

考虑相依特性的电-气互联网络故障评估方法

苏洁莹,邓丰强,张勇军

(华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心,广东 广州 510640)

摘要:随着电网和天然气网的耦合程度不断加深,电网与天然气网间的相依特性引发了新的系统安全运行问题,增加了电-气互联网络发生连锁故障的风险。为此,提出了一种考虑电网与天然气网间相依特性的电-气互联网络故障传播的影响分析方法。分析电-气互联网络的相依特性以及故障在两网间的传播机理;基于此分析电网与天然气网不同耦合程度下故障在两网间的传播特性;进而建立计及天然气网慢动态特性的电-气互联网络准稳态潮流模型,从系统供能效率与供能可靠性角度,采用负荷损失率和全局网络效能损失率指标评估分析电-气互联网络的故障传播及其对系统运行的影响,以此构建电-气互联网络连锁故障评估模型。

关键词:电-气互联网络;相依特性;连锁故障;故障评估;电网;天然气网

中图分类号:TK 01;TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108007

0 引言

在亟需能源转型的背景之下,不同能源系统之间的多能互联利用成为解决现阶段能源问题的有效途径^[1-2]。由于天然气具有环保高效、储量丰富等优点,燃气发电正逐步取代燃煤发电的传统发电方式,世界各国都在大力推动天然气机组的建设。随着天然气机组的大规模接入以及燃气轮机GT(Gas Turbine)和电转气P2G(Power-to-Gas)技术的成熟,电网和天然气网的耦合程度不断加深。为此,对电-气互联网络相依特性的研究受到了密切关注,文献[3]提出了综合模型评估电网和天然气网间的相互依赖对电网安全的影响;文献[4]探究了天然气网络状态改变对其自身以及区域综合能源系统的影响;文献[5]探究了燃气轮机和P2G耦合环节下电-气互联网络的相依特性,表明电网与天然气网的波动存在相互影响。

一方面,两网耦合下电-气互联网络提高了能源的利用效率,给低碳可持续能源系统的构建带来了新的机会;另一方面,电网和天然气网通过燃气轮机和P2G建立双向耦合关系,能量相互流动,系统发生的波动将相互影响,电网和天然气网间具有相依网络的相互依存特性^[6-8]。这一特性不可避免地给系统安全运行带来了新的挑战,一个网络的故障扰动会影响另一个网络的正常运行,甚至引起连锁故障,美国西南部、洛杉矶以及我国台湾省都出现过由供气问题造成的大规模停电事故。其中,美国西南部连锁故障事故造成130万用户失去电力供应,事故起因在于发生故障时气负荷达到峰值,导致大量气

负荷被切除,事故从气网蔓延至电网,进一步引发电网切负荷,迫使电驱动加压站退出运行,事故又重新通过耦合元件传播至气网,如此反复引发连锁故障^[6];洛杉矶发生的大规模燃气泄漏事故导致洛杉矶盆地燃气电厂拉闸限电,影响数百万用户长达14 d^[7];我国台湾省出现的大停电事故起因在于大潭电厂的6台天然气机组供气突然中断导致6台天然气机组脱网,造成约11.94%的电力供应迅速减少,此时系统中并无足够的备用,最终严重影响了约60%的用户用电^[8]。因此,在电-气互联网络耦合不断增强的背景下,有必要研究相依特性下故障在两网间传播对电-气互联网络稳定运行的影响。文献[9]基于复杂网络理论从系统拓扑结构的角度对综合能源系统连锁故障进行了分析;文献[10]分析了单一能源子系统故障对综合能源系统运行的影响;文献[11]提出了考虑天然气网随机故障影响的电网连锁故障模型,评估了天然气网故障对电网故障的影响;文献[12]考虑天然气N-1开断事故,提出了一种多能流系统静态安全耦合分析方法;文献[13]提出了一种考虑天然气网影响的电网脆弱线路辨识方法,分析了天然气网对电网脆弱性造成的影响。上述文献分析了气网随机故障对电网的影响特性,关于电-气互联网络连锁故障的研究不断深化,但在以下方面还略显不足:①未研究电网随机故障对气网的影响特性;②研究故障对天然气网的影响时未考虑天然气网慢动态特性对扰动的缓冲作用;③未定量描述两网耦合程度,对不同耦合程度下故障在两网间的传播需予以关注。

基于此,本文提出了一种考虑相依特性的电-气互联网络故障传播影响分析方法。首先,考虑相依特性分析了电-气互联网络故障在两网间的传播机理,进而分析电网与天然气网不同耦合程度下故障在两网间的传播特性。然后,基于建立的计及管存

收稿日期:2020-11-01;修回日期:2021-06-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777077)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077)

的天然气网准稳态潮流模型以及电网稳态潮流模型,从系统供能效率与供能可靠性角度采用负荷损失率和全局网络效能损失率指标评估分析了电-气互联网络的故障传播及其影响,构建了考虑相依特性的电-气互联网络连锁故障评估模型。最后,通过仿真算例验证了所提模型方法的有效性与适用性。

1 电-气互联网络的相依特性模型

1.1 电-气互联网络的耦合结构

电网与天然气网通过耦合设备紧密相连,通过耦合功率的传输形成能量的双向流通,电-气互联网络的耦合结构如图 1 所示。

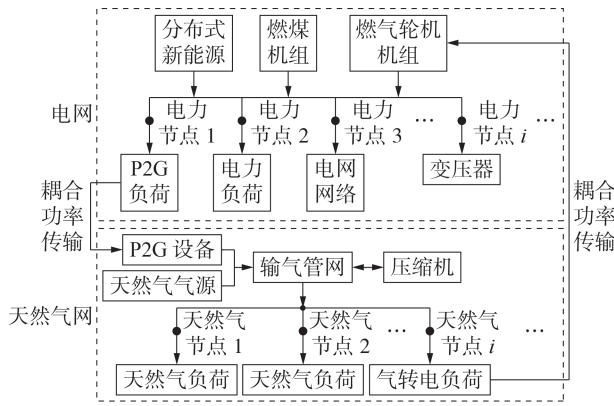


图 1 电-气互联网络的耦合结构

Fig.1 Coupled structure of integrated electricity and natural gas network

1) 燃气轮机和 P2G 设备。

燃气轮机由天然气网提供燃料,通过燃料燃烧产生高温气体推动发电机发电,将能量由天然气网流向电网。而 P2G 设备则是将电力转化为天然气的设备,通过电解水生成氢气和氧气,并且在加温加压的环境下进一步与二氧化碳反应,产生甲烷(天然气),将能量从电网流向天然气网。表征燃气轮机和 P2G 稳态能量转换关系的模型可以表示为^[14-15]:

$$\begin{cases} L_{GT} = \frac{P_{GT}}{\eta_{GT} H_G} \\ W_{P2G} = \frac{\eta_{P2G} P_{P2G}}{H_G} \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_{GT} 和 P_{GT} 分别为燃气轮机的燃气消耗和输出有功功率; W_{P2G} 和 P_{P2G} 分别为 P2G 设备产生的天然气流量和消耗的有功功率; H_G 为天然气热值; η_{GT} 和 η_{P2G} 分别为燃气轮机和 P2G 设备的转换效率。

2) 电驱动压缩机。

天然气沿管道传输会产生压力降,为了补偿天然气输送的压力损失和提高天然气网的输送容量,天然气网中需要通过配置压缩机来提高气压。在天然气压缩机模型选择中,通常采用电驱动型压缩机

模型^[16]。当压缩机消耗的能量由电网供应时,压缩机可视为电网中的等效电负荷:

$$P_c = H_c \frac{0.7457}{10^3} \quad (2)$$

式中: P_c 为电驱动压缩机的等效电负荷; H_c 为压缩机消耗的电能。

1.2 电-气互联网络的相依特性

相依网络是从复杂网络演变而来的,全相依的相依网络模型描述了发生故障后电力一、二次系统之间因存在依从关系而导致故障扩散的迭代过程机理^[17-18]。相依网络模型可用于研究具有耦合关系的网络之间的动态影响过程。区别于孤立网络,由于相依网络的节点之间存在相依性,相依网络在故障后引发级联失效的过程会更剧烈。

通过电网与天然气网间耦合功率的传输,电-气互联网络具备了相依网络的相互依存特性,一个网络的故障扰动会引起另一个网络的故障扰动,从而可能引起网络之间的连锁故障。当电网发生扰动时,需要通过提高发电机组出力 and 切除部分负荷来满足网络的功率平衡,这一过程会引起耦合设备的状态变化,导致耦合设备出力不稳定或被切除等,从而影响气网的安全运行,甚至引发天然气网连锁故障的发生。同样地,当气网发生扰动时,也会因负荷的切除而引发耦合功率的波动,进而影响电网安全运行,增加电网运行风险。由于目前多种能源供应尚未完善,当电网或气网发生故障时,电-气互联网络会优先切除能源转换负荷^[19],从而增加了故障在两网间传播的可能性。电-气互联网络双向耦合的能量流动提高了两网间的能源利用效率,但电网与天然气网间的相依特性会引发两网间故障相互传播,增加了电-气互联网络连锁故障的风险。

由此可见,考虑电-气互联网络的相依特性,电-气互联网络双向耦合的能量流动将会引发故障在两网间传播,当电网与气网耦合程度不同时,两网间耦合功率的传输发生改变,由此影响故障在两网间的传播特性。为此,本文通过构建传输功率占比指标来分析不同耦合程度下故障在两网间的传播特性,传输功率占比可定义为:

$$\begin{cases} \lambda_{GT} = \sum_m P_{m,GT} / \sum_n P_{n,G} & m, n \in N_e \\ \lambda_{P2G} = \sum_p W_{p,P2G} / \sum_q W_{q,G} & p, q \in N_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ_{GT} 和 λ_{P2G} 分别为燃气轮机和 P2G 设备的传输功率占比; $P_{m,GT}$ 和 $P_{n,G}$ 分别为节点 m 处燃气轮机的出力和节点 n 处发电机的出力; $W_{p,P2G}$ 和 $W_{q,G}$ 分别为节点 p 处 P2G 设备的出气量和节点 q 处天然气气源的出气量; N_e 、 N_g 分别为电网节点集合和天然气网节点集合。

2 电-气互联网络连锁故障评估模型

2.1 电-气互联网络连锁故障模型

2.1.1 计及管存的天然气网准稳态潮流模型

准稳态模型是指系统在经受操作或扰动后,不考虑系统暂态过程,但计及系统扰动前后新旧稳态间的总变化,考虑新旧稳态间的稳态过程^[20]。电网能量流动惯性小,准稳态过程一般在秒级左右,而天然气流动惯性比电能大,最终到准稳态过程所需时间为分钟级到小时级^[21]。由于天然气网与电网的时间常数相差悬殊,决定了在天然气网准稳态过程下不同的瞬时状态均可使电力系统过渡至新的稳态,并且系统各状态量都向着最终的稳态缓慢发展^[12]。

由于天然气传输具有时延效应,管道首末端相差的天然气流量就短暂地存储在管道中,常用管存(line pack)模型来等效天然气管道传输的存储特性。管存可缓冲天然气网负荷波动,为天然气可靠供应提供保障。

为全面分析故障在电网与天然气网间的传播对电-气互联网络稳定运行的影响,本文采用天然气网的准稳态潮流模型进行研究。计及管存的天然气网受扰动后的准稳态过程如图2所示,主要计及管存前后时刻的耦合状态,考虑天然气网受扰动后经准稳态过程由受扰前稳态逐渐过渡到新的稳态。图中, $x_G(t)$ 为 t 时刻天然气网在准稳态过程中的状态; $x_G(0)$ 、 $x_G(s)$ 分别为事故前和事故后的稳态。

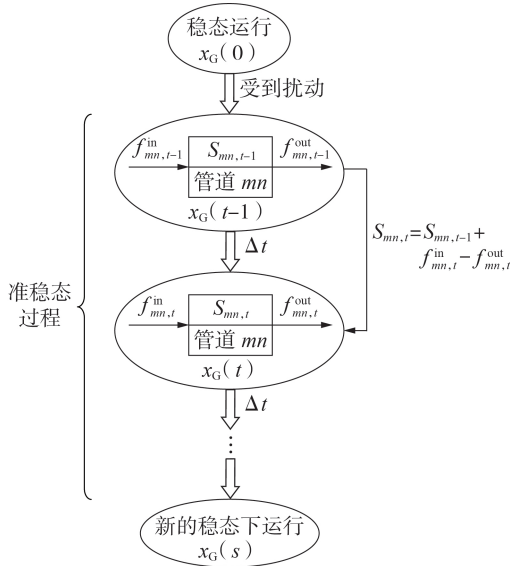


图2 天然气网受扰动后的准稳态过程

Fig.2 Quasi-steady-state process of natural gas network after disturbance

管存与管道参数和管道两端的平均压力成正比, t 时刻储存于管道 mn 的管存 $S_{mn,t}$ 可表示为:

$$S_{mn,t} = M_{mn} (\pi_{m,t} + \pi_{n,t})/2 \quad (4)$$

式中: $\pi_{m,t}$ 和 $\pi_{n,t}$ 分别为 t 时刻输入节点 m 和输出节

点 n 的气压; M_{mn} 为管道 mn 的管存系数。

t 时刻的管存 $S_{mn,t}$ 与 $t-1$ 时刻的管存 $S_{mn,t-1}$ 以及 t 时刻管道输入的气体流量 $f_{mn,t}^{\text{in}}$ 和输出管道的气体流量 $f_{mn,t}^{\text{out}}$ 有关,具体关系式为:

$$S_{mn,t} = S_{mn,t-1} + f_{mn,t}^{\text{in}} - f_{mn,t}^{\text{out}} \quad (5)$$

1) 天然气管道传输约束。

天然气管道传输方程可描述为:

$$\begin{cases} \text{sgn}(\pi_{m,t} - \pi_{n,t}) f_{mn,t}^2 = C_{mn} (\pi_{m,t}^2 - \pi_{n,t}^2) \\ f_{mn,t} = (f_{mn,t}^{\text{in}} + f_{mn,t}^{\text{out}})/2 \\ \text{sgn}(\pi_{m,t} - \pi_{n,t}) = \begin{cases} 1 & \pi_{m,t} > \pi_{n,t} \\ -1 & \pi_{m,t} < \pi_{n,t} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f_{mn,t}$ 为 t 时刻管道 mn 的平均流量; C_{mn} 为管道 mn 的参数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

结合式(3)~(5),整理管道传输约束可得:

$$\begin{cases} (f_{mn,t}^{\text{in}} - f_{mn,t}^{\text{out}}) \Delta t = M_{mn} \frac{\pi_{m,t} + \pi_{n,t}}{2} - M_{mn} \frac{\pi_{m,t-1} + \pi_{n,t-1}}{2} \\ \text{sgn}(\pi_{m,t} - \pi_{n,t}) \left(\frac{f_{mn,t}^{\text{in}} + f_{mn,t}^{\text{out}}}{2} \right)^2 = C_{mn} (\pi_{m,t}^2 - \pi_{n,t}^2) \end{cases} \quad (7)$$

$m, n \in N_g$

$$f_{mn}^{\text{min}} < f_{mn,t}^{\text{in}} < f_{mn}^{\text{max}} \quad m, n \in N_g \quad (8)$$

$$f_{mn}^{\text{min}} < f_{mn,t}^{\text{out}} < f_{mn}^{\text{max}} \quad m, n \in N_g \quad (9)$$

式中: f_{mn}^{max} 和 f_{mn}^{min} 分别为管道 mn 传输容量的上限和下限。

2) 节点气压约束。

在实际运行过程中,天然气网的各节点气压必须控制在合理范围内,具体如下:

$$\pi_i^{\text{min}} < \pi_{i,t} < \pi_i^{\text{max}} \quad i \in N_g \quad (10)$$

式中: π_i^{max} 和 π_i^{min} 分别为节点 i 处气压的最大值和最小值。

3) 气源约束。

气源出气量受到设备容量及气压等因素的限制,需控制在一定范围内,具体如下:

$$W_{i,G}^{\text{min}} < W_{i,G,t} < W_{i,G}^{\text{max}} \quad i \in N_g \quad (11)$$

式中: $W_{i,G}^{\text{max}}$ 和 $W_{i,G}^{\text{min}}$ 分别为节点 i 处气源出气量的最大值和最小值。

4) 压缩机约束。

对任一压缩机 C ,其运行约束可表示如下^[22]:

$$\begin{cases} H_{C,t} = B_C f_{C,t} (K_{C,t}^{Z_C} - 1) \\ K_{C,t} = \frac{\pi_{q,C,t}}{\pi_{p,C,t}} \\ \tau_{C,t} = \alpha_C + \beta_C H_{C,t} + \gamma_C H_{C,t}^2 \end{cases} \quad (12)$$

$$K_C^{\text{min}} < K_{C,t} < K_C^{\text{max}} \quad (13)$$

式中: $\pi_{p,C,t}$ 和 $\pi_{q,C,t}$ 分别为 t 时刻压缩机进口节点 p 和出口节点 q 的压力; $\tau_{C,t}$ 和 $f_{C,t}$ 分别为 t 时刻压缩机所消耗的天然气流量和流经压缩机的气流量; $K_{C,t}$ 为 t 时刻压缩机增压比; B_C 、 Z_C 、 α_C 、 β_C 、 γ_C 为压缩机模型

参数,其值均为常数; $K_C^{\max}$ 和 $K_C^{\min}$ 分别为压缩机升压比的最大值和最小值。

5) 负荷削减约束。

当气网气源发生故障时,首先通过增加其他气源输气量以尽可能降低故障带来的影响,若增加其他气源输气量仍未能满足此时的负荷需求,则会造成供应缺额并容易引起管道传输阻塞,从而需要对部分负荷进行切除。负荷的切除需要满足传输管道气压等约束,且负荷削减量必须控制在一定的范围内^[11-12],即:

$$0 < \Delta L_{i,L,t}^k < \Delta L_{i,L}^{\max} \quad i \in N_g \quad (14)$$

式中: $\Delta L_{i,L,t}^k$ 为 t 时刻发生第 k 次故障后节点 i 处天然气负荷削减量; $\Delta L_{i,L}^{\max}$ 为节点 i 处天然气负荷削减量最大值。

6) 节点流量平衡约束。

天然气网的任一节点需满足节点流量平衡方程:

$$W_{i,G,t} - L_{i,L,t} + \Delta L_{i,L,t} - L_{i,GT,t} + W_{i,P2G,t} - f_{i,C,t} - \tau_{i,C,t} - f_{i,in,t} = 0 \quad i \in N_g \quad (15)$$

式中: $L_{i,L,t}$ 、 $L_{i,GT,t}$ 和 $f_{i,in,t}$ 分别为 t 时刻天然气节点 i 处的气负荷、燃气轮机负荷和注入的天然气流量;若节点 i 为压缩机节点,则 $f_{i,C,t}$ 和 $\tau_{i,C,t}$ 分别为 t 时刻流经该压缩机的气流量和所消耗的天然气流量。

2.1.2 电网潮流模型

电网惯性较小,数秒内达到准稳态,故本文采用故障后电网稳态模型评估故障对电网的影响。电网稳态运行时需满足以下运行约束:

$$P_{i,G} - P_{i,L} + \Delta P_{i,L} - V_i \sum_{j=1}^{n_e} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + P_{i,GT} - P_{i,P2G} = 0 \quad i, j \in N_e \quad (16)$$

$$Q_{i,G} - Q_{i,L} + \Delta Q_{i,L} - V_i \sum_{j=1}^{n_e} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + Q_{i,GT} - Q_{i,P2G} = 0 \quad i \in N_e \quad (17)$$

$$P_{i,G}^{\min} < P_{i,G} < P_{i,G}^{\max} \quad i \in N_e \quad (18)$$

$$Q_{i,G}^{\min} < Q_{i,G} < Q_{i,G}^{\max} \quad i \in N_e \quad (19)$$

$$V_i^{\min} < V_i < V_i^{\max} \quad i \in N_e \quad (20)$$

$$P_{ij,1}^{\min} < P_{ij,1} < P_{ij,1}^{\max} \quad i, j \in N_e \quad (21)$$

式中: G_{ij} 和 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相位差; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的节点电压幅值; $Q_{i,G}$ 为节点 i 处发电机的无功出力; $Q_{i,GT}$ 、 $Q_{i,P2G}$ 分别为节点 i 处燃气轮机的无功出力和P2G设备的无功负荷; $P_{i,L}$ 和 $Q_{i,L}$ 分别为节点 i 处的有功负荷和无功负荷; $\Delta P_{i,L}$ 和 $\Delta Q_{i,L}$ 分别为节点 i 处的有功负荷削减量和无功负荷削减量; $P_{ij,1}$ 为支路 ij 的传输功率; $P_{i,G}^{\max}$ 、 $P_{i,G}^{\min}$ 分别为节点 i 处发电机的有功出力上、下限; $Q_{i,G}^{\max}$ 、 $Q_{i,G}^{\min}$ 分别为节点 i 处发电机的无功出力上、下限; $V_i^{\max}$ 、 $V_i^{\min}$ 分别为节点 i 处电压的上、下限; $P_{ij,1}^{\max}$ 、 $P_{ij,1}^{\min}$ 分别为支路 ij 传输功率的上、下限; n_e 为

电网节点数。

当电网发生随机故障时,网络有可能会形成新的孤岛,此时需要调整每个孤岛的发电机出力以及负荷水平以保持功率的平衡。若发电机出力调整至上限时系统仍未满足负荷需求,需切除部分电网负荷,对负荷的切除应控制在一定的范围内^[13]:

$$0 < \Delta P_{i,L}^k < \Delta P_{i,L}^{\max} \quad i \in N_e \quad (22)$$

$$0 < \Delta Q_{i,L}^k < \Delta Q_{i,L}^{\max} \quad i \in N_e \quad (23)$$

式中: $\Delta P_{i,L}^k$ 和 $\Delta Q_{i,L}^k$ 分别为发生第 k 次故障后节点 i 处有功负荷削减量和无功负荷削减量; $\Delta P_{i,L}^{\max}$ 和 $\Delta Q_{i,L}^{\max}$ 分别为节点 i 处有功负荷削减量最大值和无功负荷削减量最大值。

2.2 连锁故障影响评估指标

当发生不同的故障扰动时,系统运行状态会受到不同程度的影响,可通过构建相应的指标评估故障对系统的破坏程度,本文从系统供电效率与供电可靠性角度,采用负荷损失率以及全局网络效能损失率来反映故障对系统运行状态的影响以及恶化趋势。

2.2.1 负荷损失率

当系统发生故障扰动,故障程度严重时需要通过切除系统负荷来满足功率平衡,这一过程将改变系统运行状态,造成很大比例的负荷损失,供电效率随之降低。因此,通过负荷损失率可反映系统供电效率的下降程度,从而反映故障对系统的破坏程度,负荷损失率 C_k 可表示为故障时段内负荷切除总量占该时段内故障前总负荷的比例。

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} P_i - \sum_{s=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_{sk}} P_{s,i}^k}{\sum_{i=1}^{n_e} P_i} \quad (24)$$

式中: P_i 为未发生故障时节点 i 的系统可供电网负荷/气流量; $P_{s,i}^k$ 为发生第 k 次故障时孤岛 s 中节点 i 的系统可供电网负荷/气流量; n_e 为所计算系统的负荷节点总数; n_s 为故障后孤岛总数; n_{sk} 为第 k 次故障后孤岛 s 内节点总数。负荷损失率很好地反映了故障对系统造成的破坏程度,负荷损失率越大,表示故障后系统损失的负荷越多,故障后系统被破坏程度越严重。

2.2.2 全局网络效能损失率

为了体现电网与天然气网的相依特性对故障传播的影响,本文采用网络效能值反映故障对于网络的连通以及能量传输的破坏程度。网络效能值可以反映网络的连通性,网络效能值越大表示网络传输越通畅。当系统受到扰动时,网络结构以及运行状态均有可能被影响,能量传输可能受到阻碍,网络效能值的损失可以从整体上反映故障对于系统运行状

态的破坏程度。

在复杂网络理论中,将节点对 (m,n) 间的效能值定义为节点对间最短距离的倒数^[18,23],当节点对之间不存在直接或间接连接时,效能值为0。为了体现故障对网络供能可靠性的影响,本文结合网络物理特性,用最短电气/燃气距离代替最短距离,将发电机/气源出力和电网/气网负荷大小作为权重。在此基础上,为了衡量网络整体传输效能,本文将网络中所有节点对的效能平均值定义为全局网络效能,第 k 次故障后全局网络效能 E_k 可定义为:

$$E_k = \frac{1}{n_G n_L} \sum_{m=1}^{n_G} \sum_{n=1}^{n_L} \frac{\min\{\omega_m \omega_n\}}{d_{mn}^k} \quad (25)$$

式中: ω_m 为节点 m 处发电机/气源的权重,其值为发生故障后发电机/气源节点的节点总注入功率; ω_n 为节点 n 处电网/气网负荷的权重,其值为发生故障后电网/气网负荷节点的节点总注入功率; d_{mn}^k 为第 k 次故障后节点对 (m,n) 间最短电气/燃气距离,其值为两点之间的等值阻抗; n_G 和 n_L 分别为发电机/气源节点的总数和负荷节点的总数。

全局网络效能可以衡量系统全局传输能力,全局网络效能越高,节点间的能源传输与转换效率越高,系统的供能可靠性越高。为了进一步反映故障对于系统传输能力的影响程度,定义全局网络效能损失率 W_k 为:

$$W_k = (E_0 - E_k) / E_0 \quad (26)$$

式中: E_0 为未发生任何故障时的全局网络效能值。全局网络效能损失率越大表明故障对网络的能量传输影响越大,从而表明故障对系统运行破坏程度越大。

2.3 电-气互联网络连锁故障评估流程

为分析电网与天然气网的相依特性对两网间故障传播的影响,本文考虑天然气网随机故障对电网连锁故障的影响以及电网随机故障对天然气网连锁故障的影响,采用蒙特卡洛故障模拟以考虑故障发生的随机性。本文天然气网初始故障集主要包括气源的供应中断,电网故障集主要包括在实际运行情况下较为常见的传输线路 $N-1$ 断线故障以及发电机组的故障。基于此,电-气互联网络连锁故障影响分析流程如附录A图A1所示。

3 算例分析

基于上文提出的电-气互联网络故障评估模型,本文采用改进的IEEE 39节点电力系统和比利时20节点天然气系统组成电-气互联测试网络进行连锁故障评估分析,如附录B图B1所示。将IEEE 39节点电力系统节点30、31、39处的发电机组设置为燃气轮机机组,分别由天然气系统的节点7、9、16供应

天然气进行发电;将比利时20节点天然气系统的节点2、14、17处的气源设置为P2G气源,分别通过电力系统节点7、27、38供气。在电网和天然气网的故障集内进行蒙特卡洛故障模拟,将最大仿真次数设置为 $k_{\max} = 200$,天然气网准稳态过程设置时间间隔 $\Delta t = 1 \text{ min}$ ^[21]。

3.1 天然气网发生故障对电网连锁故障的影响

考虑到电网的不同负荷水平会影响受扰动后系统形成的孤岛结构以及系统的稳态运行功率平衡条件,系统故障后需要切除的负荷也会被影响^[13]。为反映电网受故障扰动的不同影响,本文将分析电网不同负荷水平下天然气网故障对电网连锁故障的影响,设置如下4种场景进行分析:场景1,不考虑天然气网故障的影响,负荷水平为初始负荷水平;场景2,考虑天然气网故障的影响,设置初始负荷水平为中间负荷;场景3:考虑天然气网故障的影响,取中间负荷的1.2倍为高峰负荷;场景4,考虑天然气网故障的影响,取中间负荷的80%为低谷负荷。

设置传输功率占比为30%,定义 α 为负荷损失率大于等于对应 C_k 的概率,定义 β 为全局网络效能损失率大于等于对应 W_k 的概率。图3给出了不同场景下电网连锁故障的负荷损失率和全局网络效能损失率的分布曲线。仿真结果表明在天然气网随机故障的影响下,电网发生故障后负荷损失率大幅增加,全局网络效能损失率也显著增加,供电效率及可靠性受到影响。其次,随着电网负荷水平的提高,负荷损失率和全局网络效能损失率随之增加,电网故障受天然气网故障的影响也随之增加。气网随机故障下气源出力减少,导致气负荷被切除,燃气轮机出力下降,故障严重时可能导致燃气轮机被切除,故障影响传播至电网,进而影响电网负荷的供应,加剧电网发生连锁故障的风险。在电网负荷水平较高的场景下,系统备用容量相对较小,当天然气网发生故障时,增加了电网的运行风险以及发生连锁故障的风险。当电网发生连锁故障时,对负荷的供应严重减少,供电效率及可靠性受到严重影响,整个系统的运行状态被严重破坏。

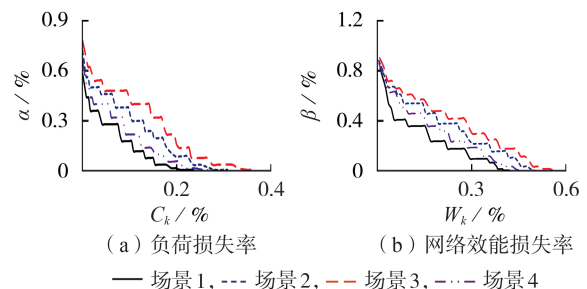


图3 电网受天然气网故障影响的仿真对比

Fig.3 Simulative comparison of power grid affected by fault of natural gas network

3.2 电网发生故障对天然气网连锁故障的影响

设置传输功率占比为 30%,图 4 给出了电网随机故障和电网正常运行 2 种情况下天然气网连锁故障的负荷损失率和全局网络效能损失率的分布曲线。仿真结果表明在电网随机故障的影响下,天然气网发生故障后的负荷损失率大幅增加,全局网络效能损失率也显著增加,供气效率及可靠性受电网故障影响。这是由于电网发生故障可能会引起燃气轮机的出力突增,容易致使气网的节点气压越限,增加气网连锁故障的风险;此外,电网发生故障会影响 P2G 设备的正常运行,此时耦合能量传输将受到一定的阻碍,电网故障传播至天然气网,影响天然气网供气。由此可见,电网发生故障会增加气网的运行风险,影响气网的供气效率以及可靠性。

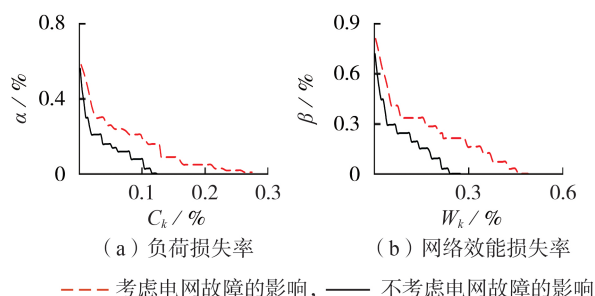


图 4 天然气网受电网故障影响的仿真对比

Fig.4 Simulative comparison of natural gas network affected by fault of power grid

此外,若电网故障造成电驱动压缩机供电不足,压缩机将被迫停机,故障影响传播至气网,造成天然气网局部气压水平下降,加剧天然气网发生连锁故障的风险。因此,运用仿真对电网故障造成电驱动压缩机停机这一情形进行分析,附录 B 图 B2 给出了压缩机 C1 在 t_3 时刻停机的状况下天然气网准稳态过程中各时刻的节点气压。由图可见,压缩机停机将引起天然气网气压的波动,而由于管存特性的存在,天然气网在准稳态过程的状态变化下逐渐过渡至下一个稳态,从 t_4 时刻到 t_8 时刻各节点气压逐渐向新的稳态发展,过渡到扰动后新的稳态。天然气网管存特性能够缓冲气压波动,减缓扰动对于系统状态的瞬时影响,降低系统发生连锁故障的风险。计及天然气网准稳态过程分析故障对天然气网运行状态造成的影响更为实际合理。

3.3 传输功率占比对故障传播的影响

为了进一步分析电-气互联网络相依特性对故障在两网间传播的影响,本文将对比分析传输功率占比分别为 15%、30%、45% 的不同场景下电-气互联网络的故障传播特性。对不同场景下的电-气互联网络进行初始潮流计算,对比电网与天然气网无耦合时,传输功率占比为 15%、30%、45% 下的电-气

互联网络全局网络效能值分别提高了 20.018%、37.094%、55.571%,可见电网与天然气网通过能量双向耦合提高了电-气互联网络的全局网络传输效能,提高了能量的传输效率和能源的利用效率。

图 5 给出了不同传输功率占比的场景下,考虑电网随机故障影响的天然气网连锁故障的负荷损失率和全局网络效能损失率的分布曲线。由图可见,随着传输功率占比的增加,电网与天然气网间耦合程度提高,电网随机故障对天然气网故障的影响程度不断增加,天然气网故障后的负荷损失率和全局网络效能损失率随之增加,天然气网发生连锁故障的风险也随之增加。当传输功率占比为 45% 时,考虑电网随机故障影响下的天然气网故障最严重时造成最多约 31.26% 负荷的损失以及 56.14% 全局网络效能的损失,对系统的运行状态破坏程度较高,引起严重连锁故障,表明此时气网运行存在较大的风险。从仿真结果得出电-气互联网络在双向能量流动的状态下传输功率占比的增加能够提高能量传输效率和传输效能,但同时会加剧故障在两网间的传播,增加了系统整体的运行风险,更易引发电-气互联网络连锁故障。

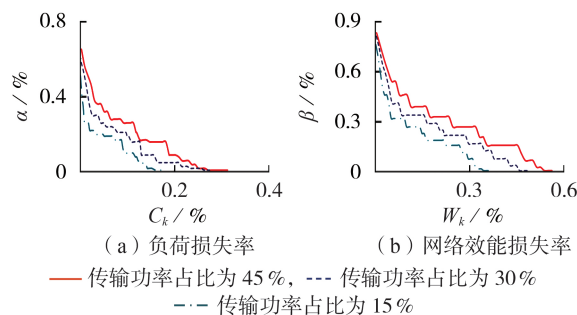


图 5 传输功率占比对故障传播的影响对比

Fig.5 Comparison of influences of ratio of transmission power on fault propagation

4 结论

在电网和天然气网耦合程度不断加深的背景下,本文提出了一种考虑电网与天然气网相依特性的电-气互联网络故障传播的影响分析方法。所提方法采用负荷损失率和全局网络效能损失率指标评估分析了电-气互联网络的故障传播及其对系统运行的影响,对比分析了不同耦合程度对故障在两网间传播的影响。算例仿真结果表明:①电-气互联网络通过双向能量流动,提高了能量传输效率和传输效能,同时引发了故障在两网间的传播,增加了系统整体运行风险,两网间的故障传播容易导致连锁故障的发生;②随着电网负荷水平的增加,天然气网故障对电网连锁故障的影响也随之增加,会影响电网供电效率及可靠性,增加了电网的运行风险;③计及

天然气网准稳态过程分析故障对天然气网运行状态造成的影响更为实际合理,天然气网管存特性能够缓冲扰动对系统状态的瞬时影响,降低系统发生连锁故障的风险;④由于电-气互联网络间相依特性的存在,耦合功率的传输将引发故障在两网间的传播,随着两网耦合程度增加,电网随机故障对天然气网连锁故障的影响程度随之增加,系统整体运行风险也随之增加。

本文研究成果对电-气互联网络的安全稳定运行分析具有重要意义,上述结论充分说明研究电-气互联网络故障传播的影响特性分析是迫切且必要的。下一步研究将会关注故障暂态过程,拓展耦合能源种类,进一步进行多能流耦合系统间的故障传播特性分析和系统安全运行的相关研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [2] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [3] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1042-1056.
- [4] 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 integrated power and natural gas regional energy system considering the state of natural gas network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1305.
- [5] 苏洁莹,林楷东,张勇军,等. 基于统一潮流建模及灵敏度分析的电-气网络相互作用机理[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 43-52.
SU Jieying, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Interaction mechanism of electricity-gas network based on unified power flow modeling and sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 43-52.
- [6] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 3-11.
CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 3-11.
- [7] PETER F. The troubled link between gas and electricity grids[J]. IEEE Spectrum, 2016, 53(6): 11-12.
- [8] 严超,别朝红,王灿,等. 面向新一代能源系统的风险评估研究现状及展望[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 12-22.
YAN Chao, BIE Zhaozhong, WANG Can, et al. Risk assessment studies for new generation energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 12-22.
- [9] 郁嘉嘉,肖勇,陆文升,等. 基于复杂网络理论的区域综合能源系统可靠性评估[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 1-9.
HUAN Jiajia, XIAO Yong, LU Wensheng, et al. Reliability evaluation method for regional integrated energy system applying complex network theory[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 1-9.
- [10] 郁嘉嘉,隋宇,张小辉. 综合能源系统级联失效及故障连锁反应分析方法[J]. 电力建设, 2019, 40(8): 84-92.
HUAN Jiajia, SUI Yu, ZHANG Xiaohui. Analysis method for cascade failure and fault chain reaction of integrated energy system[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(8): 84-92.
- [11] 包铭磊,杨阳,丁一,等. 考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障评估[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 41-49.
BAO Minglei, YANG Yang, DING Yi, et al. Assessment of cascading failures in power system considering effects of natural gas system[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 41-49.
- [12] 马瑞,王大朔. 考虑天然气N-1的多能流系统静态安全耦合分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1627-1636, 1859.
MA Rui, WANG Dashuo. Static security coupling analysis of multi-energy flow system considering natural gas system N-1 contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1627-1636, 1859.
- [13] 桑茂盛,包铭磊,丁一,等. 考虑天然气网影响的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 34-46.
SANG Maosheng, BAO Minglei, DING Yi, et al. Identification of vulnerable lines in power grid considering impact of natural gas network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 34-46.
- [14] PEDRO S M, CORREA-POSADA C M. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3355-3357.
- [15] 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 power-gas interconnection integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47.
- [16] 张琦泓. 气电综合系统故障传播机理及天然气管线故障对策研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
ZHANG Qihong. Research on failure propagation mechanism in IEGS and defense strategy against pipeline failure in natural gas system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [17] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 463(7291): 1025-1028.
- [18] 汪勋婷. 基于相互依存网络的综合能源系统脆弱性评估方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2018.
WANG Xunting. Study on interdependent network vulnerability assessment for integrated energy system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [19] 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.
- [20] 孙宏斌,张伯明,相年德. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 3-5.
SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. New sensitivity analysis method under quasi-steady-state for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 3-5.

- [21] 钟俊杰,李勇,曾子龙,等. 综合能源系统多能流准稳态分析与计算[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):22-30.
ZHONG Junjie,LI Yong,ZENG Zilong,et al. Quasi-steady-state analysis and calculation of multi-energy flow for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):22-30.
- [22] BURCIN C E,KWABENA A P,RICARDO B L,et al. An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2014,61:410-420.
- [23] CHEN Zhen,DU Wenbo,CAO Xianbin,et al. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack[J]. Chaos,Solitons and Fractals,2015,80:7-12.

作者简介:



苏洁莹

苏洁莹(1997—),女,广东广州人,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网优化运行(E-mail:1004918817@qq.com);

邓丰强(1986—),男,广东韶关人,实验师,硕士,主要研究方向为智能配电网与能源互联网的运行(E-mail:epfqdeng@scut.edu.cn);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制(E-mail:zhangjun@scut.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Failure assessment method of integrated electricity and natural gas network considering interdependent characteristics

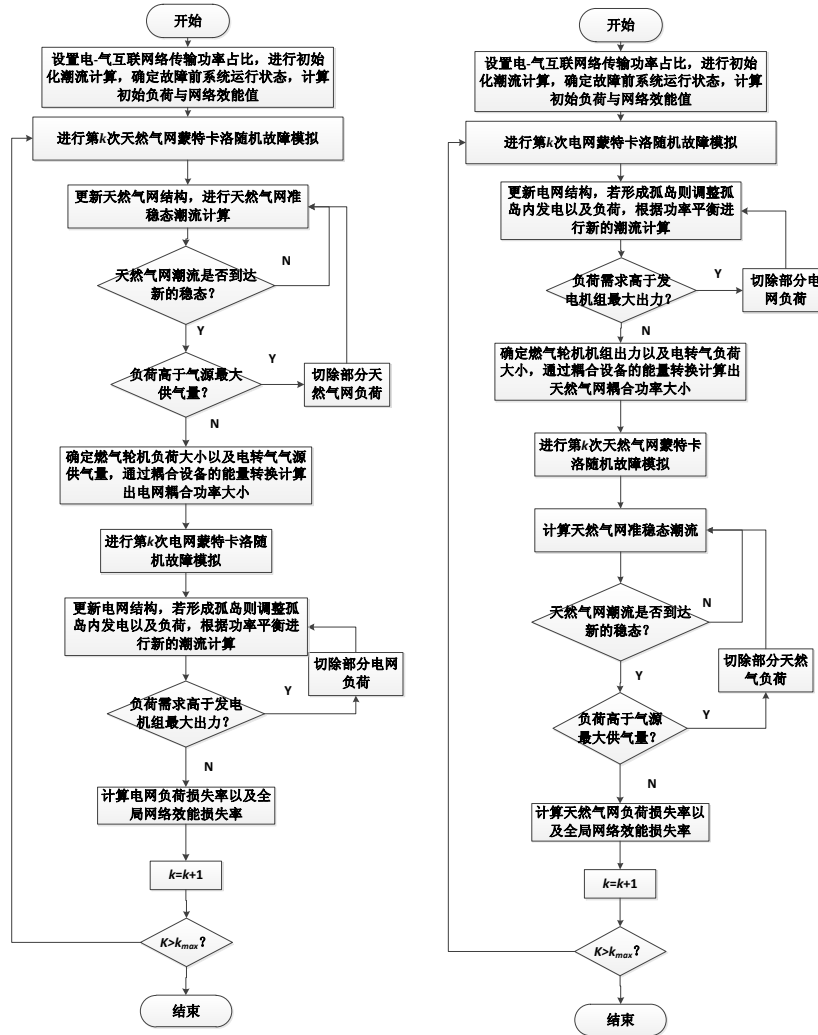
SU Jieying,DENG Fengqiang,ZHANG Yongjun

(Research Center of Smart Energy Technology,School of Electric Power,
South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: With the deepening of coupling degree between power grid and natural gas network, the interdependent characteristics between the two systems lead new problems about safe operation of system, which increases the risk of cascading failures in integrated electricity and natural gas system. Therefore, an analysis method of the impact of failure propagation for integrated electricity and natural gas system considering the interdependent characteristics between power grid and natural gas network is proposed. The interdependent characteristics of integrated electricity and natural gas network and the propagation mechanism of failures between the two networks are analyzed, based on this, the characteristics of failure propagation between the two networks under different coupling degrees of power grid and natural gas network are analyzed. Furthermore, the quasi-steady-state power flow equations of integrated electricity and natural gas system considering the slow time-scale dynamic characteristics of natural gas network are constructed. And then, from the perspective of energy supply efficiency and reliability of system, the impact of failure propagation on operation of integrated electricity and natural gas system is evaluated and analyzed by using the indicators of loss rate of load and loss rate of global network effectiveness, so that the assessment model of cascading failures of integrated electricity and natural gas system is constructed.

Key words: integrated electricity and natural gas network; interdependent characteristics; cascading failure; failure assessment; power grid; natural gas network

附录 A



(a) 气网随机故障对电网连锁故障的影响分析 (b) 电网随机故障对气网连锁故障的影响分析

图A1 电-气互联网络连锁故障分析流程

Fig.A1 Flowchart of cascading failures analysis of integrated electricity and natural gas network

附录 B

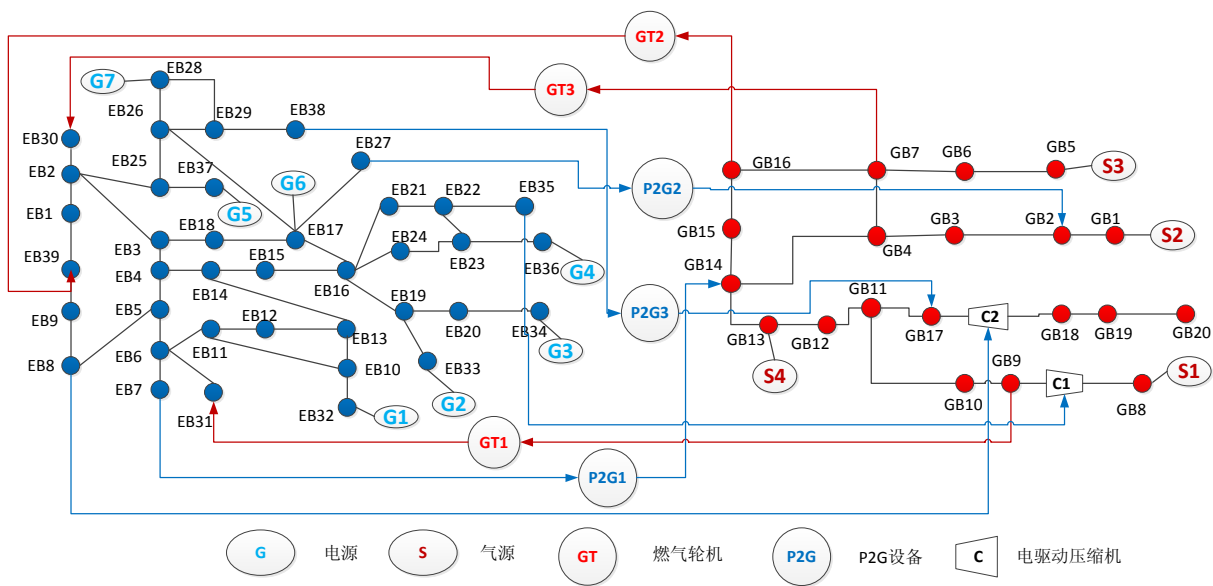


图 B1 算例仿真结构示意图

Fig.B1 Schematic diagram of test system

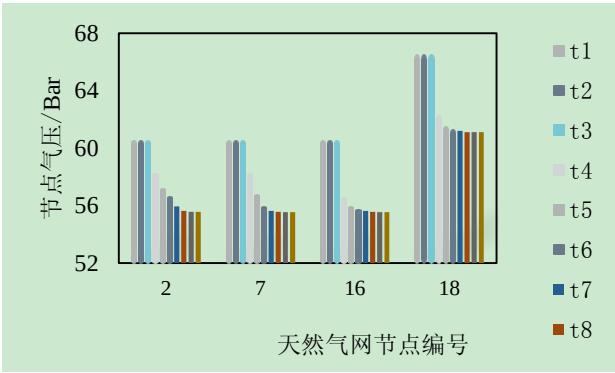


图 B2 天然气网准稳态过程的节点气压

Fig.B2 Load pressure of natural gas network during quasi-steady state process