

# 计及静态安全约束的电-气耦合综合能源系统 供电能力评估方法

骆柏锋<sup>1</sup>, 穆云飞<sup>1</sup>, 何伟<sup>2</sup>, 余晓丹<sup>1</sup>, 魏炜<sup>1</sup>, 贾宏杰<sup>1</sup>, 孙旻<sup>2</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072;

2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西省 南昌市 330096)

## Load Supply Capability Assessment Method for Integrated Electricity-gas System Considering Static Security Constraints

LUO Bofeng<sup>1</sup>, MU Yunfei<sup>1</sup>, HE Wei<sup>2</sup>, YU Xiaodan<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, JIA Hongjie<sup>1</sup>, SUN Min<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, Jiangxi Province, China)

**Abstract:** The load supply capacity represents the maximum load that can be carried by a power system, and is determined by testing the system's security constraints in a given growth mode. However, the conventional load supply capacity assessment method is insufficient to consider the recent significant increases in gas-generated electricity, with limited assessments of the energy supplied by gas generators and the security constraints of natural gas systems. Therefore, this paper proposes a load supply capability assessment method that considers static security constraints in integrated electricity-gas systems. First, a multi-energy flow model of the integrated electricity-gas system is established, and then a load growth parameter is introduced to complete the model. The proposed method is applied to a modified 14-node power system and 14-node natural gas system, and the simulation results verify the accuracy of the proposed model, which can be effectively deployed to investigate and improve these integrated energy systems.

**Keywords:** power supply capacity; continuous power flow; multi-energy flow; integrated energy system; static security

**摘要:** 供电能力反映了电力系统所能承载的最大负荷,即在给定的发电机运行方式下,模拟系统中负荷的增长模式,不断检验系统的安全约束条件,从而确定系统所能供给的最

大供电负荷。然而,随着以天然气为一次能源的燃气发电机发电比重的显著提升,传统供电能力评估方法并没有考虑燃气发电机的一次能源供应以及天然气系统的运行约束,显然并不恰当。为此,提出了基于连续多能流的电-气耦合综合能源系统供电能力评估方法。首先,建立了电-气耦合综合能源系统的多能流模型;接着引入负荷增长参数,提出连续多能流方法,通过预测-校正追踪多能流解曲线;最后,将所提方法应用于修改的14节点电力系统和14节点天然气系统,仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 供电能力; 连续潮流; 多能流; 综合能源; 静态安全

## 0 引言

近年来,燃气机组凭借其良好的经济性、快速调节能力和较低的污染排放特性,发电份额不断提高<sup>[1-3]</sup>。随着燃气机组发电份额的快速增加,电力系统和天然气系统耦合日益加深,形成了电-气耦合综合能源系统(integrated electricity-gas system, IEGS)。随着耦合日益紧密,不同供能系统之间交互影响受到密切关注。

目前,各国已对IEGS开展了相关研究工作<sup>[4-7]</sup>。文献[4-5]充分发挥了天然气系统的储能特性,利用电转气技术,实现了可再生能源的大量消纳;文献[6]提出了一种计及时段粒化的电-气综合能源系统低碳经济调度策略,通过将调度周期粒化,实现优化模型的快速求解;文献[7]研究了天然气系统的动态特性,挖掘了天然气系统动态特性所对应的储能能力。上述文献主要集中在利用多能源的互补特性进行协调优化运

**基金项目:** 国家自然科学基金-国家电网公司智能电网联合基金(U1766210); 国家电网公司科技项目(52182019000K)。

National Natural Science Foundation of China-Smart Grid Foundation of SGCC (U1766210); Science and Technology Foundation of SGCC (52182019000K).

行, 涉及IEGS供电能力的研究工作偏少。

供电能力是衡量电力系统运行安全性与经济性的指标之一, 反映了系统所能承载的最大负荷。根据不同的安全约束条件, 已有学者提出了不同的供电能力评估模型。文献[8]提出了 $N-1$ 安全校验准则下的配电网供电能力模型; 考虑到配电网自动化技术日益成熟, 文献[9]提出一种考虑负荷转供的配电网最大供电能力评估模型; 文献[10]阐述了在电力市场形势下的输电网络的供电能力计算模型, 提出了使用连续潮流法计算可用输电能力的步骤; 文献[11]建立了以变电站为核心的变电能力评价指标, 反映了网络特征对输电能力的影响。在电力系统和天然气系统深度耦合的背景下, 如何实现供电能力的评估, 对综合能源系统的调度具有重要意义<sup>[12]</sup>。

电-气耦合综合能源系统供电能力评估主要借鉴综合能源可用输电能力的概念来开展<sup>[13]</sup>, 即在给定的发电机运行方式下, 模拟IEGS中负荷的增长模式, 不断检验IEGS中电力系统和天然气系统的安全约束条件, 从而确定IEGS所能供给的最大供电负荷。当前, 已有文献研究了多种方法计算系统的最大供电能力, 主要可分为优化潮流法<sup>[14-18]</sup>与连续潮流法<sup>[19-23]</sup>两大类。优化潮流法将供电能力作为目标函数, 通过不同的优化方法进行寻优计算, 计算结果依赖于所选用的优化算法。连续潮流法可以有效克服接近电压崩溃点时潮流不收敛的问题, 因此广泛应用于电力系统供电能力的求解<sup>[21]</sup>。

随着以天然气为一次能源的燃气发电机发电比重的显著提升, 传统供电能力评估方法并没有考虑燃气发电机的一次能源供应以及天然气系统的运行约束, 显然并不恰当。为此, 本文提出了计及静态安全约束的电-气耦合综合能源系统供电能力评估方法。本文的主要内容分为5个部分。第1章阐述了本研究的背景和研究内容。第2章建立了考虑安全约束的IEGS多能量流模型。第3章仿照连续潮流, 引入负荷增长参数, 提出了连续多能流计算方法, 用于计算系统的供电能力。第4章将所提方法应用于修改的14节点电力系统和14节点天然气系统。第5章总结全文。

## 1 考虑安全约束的IEGS多能量流模型

对于一个典型的IEGS, 电力系统和天然气系统通过燃气机组耦合在一起。在此首先给出天然气系统、电力系统、燃气机组的多能流模型以及系统的安全约束。

### 1.1 天然气系统模型

燃气系统的节点变量有注入燃气流量和节点气压, 仿照电力系统的节点分类, 根据已知变量可将节点分为压力已知节点和注入流量已知节点。在天然气系统中, 气源为平衡节点, 其气压已知而注入流量未知, 燃气负荷的气压未知而燃气需求已知。天然气系统的管道可以分为不含压缩机的管道以及含有压缩机的管道。

对于不含压缩机的管道, 节点 $m$ 和节点 $n$ 之间的管道流量 $f_{mn}$ 取决于上游和下游节点之间的压力差和管道参数。

$$f_{mn} = c_{mn} s_{mn} \sqrt{s_{mn} (p_m^2 - p_n^2)} \quad (1)$$

$$s_{mn} = \begin{cases} +1 & p_m \geq p_n \\ -1 & p_m < p_n \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p_m$ 、 $p_n$ 分别代表天然气节点 $m$ 、 $n$ 的节点气压;  $c_{mn}$ 为管道的阻力系数, 同管道本身的参数(粗糙程度、直径、长度等)有关;  $s_{mn}$ 为符号函数, 当 $p_m$ 大于等于 $p_n$ 时,  $s_{mn}$ 取1, 当 $p_m$ 小于 $p_n$ 时,  $s_{mn}$ 取-1。

含有电压压缩机的管道如图1所示, 输气网络往往配置电压压缩机(本文中的压缩机为电压压缩机)用于维持天然气系统的气压水平。对于入口压力为 $p_m$ , 出口压力为 $p_n$ 的电压压缩机, 其模型可以表达为:

$$r = \frac{p_n}{p_m} \quad (3)$$

式中 $r$ 为压缩机的压缩比。

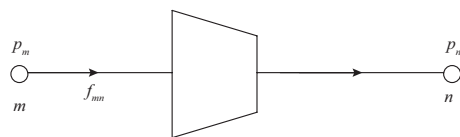


图1 天然气系统电压压缩机模型

Fig. 1 Natural gas system compressor model

对于天然气网络中的节点而言, 节点的流入流量和流出流量守恒, 可以表达为:

$$L_{s,m} - L_{l,m} - \sum_{m \in n} f_{mn} = 0 \quad (4)$$

式中:  $L_{s,m}$ 为节点 $m$ 上的天然气供应量;  $L_{l,m}$ 为节点 $m$ 上的天然气需求量;  $m \in n$ 表示表示节点 $m$ 和节点 $n$ 之间有管道相连接。

燃气压力是天然气系统运行状态的直观反映, 过低的燃气压力会影响燃气负荷的正常用气, 对于IEGS而言是一种不安全运行状态。当天然气系统运行到安

全边界时，燃气负荷需求的微小变动，都会让天然气系统处于不安全的状态。节点气压、压缩机变比以及管道流量均存在安全约束。

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

$$f_{mn}^{\min} \leq f_{mn} \leq f_{mn}^{\max} \quad (6)$$

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

式中： $p_m^{\max}$ 、 $p_m^{\min}$ 为节点 $m$ 气压的上、下限； $f_{mn}^{\max}$ 、 $f_{mn}^{\min}$ 为管道流量 $f_{mn}$ 的上、下限； $r^{\max}$ 、 $r^{\min}$ 为压缩机压缩比的上、下限。

## 1.2 电力系统模型

以 $\mathbf{x}_e=[\theta, \mathbf{V}]^T$ 为状态变量， $\mathbf{y}_e=[\mathbf{P}^{\text{sp}}, \mathbf{Q}^{\text{sp}}]^T$ 为节点注入量，则电力系统模型表达为：

$$P_i^{\text{sp}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

$$Q_i^{\text{sp}} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (9)$$

式中： $P_{\text{spi}}$ 表示节点 $i$ 的注入有功功率； $Q_{\text{spi}}$ 表示节点 $i$ 的注入无功功率； $V_i$ 表示节点 $i$ 的电压幅值； $\theta_{ij}$ 表示节点 $i$ 和节点 $j$ 之间线路的相角差； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 分别表示节点 $i$ 和节点 $j$ 之间线路的电导和电纳； $j \in i$ 表示节点 $i$ 和节点 $j$ 之间有线路相连接。

电力系统中各节点的功率平衡应满足：

$$P_i^{\text{sp}} = P_{g,i} - P_{l,i} \quad (10)$$

$$Q_i^{\text{sp}} = Q_{g,i} - Q_{l,i} \quad (11)$$

对于电力系统，节点电压、支路功率、发电机有功出力均存在安全约束：

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (12)$$

$$P_{f,i}^{\min} \leq P_{f,i} \leq P_{f,i}^{\max} \quad (13)$$

$$P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max} \quad (14)$$

## 1.3 燃气发电机模型

燃气发电机是天然气系统与电力系统的耦合环节，其通过消耗天然气输出电功率。因而对于天然气系统而言，燃气发电机是负荷；而对于电力系统而言，则是发电机。设IEGS中的所有燃气发电机可以表示为集合 $\Omega_{\text{NGU}}$ 。

$$\Omega_{\text{NGU}} = \{GU_1, GU_2, \dots, GU_N\} \quad (15)$$

式中： $GU_i$ 代表第 $i$ 个燃气发电机； $N$ 为燃气发电机的数量。

对于设置在天然气节点 $m$ 的燃气发电机，其天然气消耗 $L_{U,i}$ 与输出电功率 $P_{U,i}$ 的关系为：

$$L_{U,i} = a_i + b_i P_{U,i} + c_i P_{U,i}^2 \quad (16)$$

综上，考虑安全约束的IEGS多能量流模型可以描述为式(1) — (16)。

## 2 IEGS供电能力评估方法

### 2.1 IEGS供电能力模型

电-气耦合系统供电能力评估主要借鉴电网供电能力的概念来开展，即在给定的发电机运行方式下，模拟IEGS中负荷的增长模式，不断检验IEGS中电力系统和天然气系统的安全约束条件，从而确定IEGS所能供给的最大供电负荷。通常用系统所能承载的总负荷(load supplying capability, LSC)作为系统的供电能力指标。IEGS的供电能力可以表示为：

$$LSC = \sum_{i=1}^{N_e} P_{l,i} \quad (17)$$

式中 $N_e$ 为电力系统节点数。

负荷预测方法可以预测负荷(天然气负荷和电力负荷)的增长方向，当IEGS中发电机运行方式确定后，系统所能承载的总负荷也是确定的。IEGS的供电能力模型可以表达为：

$$\text{obj max } LSC = \sum_{i=1}^{N_e} P_{l,i} \quad (18)$$

等式约束条件为式(1) — (4)、式(8) — (11)，不等式约束为式(5) — (7)、式(12) — (14)。

### 2.2 连续多能流

连续潮流是跟踪非线性动态系统平衡点解轨迹的一种基本方法。仿照连续潮流，本文提出连续多能流，用于求解IEGS供电能力模型。连续多能流通过在常规的多能流方程中添加连续性参数，克服了常规多能流方程在接近低电压或者低气压状态下潮流不可解的问题，可精确计算出系统的供电能力。

引入负荷参数 $\lambda$ ，用于表示发电机出力和负荷的增长。

$$P_{g,i}(\lambda) = P_{g,i0} + \lambda K_{g,i}^P \quad (19)$$

$$P_{l,i}(\lambda) = P_{l,i0} + \lambda K_{l,i}^P \quad (20)$$

$$Q_{l,i}(\lambda) = Q_{l,i0} + \lambda K_{l,i}^Q \quad (21)$$

$$L_{l,m}(\lambda) = L_{l,m0} + \lambda K_{l,m}^L \quad (22)$$

如图2所示，随着 $\lambda$ 的增大，电压和气压将会不断下降，直到到达安全边界。连续多能流可通过预测—校正追踪平衡点的轨迹，在追踪过程中计算随 $\lambda$ 变化的系统状态变量，通过判断是否违反安全约束来确定



供电能力。

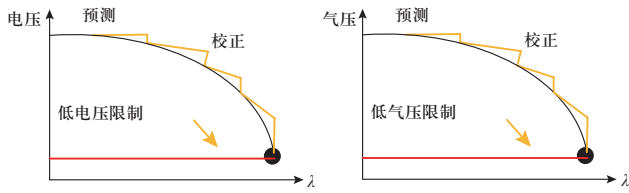


图2 连续多能流

Fig. 2 Continuous multi-energy flow

基于连续多能流求解IEGS供电能力可分为预测-校正环节。

### 2.2.1 预测环节

当多能流模型引入增长参数后, 参数化多能流方程可以表达为:

$$H(X) = 0, \quad X = (V, \theta, p, \lambda) \quad (23)$$

若当前的平衡点为  $(V^{(i)}, \theta^{(i)}, p^{(i)}, \lambda^{(i)})$ , 采用切线法预测下一个平衡点的方向, 切向量  $t$  表达为:

$$t = \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ dp \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial \theta} & \frac{\partial H}{\partial V} & \frac{\partial H}{\partial p} & \frac{\partial H}{\partial \lambda} \\ & & e_k & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中  $e_k$  为行向量, 其中第  $k$  个元素为1,  $k$  代表IEGS中变量变化得最快的变量编号, 其他元素为0。

$$x_k : \max \left\{ \left| \frac{dx_1}{x_1} \right|, \left| \frac{dx_2}{x_2} \right|, \dots, \left| \frac{dx_{n_c-1+n_m+n_g}}{x_{n_c-1+n_m+n_g}} \right| \right\} \quad (25)$$

式中  $k$  是一个参数, 本文选择的  $k$  用于确定  $e_k$  中等于1的元素的位置。

若步长固定为  $\sigma$ , 计算下一个平衡点的预估值为  $(V^{(i+1)*}, \theta^{(i+1)*}, p^{(i+1)*}, \lambda^{(i+1)*})$ :

$$\begin{bmatrix} V^{(i+1)*} \\ \theta^{(i+1)*} \\ p^{(i+1)*} \\ \lambda^{(i+1)*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V^{(i)} \\ \theta^{(i)} \\ p^{(i)} \\ \lambda^{(i)} \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ dp \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中  $V^{(i+1)*}$ 、 $\theta^{(i+1)*}$ 、 $p^{(i+1)*}$ 、 $\lambda^{(i+1)*}$  分别为预测后运行点的电压幅值、电压相角、节点气压和负荷参数。

### 2.2.2 校正环节

校正环节根据参数化过程选择的参数  $k$  建立方程组:

$$\begin{cases} H(X) = 0 \\ x_k - x_k^* = 0 \end{cases} \quad (27)$$

将式 (26) 所计算的预估值, 作为迭代的初始

值, 通过Newton法求解式 (27) 得到下一个平衡点  $(V^{(i+1)}, \theta^{(i+1)}, p^{(i+1)}, \lambda^{(i+1)})$ , 接着判断是否违反IEGS的安全约束。若是, 得到LSC, 停止连续多能流搜索, 否则继续重复预测-校正直到违反IEGS的安全约束。此时所计算得到的系统总负荷就是IEGS的LSC。

在负荷增长方式给定的基础上, 确定发电机的增长方向, 接着在负荷参数增长的过程中, 利用预测-校正环节求解系统的状态变量, 同时校验是否满足系统的安全约束, 直到违反系统安全约束, 此时系统所承载负荷即系统的供电能力。本文提出的基于连续多能流求解IEGS供电能力流程如图3所示。

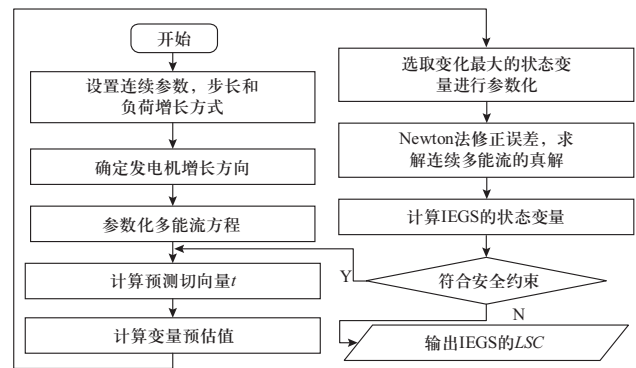


图3 算法流程

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

## 3 算例分析

为了验证所提的模型和求解方法的有效性, 采用修正的IEEE14节点电力系统和14节点的天然气系统进行仿真验证, 系统的原始数据见文献[24]。电力系统的母线2和母线3分别接入天然气发电厂, 其天然气燃料分别来源于天然气系统的节点7和节点4, 系统拓扑如图4所示。

假定每个母线的电压范围在0.75~1.06, 线路功率范围为0~500 MW, 发电机有功出力范围为0~500 MW。天然气系统气压安全范围为100~400 psig (1 psig  $\approx$  6.895 kPa), 管道每小时的流量限制为0~1200 kcf (1 kcf  $\approx$  28.3168 m<sup>3</sup>), 压缩机压缩比范围为1.2~1.8。两台燃气发电机参数相同, 参数为  $a=137.41$  kcf,  $b=37.3$  kcf/MW,  $c=0.05$  kcf/MW<sup>2</sup>。电力负荷有功和无功增长方向相同。气源节点气压为200 psig, 两台压缩机压缩比都设定为1.5。电力系统初始运行点的负荷需求、发电机注入可以参考MATPOWER中关于IEEE14节点的数据。天然气系统网络数据以及初始运行点负荷见附表1、附表2。增长方向参数如表1所示。

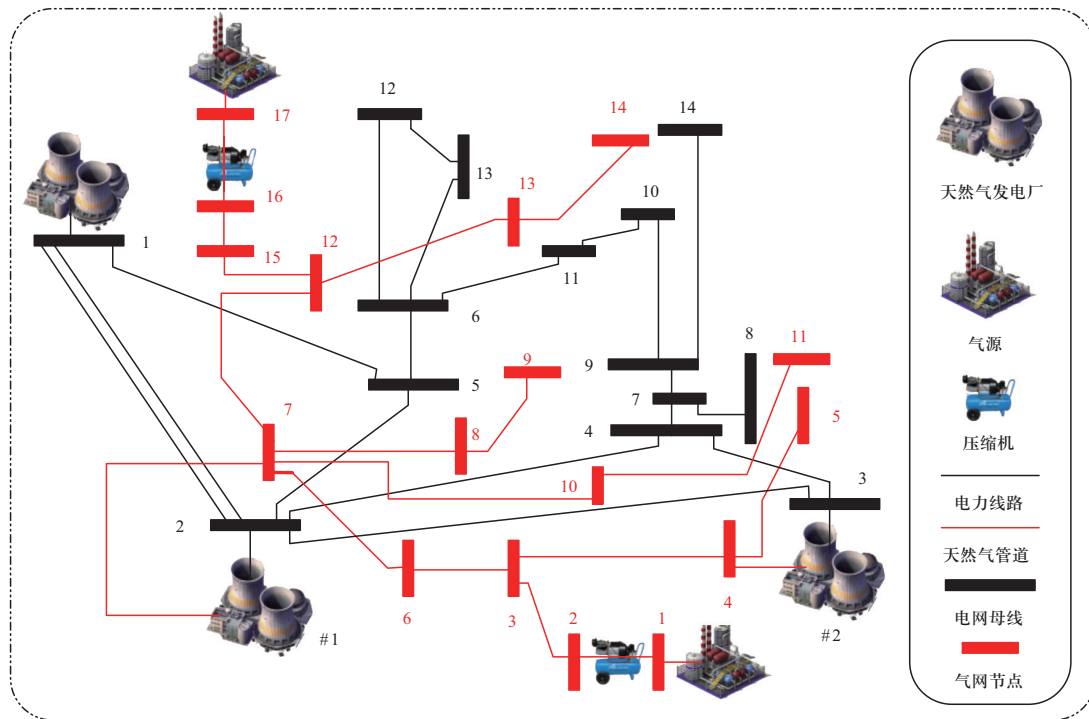


图4 测试系统拓扑图

Fig. 4 Topology diagram of test system

表1 增长方向参数

Table 1 Growth direction parameter

| $K_g^P$         | $K_{pl,i}$                                  | $K_{Li}^Q$                                  |
|-----------------|---|---|
| [0;0.8;0.2;0;0] | [0;0;0;0.2;0.1;0.1;0;0;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1] | [0;0;0;0.2;0.1;0.1;0;0;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1] |

表2 不同场景下的供电能力及电压

Table 2 LSC under different scenarios

| 供电能力/MW      | 场景            |          |
|--------------|---------------|----------|
|              | 场景1           | 场景2      |
| 供电能力/MW      | 571.3942      | 534.9656 |
| $V_1$ /pu    | 1.0600        | 1.0600   |
| $V_2$ /pu    | 1.0450        | 1.0450   |
| $V_3$ /pu    | 1.0100        | 1.0100   |
| $V_4$ /pu    | 0.8665        | 0.8940   |
| $V_5$ /pu    | 0.8775        | 0.9046   |
| $V_6$ /pu    | 1.0700        | 1.0700   |
| $V_7$ /pu    | 0.9107        | 0.9390   |
| $V_8$ /pu    | 1.0900        | 1.0900   |
| $V_9$ /pu    | 0.8326        | 0.8737   |
| $V_{10}$ /pu | 0.8089        | 0.8521   |
| $V_{11}$ /pu | 0.8820        | 0.9116   |
| $V_{12}$ /pu | 0.9236        | 0.9425   |
| $V_{13}$ /pu | 0.9225        | 0.9425   |
| $V_{14}$ /pu | <b>0.7501</b> | 0.8005   |

### 3.1 天然气系统静态安全约束的影响

为了研究天然气系统静态安全约束对供电能力的影响，本文设置了以下两种场景的供电能力。

场景一：仅仅考虑电力系统的安全约束，计算系统的供电能力。

场景二：在考虑电力系统安全约束的基础上，同时考虑天然气系统的安全约束，计算系统的供电能力。

结果如表2和表3所示。表中给出了IEGS到达最大供电能力时的状态变量和供电能力，制约IEGS供电能力的关键约束被加粗表示。对比场景1和场景2，考虑天然气系统静态安全约束后，系统的供电能力下降了。这说明在仅仅考虑电力系统的安全约束时，场景1的供电能力计算结果过于乐观，可能威胁到IEGS的安全，因此，供电能力计算有必要计及天然气系统的静态安全约束。

表3 场景2的气压计算结果

Table 3 The pressure calculation results of scenario 2

| 节点编号         | 气压/psig         | 节点编号     | 气压/psig  |
|--------------|-----------------|----------|----------|
| $p_1/p_{17}$ | 200.0000        | $p_9$    | 101.4068 |
| $p_2$        | 300.0000        | $p_{10}$ | 102.1523 |
| $p_3$        | 280.1115        | $p_{11}$ | 102.7428 |
| $p_4$        | 273.0290        | $p_{12}$ | 164.5635 |
| $p_5$        | 272.7971        | $p_{13}$ | 164.2594 |
| $p_6$        | 203.0298        | $p_{14}$ | 164.2678 |
| $p_7$        | <b>100.6710</b> | $p_{15}$ | 206.3157 |
| $p_8$        | 100.8617        | $p_{16}$ | 300.0000 |

注: 1 psig=6.895 kPa

### 3.2 压缩机压缩比的影响

若天然气系统的静态安全约束制约了电力系统的负荷裕度, 可考虑通过调整压缩机的压缩比, 提高天然气系统的气压水平, 以增强天然气系统的输气能力。为了扩大IEGS的供电能力, 调整压缩机的变比从1.2到1.8变化, 则系统的供电能力变化如图5所示。

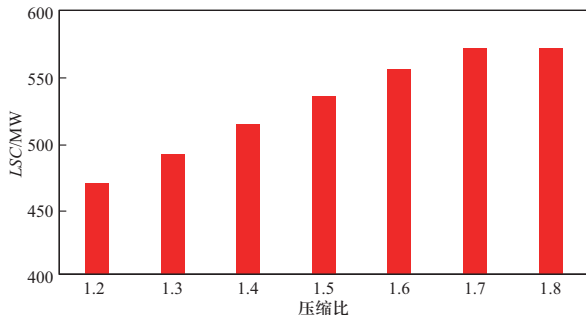


图5 供电能力随压缩比变化

Fig. 5 Load supplying capability varies with compression ratio

当压缩机压缩比从1.2到1.7增加的时候, 系统的供电能力不断增加, 当压缩机变比调整为1.8时, 系统的供电能力不再变化, 说明此时制约系统供电能力的关键约束, 已经从天然气系统安全约束变为电力系统安全约束, 可以考虑通过调整发电机调度模式, 增加系统的供电能力。

### 3.3 发电机调度方向的影响

上述讨论都是在发电机出力的增长方向预先设定的情况下确定的, 在系统实际运行过程中, 当负荷水平变化时, IECS的调度员可以通过调整各发电机的出力模式, 满足负荷的增长需求。

将发电机出力按某一种固定的模式调整, 所获得的计算结果趋于保守, 从而限制了系统供电能力的提升, 造成现有资源的浪费。为了研究发电机调度模式对IEGS的供电能力的影响, 调整两台燃气发电机的出力比, 计算系统的供电能力变化如图6所示。

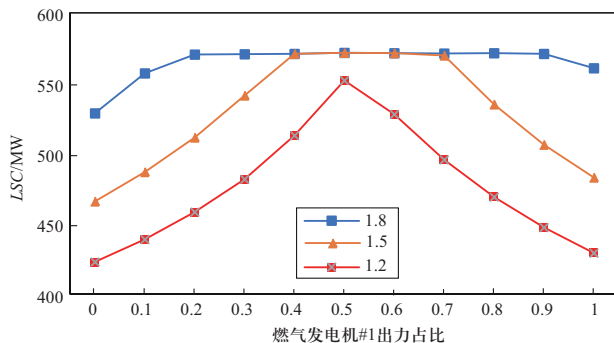


图6 供电能力随燃气发电机#1出力占比变化

Fig. 6 Load supplying capability varies with output ratio of gas generator #1

通过连续多能流计算, 可辨识制约IEGS供电能力的关键约束。一方面, 可以通过提高燃气压缩机压缩比, 从而增强燃气网络的输气能力, 进一步增加了系统供电能力。另一方面, 可以适当地调整发电机调度方向, 增强电网本身的输电能力, 也能起到提高系统供电能力的作用。本文所提方法可以为IEGS调度员提供一定的参考, 对IEGS运行状态的调整提供科学支撑。

## 4 结论

随着燃气发电机发电份额的快速增长, 电力系统的供电越来越依赖于天然气系统的供气, 两者之间的耦合也越来越紧密。

本文提出了一种计及静态安全约束的电-气耦合综合能源系统供电能力评估方法, 分析了天然气系统安全约束、压缩机压缩比、发电机调度方向对负荷裕度的影响。算例结果表明:

1) 在燃气发电占比高的电力系统, 单独考虑电力系统约束而不考虑天然气系统的供电能力计算结果可能过于乐观。

2) 通过调整压缩机的压缩比以及燃气发电机的调度方向, 可以显著提高系统的供电能力。

本文定量讨论了发电机发电方向对于系统供电能力的影响, 如何在燃气发电比例快速上升的背景下, 快速寻找燃气发电机的最优调度方向, 是下一步需要研究的内容。

## 附录

附表1 天然气网络参数

Appendix Table 1 Parameters of natural gas network

| 支路编号 | 起始节点 | 终止节点 | $c_{mn}$ |
|------|------|------|----------|
| 1    | 2    | 3    | 80       |
| 2    | 3    | 4    | 40       |
| 3    | 4    | 5    | 40       |
| 4    | 3    | 6    | 30       |
| 5    | 6    | 7    | 30       |
| 6    | 7    | 10   | 30       |
| 7    | 10   | 11   | 50       |
| 8    | 7    | 8    | 50       |
| 9    | 8    | 9    | 40       |
| 10   | 7    | 12   | 60       |
| 11   | 12   | 13   | 40       |
| 12   | 13   | 14   | 60       |
| 13   | 12   | 15   | 70       |
| 14   | 16   | 15   | 40       |
| 15   | 1    | 2    | —        |
| 16   | 17   | 16   | —        |

附表2 天然气网络初始负荷

Appendix Table 2 Initial load of natural gas network

| 节点编号      | 负荷/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 节点编号 | 负荷/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
|-----------|--|------|--|
| 1/2/16/17 | 0  | 9    | -420                                     |
| 3         | 300                                      | 10   | 30                                       |
| 4         | -310                                     | 11   | -550                                     |
| 5         | 450                                      | 12   | 500                                      |
| 6         | 500                                      | 13   | 500                                      |
| 7         | 600                                      | 14   | -100                                     |
| 8         | 110                                      | 15   | 0  |

## 参考文献

- [1] Chen Y, Chua W S, Koch T. Forecasting day-ahead high-resolution natural-gas demand and supply in Germany[J]. Applied energy, 2018, 228: 1091-1110.
- [2] Khan M I, Shahrestani M, Hayat T, et al. Life cycle (well-to-wheel) energy and environmental assessment of natural gas as transportation fuel in Pakistan[J]. Applied Energy, 2019, 242: 1738-1752.
- [3] Feijoo F, Iyer G C, Avraam C, et al. The future of natural gas infrastructure development in the United States[J]. Applied Energy, 2018, 228: 149-166.
- [4] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678.
- Zhang Rufeng, Jiang Tao, Li Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678(in Chinese).
- [5] 张有兵, 王嘉瑶, 杨晓东, 等. 计及电转气技术的区域综合能源系统在线优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2467-2476.
- Zhang Youbing, Wang Jiayao, Yang Xiaodong, et al. An online optimal scheduling approach for regional integrated energy system considering P2G[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2467-2476(in Chinese).
- [6] 卢志刚, 刘浩然, 何良策. 计及时段粒化的电-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 266-276.
- Lu Zhigang, Liu Haoran, He Liangce. Low-carbon economic dispatch of integrated electricity and natural gas systems considering period granulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 266-276(in Chinese).
- [7] 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 12-19.
- Dong Shuai, Wang Chengfu, Xu Shijie, et al. Day-ahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 12-19(in Chinese).
- [8] 肖峻, 伊丽达, 余步鑫, 等. 部分元件N-1下的配电网供电能力与安全域[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1170-1178.
- Xiao Jun, Yi Lida, She Buxin, et al. Total supply capability and distribution system security region considering certain components N-1[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1170-1178(in Chinese).
- [9] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2281.
- Zhu Jiaqi, Dong Shufeng, Xu Chengsi, et al. Evaluation model of total supply capability of distribution network considering multiple transfers[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2281(in Chinese).
- [10] 李国庆, 董存. 电力市场下区域间输电能力的定义和计算[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 6-9.
- Li Guoqing, Dong Cun. Determining available transfer capability of a large interconnected power system for electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 6-9(in Chinese).
- [11] 刘文霞, 夏宝亮, 王志强, 等. 输电网输电能力评价方法的解析与改进[J]. 现代电力, 2017, 34(4): 27-32.
- Liu Wenxia, Xia Baoliang, Wang Zhiqiang, et al. Analysis

- and improvement on evaluation method of power grid transfer capacity[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 27-32(in Chinese).
- [12] 李晓英, 张巍, 孙坡, 等. 基于机会约束的综合能源系统最大供电能力研究[J]. 电力科学与工程, 2018(3): 22-28.  
Li Xiaoying, Zhang Wei, Sun Po, et al. Analysis on the total supply capacity of integrated energy system considering stochastic chance constraint[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018(3):22-28(in Chinese).
- [13] 黄兵, 赵晋泉. 基于连续潮流的配电网供电能力评估[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 14-18.  
Huang Bing, Zhao Jinquan. Power supply capability evaluation of distribution network based on continuation power flow[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 14-18(in Chinese).
- [14] Xu X, Yan Z, Shahidehpour M, et al. Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3236-3245.
- [15] Hashemi S, Aghamohammadi M R, Sangrody H. Restoring desired voltage security margin based on demand response using load-to-source impedance ratio index and PSO[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 96: 143-151.
- [16] Fan Y, Liu S, Qin L, et al. A novel online estimation scheme for static voltage stability margin based on relationships exploration in a large data set[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1380-1393.
- [17] Wang C, Cui B, Wang Z, et al. SDP-based optimal power flow with steady-state voltage stability constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4637-4647.
- [18] Hashemi S, Aghamohammadi M R, Sangrody H. Restoring desired voltage security margin based on demand response using load-to-source impedance ratio index and PSO[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 96: 143-151.
- [19] Yao M, Molzahn D, Mathieu J L. An Optimal Power Flow Approach to Improve Power System Voltage Stability Using Demand Response[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, DOI: 10.1109/TCNS.2019.2910455.
- [20] Mohamed A A, Venkatesh B. Voltage stability constrained line-wise optimal power flow[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(8): 1332-1338.
- [21] Adusumilli B S, Kumar B K. Modified affine arithmetic based continuation power flow analysis for voltage stability assessment under uncertainty[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(18): 4225-4232.
- [22] Wang L, Chiang H D. Toward online line switching for increasing load margins to static stability limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1744-1751.
- [23] Dong X, Wang C, Yun Z, et al. Calculation of optimal load margin based on improved continuation power flow model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 225-233.
- [24] Vahid-Pakdel M J, Seyedi H, Mohammadi-Ivatloo B. Enhancement of power system voltage stability in multi-carrier energy systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 344-354.

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-08-07。



骆柏锋

作者简介:

骆柏锋(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源集成及应用, E-mail: bofengluo@tju.edu.cn。

穆云飞(1984), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、综合能源集成与应用, E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn。

贾宏杰(1973), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为综合能源系统及智能电网领域的建模、优化、分析以及控制, E-mail: hjjia@tju.edu.cn。

(责任编辑 李锡)