基于灵敏度分析的综合能源系统运行安全性的研究

陈厚合¹,张 鹏¹,姜 涛¹,李 雪¹,邵俊岩¹,李国庆¹,王鹏字² (1. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;2. 国网吉林省电力有限公司 长春供电公司,吉林 长春 130000)

摘要:基于电-气互联综合能源系统子系统间的灵敏度矩阵,探究了电-气能源子系统间的交互耦合机理,提 出一种提升综合能源系统运行安全性的改善措施。首先构建电-气耦合的综合能源系统模型,采用基于扩展 牛顿-拉夫逊法的交替求解法求解该综合能源系统的多能流方程;在此基础上,借助综合能源系统灵敏度分 析方法计算电压幅值-燃气负荷灵敏度矩阵和天然气系统节点压力-电力系统节点有功灵敏度矩阵,定量描 述电、气系统间交互耦合作用机理;然后,通过灵敏度矩阵辨识与薄弱节点密切相关的关键环节,研究提升综 合能源系统运行安全性的相关措施。最后,通过IEEE 24节点和比利时20节点天然气系统耦合的IEGES-24 系统算例对所提方法进行分析、验证,结果表明所提方法可应用于综合能源系统交互耦合机理揭示和运行安 全性分析。

0 引言

能源是人类社会赖以生存和发展的基础,确保 能源高效、安全、绿色、可持续供给是当今社会共同 关注的重点[1]。当前,我国正处于能源转型的关键 时期,我国能源发展虽然取得了巨大成绩,但也面临 需求压力巨大、供给制约多、生产和消费对生态环境 损害严重、技术水平总体落后等挑战^[1-2]。在此背景 下,综合能源系统IES(Integrated Energy System)因 具有考虑多种能源互补耦合、充分消纳可再生能源、 提升能源利用率等诸多优点,已成为解决上述问题 的有效技术之一^[3]。IES可在一定区域内,科学有效 地整合煤炭、石油、天然气、电能、热能等传统能源, 以及光伏、风电、潮汐能等多种新能源,对多种能量 协调规划、优化运行、协同管理和互补互济有着重要 意义^[4]。此外,IES打破了多种异质能源子系统之间 单独规划运行的既有格局,以满足区域内用户用能 多元化需求为前提,通过创新管理模式和先进的物 理信息技术,有效提升能源利用效率^[5]。IES势必成 为未来能源系统的主要形态。

然而,IES虽存在上述优势,但随着各能源子系统间的耦合程度不断增加,单一能源子系统内部扰动所引起的冲击经由多种类型耦合元件扩散和传

收稿日期:2019-03-28;修回日期:2019-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677022,51877033); 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903400);吉林省综 合能源系统创新团队资助项目(20180519015JH)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677022,51877033), the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0903400) and the Integrated Energy System Innovation Team of Jilin Province (20180519015JH) 递,会直接威胁到整个IES的安全运行。尤其在典 型的电-气互联综合能源系统 IEGES (Integrated Electric and Gas Energy System)中,电力系统与天然 气系统的紧密耦合,使得 IES 更加复杂,给 IEGES 安 全运行带来了潜在危机。一方面,电力系统会影响 天然气系统的安全运行,如随着可再生能源渗透率 的不断提升,主要起着调峰作用的燃气发电机组 (gas-fired generators)需要频繁调节出力,这将导致 天然气系统状态不断改变,使天然气系统气压不断 波动而出现安全问题[6]。另一方面,天然气系统的 不安全因素会通过耦合元件传递至电力系统,如 2016年美国南加州地区阿利索峡谷大规模燃气泄 漏事件,导致燃气发电厂供气不足,最终影响"数以 百万计的公用事业客户"长达14 d的用电限制^[7]。 因此,IEGES协调运行在提升能效的同时,其由于多 能流交互耦合而引起的安全问题更应受到关注。

当前,国内外学者已针对IEGES展开了相关研究。针对稳态模型建模,文献[8]基于能源集线器理论,综合考虑了不同耦合形式和能源供应模式下电力网络和燃气管网的相关约束,提出了适用的混合潮流算法;进一步地,文献[9]构建了一种电力-天然气区域IES的稳态模型,探究了天然气系统网络状态改变对天然气系统自身及区域IES的影响。针对电力-天然气系统间的交互影响,文献[10]侧重分析含微型燃气发电机的配电网与配气网耦合的IEGES中电力负荷对天然气系统节点气压的影响;文献[11]通过一种适用于微型IES的多时间尺度仿真算法,分析了电力系统与天然气系统的相互影响;文献[12]建立一种电-气互联系统的优化调度模型,着重研究发电成本与燃气价格的关系。然而,上述研究大多侧重于IES多能流计算,对IES中子系统间交互

耦合机理的描述比较模糊,同时未针对跨区级IES 子系统间的交互耦合机理进行深入研究,也缺少提 升IES运行安全性的相关措施。

针对上述问题,本文以典型跨区级IEGES为例, 重点研究IES中多能源系统间的交互耦合机理和 IEGES运行安全性,并提出一种改善IEGES薄弱节 点电压和气压的有效措施。首先建立IEGES系统稳 态模型,采用交替求解法求解IEGES多能流方程,得 到IEGES当前运行状态。在此基础上,借助灵敏度 分析方法研究IEGES子系统间的交互耦合机理,辨 识与薄弱节点密切相关的关键环节。进而分析系统 运行安全性,提出一种提升IES运行安全性的控制 措施。最后,通过算例分析验证所提灵敏度分析方 法在IEGES中的适用性。

1 IEGES 稳态建模

IEGES由长距离大容量的输气系统及跨区级输 电系统构成,通过能源间的转化设备进行耦合,图1 为典型IEGES示意图。图中,电力系统与天然气系 统通过燃气发电机组和电转气P2G(Power to Gas)设 备耦合形成IEGES。电力系统与天然气系统的交互 关系可以概括为:一方面,P2G设备通过电解水制 气,整个过程消耗电能,并且作为天然气系统的气源 供气;另一方面,燃气发电机消耗天然气产生电能, 在电力系统中充当电源,同时作为天然气系统的气 负荷。



1.1 天然气系统模型

天然气系统模型如图2所示。天然气系统由气 源节点、传输管道、压缩机、储气装置及气负荷节点 组成,天然气经由管道从气源传输至用户。与电力 系统相似,天然气系统元件模型可归为节点与支路 两部分。

1.1.1 天然气系统节点类型

天然气系统中,针对节点这一研究对象,主要的 变量是节点气压 π 和节点天然气流量 L。参照电力 系统,对天然气系统节点进行分类,结果如表1所 示。通常选取气源节点为平衡节点,类似电力系统 的平衡节点起到平衡系统气负荷的作用,已知变量 为节点压力,待求变量为气源发出的天然气量;其他 节点作为负荷节点,类似于电力系统中的PQ节点,



图2 天然气系统结构图

Fig.2 Structure of gas system

已知变量为节点气负荷,待求变量为节点气压。

表1 IEGES节点类型分类

IES子系统	节点类型	已知变量	未知变量
	PQ节点	P, Q	V, θ
电力系统	PV节点	P, V	Q, θ
	平衡节点	V, θ	P, Q
王母与玄坛	负荷节点	L	π
大然气杀统	平衡节点	π	L

1.1.2 天然气系统支路模型

天然气系统的支路方程主要为管道稳态气体流 量方程,管道气体流量为待求量,与管道有关的常数 及管道首末两端的压力差有关。根据管道是否含有 压缩机,管道类型又分为含有压缩机的管道以及普 通管道。管道流量的具体表达式与压力等级密切相 关,本文场景为跨区级输气系统,节点气压往往较 高,对于第k条不含压缩机的支路 $N_{\rm bk}$ 的首端节点i和 末端节点j,需采用Polyflo方程计算管道流量,输气 管道流量 f_i 与两端节点压力的关系如式(1)所示^[13]。

$$f_{k} = 7.57 \times 10^{-4} \times \frac{T_{\mathrm{N}}}{\pi_{\mathrm{N}}} \times \mathrm{sgn}_{ij} \times \sqrt{\frac{\left|\pi_{i}^{2} - \pi_{j}^{2}\right| D^{5}}{k_{\mathrm{r}} S l Z T}} \qquad (1)$$

其中, T_{N} 为标准状况下气体温度; π_{N} 为标准状况下 气体压力; $\pi_{i} \subseteq \pi_{j}$ 分别为管道首、末端节点气压;D为管道直径;S为标况下燃气密度;l为输气管道长 度;Z为计算常数;T为燃气温度; k_{i} 为管道摩擦系 数; sgn_{ij} 为符号函数,其物理含义为当节点i压力大 于节点j时气体由节点i流向节点j,当节点i的压力 小于节点j时则流向相反,具体描述如式(2)所示。

$$\operatorname{sgn}_{ij} = \begin{cases} 1 & \pi_i > \pi_j \\ -1 & \pi_i < \pi_j \end{cases}$$
(2)

在天然气传输过程中,通常认为天然气的气体 温度是不变的,气体是均匀的,密度为恒定值,则式 (1)可简化为:

$$f_k = C_k \times \operatorname{sgn}_{ij} \times \sqrt{\left| \pi_i^2 - \pi_j^2 \right|}$$
(3)

其中,C"为管道常数,可由式(4)计算。

$$C_{k} = 7.57 \times 10^{-4} \times \frac{T_{\rm N}}{\pi_{\rm N}} \sqrt{\frac{D^{5}}{k_{\rm r} SlZT}} \times {\rm sgn}_{ij} \qquad (4)$$

在输气系统中,尤其是大容量长距离的输气系 统中,管道首、末端往往存在着压降,需要配置压缩 机提升输气管道的压力,保证燃气正常传输。压缩 机的功率消耗如式(5)所示。

$$H_{\rm com} = \alpha F_{\rm com} \left[\left(\frac{\pi_j}{\pi_i} \right)^{\beta} - 1 \right]$$
 (5)

其中, H_{con} 为压缩机消耗的功率; F_{con} 为流过压缩机的天然气流量; α 和 β 均为常数, α 由压缩机工作时气体温度、效率决定, β 由气体压缩因子决定。

在天然气压缩机模型选择中,本文采用电驱动型压缩机模型,控制模式为定变比控制,模型如图3 所示,其参数详见附录A^[14]。



图3 电驱动型压缩机示意图

Fig.3 Schematic diagram of electric-driven compressor

1.2 电力系统模型

IES中电力系统潮流模型通常采用交流潮流模型描述,节点的功率表达式如式(6)所示。

$$\begin{cases} P = \operatorname{Re}\left\{U(YU)^*\right\}\\ Q = \operatorname{Im}\left\{U(YU)^*\right\} \end{cases}$$
(6)

其中,P、Q分别为节点的有功功率和无功功率;Y为 节点导纳矩阵;*表示共轭;U为节点电压相量。

1.3 耦合元件模型

本文中IEGES的耦合元件主要有燃气发电机和 P2G设备2种,2种耦合元件模型如下所述。

1.3.1 燃气发电机模型

燃气发电机消耗天然气转化为电功率,与燃煤 发电机相比,具有热效率高、成本低、可靠性高、对环 境影响小等优点^[15]。燃气发电机具体模型如下:

$$Q_{\rm GG} = \gamma_{\rm GG} P_{\rm GG} \tag{7}$$

$$\Gamma_{\rm GG} = \frac{Q_{\rm GG}}{\lambda_{\rm HV}} \tag{8}$$

其中, Q_{cc} 为燃气发电机消耗的热量; γ_{cc} 为能量转化 效率系数; P_{cc} 为燃气发电机发出的电功率; Γ_{cc} 为天 然气的消耗量; λ_{HV} 为天然气的低热值^[16]。

1.3.2 P2G 模型

P2G技术的能量平衡如图4所示。P2G技术利 用电能产生天然气,分为电解水制氢气和电转甲烷 2类。P2G技术的推广及应用进一步加强了天然气 系统与电力系统的联系,使之交互耦合作用更加紧 密。天然气管道中注入氢气所占比例往往存在一定 的限制,而注入甲烷不受该限制,因此本文考虑P2G 类型为电转甲烷。1 MW 电功率经过电解水和甲烷 化后得到的天然气可发出相当于 0.6 MW 的电功率, 即 P2G 的转换效率可达到 60 %^[17]。P2G 消耗电功率 和天然气(甲烷)产量关系如下:

$$L_{\rm P2G} = P_{\rm P2G} \frac{\mu_{\rm P2G}}{\lambda_{\rm HV}} \tag{9}$$

其中,L_{P2G}为P2G消耗电能产生的天然气流量;P_{P2G}为P2G设备消耗的电功率;μ_{P2G}为P2G的转化效率。



2 IEGES多能流计算方法

针对 IES 多能耦合、多子系统交互的特点,其潮 流求解可分为统一求解法和交替求解法2种^[15]。统 一求解法的求解思路是在传统交流电力系统潮流计 算的基础上,将天然气系统变量作为扩展变量,然后 与电力系统变量统一进行求解。交替求解法指在迭 代过程中,对不同的能源子系统方程分别进行求解。 相较于交替求解法,统一求解法的雅可比矩阵维数 较高,计算时间较长。对于 IEGES 的多能流计算,本 文采用交替求解法,求解过程如图5所示。

由1.1节对天然气系统的分析知,若以天然气系统节点为研究对象,则天然气系统内任一节点的流量L可以表示为:

$$L_{i} = \sum_{k=1}^{K} f_{k} = \sum_{k=1}^{K} C_{k} \times \operatorname{sgn}_{ij} \times \sqrt{\left| \pi_{i}^{2} - \pi_{j}^{2} \right|}$$
(10)

其中,K为天然气系统中的管道总数。

基于牛顿-拉夫逊法求解天然气系统潮流,以天 然气节点流量为研究对象,推导牛顿-拉夫逊法计算 潮流的公式,其雅可比矩阵为:

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{g}} = \left[\frac{\partial \boldsymbol{L}}{\partial \boldsymbol{\pi}}\right] \tag{11}$$

建立如式(12)所示的修正方程,通过牛顿法求 解天然气系统多能流。

$$\begin{bmatrix} \Delta L_{1} \\ \Delta L_{2} \\ \vdots \\ \Delta L_{n_{s}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{1}}{\partial \pi_{1}} & \frac{\partial L_{1}}{\partial \pi_{2}} & \cdots & \frac{\partial L_{1}}{\partial \pi_{n_{s}}} \\ \frac{\partial L_{2}}{\partial \pi_{1}} & \frac{\partial L_{2}}{\partial \pi_{2}} & \cdots & \frac{\partial L_{2}}{\partial \pi_{n_{s}}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial L_{n_{s}}}{\partial \pi_{1}} & \frac{\partial L_{n_{s}}}{\partial \pi_{2}} & \cdots & \frac{\partial L_{n_{s}}}{\partial \pi_{n_{s}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \pi_{1} \\ \Delta \pi_{2} \\ \vdots \\ \Delta \pi_{n_{s}} \end{bmatrix}$$
(12)

其中,n_g为天然气系统中节点总数。

对于电力系统潮流,采用传统的牛顿法求解依





然适用,其雅可比矩阵如式(13)所示,修正方程形式 如式(14)所示^[18]。

$$\boldsymbol{J}_{e} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \boldsymbol{P}}{\partial \boldsymbol{V}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \boldsymbol{Q}}{\partial \boldsymbol{V}} \end{bmatrix}$$
(13)

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$
(14)

其中,V为电压幅值;0为电压相角。

值得注意的是,在计算电力系统多能流时,将 P2G设备所在节点等值为PQ节点,燃气发电机节点 等值为PV节点;在计算天然气系统多能流时,将 P2G设备所在节点等值为气源节点或者储气罐,燃 气发电机等值为气负荷节点。 3 IEGES运行安全性分析方法

3.1 IEGES 灵敏度计算

本节将借助灵敏度分析方法^[19-20],探究电压幅 值-燃气负荷和燃气压力-节点有功之间的定量关 系,揭示 IES 的静态耦合机理。IES 静态灵敏度分析 通用表达式如式(15)所示^[10]。

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}}{\mathrm{d}\boldsymbol{u}} = -\left[\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{x}}\right]^{-1} \frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial \boldsymbol{u}} \tag{15}$$

其中,x为IES中的因变量,如电压幅值V、电压相角 θ 、天然气系统节点压力 π 等;u为IES中的自变量, 如电力系统节点有功功率P、天然气系统节点流量L等;F为耦合元件状态量,如燃气发电机出力、P2G 设备产气量等。进一步,可由式(16)、(21)分别给出 电压幅值-燃气负荷灵敏度以及燃气压力-电力系 统节点有功灵敏度。

3.1.1 电压幅值-燃气负荷灵敏度矩阵SL

考虑到 P2G 设备在不同子系统具有双重特性,即在电力系统中等效为 PQ 节点,在天然气系统中等效为气源节点,若两子系统之间通过 P2G 传递能量,则可定义电压幅值-燃气负荷灵敏度 S^V_L,其表达式为:

$$\mathbf{S}_{L}^{V} = \left[\frac{\partial V_{n}}{\partial L_{m}}\right] = \left[\frac{\partial V_{n}}{\partial P_{CE}}\frac{\partial P_{CE}}{\partial L_{CE}}\frac{\partial L_{CE}}{\partial L_{m}}\right]$$
(16)

其中, S_L^v 为天然气系统节点 $m(m=1,2,\dots,n_s)$ 气负荷 与电力系统节点 $n(n=1,2,\dots,n_s)$ 的电压幅值的灵敏 度; V_n 为电力系统节点n的电压幅值; L_m 为天然气系 统节点m的流量; P_{CE} 和 L_{CE} 分别为耦合元件P2G设 备消耗的电功率和产生的天然气流量。

$$\begin{cases} S_{e}^{1} = \left[\frac{\partial V_{n}}{\partial P_{CE}}\right] \\ S_{g}^{1} = \left[\frac{\partial L_{CE}}{\partial L_{m}}\right] \end{cases}$$
(17)

其中,根据式(9)知∂P_{CE}/∂L_{CE}为P2G设备的转化效 率;S^l为电力系统节点电压幅值-电网耦合元件所在 节点有功功率灵敏度,描述了电力系统节点有功负 荷变化对P2G设备电压幅值的影响;S^l为天然气系 统节点流量-天然气系统节点气负荷灵敏度,描述了 天然气系统节点气负荷变化对P2G设备燃气出力的 影响。

在求解电力系统潮流时,雅可比矩阵J。中元素 可为S。的求解提供信息。对雅可比矩阵J。求逆有:

$$\boldsymbol{J}_{e}^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial \boldsymbol{P}} & \frac{\partial \boldsymbol{\theta}}{\partial \boldsymbol{Q}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{P}} & \frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial \boldsymbol{Q}} \end{vmatrix}$$
(18)

由式(18)可知,J_e⁻¹中的元素组成了电力系统节

点电压幅值-电力系统耦合元件所在节点的有功功 率灵敏度**S**_e。

对于天然气系统,天然气注入总量等于系统天 然气消耗总量,即气源、储气罐注入的燃气量及P2G 元件注入的气量总和与各个气负荷节点消耗的燃气 量以及压缩机损耗的气量相等,其关系可由式(19) 描述。

$$\sum L_{\rm P2G} + \sum L_{\rm in} - \sum L_{\rm com} - \sum L_{i} = 0 \qquad (19)$$

其中,*L*_{in}为气源以及储气罐注入天然气系统的燃气量;*L*_i为天然气系统各个负荷节点包括燃气发电机消耗的燃气量;*L*_{com}为压缩机消耗的燃气量。式(19)对*L*_i求偏导,并注意到本文压缩机采用电驱动型压缩机,显然电驱动型压缩机耗气量为0,则求得式(20)。

$$\frac{\partial L_{\text{P2G}}}{\partial L_{i}} = \frac{\partial \sum_{k=1}^{K} C_{k} \times \text{sgn}_{ij} \times \sqrt{\left| \pi_{i}^{2} - \pi_{j}^{2} \right|}}{\partial L_{i}}$$
(20)

天然气系统雅可比矩阵可为式(20)的求解提供 信息,联立式(16)—(20),可计算出电压幅值-燃气 负荷灵敏度矩阵*S*^V_L。

3.1.2 天然气系统节点气压-电力系统节点有功灵 敏度矩阵 SF

对于电-气耦合系统中的另一类耦合元件一燃 气发电机,其同样具有双重特性,即在天然气系统中 等效为气负荷节点,在电力系统中等效为PV节点。 由式(15)可定义天然气系统节点气压-电力系统节 点有功灵敏度矩阵 *S*^{*},如式(21)所示。

$$S_{P}^{\pi} = \left[\frac{\partial \pi_{m}}{\partial P_{n}}\right] = \left[\frac{\partial \pi_{m}}{\partial L_{\rm CE}}\frac{\partial L_{\rm CE}}{\partial P_{\rm CE}}\frac{\partial P_{\rm CE}}{\partial P_{n}}\right]$$
(21)

其中, S_p^{π} 为电力系统节点 $n(n=1,2,\dots,n_e)$ 处的有功 负荷与天然气系统节点 $m(m=1,2,\dots,n_g)$ 气压的灵 敏度; P_{CE} 和 L_{CE} 分别为耦合元件燃气发电机发出的 电功率和消耗的天然气流量。

$$\begin{cases} S_{g}^{2} = \left[\frac{\partial \pi_{m}}{\partial L_{CE}}\right] \\ S_{e}^{2} = \left[\frac{\partial P_{CE}}{\partial P_{n}}\right] \end{cases}$$
(22)

其中,根据式(7)、(8)知∂L_{CE} / ∂P_{CE} 为燃气发电机的转化效率;*S*²_e 为天然气系统节点气压-燃气发电机耗气量灵敏度,描述了燃气发电机消耗气量变化对天然气系统节点气压的影响;*S*²_e 为燃气发电机有功出力-电力系统各节点有功功率灵敏度,描述了电网节点负荷变化对燃气发电机出力的影响。

对于天然气系统,计算天然气系统潮流时,*S*²_g值 等于天然气系统潮流求解中雅可比矩阵*J*_g求逆负 数^[21]。进一步由式(12)的天然气系统修正方程有:

$$S_{g}^{2} = -\boldsymbol{J}_{g}^{-1} = -\left[\frac{\partial \boldsymbol{\pi}}{\partial L}\right]$$
(23)

对于电力系统,根据能量守恒,燃气发电机组与 传统燃煤发电机组注入系统的总有功功率需等于各 个节点负荷与网络损耗有功之和,如式(24)所示。

$$\sum P_{\rm in} - \sum P_n - \sum P_{\rm loss} = 0 \qquad (24)$$

其中, P_{in}为发电机注入的有功; P_n为电力系统节点 n 处的有功负荷; P_{loss}为电力系统网络损耗。

式(24)对
$$P_n$$
求偏导数有:

$$\frac{\partial P_{\rm CE}}{\partial P_n} = 1 + \frac{\partial P_{\rm loss}}{\partial P_n} \tag{25}$$

显然,式(25)中等号右边第2项为电力系统的 网损微增率。可运用转置雅可比矩阵法计算网损微 增率,方法为联立式(26)和式(27)以及极坐标形式 下的牛顿-拉夫逊潮流计算中的雅可比逆矩阵式 (18)求解^[22]。

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_n} = \left[\frac{\partial \theta}{\partial P_{\text{loss}}}\frac{\partial V}{\partial P_{\text{loss}}}\right] \left[\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta}\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V}\right]^{\text{T}}$$
(26)

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_n} = 2 \sum_{s=1}^n G_{sn} V_s V_n \sin(\theta_s - \theta_n) \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_n} = 2 \sum_{s=1}^n G_{sn} V_n \cos(\theta_s - \theta_n) \end{cases}$$
(27)

其中,G_{sn}为电力系统节点s、n间的电导。

3.2 基于灵敏度方法的 IEGES 运行安全性分析

综上,本文基于灵敏度分析的IEGES耦合机理 揭示与运行安全性分析步骤如下:

(1)计算 IES 多能流,得到系统当前运行状态, 辨识系统中的薄弱节点;

(2)利用求解 IES 多能流过程中得到的雅可比 矩阵,计算电压幅值-燃气负荷灵敏度矩阵以及燃气 压力-节点有功灵敏度矩阵,研究多能系统间的交互 耦合机理;

(3)针对薄弱节点,分析灵敏度矩阵所反映的信息,定义灵敏度指标较大的节点为薄弱节点的关键 环节;

(4)针对关键环节,提出相应的改进运行安全性的措施,改善相应关键环节的运行状态,重新计算 IEGES多能流,得到IES新的运行状态,与IEGES初 始运行状态比较,分析改善后的IEGES的安全性。

4 算例分析

4.1 算例说明

为验证本文所提方法的正确性和有效性,本节以 图6所示的IEEE 24节点电力网络与比利时20节点 天然气系统耦合的IEGES-24系统为例^[24]进行分析、 验证。为便于描述,将图6中的电力系统节点编号记 为P₁—P₂₄,天然气系统节点编号记为B₁—B₂₀。耦合



□气源及储气装置, OP2G设备, □压缩机, ②燃气机组, ②燃煤机组

图 6 IEGES-24 系统结构图 Fig.6 Structure of IEGES-24 system

元件 P2G 设备连接了节点 B_2 与节点 P_{10} ;燃气发电机 连接了节点 P_7 与节点 B_{16} ;天然气系统中的2台压缩机 C_1 、 C_2 消耗的能量分别由电力系统节点 P_6 、 P_8 供应。

由于本文天然气系统为比利时20节点系统,因此压力单位采用Bars,流量单位采用标准立方百万英尺SCM(Standard Cube Million feet),其换算关系为:1Bars=0.1 MPa,1SCM=28317 m³。

IEGES-24系统多能流计算结果详见附录B。电 压幅值的安全限制为 $0.95 \sim 1.05$ p.u.(本文中电压幅 值均为标幺值),天然气系统节点气压范围详见附录 B中的表 $B1^{[24-25]}$ 。显然,由附录B中多能流计算结 果可知:电力系统节点 P_{24} 电压为0.948 p.u.,越下限; 天然气系统节点 B_{20} 气压为39.18 Bars,越下限,因此 认定节点 P_{24} 、节点 B_{20} 为IEGES-24系统的薄弱节点。

4.2 灵敏度分析

100

根据第3节所提方法,计算电网节点电压幅值-P2G设备所在节点有功功率灵敏度矩阵*S*¹。、燃气发 电机所在节点有功-电网各节点有功功率灵敏度矩 阵*S*²、天然气系统节点流量-天然气系统节点气压灵 敏度矩阵*S*¹。以及天然气节点气压-燃气发电机耗气 量灵敏度矩阵*S*²,计算结果分别如图7、8所示。

图7中,*S*^l_e为P2G设备有功负荷对电网各节点电 压幅值的灵敏度矩阵,其中节点P₁₅的灵敏度数值最 大,达到了0.0104,表明P2G设备有功负荷变化对节 点P₁₅的电压幅值变化影响最大;*S*²_e描述了电网节点 各负荷对燃气发电机出力的灵敏度关系,值得注意





Fig.8 Calculative results of S_{g}^{1} and S_{g}^{2}

的是,部分节点的灵敏度为负值,表明这些节点的负 荷增加时,燃气发电机出力会下降,其余发电机出力 会升高;节点 P₄的负荷对燃气发电机出力灵敏度 为-0.0173,节点 P₄处的灵敏度绝对值最大,反映了 该节点的负荷变化对燃气发电机出力影响最大,且为 负相关;节点 P₁₅处的负荷对燃气发电机出力灵敏度为 0.0172,表明燃气发电机的出力与节点 P₁₅的有功负 荷正相关程度最高。整体趋势上,*S*₄较*S*²波动更小, 这与耦合元件的供能特点及在 IEGES 中的能量转换 效率有关,目前 P2G 供能效率明显低于燃气发电机。

图 8 中, S¹_g 描述了天然气系统各节点气负荷对 P2G 产气量的灵敏度关系,其中节点 B₁₉、B₂₀的灵敏 度数值较大,分别为0.003 263、0.003 302,由此可知 天然气系统中节点 B₁₉、B₂₀气负荷对 P2G 设备的气出 力影响较大; S²_g 描述了燃气发电机耗气量对天然气 系统各节点气压的灵敏度关系,其中节点 B₁₇、B₁₉、B₂₀ 处的灵敏度指标较高,分别为0.007 475、0.007 500、 0.007 589,这表明燃气发电机耗气量对节点 B₁₇、B₁₉、 B₂₀的气压影响更大。同样地,由于 P2G 设备技术的 供能效率明显低于燃气发电机, S¹_g 与 S²_g 相比, S¹_g数值 波动更小。

图7和图8初步描述了耦合元件所在节点状态 量与子系统各节点自变量之间的关系。进一步根据 已知计算结果和耦合元件传递能量关系计算电压幅 值-燃气负荷灵敏度矩阵 S½和天然气系统节点气 压-电力系统节点有功灵敏度矩阵 S_L,结果分别如 图9、图10所示。



4.3 安全措施

分析图9可得,对于电力系统薄弱节点P₂₄,节点B₈ 处的电压幅值-燃气负荷灵敏度最低,为0.002729, 节点B₂₀处的电压幅值-燃气负荷灵敏度最高,为 0.004039,因此与节点P₂₄电压幅值密切相关最高的 天然气系统节点为B₂₀,通过灵敏度矩阵,定位B₂₀为 影响电力系统节点P₂₄电压安全性的关键环节。分 别在B₈、B₂₀处单独设置储气罐,改善燃气负荷状态, 储气罐大小设置为节点B₂₀气负荷的30%。增加储 气罐前后电力系统节点电压幅值如附录C中的图 C1所示,由图可见电压变化均未越限。增加储气罐 会影响平衡节点出力,平衡节点出力变化见附录D 中的表D1。对比该措施对节点P₂₄电压幅值的影响, 结果表2所示。

表2 改善前后节点 P₂₄ 电压变化比较

Table 2 Comparison of node voltage variation

of P₂₄ before and after improvement

储气罐 设置情况	节点 P ₂₄ 电压幅值	节点 P ₂₄ 电压 相角 / (°)
不设置储气罐	0.9481	-13.906
储气罐位于B ₈	0.9509	12.895
储气罐位于B ₂₀	0.9524	9.093

如表2所示,不设置储气罐时节点P₂₄电压幅值 为0.948 p.u.,将储气罐置于节点B₂₀时,电压幅值变 为0.9524 p.u.,而将同样容量的储气罐置于节点B₈ 时,电压幅值为0.9509 p.u.。分析表2中的结果,将 储气罐置于节点B₂₀时改善节点P₂₄的电压幅值更 佳,即调整灵敏度指标较高处的气负荷状态对改善节点P24电压幅值的效果更好。

对于 IEGES,可以通过改善天然气负荷状态进 而达到改善电压质量的目的,这为提升电压质量提 供了一种新的措施。

为进一步探究储气罐对电力系统电压的影响, 针对同样位置设置不同储气量的储气罐进行对比分 析,分别设置节点 B₂₀气负荷的 15%、30%、45%,即 在节点 B₂₀处分别增加储气量为 2.9×10⁵ SCM、5.8× 10⁵ SCM、8.6×10⁵ SCM的储气罐,对节点 P₂₄电压的影 响如表 3 所示。由表可知,在一定范围内,储气罐的 储气量越大对于薄弱节点 P₂₄的电压幅值的改善效 果越好,如果储气罐的储气量设置得不足,则可能起 不到改善电压幅值的作用。

表3 储气罐不同出气量对节点P24电压的影响

Table 3 Influence of different gas outputs of gas storage tank on node voltages of P_{24}

储气罐储气量 / SCM	节点P24电压幅值	节点P ₂₄ 电压相角 / (°)
0	0.9481	-13.906
2.9×10 ⁵	0.9492	-13.368
5.8×10 ⁵	0.9524	9.093
8.6×10 ⁵	0.9553	-10.708

对于天然气系统薄弱节点B₂₄,根据图10的计算 结果可知,节点P₁₅处的天然气系统节点气压-电力 系统节点有功灵敏度为0.007813,节点B₂₀的气压与 节点P₁₅的有功负荷正相关程度最大,即P₁₅为与B₂₀ 气压紧密相关的关键环节。为了验证节点气压-节点 有功灵敏度的有效性,注意到节点P₁₄处的天然气系 统节点气压-电力系统节点有功灵敏度为0.001952, 有功负荷正相关程度最小,现采取2种不同方案改 善节点B₂₀的气压。

(1)方案1:调节P₁₅的有功负荷。

(2)方案2:调节等量的P₁₄的有功负荷。

不同方案下,天然气系统节点气压多能流计算 结果如图11所示。观察气压改善情况,方案1对气 压整体改善效果较方案2更佳,同时节点气压提升 趋势符合灵敏度的趋势。而针对节点B₂₀的气压,方



案1将节点 B_{20} 的气压从39.97 Bars 提升至42.94 Bars,方案2虽对节点 B_{20} 的气压有所改善,将其提升 至40.71 Bars,但是显然仍是方案1更能有效地提升 IEGES的运行安全性。同时也验证了灵敏度分析方 法在IEGES中的适用性、有效性。

5 结论

本文建立了一种 IEGES 模型,以 P2G 和燃气发 电机作为耦合元件,采用交替求解法计算 IEGES 多 能流。在此基础上,通过灵敏度分析方法研究电-气 子系统间的交互耦合作用机理,探究提升 IEGES 运 行安全性的控制措施。最后,通过算例进行分析、验 证,相关结论如下:

(1)P2G设备与燃气发电机2种类型的耦合元件,由于其作用机理、供能效率不同,因此建立起的 灵敏度矩阵类型,但都能准确真实地反映子系统间 的交互作用机理;

(2)通过灵敏度矩阵,可快速辨识、定位与薄弱 节点紧密相关的关键环节,规避了传统逐点法需反 复计算系统多能流的缺点,大幅减少了计算量;

(3)灵敏度方法可对提升IEGES运行安全性提供一种新思路;

本文重点研究了 IEGES 中电-气各能源子系统 间的交互耦合作用机理,此方法可进一步扩展到含 电/气/热/冷/交通等更为复杂的 IES 中。本文 所用的灵敏度方法是局部线性化的思想,因此在一 定的范围内是合理有效的。此外,除设置储气罐以 外,还有调节气源节点压力、调节压缩机出口压力、 投切无功补偿装置等多种措施来调节 IEGES 的运行 状态,本文后续工作将继续围绕以上调控措施进行 探究,改善IEGES 运行安全性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 袁立明."十三五"能源规划前瞻[J].地球,2014(8):35-36.
 YUAN Liming. Prospects for the energy planning of the 13th Five-Year Plan[J]. Earth,2014(8):35-36.
- [2] 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.
- [3] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状 与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
 PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (6):3-10.
- [4] LI Guoqing, ZHANG Rufeng, JIANG Tao, et al. Security-constrained bi-level economic dispatch model for integrated natural gas and electricity systems considering wind power and power-to-

gas process[J]. Applied Energy, 2017, 194:696-704.

- [5] LI Guoqing, ZHANG Rufeng, JIANG Tao, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power [J]. Applied Energy, 2017, 192:408-419.
- [6] MICHAEL C, SCOTT B, VLADIMIR L. Cascading of fluctuations in interdependent energy infrastructures: gas-grid coupling[J]. Applied Energy, 2015, 160:541-551.
- [7]杨自娟,高赐威,赵明.电力-天然气网络耦合系统研究综述
 [J].电力系统自动化,2018,42(16):27-37,62.
 YANG Zijuan, GAO Ciwei, ZHAO Ming. Review of coupled system between power and natural gas network [J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(16):27-37,62.
- [8] 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.

 [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):21-33.
 WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady-state

analysis of power-natural gas regional integrated energy system considering natural gas network state[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5):21-33.

[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):35-41.

LUO Baifeng, 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):35-41.

- [11] 徐宪东. 电/气/热微型能源系统的建模、仿真与能量管理研究[D]. 天津:天津大学,2014.
 XU Xiandong. Modelling, simulation, and energy management research for electricity, gas, and heat based micro energy system
 [D]. Tianjin:Tianjin University,2014.
- [12] AN S, LI Qing, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, TX, USA: IEEE, 2003:138-143.
- [13] ABEYSEKERA M, WU J, JENKINS N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas [J]. Applied Energy, 2015, 164:991-1002.
- [14] LIU Cong, SHAHIDEHPOUR M, FU Yong, et al. Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints
 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3):1523-1536.
- [15] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多 指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116. DU Lin,SUN Liang,CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):110-116.
- [16] JIANG Tao, DENG Hongwei, BAI Linquan, et al. Optimal energy flow and nodal energy pricing in carbon emission-embedded integrated energy systems [J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2018, 4(2):179-187.
- [17] 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):5668-5678,5924.

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, 5924.

- [18] VANDEWALLE J. Natural gas in the energy transition-technical challenges and opportunities of natural gas and its infrastructure as a flexibility-providing resource [D]. Leuven, Belgium: University of Leuven, 2014.
- [19] 姜涛,李国庆,贾宏杰,等. 电压稳定在线监控的简化L指标及 其灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):13-18. JIANG Tao, LI Guoqing, JIA Hongjie, et al. Simplified L-index and its sensitivity analysis method for on-line monitoring of voltage stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21):13-18.
- [20] 伍利,南海鹏,姚李孝.考虑功频静特性及发电机出力分配的 静态电压稳定分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(14): 26-30.

WU Li, NAN Haipeng, YAO Lixiao. Static voltage stability analysis considering static power frequency characteristics of load and generation dispatch [J]. Power System Protection and Control, 2012,40(14):26-30.

- [21] 张儒峰,姜涛,李国庆,等.基于最大熵原理的电-气综合能源 系统概率能量流分析[J/OL].中国电机工程学报.(2019-03-13)[2019-03-15].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107. TM.20190312.1641.012.html.
- [22] 陈恳,李小锐,徐敏. 网损微增率新解法与转置雅可比矩阵法 用于有功优化计算的比较[J]. 中国电机工程学报,2000,20 (7):34-36,39.

CHEN Ken, LI Xiaorui, XU Min. Comparisons between new method and transposed Jacobian matrix method for calculating incremental transmission losses in active power economic dispatch[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(7):34-36,39.

[23] 李本新,韩学山,蒋哲,等. 计及网损的快速经济调度方法[J].

发电技术,2018,39(1):90-95.

LI Benxin, HAN Xueshan, JIANG Zhe, et al. A fast analytical method for economic dispatch considering network losses [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(1):90-95.

- [24] 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.
- [25] WOLF D D, SMEERS Y. The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm [J]. Management Science, 2000,46(11):1454-1465.

作者简介:



陈厚合(1978—),男,江苏徐州人,教 授,博士研究生导师,博士,主要研究方向 为电力系统安全性与稳定性(E-mail:chenhouhe@126.com);

张 鹏(1995—),男,山东泰安人,硕 士研究生,主要研究方向为综合能源系统 静态安全分析(E-mail: pengzhangneepu@ aliyun.com);

姜 涛(1983—),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(E-mail:t.jiang@aliyun.com);

李 雪(1986—),女,陕西西安人,副教授,博士,主要研 究方向为电力系统安全性与稳定性、电力系统高性能计算。

Security analysis based on sensitivity analysis for integrated electric and gas energy system

CHEN Houhe¹, ZHANG Peng¹, JIANG Tao¹, LI Xue¹, SHAO Junyan¹, LI Guoqing¹, WANG Pengyu²

(1. Department of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Changchun Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd.,

Changchun 130000, China)

Abstract: The interaction coupling mechanism among the subsystems in IEGES(Integrated Electric and Gas Energy System) is explored based on the sensitivity matrices between the electric power system and natural gas system in IEGES, and the measure to enhance the operational security of IEGES is proposed. Firstly, the IEGES model is established, and then alternating solution method based on extended Newton-Raphson method is adopted to solve the multi-energy flow equation of the IEGES. According to the solved multi-energy flow of the IEGES, the sensitivity analysis approach is adopted to calculate the voltage amplitude-gas load sensitivity matrix and the natural gas system node pressure-power system node active power sensitivity matrix to quantitatively describe the interaction coupling mechanism between the electricity and gas systems in IEGES. Further, the weak nodes of IEGES are identified by the sensitivity matrices, and the measure to enhance the operational security of IEGES is proposed. The performance of the proposed approach is evaluated by the IEGES-24 test system integrating IEEE 24-bus system and Belgian 20-node gas system. The results demonstrate that the proposed approach can be used to reveal the interaction coupling mechanism of IES(Integrated Energy System) and analyze the operational security.

Key words: integrated energy system; alternating solution method; Newton-Raphson method; sensitivity analysis; security analysis

压缩机参数及控制模式说明

本文算例中,电驱动型压缩机采用定变比的控制模式,压缩机详细参数如表 A1 所示^[14]。 气体压缩机比 *R* 的取值与压缩机型号有关系,计算公式如式(A1)所示,本文选取变比 *R*=1.05。

$$R_{\min} \le \frac{\max(\pi_i, \pi_j)}{\min(\pi_i, \pi_j)} \le R_{\max}$$
(A1)

表 A1 压缩机参数 Table A1 Parameters of natural gas compressor

压缩机编号	压缩机首节点	压缩机末节点	R_{\min}	R _{max}
C_1	B_8	B_9	1.02	2.45
C_2	B ₁₇	B ₁₈	1.02	2.45

附录 A

門 环 L

TableB1 Calculation results of multi-energy flow state for natural gas system 节点气压允 节点气压 节点注入气量 气网节点 节点气负荷/SCM 许范围/Bars /SCM /Bars \mathbf{B}_1 1.091×10^{7} 0 58.00 50~77 9.400×10^{6} 5.000×10^{6} 57.99 \mathbf{B}_2 30~77 0 3.920×10^{6} B_3 57.88 30~80 0 0 30~77 \mathbf{B}_4 56.58 2.810×10^{6} 0 55.65 30~77 B_5 0 4.030×10^{6} 47.76 $40 \sim 80$ $B_{6} \\$ 0 5.260×10^{6} 48.44 $40 \sim 80$ \mathbf{B}_7 1.570×10^{7} 0 59.46 50.00~66.25 B_8 0 30.00~66.25 **B**9 0 62.43 B_{10} 0 0 53.88 30.00~66.25 B_{11} 0 6.370×10^{6} 52.71 30.00~66.25 B_{12} 0 0 53.66 30.00~66.25 B_{13} 0 2.120×10⁶ 54.52 30.00~66.25 B_{14} 0 5.000×10^{6} 54.54 40.00~66.25 B_{15} 1.296×107 0 54.57 40.00~66.25 0 6.840×10^{6} 54.35 50.00~66.25 B_{16} 0 1.562×10^{7} 40.79 40.00~66.25 **B**₁₇ 0 2.20×10^{5} 42.68 40.00~66.25 B_{18} B_{19} 0 0 40.66 40.00~66.25 1.920×106 B_{20} 0 39.18 40.00~66.25

IEGSE 当前运行状态多能流计算结果 表 B1 天然气系统多能流计算结果

Т	able B2 Calc	ulation results	of pipeline flo	w state for natu	ral gas system
	管道	管道首节点	管道末节点	管道常数 C _k	管道流量
	1	1	2	9.0720	10.92
	2	2	3	6.0469	19.82
	3	3	4	1.3954	15.90
	4	5	6	0.1003	2.81
	5	6	7	0.1487	1.22

百坦	目垣目口宮	目垣不且出	目坦币奴 Ck	日坦仉里
1	1	2	9.0720	10.92
2	2	3	6.0469	19.82
3	3	4	1.3954	15.90
4	5	6	0.1003	2.81
5	6	7	0.1487	1.22
6	7	4	0.2269	6.48
7	4	13	0.6597	9.42
8	8	9	0.6643	15.70
9	9	10	1.4512	15.70
10	10	11	0.8638	8.42
11	11	12	0.9070	8.42
12	12	13	7.2562	10.54
13	13	14	3.6281	6.12
14	14	15	1.4512	6.84
15	10	16	0.5144	17.76
16	16	17	0.5798	2.14
17	17	18	0.2782	1.92

表 B2 天然气系统管道流量计算结果

中國共占			负荷	
电网节点	幅值	相角/(°)	有功功率/MW	无功功率/Mvar
P_1	1.035	-15.677	108	22
P_2	1.035	-15.611	97	20
P_3	0.966	-18.608	180	37
\mathbf{P}_4	0.993	-17.161	74	15
P ₅	1.015	-17.421	71	14
P_6	1.006	-19.382	138	28
P ₇	1.025	-14.205	125	25
P_8	0.989	-17.895	173	35
P ₉	0.993	-14.213	175	36
\mathbf{P}_{10}	1.021	-15.947	245	40
P ₁₁	0.984	-6.886	0	0
P ₁₂	0.994	-5.288	0	0
P ₁₃	1.020	0	265	54
P_{14}	0.980	-5.004	194	39
P ₁₅	1.014	0.032	317	64
P ₁₆	1.017	0.86	100	20
\mathbf{P}_{17}	1.039	4.653	0	0
P ₁₈	1.050	5.693	333	68
P ₁₉	1.023	1.183	181	37
P_{20}	1.038	3.355	128	26
P_{21}	1.050	6.231	0	0
P ₂₂	1.050	12.116	0	0
P ₂₃	1.050	5.226	0	0
P ₂₄	0.948	-13.906	360	0

表 B3 电力系统多能流计算结果 TableB3 Calculation results of multi-energy flow for power system

表 B4 燃气发电机当前运行状态 TableB4 Current operating status of gas generator

井占	ŧ	山压	燃气发时	电机出力		负荷
~ 1	幅值	相角/(°)	有功功率/MW	无功功率/Mvar	有功功率/MW	无功功率/Mvar
P ₇	1.025	0	240.00	57.84	125	25

表 B5 P2G 当前运行状态 TableB5 Current operating status of P2G

气网节点	节点注入气量 /SCM	节点气负荷/SCM	节点气压 /Bars	节点气压允 许范围/Bars
B_2	9.40×10^{6}	5×10^5	57.99	30~77

```
附录 C
```



图 C1 阀 飞峰位 5 不同位直的时电压幅值入小 Fig.C1 Voltage amplitude of when gas tank is in different positions

1	able D1 working status	of sheek bus
储气罐位置	P13节点有功出力 P/MW	P13节点无功出力 Q/Mvar
无储气罐(当前状态)	611.93	118.18
储气罐位于 B8	590.50	117.87
储气罐位于 B20	579.83	117.79

表 D1 平衡节点出力情况 Table D1 working status of slack bus