2.3 EH耦合灵敏度定义

根据式(4)和式(7)~(9)定义EH耦合灵敏度为:

$$S_{p-P_e} = \frac{\partial f_p}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial p} = -v\eta_{CHP,e}(A + U)C(A + U)^T \quad (16)$$

$$S_{V-f_g} = \frac{\partial f_G}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial V} \quad (17)$$

$$S_{V-f_g} = -\eta_{Trans} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (18)$$

其中,  $S_{p-P_e}$ 为天然气节点压强-EH节点注入电功率的灵敏度矩阵, 反映天然气系统节点压强的变化对EH节点注入电功率的影响;  $S_{V-f_g}$ 为电力系统节点电压-EH节点天然气注入流量的灵敏度矩阵, 反映电力系统节点电压对EH节点天然气注入流量的影响;  $S_{V-f_g}$ 为灵敏度矩阵 $S_{V-f_g}$ 的元素。具体的推导过程见附录A。

上述灵敏度指标可跟随电力系统负荷节点有功功率-电压曲线、天然气系统流量-气压曲线的获取, 同时因采用SRSM拟合风电的随机性, 本质上具有期望值性质, 可定量识别耦合多能流系统中电压和气压薄弱节点, 评估EH耦合的影响程度。

## 3 含DFIG风电场多能流系统的连续混合潮流模型求解方法

### 3.1 DFIG有功出力的SRSM模型

SRSM作为一种解决不确定性的方法, 其在工程实践中得到了有效的应用<sup>[17]</sup>。本文将风速 $v_w$ 作为系统输入的不确定参数 $x$ ,  $P_w$ 为电力系统的输出响应, 输入参数与输出响应之间的关系可用 $P_w = h(v_w)$ 表示<sup>[18]</sup>。 $v_w$ 用 $\xi$ 标准化可以表示为:

$$v_w = c_w \left\{ -\ln \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} E_{\text{erf}} \left( \frac{\xi / \sqrt{2}}{\sqrt{2}} \right) \right] \right\}^{1/k_w} \quad (19)$$

其中,  $c_w$ 、 $k_w$ 为威布尔参数, 取值分别为10、2;  $E_{\text{erf}}(\cdot)$

为误差函数。

输出的三阶SRSM模型可表示为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_w = & a_0 + \sum_{i=1}^l a_i v_i + \sum_{i=1}^l a_{ii} [(v_w^i)^2 - 1] + \sum_{i=1}^l a_{iii} [(v_w^i)^3 - 3v_w^i] + \\ & \sum_{i=1}^{l-1} \sum_{j>i}^l a_{ij} v_w^i v_w^j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l a_{ijj} [v_w^i (v_w^j)^2 - v_w^i] + \\ & \sum_{i=1}^{l-2} \sum_{j>i}^{l-1} \sum_{q>j}^l a_{ijq} v_w^i v_w^j v_w^q \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $a_0, a_i, a_{ii}, a_{iii}, a_{ij}, a_{ijj}, a_{ijq}$  为多项式的待定系数;  $l$  为输入变量的数量。

采用三阶 Hermite 正交多项式, 选取三阶及四阶一维 Hermite 多项式的根作为配点值, 将其代入式(19), 得到  $v_w$ ; 然后求取  $P_w$ , 得到配点值对应的输出值; 由式(20)可知 Hermite 多项式的待定系数, 将已知的待定系数返回, 基于 Hermite 多项式即可求取 DFIG 有功出力的概率分布函数, 假设风电出力的增减用平衡机组相应分担。

### 3.2 含 DFIG 风电场多能系统的连续潮流雅可比矩阵

由 DFIG 的稳态模型<sup>[16]</sup>和式(8)可得含 DFIG 和 EH 的电力系统修正方程。电力系统雅可比矩阵  $J_E$  由四部分组成, 如式(21)所示。

$$J_E = \begin{bmatrix} J_{E-G} & 0 \\ J_{E-DFIG} & J_{DFIG} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$J_{E-G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_p}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial f_g} & \frac{\partial f_p}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial p} \\ \frac{\partial f_q}{\partial V} & \frac{\partial f_q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中,  $J_{E-G}$  为电-气之间耦合关系的雅可比矩阵;  $J_{E-DFIG}$  为 DFIG 模型与电力系统的关联雅可比矩阵;  $J_{DFIG}$  为 DFIG 模型对应的雅可比矩阵;  $\frac{\partial f_p}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial f_g}$  和  $\frac{\partial f_p}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial p}$  分别反映电-气耦合下天然气系统流量和节点压强对电力系统的影响。

同理, 由式(7)和式(9)可得到含 EH 的天然系统的修正方程,  $J_{G-E}$  表征气-电耦合关系的雅可比矩阵, 如式(23)所示。

$$J_{G-E} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_c}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial V} & \frac{\partial f_c}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial \theta} \\ \frac{\partial f_c}{\partial f_g} & \frac{\partial f_c}{\partial p} \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中,  $\frac{\partial f_c}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial V}$  和  $\frac{\partial f_c}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial \theta}$  分别反映电-气耦合下电力系统节点电压和相角对天然气系统的影响。

### 3.3 基于预估-校正和电-气耦合交替结合的含 DFIG 风电场多能流系统的负荷裕度计算

含参连续潮流潮流方程中  $\lambda_e \in [0, \lambda_e^c]$ 、 $\lambda_g \in [0, \lambda_g^c]$ , 其中 0 表示电力系统和天然气系统中原始运行点的负荷水平,  $\lambda_e^c, \lambda_g^c$  分别为电力系统和天然气系统在给定的负荷增长方式下静态稳定临界点的负荷水平。在电力系统和天然气系统的预估-校正中, 根据系统所给定的初始条件, 通过式(9)所示电-气耦合关系进行电力系统和天然气系统的交替迭代, 输出电力系统和天然气系统的潮流结果和相应的系统负荷裕度。

对于含 DFIG 和 EH 的电力系统连续潮流计算部分, 首先确定变量的预测方向, 本文采用一阶微分方法作为预测方法。计算电力系统和 EH 的待求量及电力系统负荷参数  $\lambda_e$  的微分, 得到切向量的计算方程, 如式(24)所示。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_E}{\partial \mathbf{x}_E} & \frac{\partial f_E}{\partial \lambda_e} \\ \mathbf{e}_k^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{x}_E \\ d\lambda_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中,  $\mathbf{x}_E$  为电力系统的相关待求量, 包括 DFIG、电力系统和 EH 中的待求量; 由于增设变量  $\lambda_e$ , 所以加入  $\mathbf{e}_k^T$ , 其为雅可比矩阵对应的行向量。令  $d\mathbf{x}_k = \pm 1$  ( $x_k$  为该电力系统状态变量在预测步切向量计算中变化最大的量), 得到切向量后, 根据式(25)求取预测向量, 确定预测方向。

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_E \\ \hat{\lambda}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{E0} \\ \lambda_{e0} \end{bmatrix} + \sigma_e \begin{bmatrix} d\mathbf{x}_E \\ d\lambda_e \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中,  $\hat{\mathbf{x}}_E, \hat{\lambda}_e$  为预估值;  $\mathbf{x}_{E0}, \lambda_{e0}$  为原始值;  $\sigma_e$  为预测步长。然后进行校正计算, 通过牛顿-拉夫逊法计算得到校正值, 并将其作为下一次预测部分计算的初值, 依次不断迭代直至到达系统临界运行点, 由此计算电-气耦合系统的最大负荷裕度。同理, 含 EH 的天然气系统的预估-校正方法与电力系统相同。算法流程如图 3 所示。

## 4 算例分析

### 4.1 算例仿真系统

本文算例由 IEEE 14 节点电力网络系统、22 节点天然气系统以及 11 个 EH 构成, 算例拓扑结构图见附录 B 中的图 B1、B2。在电力网络的节点 2 处接入含 20 台 DFIG 的风电场, 风电渗透水平为 15%; DFIG 的运行模式为电压控制模式, 参考电压为 1 p.u.。电力网络的节点 2—6、9—14 通过 11 个 EH 分别与天然气网络的节点 2—6、9—14 相耦合, EH 中 CHP 的容量见附录 B 中的表 B1; 测试算例的详细参数见文献[19]。

本文设置了如下 3 种场景进行算例仿真:

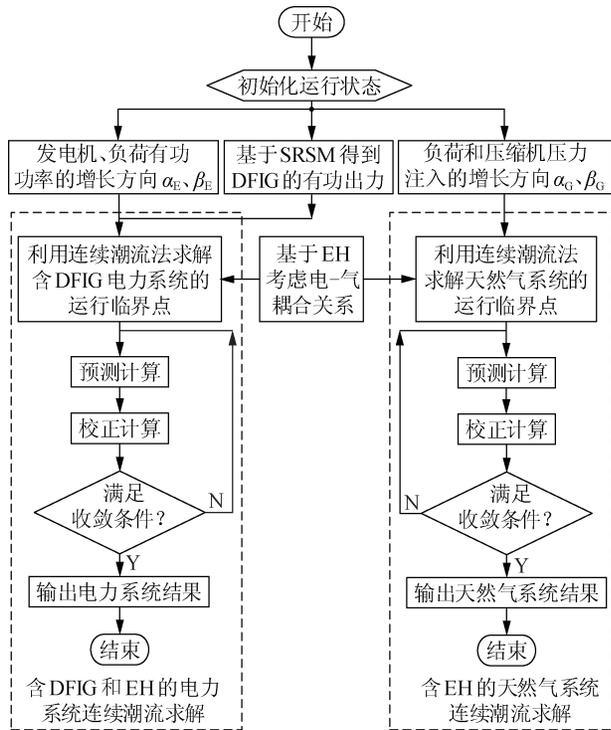


图3 含DFIG风电场的电-气耦合系统概率连续混合潮流算法流程

Fig.3 Flowchart of probabilistic continuous hybrid power flow algorithm for electricity-gas coupling system with DFIG wind farm

(1)场景1,不考虑天然气管网动态特性的电力网络和天然气网络耦合运行工作模式;

(2)场景2,考虑天然气管网动态特性的电力网络和天然气网络耦合运行工作模式;

(3)场景3,考虑天然气管网动态特性的电力网络和天然气网络解耦运行工作模式。

#### 4.2 场景1与场景2下天然气管道流量对比分析

场景1与场景2下天然气管道流量如图4所示。由图4可知,场景2的天然气管道流量比场景1有所增加,这是因为天然气管网的动态特性主要考虑天然气网络中管存的作用,类似于电力网络中的储能,这样可以提高天然气供应的可靠性。

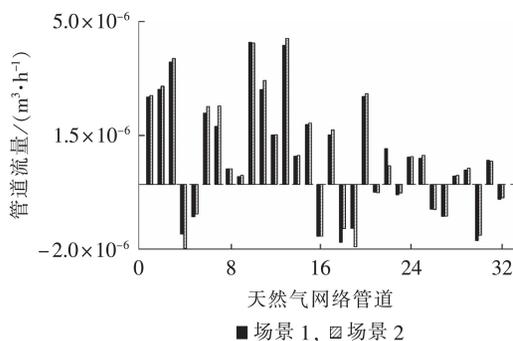


图4 场景1、2下天然气管道流量对比

Fig.4 Comparison of natural gas pipeline flow between Scenario 1 and 2

#### 4.3 基于SRSM的含DFIG风电场的电-气耦合多能流系统的结果有效性分析

将DFIG风电场和异步风机风电场接入多能流系统的最大负荷裕度期望值进行对比分析,得到2种风电场接入情形下EH接入节点的最大负荷裕度,电力网络和天然气网络的结果对比如图5所示。由图可知,当DFIG风电场接入系统时,多能系统的负荷裕度明显高于异步风机风电场接入的情形,这主要是因为异步风机风电场在调节系统电压方面不及DFIG风电场,DFIG的变换器可根据地区电压的变化持续不断地进行调节,而异步风机主要以机端无功补偿装置对电压进行调节,需配置并联电容器。

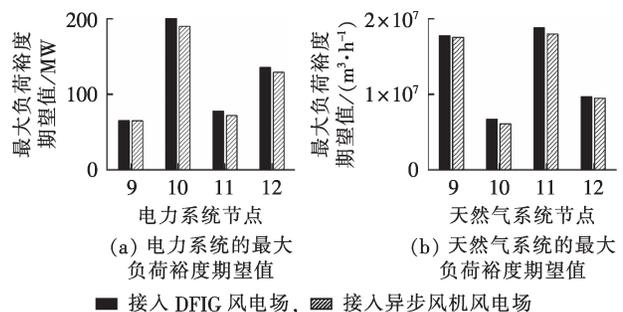


图5 DFIG与异步风机风电场接入电-气耦合系统的最大负荷裕度期望值对比

Fig.5 Comparison of expected maximum load margin of electricity-gas coupling system integrated with DFIG and asynchronous fan wind farm

表1为5000次蒙特卡洛MC(Monte Carlo)模拟与190次SRSM计算下电力网络和天然气网络的EH处负荷裕度期望值及其误差,SRSM所需计算时间为20.41 s,而MC模拟所需计算时间为346.11 s,计算结果的相对误差不超过6.2%。可见本文方法能在保

表1 不同方法下电力、天然气网络的负荷裕度期望值比较

Table 1 Comparison of expected load margin of electricity power and natural gas network based on different methods

EH	电力网络 负荷裕度 期望值 / MW		相对 误差 / %	天然气网络 负荷裕度 期望值 / (m³·h⁻¹)		相对 误差 / %
	MC模拟	SRSM		MC模拟	SRSM	
EH <sub>1</sub>	120.60	128.07	6.19	98 870	96 060	2.84
EH <sub>2</sub>	209.40	208.68	0.34	137 500	139 680	1.58
EH <sub>3</sub>	106.26	105.89	0.34	151 210	151 610	0.26
EH <sub>4</sub>	168.36	168.36	0	214 990	214 120	0.40
EH <sub>5</sub>	248.97	248.11	0.35	69 270	69 300	0.04
EH <sub>6</sub>	62.24	65.35	4.99	176 940	176 730	0.12
EH <sub>7</sub>	200.07	199.38	0.34	66 890	68 220	1.98
EH <sub>8</sub>	77.80	77.54	0.33	187 990	187 120	0.46
EH <sub>9</sub>	135.60	135.13	0.35	97 940	97 250	0.70
EH <sub>10</sub>	300.10	299.07	0.34	93 160	93 090	0.07
EH <sub>11</sub>	331.22	330.08	0.34	47 780	47 580	0.41

持精度的情况下有效地减少仿真时间。

图 6 为场景 2、场景 3 下基于 SRSM 计算所得天然气网络的负荷裕度期望值对比。由图可以看出,整体上场景 2 中天然气网络的最大负荷裕度比场景 3 大,这主要是因为电-气耦合系统可以加强电、气之间的互联,促进多种能源优化互补。针对负荷的变化与需求,可以通过 EH 做出相应能源的分配和调节,单个子能流系统的负荷调节能力以及系统安全稳定运行机制方面的调节能力都不及电-气耦合系统。由图 6 还可看出,EH<sub>2</sub>、EH<sub>8</sub>、EH<sub>11</sub>处天然气网络的负荷期望值对比更为明显,这是因为这些位置的电-气耦合程度更紧密,由后续 EH 灵敏度分析用以评估电-气之间的耦合程度进一步验证。由此可知,耦合系统较单个能流系统在稳定性上更具优势。

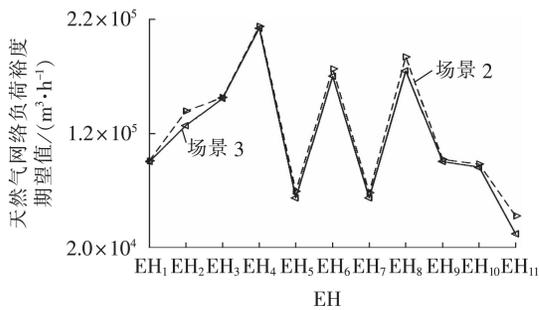


图 6 场景 2、3 下基于 SRSM 的天然气网络负荷裕度期望值对比

Fig.6 Comparison of expected load margin of natural gas network based on SRSM between Scenario 2 and 3

#### 4.4 电-气耦合多能流系统的灵敏度分析

##### 4.4.1 电力系统有功功率-电压曲线和天然气系统流量-气压曲线分析

图 7 为电力网络系统中 PQ 节点的有功功率-电压曲线(图中电压幅值、 $\lambda_e$  均为标么值),表示电力网络系统中 PQ 节点的电压随有功功率的变化情况。由图 7 可知,从原始运行点到电压崩溃点电压下降得最严重的节点为节点 12、14。这是因为节点 12、14 处于电源电气距离较远的位置,其受负荷变化的影响

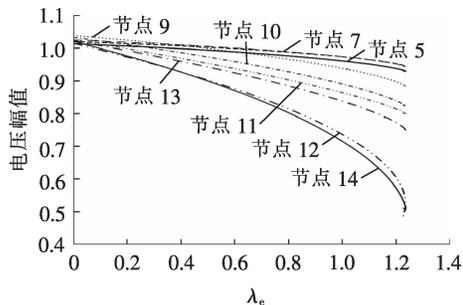


图 7 电力网络中 PQ 节点有功功率-电压曲线的上半部分  
Fig.7 Upper half part of active power-voltage curves of PQ node in electric power network

更为明显,这与电力网络的实际情况基本符合。因此在这些节点处进行负荷调节更加有利于电力系统电压的提升。

图 8 为天然气网络负荷节点流量-气压曲线的上半部分(图中天然气系统压强、 $\lambda_g$  均为标么值),即与 EH 相连接节点的流量-气压曲线,其可以反映天然气系统负荷节点的压强随天然气流量的变化情况。由图 8 可知,从原始运行点到天然气节点的压强下降得最严重的节点为节点 5、6、9、10。这是因为这些节点处于离气源点较远的位置,且没有压缩机装置进行加压,这些节点的压力变化受负荷变化的影响最大,与天然气网络的实际情况基本符合。在这些节点进行负荷调节对天然气系统压强水平的提升效果最佳。

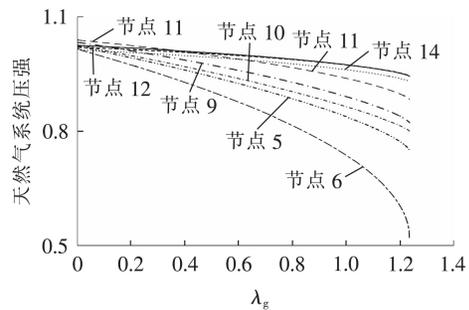


图 8 天然气网络负荷节点流量-气压曲线的上半部分  
Fig.8 Upper half part of gas flow-air pressure curves of load node in natural gas network

##### 4.4.2 电-气耦合下电力系统的灵敏度分析

沿有功功率-电压曲线在系统原始运行点-50%系统临界点-系统临界点获取电力系统的灵敏度期望值。节点 9、10 负荷变化的电力系统灵敏度期望值见附录 B 中表 B2。上述结果表明在系统临界点处电压灵敏度最大的节点为节点 12。静态电压灵敏度随负荷参数的变化曲线如图 9 所示(图中电压-负荷灵敏度、 $\lambda_e$  均为标么值),结合有功功率-电压曲线可以看出,灵敏度在临界点之前处于较低的平稳状态,越靠近临界点,灵敏度曲线变化得越快。在此之前,电力系统的静态电压是稳定的。

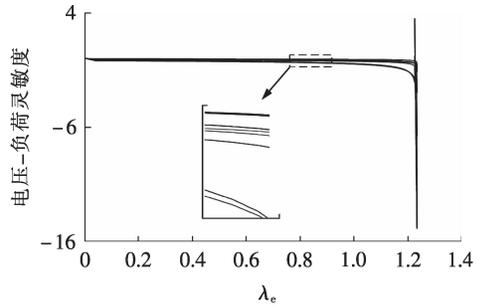


图 9 电力系统电压-负荷灵敏度期望曲线  
Fig.9 Expected voltage-load sensitivity curves of electric power system

选择灵敏度值最大的节点12、14进行电负荷调节,调节量均为5 MW,观察电力系统节点电压的变化情况,调节前、后的节点电压如图10所示(图中电压幅值为标幺值)。由图可知,在调节量相同的情况下,对电力网络中电压下降最严重的节点优先进行负荷调节,更容易提高电力系统的电压水平,对负荷敏感的节点进行负荷调节更为容易,从而提高了电力网络的电压水平和天然气网络的压强水平,符合上述结论。

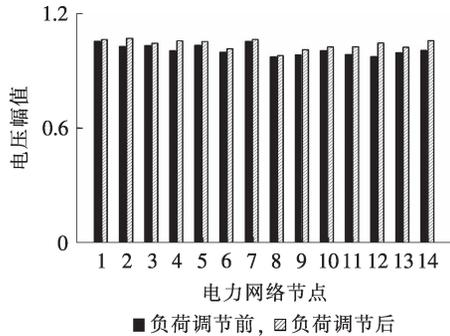


图10 电力网络负荷调节前、后节点电压对比

Fig.10 Comparison of node voltage before and after load regulation of electric power system

#### 4.4.3 电-气耦合下天然气系统的灵敏度分析

沿天然气网络负荷节点流量-气压曲线在系统原始运行点-50%系统临界点-系统临界点获取天然气系统的灵敏度期望值。节点9、10负荷变化的灵敏度值见附录B中表B3。节点5、6、9、10为天然气网络灵敏度值偏大的节点。选择节点9、10进行负荷调节,调节量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,观察节点所需要的加压力,结果如图11所示。

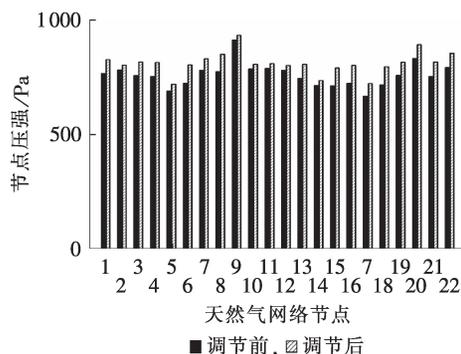


图11 天然气网络各节点调节前、后的压强对比

Fig.11 Comparison of air pressure before and after node regulation of natural gas network

在天然气流量调节量相同的情况下,对灵敏度偏大的节点优先进行负荷调节,需要加压的幅度偏小,更能有效地提高天然气网络负荷节点的压强。基于前述定义的物理意义及应用,灵敏度指标可以明确电力系统与天然气系统之间的交互影响。上述算例结果及分析表明,本文所提方法可以计算电力

系统和天然气系统的最大负荷裕度,同时拟合得到电力系统的有功功率-电压曲线、天然气系统的流量-气压曲线来确定电力系统电压临界点及天然气系统压强临界点的位置,从而对电-气耦合系统的安全稳定运行进行评估。

#### 4.4.4 EH耦合的灵敏度分析

由式(16)所示天然气节点压强-EH节点注入电功率灵敏度矩阵和式(17)所示电力系统节点电压-EH节点天然气注入流量灵敏度矩阵进行结果分析。限于篇幅,以节点9-12为例,附录B中的表B4、B5分别给出了天然气节点压强受电力系统影响及电力系统节点电压受天然气系统影响的结果(在原始运行点-50%系统临界点-系统临界点的灵敏度期望值)。表中数据定量表示了天然气系统压强的变化对电力系统中注入功率的影响以及电力系统节点电压对天然气系统节点注入流量的影响。由数据分析可知,灵敏度矩阵中较大的元素为电-气耦合系统中的薄弱节点以及耦合关系更为紧密的节点,可定量识别耦合多能流系统中的电压和气压薄弱节点以及评估EH耦合的影响程度。

## 5 结论

针对含DFIG风电场电-气耦合系统的最大负荷裕度及其灵敏度分析进行研究,所得结论如下。

(1)考虑天然气管网的动态特性,建立了考虑DFIG稳态模型和EH的电-气多能源系统的含参连续潮流模型。算例仿真表明,当接入DFIG风电场时,可以提升多能系统的最大负荷裕度;当电力系统、天然气系统进行耦合作用时,相较于单能流系统,耦合系统可以提升系统的最大负荷裕度,稳定性更具备优势。

(2)提出基于SRSM处理风电的随机性,将电力系统的确定性连续潮流拓展到考虑天然气管网动态特性的天然气系统,通过EH能流平衡方程考虑电-气耦合,分别采用交替迭代算法可有效求解模型。与MC模拟相比,SRSM在保持精度的情况下可有效减少仿真时间。

(3)得到电-气耦合下电力系统的有功功率-电压曲线和天然气系统的流量-气压曲线;灵敏度指标可跟随电力系统有功功率-电压曲线和天然气系统流量-气压曲线的获取,得到任意负荷所对应的灵敏度值,可有效定量识别电力系统、天然气系统的薄弱节点以及评估EH耦合的影响程度。

上述模型、算法和定义的相关指标为电-气耦合系统的静态安全评估提供了一定的理论支持和工具。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 薛屹洵,郭庆来,孙宏斌,等. 面向多能协同园区的能源综合利用效率指标[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):117-123.  
XUE Yixun, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Comprehensive energy utilization rate for park-level integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):117-123.
- [2] 卫志农,梅建春,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):41-47.  
WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):41-47.
- [3] 艾小猛,方家琨,徐沈智,等. 一种考虑天然气系统动态过程的气电联合系统优化运行模型[J]. 电网技术,2018,42(2):409-416.  
AI Xiaomeng, FANG Jiakun, XU Shenzhi, et al. An optimal energy flow model in integrated gas-electric systems considering dynamics of natural gas system[J]. Power System Technology, 2018, 42(2):409-416.
- [4] FANG J K, ZENG Q, AI X M, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1):188-198.
- [5] 梅建春,卫志农,张勇,等. 电-气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):36-42.  
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Dynamic optimal dispatch with multiple time scale in integrated power and gas energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):36-42.
- [6] CORREA-POSADA C M, SANCHEZ-MARTIN P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3347-3355.
- [7] 梅建春,卫志农,张勇,等. 考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法[J]. 电网技术,2019,43(1):23-33.  
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Hybrid control of integrated power and gas energy systems based on significant contingency screening[J]. Power System Technology, 2019, 43(1):23-33.
- [8] 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[J]. 电网技术,2018,42(2):400-408.  
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation of combined electric-gas networks for energy internet[J]. Power System Technology, 2018, 42(2):400-408.
- [9] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1293-1305.  
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):1293-1305.
- [10] 骆柏锋,穆云飞,赵波,等. 基于统一潮流模型的电-气耦合综合能源系统静态灵敏度分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):29-35.  
LUO Bofeng, MU Yunfei, ZHAO Bo, et al. Static sensitivity analysis of integrated electricity and gas system based on unified power flow model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):29-35.
- [11] 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.  
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3634-3642.
- [12] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术,2016,40(10):2942-2950.  
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10):2942-2950.
- [13] ZLOTNIK A, ROALD L, BACKHAUS S, et al. Coordinated scheduling for interdependent electric power and natural gas infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1):600-610.
- [14] 林威,靳小龙,穆云飞,等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5829-5839.  
LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Multi-objective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20):5829-5839.
- [15] 孙国强,陈胜,郑玉平,等. 计及电-气互联能源系统安全约束的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):26-32,42.  
SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZHENG Yuping, et al. Available transfer capability calculation considering electricity and natural gas coupled energy system security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23):26-32,42.
- [16] MEDINA PADRON J F, FEIJOO LORENZO A E. Calculating steady-state operating conditions for doubly-fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):922-928.
- [17] ZHOU Y C, LI Y G, LIU W D, et al. The stochastic response surface method for small-signal stability study of power system with probabilistic uncertainties in correlated photovoltaic and loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4551-4559.
- [18] 马瑞,王京生. 智慧社区多能流随机响应面模型预测控制方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):121-127.  
MA Rui, WANG Jingsheng. Model predictive control method for multi-energy flow of smart community combined with stochastic response surface method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):121-127.
- [19] MA R, QIN J Q. Multi-objective optimal power flow of multiple-energy system considering wind power penetration[C]//2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Beijing, China: IEEE, 2017:13-17.

## 作者简介:



马 瑞

马 瑞(1971—),男,甘肃泰安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、能源互联网和电力大数据(E-mail:marui818@126.com);

秦佳倩(1995—),女,湖南永州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:jiaqianqin718@163.com)。

## Probabilistic continuous hybrid flow method for electricity-gas coupling system integrated with DFIG wind farm and its load margin analysis

MA Rui, QIN Jiaqian

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of the maximum load margin and its coupling effect of the electricity-gas coupling multi-energy flow system integrated with DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)-based wind farm, based on the dynamic characteristics of natural gas pipeline network, the continuous hybrid flow models with parameters are established considering DFIG steady-state model and EH (Energy Hub). The SRSM (Stochastic Response Surface Method) is used to fit the output of DFIG, combining prediction-correction and the alternate iteration of electricity-gas coupling system, the active power-voltage curves of the electric power system load nodes, the natural gas flow-gas pressure curves of natural gas system and their expected load margins are obtained. The voltage-load sensitivity and gas pressure-natural gas flow sensitivity are defined, which can be obtained with the active power-voltage curve of the electric power system load node and the natural gas system flow-gas pressure curve of natural gas system respectively. In the electricity-gas coupling link, the sensitivities of natural gas system node pressure-injection electric power of EH node and the electric power system node voltage-natural gas injection flow of EH node are defined, based on which, the EH coupling degree and the weak nodes of electric power system, natural gas system and electricity-gas coupling link can be evaluated quantitatively. Simulative results of the electricity-gas coupling system, coupling with the IEEE 14-bus system with DFIG-based wind farm and the 22-node natural gas system through 11 EHs, verify the correctness and effectiveness of the proposed model, algorithm and the defined load margin sensitivity indexes.

**Key words:** electricity-gas coupling system; dynamic characteristics; sensitivity analysis; stochastic response surface method; continuous power flow; doubly-fed induction generator; load margin

## 附录 A

EH 耦合灵敏度公式推导如下。

天然气节点压强-EH 节点注入电功率灵敏度为  $\frac{\partial f_P}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial p}$ ，其由三部分组成： $\frac{\partial f_P}{\partial P_e}$  为电力系统部分， $\frac{\partial P_e}{\partial P_g}$

为电-气耦合部分， $\frac{\partial P_g}{\partial p}$  为天然气部分。EH 中输入的电功率与天然气可以分别等效为电力系统节点与天然气系

统节点的负荷，则  $\frac{\partial P_g}{\partial p} = (A + U)C(A + U)^T$ 。电-气耦合部分由式 (10) 对  $P_g$  求偏导得  $-v\eta_{\text{CHP,e}}$ ；电力系统部

分对  $P_e$  求偏导为-1。由上述推导得：

$$S_{p-P_e} = \frac{\partial f_P}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial p} = -v\eta_{\text{CHP,e}}(A + U)C(A + U)^T \quad (\text{A1})$$

同理，得到电力系统节点电压-EH 节点天然气注入流量的灵敏度矩阵为：

$$S_{V-f_g} = \frac{\partial f_G}{\partial P_g} \frac{\partial P_g}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial V} \quad (\text{A2})$$

$$S_{V-f_g} = -\eta_{\text{Trans}} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{A3})$$

## 附录 B

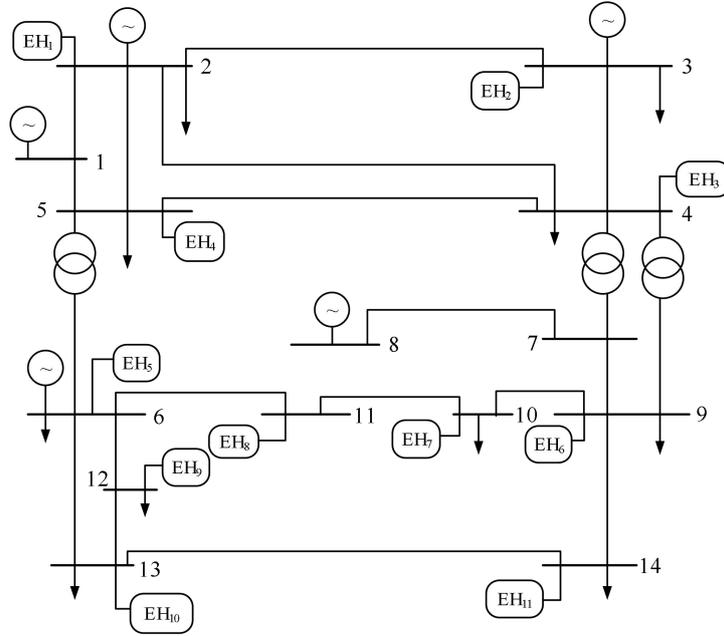


图 B1 IEEE 14 节点系统的结构  
Fig.B1 Structure of IEEE 14-bus system

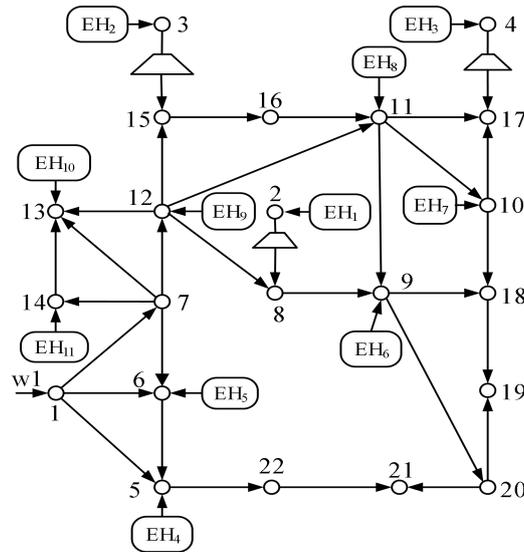


图 B2 天然气网络结构  
Fig.B2 Structure of natural gas network

表 B1 EH 中 CHP 的容量  
Table B1 Capacity of CHP in EH

EH	CHP 容量	EH	CHP 容量	EH	CHP 容量
EH <sub>1</sub>	0.40	EH <sub>5</sub>	1	EH <sub>9</sub>	1
EH <sub>2</sub>	0.65	EH <sub>6</sub>	0.30	EH <sub>10</sub>	0.80
EH <sub>3</sub>	0.45	EH <sub>7</sub>	0.80	EH <sub>11</sub>	0.75
EH <sub>4</sub>	0.70	EH <sub>8</sub>	1		

注：表中的 CHP 容量为标么值。

表 B2 电力系统电压-负荷灵敏度期望值

Table B2 Voltage-load sensitivity matrix expectation of electricity power system

电压变化 节点	节点 9 灵敏度			节点 10 灵敏度		
	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点
2	0.0022	0.0024	5.5472	0.0144	0.0154	5.1882
3	0.0142	0.0158	2.1834	0.0052	0.0086	0.7904
4	0.0012	0.0014	4.1216	0.0094	0.0090	4.2844
5	0.0084	0.0094	0.8562	0.0032	0.0052	0.9054
6	0.0034	0.0028	2.2536	0.0264	0.0262	5.9770
9	0.0018	0.0556	8.8858	0.0086	0.0126	2.1874
10	0.0076	0.0050	5.4092	0.0522	0.0656	10.559
11	0.0280	0.0336	3.7060	0.0198	0.0262	0.2096
12	0.0028	0.0002	7.2690	0.0548	0.0592	15.885
13	0.0100	0.0176	3.7596	0.0080	0.0120	0.5666
14	0.0246	0.0298	1.8860	0.0360	0.0386	14.024

注：表中的灵敏度为标么值，后同。

表 B3 天然气系统压强-流量灵敏度矩阵期望值

Table B3 Air pressure-gas flow sensitivity matrix expectation of natural gas system

压强变化 节点	节点 9 灵敏度			节点 10 灵敏度		
	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点
2	0.0013	0.0013	1.2603	0.0010	0.0012	1.2290
3	0.0012	0.0018	1.1757	0.0011	0.0012	1.1790
4	0.0018	0.0036	1.8150	0.0019	0.0018	1.8600
5	0.0022	0.0043	4.3407	0.0042	0.0031	4.1973
6	0.0022	0.0056	5.5627	0.0033	0.0054	5.3767
9	0.0021	0.0082	8.2000	0.0035	0.0066	6.5623
10	0.0021	0.0066	6.5623	0.0038	0.0074	7.4003
11	0.0030	0.0036	3.6393	0.0037	0.0038	3.7570
12	0.0023	0.0054	2.2783	0.0023	0.0023	2.3417
13	0.0035	0.0087	2.0967	0.0021	0.0021	2.1530
14	0.0021	0.0021	3.5410	0.0038	0.0097	3.8100

表 B4 天然气系统部分节点压强-EH 节点注入电功率灵敏度期望值

Table B4 Air pressure of part node in natural gas system- injection power of EH node sensitivity expectation

压强 变化 节点	节点 9 灵敏度			节点 10 灵敏度			节点 11 灵敏度			节点 12 灵敏度		
	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点
2	0.0011	0.0012	2.7736	0.0072	0.0077	2.5941	0.0025	0.0030	1.4614	0.0071	0.0073	2.4578
3	0.0071	0.0079	1.0917	0.0026	0.0043	0.3952	0.0083	0.0099	1.2904	0.0011	0.0028	0.0626
4	0.0006	0.0007	2.0608	0.0047	0.0045	2.1422	0.0015	0.0018	0.9845	0.0042	0.0043	2.0964
5	0.0042	0.0047	0.4281	0.0016	0.0026	0.4527	0.0048	0.0058	0.6534	0.0007	0.0018	0.2481
6	0.0017	0.0014	1.1268	0.0132	0.0131	2.9885	0.0040	0.0042	0.2107	0.0117	0.0123	2.3244
9	0.0259	0.0278	4.4429	0.0043	0.0063	1.0937	0.0137	0.0167	2.3173	0.0018	0.0039	1.3086
10	0.0038	0.0025	3.6345	0.0311	0.0328	7.9428	0.0092	0.0080	2.6434	0.0275	0.0307	6.6308
11	0.0140	0.0168	1.8530	0.0099	0.0131	0.1048	0.0328	0.0402	4.7048	0.0040	0.0076	0.8024
12	0.0014	0.0001	2.7046	0.0274	0.0296	7.0123	0.0035	0.0014	1.0783	0.0276	0.0312	6.4762
13	0.0123	0.0149	1.8798	0.0040	0.0060	0.2833	0.0289	0.0361	4.2494	0.0254	0.0316	2.2494
14	0.0050	0.0088	0.9430	0.0180	0.0193	5.2798	0.0117	0.0204	1.9077	0.0284	0.0352	6.2274

表 B5 电力系统部分节点电压-EH 节点天然气注入流量灵敏度期望值

Table B5 Voltage of part node in electricity power system-EH node natural gas injection flow sensitivity expectation

电压变化 节点	节点 9 灵敏度			节点 10 灵敏度			节点 11 灵敏度			节点 12 灵敏度		
	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点	初始点	50%临界点	临界点
2	0.0004	0.0004	0.3781	0.0003	0.0004	0.3687	0.0003	0.0004	0.3880	0.0003	0.0004	0.3862
3	0.0004	0.0006	0.3527	0.0003	0.0004	0.3537	0.0003	0.0004	0.4392	0.0003	0.0005	0.5403
4	0.0005	0.0011	0.5445	0.0006	0.0005	0.5580	0.0006	0.0008	0.7732	0.0005	0.0011	1.0562
5	0.0007	0.0013	1.3022	0.0013	0.0009	1.2592	0.0011	0.0012	1.1656	0.0007	0.0011	0.7343
6	0.0007	0.0017	1.6688	0.0010	0.0016	1.6130	0.0011	0.0013	1.1285	0.0007	0.0014	0.7108
9	0.0006	0.0025	2.4600	0.0011	0.0020	1.9687	0.0011	0.0015	1.0918	0.0007	0.0018	0.6835
10	0.0006	0.0020	1.9687	0.0011	0.0022	2.2201	0.0011	0.0017	1.1271	0.0007	0.0018	0.7025
11	0.0009	0.0011	1.0918	0.0011	0.0011	1.1271	0.0011	0.0016	1.6151	0.0009	0.0010	0.9871
12	0.0007	0.0016	0.6835	0.0007	0.0007	0.7025	0.0007	0.0010	0.9871	0.0006	0.0020	2.0083
13	0.0006	0.0026	0.6290	0.0006	0.0006	0.6459	0.0006	0.0009	0.9033	0.0005	0.0016	1.6353
14	0.0011	0.0006	1.0623	0.0011	0.0029	1.1430	0.0011	0.0020	1.1300	0.0007	0.0009	0.6940