

考虑风光出力不确定性的 电-气互联系统脆弱线路辨识

南璐, 何川, 刘天琪

(四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Vulnerable Lines Identification of Integrated Electricity and Natural Gas Systems Considering Wind and Photovoltaic Generation Uncertainties

NAN Lu, HE Chuan, LIU Tianqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: With the intensified integration of electricity and natural gas system, any disturbance or failure of the vulnerable line in one subsystem may propagate to another system, consequently resulting in a failure of the whole integrated system. To this end, a novel method to identify vulnerable lines of integrated electricity and natural gas system was proposed. Firstly, a stochastic co-optimization model of integrated electricity and natural gas systems considering wind and photovoltaic generation uncertainties was constructed to access the normal and contingency operation conditions of the integrated system. Specially, vulnerability of lines in the integrated electricity and natural gas system was discussed from the point of topological vulnerabilities and functional vulnerabilities via local centrality and power flow changing entropy, respectively. The line vulnerability index, considering both topological and functional vulnerabilities, was constructed to identify vulnerable lines for the integrated electricity and natural gas system. Finally, the geodesic vulnerability and generation/load imbalances were used to quantify influences when the vulnerable lines are out of service. Numerical results of a 6-bus electricity/7-node gas system and a 24-bus electricity/20-node gas system illustrate the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: integrated electricity and natural gas system; vulnerable line; local centrality; entropy; stochastic optimization

摘要: 在电力系统和天然气系统紧密耦合的背景下, 任意子系统中任意脆弱线路的扰动或故障都可能会传播到另一个

子系统, 进而引起整个电-气互联系统的故障。为此, 提出一种电-气互联系统脆弱线路辨识方法。首先, 提出考虑风光出力不确定性的电-气互联系统协调调度随机优化模型, 求解得到电-气互联系统故障前后的运行状态; 而后, 基于局部集中度和潮流变化熵分别从拓扑结构脆弱性和运行特性脆弱性两方面分析电-气互联系统中线路的脆弱性, 构建综合考虑线路拓扑结构脆弱性和运行特性脆弱性的电-气互联系统线路脆弱度指标, 对互联系统的脆弱线路进行辨识。通过计算脆弱线路断开后互联系统的测地线脆弱度 (geodesic vulnerability) 及供需不平衡量, 对所辨识的脆弱线路进行评估。6 节点电网-7 节点气网和 24 节点电网-20 节点气网 2 个电-气互联系统的算例分析结果验证了所提脆弱线路辨识方法的有效性。

关键词: 电-气互联系统; 脆弱线路; 局部集中度; 熵; 随机优化

0 引言

近年来, 随着燃气机组装机规模的不断扩大和电转气(power to gas, P2G)技术的日益成熟, 电力系统与天然气系统的耦合关系愈加紧密。2017 年, 以色列天然气发电用气量占比达 60%^[1]; 2017—2019 年, 美国发电用气量增长了 22.03%, 燃气机组已成为美国天然气系统第一大负荷类型^[2]。在我国, 天然气也于能源结构调整中迎来了发展机遇, 燃气轮机关键技术不断突破, 应用市场不断扩大^[3]。2018 年, 我国天然气消费量达 2803 亿立方米, 同比增长 17.5%, 其中发电用气占比达 17.3%; 预计 2050 年前, 我国天然气消费将一直保持增长趋势^[4]。与此同时, 日趋成熟的 P2G 技术也能够减缓新能源装机规模扩大引起的弃风、弃光现象, 且能

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFH0029)。

Project Supported by Science and Technology Program of Sichuan Province (2021YFH0029).

有效缓解输电线路阻塞情况^[5-8]。

在电、气系统紧密耦合的背景下,任意子系统任意脆弱线路的扰动或故障都可能传播到另一个系统,进而引发互联系统的故障。本文将断开后对互联系统影响较大的线路定义为脆弱线路^[9-10],电、气系统间的耦合关系越紧密,互联系统的脆弱线路越难以辨识。目前,与电-气互联系统的相关研究多是基于系统的建模^[11],短期协调运行^[12-14],以及长期联合规划^[15-16],少有研究对互联系统中线路的脆弱性进行分析。已有针对电力系统和天然气系统的脆弱线路辨识多局限于电、气子系统,忽略了两系统间的互联关系。

目前,对电、气系统的脆弱线路辨识方法主要分为两部分:拓扑结构分析法^[10,17]和运行特性分析法^[18-20]。拓扑结构分析法主要以系统拓扑为核心,利用图论中度数、介数等概念辨识脆弱线路。运行特性分析法则着重考虑系统的运行特征,通过潮流熵等指标识别对系统大规模故障有关键作用的脆弱线路。文献^[10,17]分别通过拓扑结构分析辨识了电力系统的脆弱线路与天然气系统的脆弱管道。文献^[18-19]基于运行特性分析法对电网脆弱线路进行研究。文献^[20]通过综合考虑节点度与潮流熵指标,提出了城市电网脆弱线路辨识方法。上述方法均从电、气子系统出发,未考虑到两系统的互联关系。部分学者从电、气系统的耦合特性出发,对互联系统的脆弱性进行研究,文献^[21-22]基于最短路径、网络直径等指标从拓扑角度分析了互联系统的脆弱性,但未考虑到其实际运行特性。文献^[23]分别从拓扑和运行特性角度分析了电-气互联系统在随机攻击下的脆弱性,但未综合考虑其拓扑、运行特性,未对互联系统中线路的脆弱性进行分析。文献^[24]建立了考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障模型。文献^[9]综合考虑拓扑脆弱度及潮流熵脆弱度,研究了受天然气系统影响的电网脆弱线路辨识方法。上述文献研究了受天然气系统影响的电力系统脆弱线路,未考虑到天然气管道的脆弱度。因此,综合考虑电力系统与天然气系统的互联关系,对脆弱输电线路和天然气传输管道(以下简称“脆弱线路”)进行辨识具有重要意义。

鉴于此,本文将电、气系统看作一个整体,通过充分考虑两系统间的互联关系,提出一种考虑风光出力不确定性的电-气互联系统脆弱线路辨识方法。一方面,本文建立的互联系统脆弱度指标综合

考虑线路的拓扑结构及运行特性脆弱度,能够随电-气互联系统运行情况的变化动态反映线路脆弱性。在对线路运行特性脆弱度进行计算时,本文所提方法考虑了线路从电-气互联系统中断开后各节点的供需不平衡量。另一方面,本文建立的考虑风光出力不确定性的电-气互联系统协调调度随机优化模型通过对燃气机组、P2G设备以及电驱动压缩机设备的建模,更加全面地考虑两系统间互联关系的紧密程度,以便更准确地分析互联系统中线路的拓扑结构和运行特性脆弱性。此外,所提模型还考虑了脆弱线路故障后互联系统自身的调节能力,能够更为准确地反映故障后互联系统的运行状态。通过计算电-气互联系统的测地线脆弱度(geodesic vulnerability)及供需不平衡量,分别从拓扑结构和运行特性两方面计算脆弱线路从互联系统中断开后的影响。最后,分别用6节点电网-7节点气网和24节点电网-20节点气网的电-气互联系统验证所提互联系统脆弱线路辨识方法的有效性。

1 电-气互联系统协调调度随机优化模型

电力系统与天然气系统间互联关系的紧密程度受耦合设备运行状态的影响,对于电-气互联系统在不同时段下的不同运行情况而言,耦合设备的启停状态可能不同,因而互联系统的拓扑结构及线路潮流分布都可能不同。因此,确定互联系统的运行状态是脆弱线路辨识的首要环节。本文提出电-气互联系统的协调调度随机优化模型,在考虑风光出力不确定性的情况下,求取电-气互联系统故障前后的最优运行状态,以便更准确地分析互联系统中线路的拓扑结构和运行特性脆弱性。

1.1 目标函数

本节建立的电-气互联系统协调调度随机优化模型目标为最小化电、气系统的运行成本及电力系统弃风弃光的惩罚成本之和。

$$\min \sum_{t \in L} \left\{ \sum_{g \in \mathcal{M}} C_g^{\text{fuel}} [F_g(P_{g,t}^b) \cdot I_{g,t}^b + s_{g,t}^{\text{up},b} + s_{g,t}^{\text{down},b}] + \sum_{k \in C} (C_k^{\text{gas}} \cdot G_{k,t}^b) + \sum_{s \in K} (C_s^{\text{gas}} \cdot Q_{s,t}^{\text{out},b}) + \sum_{h \in \mathcal{H}} (C_h^{\text{P2G}} \cdot P_{h,t}^b) + \sum_{v \in N} C_v^{\text{voll}} \cdot (P_{v,t}^{\text{max}} - P_{v,t}^b) + \sum_{a \in \mathcal{A}} C_a^{\text{voll}} \cdot (P_{a,t}^{\text{max}} - P_{a,t}^b) \right\} \quad (1)$$

式中: C_g^{fuel} 为非燃气发电机组 g 的燃料价格; F_g 为发电机组 g 的热耗曲线; $P_{g,t}^b$ 为正常运行方式 b 下发电机组 g 在时段 t 的调度出力安排; $I_{g,t}^b$ 为发电机组 g 在时段 t 的工作状态,其值为1时,表示 g 处

于运行状态, 其值为0时, 表示 g 处于关闭状态;
 $s_{g,t}^{\text{up},b}$ 和 $s_{g,t}^{\text{down},b}$ 分为发电机组 g 的开/停机燃料消耗;
 C_k^{gas} 为天然气气井 k 的生产成本; $G_{k,t}^b$ 为气井 k 在
 时段 t 的出气量安排; C_s^{gas} 为储气设备 s 的运行成
 本; $Q_{s,t}^{\text{out},b}$ 为储气设备 s 在时段 t 的出气量; C_h^{P2G} 为
 P2G 设备 h 的运行成本; $P_{h,t}^b$ 为 P2G 设备 h 在时段
 t 消纳的电量; C_v^{voll} 和 C_a^{voll} 分别为弃光和弃风的惩
 罚成本; $P_{v,t}^{\text{max}}$ 和 $P_{a,t}^{\text{max}}$ 分别为光伏电厂 v 和风电场 a
 的在时段 t 的预测出力; $P_{v,t}^b$ 和 $P_{a,t}^b$ 分别为光伏电厂
 和风电场在时段 t 的实际调度出力。

1.2 约束条件

1) 电力系统约束。

式(2)–(16)为电力系统的运行约束, 其中,
 式(2)为发电机组 g 有功出力的约束; 式(3)为 P2G
 设备 h 的消纳电量限值约束; 式(4)对连接在同一个
 节点上的发电机组和 P2G 设备的工作状态进行了
 限制, 即电网同一个节点上的发电机组和 P2G 设备
 不能同时运行; 式(5)、(6)分别为发电机组 g 的上/
 下爬坡约束; 式(7)、(8)分别为发电机组 g 最小开/
 停机时间约束; 式(9)和式(10)为发电机组 g 在时段
 t 的开/停机燃料消耗约束; 式(11)为节点功率平衡
 约束; 式(12)–(14)通过直流潮流模型的计算对输电
 线路的最大传输容量进行约束; 式(15)、(16)分别为
 风电场和光伏电厂最大可调度出力约束。

$$P_g^{\text{min}} \cdot I_{g,t}^b \leq P_{g,t}^b \leq P_g^{\text{max}} \cdot I_{g,t}^b, \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (2)$$

$$0 \leq P_{h,t}^b \leq P_h^{\text{max}} \cdot I_{h,t}^b, \quad h \in \text{@}, t \in \text{L} \quad (3)$$

$$I_{g,t}^b + I_{h,t}^b \leq 1, \quad g, h \in N(e), h \in \text{@}, t \in \text{L} \quad (4)$$

$$P_{g,t}^b - P_{g,t-1}^b \leq R_g^{\text{UR}} \cdot I_{g,t-1}^b + P_g^{\text{min}} \cdot (I_{g,t}^b - I_{g,t-1}^b) + P_g^{\text{max}} \cdot (1 - I_{g,t}^b), \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (5)$$

$$P_{g,t-1}^b - P_{g,t}^b \leq R_g^{\text{DR}} \cdot I_{g,t}^b + P_g^{\text{min}} \cdot (I_{g,t-1}^b - I_{g,t}^b) + P_g^{\text{max}} \cdot (1 - I_{g,t-1}^b), \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (6)$$

$$(X_{g,t-1}^{\text{on}} - T_g^{\text{on}}) \cdot (I_{g,t-1}^b - I_{g,t}^b) \geq 0, \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (7)$$

$$(X_{g,t-1}^{\text{off}} - T_g^{\text{off}}) \cdot (I_{g,t}^b - I_{g,t-1}^b) \geq 0, \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (8)$$

$$s_{g,t}^{\text{up},b} \geq U_g \cdot (I_{g,t}^b - I_{g,t-1}^b), \quad s_{g,t}^{\text{up},b} \geq 0, \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (9)$$

$$s_{g,t}^{\text{down},b} \geq D_g \cdot (I_{g,t-1}^b - I_{g,t}^b), \quad s_{g,t}^{\text{down},b} \geq 0, \quad g \in \text{?}, t \in \text{L} \quad (10)$$

$$\sum_{g \in N(e) \cap \text{?}} P_{g,t}^b + \sum_{a \in N(e) \cap \text{@}} P_{a,t}^b + \sum_{v \in N(e) \cap \text{N}} P_{v,t}^b - \sum_{s(l) \in N(e) \cap \text{D}} P_{l,t}^b + \sum_{r(l) \in N(e) \cap \text{D}} P_{l,t}^b - \sum_{h \in N(e) \cap \text{@}} P_{h,t}^b = \sum_{d \in N(e) \cap \text{<}} P_{d,t} + \sum_{c \in N(e) \cap \text{=}} P_{c,t}, \quad e \in \text{=}, t \in \text{L} \quad (11)$$

$$-P_l^{\text{max}} \leq P_{l,t}^b \leq P_l^{\text{max}}, \quad l \in \text{D}, t \in \text{L} \quad (12)$$

$$P_{l,t}^b = [\theta_{s(l),t}^b - \theta_{r(l),t}^b] / x_l, \quad l \in \text{D}, t \in \text{L} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \theta_e^{\text{min}} \leq \theta_{e,t}^b \leq \theta_e^{\text{max}} \\ \theta_{\text{ref},t}^b = 0 \end{cases}, \quad e \in \text{=}, t \in \text{L} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{a,t}^b \leq P_{a,t}^{\text{max}}, \quad a \in \text{9}, t \in \text{L} \quad (15)$$

$$0 \leq P_{v,t}^b \leq P_{v,t}^{\text{max}}, \quad v \in \text{N}, t \in \text{L} \quad (16)$$

式中: 上标为 min/max 的参量分别表示变量的最小/
 最大限值; $I_{h,t}^b$ 为 P2G 设备 h 在时段 t 的工作状态;
 $R_g^{\text{UR}} / R_g^{\text{DR}}$ 为发电机组 g 的上/下爬坡速率; $X_{g,t-1}^{\text{on}} / X_{g,t-1}^{\text{off}}$ 为发电机组 g 累计开/停机时间; $T_g^{\text{on}} / T_g^{\text{off}}$ 为
 发电机组 g 的最小开/停机时间; U_g / D_g 为发电机组
 g 的开/停机成本; $N(e)$ 为与节点 e 直接连接的电力
 系统设备的集合; $s(l)/r(l)$ 为输电线路 l 的送/受端节
 点; $P_{l,t}^b$ 为输电线路 l 在时段 t 的有功潮流; $P_{d,t}$ 为
 电负荷 d 在时段 t 的大小; $P_{c,t}^b$ 为电驱动压缩机设备
 c 在时段 t 消耗的电功率; x_l 为输电线路 l 的电抗值;
 $\theta_{e,t}^b$ 为节点 e 在时段 t 的相角大小; $\theta_{\text{ref},t}^b$ 为参考节点
 在时段 t 的相角大小; D 、 = 、 = 分别为输电线路、
 电驱动压缩机设备以及电网节点的集合。式(7)、(8)
 为非线性约束, 不便于求解, 本文采用文献[25]所
 使用的方法对其进行线性化处理。

2) 天然气系统约束。

式(17)–(27)为天然气系统的运行约束, 其中,
 式(17)为气井 k 的出气容量约束; 式(18)、(19)为储
 气设备 s 的储气量约束; 式(20)、(21)分别为储气设
 备 s 的天然气流入/流出速率约束; 式(22)为节点潮
 流平衡约束; 式(23)计算了气驱动压缩机设备 c 在
 时段 t 消耗的天然气量; 式(24)、(25)为天然气管道
 的传输潮流约束; 式(26)为天然气网络中节点气压
 值约束; 式(27)为压缩机设备 c 两端节点气压的关
 系约束。

$$G_k^{\text{min}} \leq G_{k,t}^b \leq G_k^{\text{max}}, \quad k \in \text{C}, t \in \text{L} \quad (17)$$

$$E_{s,t}^b = E_{s,t-1}^b + Q_{s,t}^{\text{in},b} - Q_{s,t}^{\text{out},b}, \quad s \in \text{K}, t \in \text{L} \quad (18)$$

$$E_s^{\text{min}} \leq E_{s,t}^b \leq E_s^{\text{max}}, \quad s \in \text{K}, t \in \text{L} \quad (19)$$

$$Q_s^{\text{min}} \leq Q_{s,t}^{\text{in},b} \leq Q_s^{\text{max}}, \quad s \in \text{K}, t \in \text{L} \quad (20)$$

$$Q_s^{\text{min}} \leq Q_{s,t}^{\text{out},b} \leq Q_s^{\text{max}}, \quad s \in \text{K}, t \in \text{L} \quad (21)$$

$$\sum_{k \in G(f) \cap \text{C}} G_{k,t}^b + \sum_{h \in G(f) \cap \text{@}} G_{h,t}^b - \sum_{s(mn) \in G(f) \cap \text{MN}} G_{mn,t}^b + \sum_{r(mn) \in G(f) \cap \text{MN}} G_{mn,t}^b + \sum_{s \in G(f) \cap \text{K}} (Q_{s,t}^{\text{out},b} - Q_{s,t}^{\text{in},b}) = \sum_{g \in G(f) \cap \text{?}} G_{g,t}^b + \sum_{w \in G(f) \cap \text{O}} G_{w,t} + \sum_{c \in G(f) \cap \text{>}} G_{c,t}^b, \quad f \in \text{>}, t \in \text{L} \quad (22)$$

$$Q_{c,t}^b = (1 - e_c^{\text{com}}) \cdot Q_{c,t}^b, \quad c \in ?; t \in L \quad (23)$$

$$G_{mn,t}^b = \text{sgn}(\pi_{m,t}^b, \pi_{n,t}^b) \cdot K_{mn} \cdot \sqrt{|\pi_{m,t}^b - \pi_{n,t}^b|}, \quad t \in L, m, n \in >, mn \in MN \quad (24)$$

$$\text{sgn}(\pi_{m,t}^b, \pi_{n,t}^b) = \begin{cases} 1, & \pi_{m,t}^b \geq \pi_{n,t}^b \\ -1, & \pi_{m,t}^b < \pi_{n,t}^b \end{cases}, m, n \in >, t \in L \quad (25)$$

$$\pi_m^{\min} \leq \pi_{m,t}^b \leq \pi_m^{\max}, \quad m \in >, t \in L \quad (26)$$

$$\pi_{m,t}^b \leq \tau_c^2 \cdot \pi_{n,t}^b, \quad m, n \in >, t \in L \quad (27)$$

式中: $E_{s,t}^b$ 为储气设备 s 在时段 t 的储气量; $Q_{s,t}^{\text{in},b}$ 为储气设备 s 在时段 t 的进气量; $G_{h,t}^b$ 为 P2G 设备 h 在时段 t 生产的天然气量; $G_{mn,t}^b$ 为天然气管道 mn 在时段 t 的潮流; $G_{g,t}^b$ 为燃气发电机组 g 在时段 t 消耗的天然气量; $G_{w,t}^b$ 为天然气负荷 w 在时段 t 的大小; $G_{c,t}^b$ 为气驱动压缩机设备 c 在时段 t 消耗的天然气量; $Q_{c,t}^b$ 为压缩机设备 c 在时段 t 压缩的天然气量; e_c^{com} 为压缩机设备的效率; K_{mn} 为计算天然气管道潮流的常数, 其值受天然气管道特性的影响; $\pi_{m,t}^b$ 为天然气节点 m 在时段 t 的节点气压的平方; $\text{sgn}(\pi_{m,t}^b, \pi_{n,t}^b)$ 表示天然气管道 mn 在时段 t 的潮流方向, 其值为 1 时表示天然气潮流从节点 m 流至节点 n , 其值为 -1 时表示天然气潮流从节点 n 流至节点 m ; τ_c 为压缩机设备 c 的气体压缩常数; $G(f)$ 为与节点 f 直接连接的天然气网络设备的集合; \circ 、 MN 、 $>$ 分别为天然气负荷节点、天然气管道、天然气节点的集合。

由于本文研究的时间尺度为小时级别, 因此在对天然气系统进行建模时, 忽略电力系统与天然气系统间的潮流传输速度差异, 采用稳态潮流模型对天然气系统进行建模, 以降低模型的时间复杂度^[14]。此外, 也可通过暂态潮流模型^[12]以及管道存气量模型^[13]对天然气系统进行建模, 进一步刻画两系统间的潮流传输速度差异。电-气互联系统中天然气管道潮流大小与天然气节点气压间的关系为非线性的, 不便于求解, 本文通过引用大 M 法^[13]对其进行线性化处理。

3) 电-气互联约束。

本文通过对燃气机组、P2G 设备及电驱动压缩机设备的建模, 充分考虑电力系统与天然气系统间的互联关系。一方面, 燃气机组作为电-气互联系统间的媒介, 通过消耗天然气产生电能, 实现天然气系统向电力系统的能量流动; 另一方面, P2G 设

备通过消纳风、光发电量, 完成了电能向天然气的转换; 此外, 天然气系统中的电驱动压缩机设备通过消耗电能对天然气进行加压传输, 进一步增强了电力系统同天然气系统的互联关系。两系统之间主要通过燃气机组、P2G 设备以及电驱动压缩机设备互相联系、相互影响。式(28)反映了燃气发电机组 g 在时段 t 出力与耗气量的关系; 式(29)计算了电驱动压缩机设备 c 在时段 t 消耗的电功率; 式(30)反映了 P2G 设备 h 在时段 t 产气量与耗电量的关系。

$$G_{g,t}^b = \frac{[F_g(P_{g,t}^b) \cdot I_{g,t}^b + S_{g,t}^{\text{up},b} + S_{g,t}^{\text{down},b}]}{\text{HHV}}, g \in ?M, t \in L \quad (28)$$

$$P_{c,t}^b = (1 - e_c^{\text{com}}) \cdot Q_{c,t}^b \cdot \text{HHV} / \Phi, \quad c \in =; t \in L \quad (29)$$

$$G_{h,t}^b = e_h^{\text{P2G}} \cdot P_{h,t}^b \cdot \Phi / \text{HHV}; h \in @, t \in L \quad (30)$$

式中: e_h^{P2G} 为 P2G 设备 h 的效率; HHV 为高热值, 其值为 1.026MBtu/kcf; Φ 为能量转换系数, 其值为 3.4MBtu/(MW·h)。

4) 不确定性约束。

本节提出的考虑风光出力不确定性的电-气互联系统协调调度随机优化模型中, 风、光出力的调度安排根据其预测出力进行优化, 然而现实情况中, 风、光的出力总是随机波动的, 因此需要考虑其不确定性。本文采用随机优化思想对风、光出力的不确定性进行处理, 首先采用拉丁超立方抽样方法^[26]生成大量出力误差满足正态分布的风、光出力场景, 而后利用快进约简法^[27]对生成的场景进行削减, 剔除出现概率极小的场景, 合并分布特性相似的场景, 最终得到几个典型的风、光出力场景, 并将其加入到电-气互联系统的协调调度随机优化模型中, 进行发电机组和气井运行状态及出力安排的优化。考虑典型风、光出力场景的约束见附录 A。

1.3 故障情况下的调度模型

电-气互联系统中的线路因故障 ∇ 从互联系统中断开时, 发电机组及气井可通过调节自身出力维持互联系统的安全运行, 然而, 当互联系统自身调节能力不足以维持平衡时, 则需要切除部分电/气负荷或发电机组/气井, 从而产生电-气互联系统的供需不平衡量。此时, 调度模型的优化目标为最小化互联系统的供需不平衡量, 其计算方法为

$$\min \sum_{V \in \Omega} \sum_{e \in <} v_{1,e,t}^{\nabla} + \sum_{e \in ? \cup \cup} v_{2,e,t}^{\nabla} + \left(\sum_{f \in \circ} v_{3,f,t}^{\nabla} + \sum_{f \in \cup @} v_{4,f,t}^{\nabla} \right) \cdot \text{HHV} / \Phi \quad (31)$$

式中： $v_{1,e,t}^\nabla$ 和 $v_{2,e,t}^\nabla$ 分别为电力系统的需求和供给不平衡量； $v_{3,f,t}^\nabla$ 和 $v_{4,f,t}^\nabla$ 分别为天然气系统的需求和供给不平衡量； Ω 为故障 ∇ 的集合。

电-气互联系统在故障情况下的约束与考虑风、光不确定性的约束组成类似。其中，电力系统的节点功率平衡约束式(32)和天然气系统的节点潮流平衡约束式(35)中分别加入了松弛变量，对故障情况下的供需不平衡量进行刻画。式(32)中， $v_{1,e,t}^\nabla$ 和 $v_{2,e,t}^\nabla$ 分别表示电力系统的需求不平衡量和供给不平衡量，电力系统中每个节点上的需求不平衡量小于该节点所连接的电负荷和电驱动压缩机设备耗电量之和式(33)，每个节点上的供给不平衡量小于该节点所连接的发电机组出力之和式(34)。式(35)中， $v_{3,f,t}^\nabla$ 和 $v_{4,f,t}^\nabla$ 分别为天然气系统的需求不平衡量和供给不平衡量，天然气系统中每个节点上的需求不平衡量小于该节点所连接的气负荷、燃气机组耗气量和气驱动压缩机设备耗气量之和式(36)，每个节点上的供给不平衡量小于该节点所连接的气井出力、P2G设备产气量及储气设备净出气量之和式(37)。

$$\begin{aligned} & \sum_{g \in N(e) \cap ?} P_{g,t}^\nabla + \sum_{a \in N(e) \cap ?} P_{a,t}^\nabla + \sum_{v \in N(e) \cap \mathbb{N}} P_{v,t}^\nabla - \\ & \sum_{s(l) \in N(e) \cap \mathbb{D}} P_{l,t}^\nabla + \sum_{r(l) \in N(e) \cap \mathbb{D}} P_{l,t}^\nabla - \sum_{h \in N(e) \cap \mathbb{Q}} P_{h,t}^\nabla + \\ & \sum_{e \in N(e) \cap <} v_{1,e,t}^\nabla - \sum_{e \in N(e) \cap (? \cup \mathbb{D} \cup \mathbb{N})} v_{2,e,t}^\nabla = \\ & \sum_{d \in N(e) \cap <} P_{d,t} + \sum_{c \in N(e) \cap =;} P_{c,t}^\nabla, \quad t \in \mathbb{L}, \nabla \in \Omega \quad (32) \end{aligned}$$

$$0 \leq \sum_{e \in N(e) \cap <} v_{1,e,t}^\nabla \leq \sum_{d \in N(e) \cap <} P_{d,t} + \sum_{c \in N(e) \cap =;} P_{c,t}^\nabla, \quad t \in \mathbb{L}, \nabla \in \Omega \quad (33)$$

$$0 \leq \sum_{e \in N(e) \cap (? \cup \mathbb{D} \cup \mathbb{N})} v_{2,e,t}^\nabla \leq \sum_{g \in N(e) \cap ?} P_{g,t}^\nabla + \sum_{a \in N(e) \cap ?} P_{a,t}^\nabla + \sum_{v \in N(e) \cap \mathbb{N}} P_{v,t}^\nabla, \quad t \in \mathbb{L}, \nabla \in \Omega \quad (34)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{k \in G(f) \cap \mathbb{C}} G_{k,t}^\nabla + \sum_{h \in G(f) \cap \mathbb{Q}} G_{h,t}^\nabla - \sum_{s(mn) \in G(f) \cap MN} G_{mn,t}^\nabla + \\ & \sum_{r(mn) \in G(f) \cap MN} G_{mn,t}^\nabla + \sum_{s \in G(f) \cap \mathbb{K}} (Q_{s,t}^{\text{out},\nabla} - Q_{s,t}^{\text{in},\nabla}) + \\ & \sum_{f \in G(f) \cap \mathbb{O}} v_{3,f,t}^\nabla - \sum_{f \in G(f) \cap (\mathbb{C} \cup \mathbb{Q})} v_{4,f,t}^\nabla = \sum_{g \in G(f) \cap ?M} G_{g,t}^\nabla + \\ & \sum_{w \in G(f) \cap \mathbb{O}} G_{w,t} + \sum_{c \in G(f) \cap ?;} G_{c,t}^\nabla, \quad t \in \mathbb{L}, \nabla \in \Omega \quad (35) \end{aligned}$$

$$0 \leq \sum_{f \in G(f) \cap \mathbb{O}} v_{3,f,t}^\nabla \leq \sum_{g \in G(f) \cap ?M} G_{g,t}^\nabla + \sum_{w \in G(f) \cap \mathbb{O}} G_{w,t} + \sum_{c \in G(f) \cap ?;} G_{c,t}^\nabla, \quad t \in \mathbb{L}, \nabla \in \Omega \quad (36)$$

$$0 \leq \sum_{f \in G(f) \cap (\mathbb{C} \cup \mathbb{Q})} v_{4,f,t}^\nabla \leq \sum_{k \in G(f) \cap \mathbb{C}} G_{k,t}^\nabla + \sum_{h \in G(f) \cap \mathbb{Q}} G_{h,t}^\nabla + \sum_{s \in G(f) \cap \mathbb{K}} (Q_{s,t}^{\text{out},\nabla} - Q_{s,t}^{\text{in},\nabla}), \quad t \in \mathbb{L}, \nabla \in \Omega \quad (37)$$

2 互联系统线路脆弱度计算

本节分别提出基于局部集中度的拓扑结构脆弱性和基于潮流变化熵的运行特性脆弱性分析方法，计算互联系统中线路的脆弱度，并据此提出综合考虑线路拓扑结构和运行特性脆弱性的互联系统线路脆弱度指标。本文研究的电-气互联系统脆弱线路包括：电力系统输电线路，天然气系统输气管道，两系统间的联络线路(燃气机组、电驱动压缩机设备以及P2G设备分别与电、气系统间的联络线路)。

1) 拓扑结构脆弱性。

本节将电-气互联系统中线路 $i-j$ 的拓扑结构脆弱度 VT_{i-j} 定义为其两端节点的局部集中度^[28]之积，计算方法为：

$$C_L(i) = \sum_{q \in \Gamma(i)} \sum_{p \in \Gamma(q)} N(p) \quad (38)$$

$$VT_{i-j} = C_L(i) \times C_L(j) \quad (39)$$

式中： $C_L(i)$ 为节点 i 的局部集中度； $N(p)$ 为与节点 p 直接相连的节点 q 及与节点 q 直接相连的节点的数目； $\Gamma(i)$ 为与节点 i 直接相连的节点集合。

线路的拓扑结构脆弱度 VT_{i-j} 基于复杂网络理论中的局部集中度概念，考虑了线路 $i-j$ 与其周围节点的连接紧密程度，能够反映线路 $i-j$ 在互联系统中的脆弱性。 VT_{i-j} 的值越大，表示线路 $i-j$ 在互联系统中与其他线路的联系越多，起到的潮流传输作用越大，一旦其从互联系统中断开，将影响到整个互联系统的潮流传输。

2) 运行特性脆弱性。

本节基于潮流变化熵提出电-气互联系统中线路 $i-j$ 的运行特性脆弱度 VF_{i-j} 。熵常用于反映网络的稳定程度，其计算方法如式(40)所示^[29]。

$$H = - \sum_{t=1}^n p(x_t) \ln(p(x_t)) \quad (40)$$

式中： n 为信息源 x 取值的个数； $p(x_t)$ 为信息源 x 取第 t 个值时的概率。

当线路 $i-j$ 从电-气互联系统中断开时，互联系统的潮流将发生变化。此时，线路 u 的潮流变化量为 δP_u ，其计算方法如式(41)所示。本文将节点 k 的潮流变化量定义为其需求不平衡量，供给不平衡量，

以及与其连接的线路潮流变化量之和，如式(42)所示。由于电力系统与天然气系统的潮流计量单位不同，因此通过单位转换因子将天然气潮流转化为电潮流进行统一计算。

$$\delta P_u = \begin{cases} |P_u^b - P_u^v|, & u \in D \\ |G_u^b - G_u^v|, & u \in MN \end{cases} \quad (41)$$

$$\delta P_k = \begin{cases} \sum_{u \in N(k)} \delta P_u + v_{1,k}^v + v_{2,k}^v, & k \text{ 为电网节点} \\ (\sum_{u \in G(k)} \delta P_u + v_{3,k}^v + v_{4,k}^v) \cdot \text{HHV} / \phi, & k \text{ 为气网节点} \end{cases} \quad (42)$$

线路 $i-j$ 断开后引起的节点 k 上的潮流变化比率为 $r_{i-j,k}$ ，如式(43)所示。综合考虑电-气互联系统中的所有节点，得到 $i-j$ 断开后互联系统的潮流变化熵为 H_{i-j} ，计算方法如式(44)所示。结合上述分析，提出线路 $i-j$ 的运行特性脆弱度 VF_{i-j} ，如式(45)所示。

$$r_{i-j,k} = \frac{\delta P_k}{\sum_{k \in ?} \delta P_k} \quad (43)$$

$$H_{i-j} = \sum_{k \in ?} -r_{i-j,k} \ln r_{i-j,k} \quad (44)$$

$$VF_{i-j} = \sum_{k \in ?} \delta P_k / H_{i-j} \quad (45)$$

式中 $? =$ 为电-气互联系统中所有节点的集合。

潮流变化熵 H_{i-j} 反映了线路 $i-j$ 从互联系统中断开后对其造成的影响， H_{i-j} 的值越小， $i-j$ 断开后对互联系统的冲击越大，即互联系统所受影响越大。互联系统的节点潮流变化量之和 $\sum_{k \in ?} \delta P_k$ 越大，表示 $i-j$ 断开后对互联系统的潮流传输影响越大。因此，线路 $i-j$ 的运行特性脆弱度 VF_{i-j} 能够从电-气互联系统的运行状态角度反映线路 $i-j$ 的脆弱性， VF_{i-j} 的值越大，表示线路 $i-j$ 断开后对互联系统的潮流传输影响越大。

3) 线路脆弱度指标。

综合考虑线路的拓扑结构脆弱度与运行特性脆弱度，将电-气互联系统线路 $i-j$ 的脆弱度指标 V_{i-j} 定义为

$$V_{i-j} = \omega_T \cdot VT_{i-j} + \omega_F \cdot VF_{i-j} \quad (46)$$

式中 ω_T 和 ω_F 分别为拓扑结构脆弱度和运行特性脆弱度的权重。 VT_{i-j} 通过节点的局部集中度反映了线路的拓扑结构脆弱度， VF_{i-j} 通过潮流变化熵反映了线路的运行特性脆弱度，因此，线路脆弱度指标 V_{i-j} 能够对电-气互联系统中的脆弱线路进行合理辨识。 V_{i-j} 的值越大，表示线路 $i-j$ 的脆弱度越高，即线路

$i-j$ 对互联系统的潮流传输重要度越高，断开后对互联系统的影响越大。对于电-气互联系统的不同运行情况而言，燃气机组、P2G 设备以及电驱动压缩机设备的启停状态可能不同，因此互联系统的拓扑结构及线路潮流分布都可能不同，从而线路的脆弱度也会不同。线路脆弱度指标 V_{i-j} 为动态指标，其值会随着互联系统运行情况的变化而变化。

3 互联系统脆弱线路辨识流程

算法 1(辨识电-气互联系统脆弱线路)总结了本文所提考虑风光出力不确定性的电-气互联系统脆弱线路辨识流程，如下所示：

步骤 1：根据第 1 节所提电-气互联系统协调调度随机优化模型(1)–(30)，(A1)–(A20)，求取互联系统无故障时的运行状态；

步骤 2：基于步骤 1 所求电、气系统间耦合设备的运行状态，确定互联系统拓扑结构，根据第 2 节所提拓扑结构脆弱性计算方法求取各条线路的拓扑结构脆弱度(38)、(39)；

步骤 3：每次断开互联系统中的 1 条线路，根据第 1 节所提电-气互联系统协调调度随机优化模型求取故障后互联系统的运行状态，根据第 2 节所提运行特性脆弱性计算方法求取各条线路的运行特性脆弱度(41)–(45)；

步骤 4：根据第 2 节所提线路脆弱度指标计算互联系统各条线路的脆弱度 V_{i-j} (46)；

步骤 5：对线路进行脆弱性排序，筛选高脆弱度线路；

步骤 6：分别根据测地线脆弱度和互联系统供需不平衡量，计算脆弱线路断开后对电-气互联系统造成的影响。

4 算例仿真分析

本文分别以 6 节点电网-7 节点气网和 24 节点电网-20 节点气网互联系统为例，验证所提脆弱线路辨识方法的有效性。所提电-气互联系统协调调度随机优化模型通过 GUROBI 求解器进行求解。所有算例均由 1 台配置为 i7, 3.20GHz, 8G 的计算机完成仿真计算。

4.1 6 节点电网-7 节点气网互联系统

6 节点电网-7 节点气网互联系统^[30]的拓扑结构如图 1 所示，共包含 7 条输电线路，5 条天然气传输管道，1 台电驱动压缩机设备，1 台 P2G 设备，

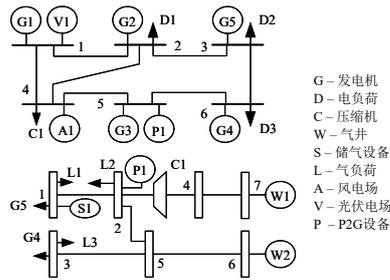


图 1 6 节点电网-7 节点气网互联系统拓扑图

Fig. 1 Topology of the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system

1 台储气设备, 3 台非燃气机组(G1, G2, G3), 2 台燃气机组(G4, G5), 1 个风电场, 1 个光伏电厂, 2 个天然气井, 3 个电负荷以及 3 个气负荷。

根据所提脆弱线路辨识方法, 取 $\omega_T = \omega_F = 50\%$, 计算 6 节点电网-7 节点气网互联系统各线路的脆弱度指标 V_{ij} , 目的是兼顾互联系统中线路的拓扑结构脆弱度和运行特性脆弱度。故障情况下互联系统协调调度模型的求解时间为 0.0690s。时段 1(运行的机组为 G1 和 G2, P2G 设备未运行)和时段 12(运行的机组为 G1, G2, G5, P2G 设备运行)的排序结果如表 1 所示。时段 12 ω_T 和 ω_F 取不同权重值时脆弱线路辨识的结果及分析见表 2。为进行对比分析, 基于线路的度数指标^[31]对互联系统的脆弱线路进行辨识(简称为 DV 法), 其结果也在表 1 中给出。表 1 中, 编号带有 E 和 N 的线路分别为电力系统的输电线路和天然气系统的传输管道, 编号带有 C 的线路为电驱动压缩机设备与电力系统的联络线路, 编号带有 G 和 P 的线路分别为燃气机组和 P2G 设备与天然气系统的联络线路。

如表 1 所示, 线路的脆弱度指标 V_{ij} 值越大, 脆弱度排序越靠前, 表示该线路断开后对电-气互联系统的影响越大。对于 6 节点电网-7 节点气网互联系统而言, 时段 1 和时段 12 电、气系统间的互联状态不同, 因而拓扑结构不同, 互联系统中的线路数量也不同。对于时段 1 而言, 电、气系统间的互联通道仅为电驱动压缩机设备的联络线, 互联关系较弱, 由于天然气系统结构较为简单, 因此脆弱度排序较高的线路多为输电线路; 相比之下, 时段 12 中, 电、气系统间的互联通道包含电驱动压缩机设备、燃气机组以及 P2G 设备的联络线, 因此天然气系统的线路脆弱度排序有所提高。可以得出结论, 随着互联系统运行状态及耦合关系强弱的改变, 互联系统中线路的脆弱度也会随之改变。

表 1 6 节点电网-7 节点气网互联系统线路脆弱度排序
Table 1 Rank of vulnerable lines in the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system

排序	线路编号			
	时段 1		时段 12	
	所提方法(V_{ij} 值)	DV 法	所提方法(V_{ij} 值)	DV 法
1	E2-E4(0.8664)	E2-E4	E1-E4(0.8231)	E2-E4
2	E4-E5(0.7099)	E1-E2	C1-E4(0.7986)	E1-E2
3	E1-E2(0.6494)	E1-E4	G5-N1(0.5775)	E1-E4
4	E2-E3(0.5964)	E2-E3	N1-N2(0.5411)	E2-E3
5	N5-N6(0.5393)	E4-E5	E2-E4(0.5302)	E4-E5
6	C1-V4(0.4953)	N2-N5	N4-N7(0.5220)	N1-N2
7	E5-E6(0.4782)	C1-V4	E4-E5(0.5082)	N2-N5
8	E1-E4(0.4655)	E3-E6	E1-E2(0.4537)	E3-E6
9	E3-E6(0.4639)	N1-N2	E2-E3(0.3800)	C1-V4
10	N2-N5(0.3872)	E5-E6	N3-N5(0.3016)	E5-E6
11	N1-N2(0.3624)	N3-N5	E5-E6(0.2716)	P1-N2
12	N4-N7(0.2437)	N5-N6	P1-N2(0.2637)	G5-N1
13	N3-N5(0.2029)	N4-N7	N2-N5(0.2244)	N3-N5
14	—	—	E3-E6(0.2201)	N5-N6
15	—	—	N5-N6(0.2189)	N4-N7

表 2 ω_r 取值不同时线路脆弱度排序
Table 2 Rank of vulnerable lines with different ω_r

序	线路编号(V_{ij} 值)			
	ω_r 20%	ω_r 40%	ω_r 60%	ω_r 80%
1	C1-E4(0.8819)	E1-E4(0.8277)	E1-E4(0.8185)	E2-E4(0.8121)
2	E1-E4(0.8370)	C1-E4(0.8263)	C1-E4(0.7708)	E1-E4(0.8092)
3	N4-N7(0.8088)	G5-N1(0.6429)	E2-E4(0.6242)	E4-E5(0.7313)
4	G5-N1(0.7738)	N4-N7(0.6176)	E4-E5(0.5825)	C1-E4(0.7153)
5	N1-N2(0.6145)	N1-N2(0.5656)	N1-N2(0.5167)	E1-E2(0.5717)
6	N3-N5(0.4289)	E2-E4(0.4363)	G5-N1(0.5120)	E2-E3(0.5179)
7	E1-E2(0.3356)	E4-E5(0.4338)	E1-E2(0.4930)	N1-N2(0.4678)
8	N5-N6(0.2967)	E1-E2(0.4143)	N4-N7(0.4263)	P1-N2(0.3996)
9	E4-E5(0.2851)	N3-N5(0.3440)	E2-E3(0.4260)	G5-N1(0.3812)
10	E2-E4(0.2484)	E2-E3(0.3341)	P1-N2(0.3090)	E5-E6(0.3576)
11	E2-E3(0.2422)	N5-N6(0.2448)	E5-E6(0.3002)	N2-N5(0.3366)
12	E5-E6(0.1855)	E5-E6(0.2429)	N2-N5(0.2618)	E3-E6(0.3002)
13	E3-E6(0.1400)	P1-N2(0.2184)	N3-N5(0.2591)	N4-N7(0.2351)
14	P1-N2(0.1278)	E3-E6(0.1934)	E3-E6(0.2468)	N3-N5(0.1743)
15	N2-N5(0.1122)	N2-N5(0.1870)	N5-N6(0.1930)	N5-N6(0.1412)

由于 DV 法仅考虑到电-气互联系统中线路的拓扑结构特性, 因此脆弱线路的辨识结果可能存在误差。以脆弱度排序最高的线路为例, 时段 1 和时段 12 基于 DV 法辨识到的最脆弱的线路均为 E2-E4, 而本文所提方法在时段 12 辨识到的最脆弱线路为 E1-E4。对于时段 12 而言, 发电机 G1, G2, G5 和 P2G 设备均处于运行状态, 因此最脆弱的线

路为 E1-E4，该线路不仅是 G1, V1, A1 的重要潮流送出线路，而且承载着流向电驱动压缩机设备 C1 的潮流，相比之下，脆弱度高于线路 E2-E4。供需不平衡量的计算结果也证实了 E1-E4 断开后，对互联系统的影响更大。

如表 2 所示，随着拓扑结构脆弱度权重 ω_T 的增加，处于电-气互联系统拓扑结构图中中间位置的线路脆弱度排序提升较大，如 E2-E4 等。随着运行特性脆弱度权重 ω_F 的增加，处于电-气互联系统拓扑结构图边缘位置但对潮流传输影响较大的线路脆弱度排序提升较大，如 N4-N7 等。

为验证所提脆弱线路辨识方法的有效性，测地线脆弱度指标^[21]被用于评估脆弱线路对互联系统的影响：依次从互联系统中断开线路后，测地线脆弱度指标值下降的越快，意味着断开的线路在互联系统中的脆弱度越高，测地线脆弱度指标值越小，表示线路断开后对互联系统的影响越大。本文所提脆弱线路辨识方法及 DV 法的测地线脆弱度结果如图 2 所示，按照脆弱度排序依次断开互联系统中的每条脆弱线路，求取互联系统的测地脆弱度值，即首先断开脆弱度最高的线路，计算系统测地脆弱度值；在此基础上，断开脆弱度次高的线路，计算系统测地脆弱度值；而后依次断掉脆弱度排序靠前的线路，计算系统测地脆弱度值，直至断掉互联系统中的所有线路。为进一步分析对比，随机产生 50 组断开线路的排序结果并计算其测地线脆弱度(简称为 RV 法)，取 50 次测地线脆弱度结果的平均值进行对比分析，其结果也在图 2 中给出，其中时段 1 随机结果的平均方差值为 0.0100，时段 12 随机结果的平均方差值为 0.0060。

由图 2 可知，对于时段 1 和时段 12 而言，本

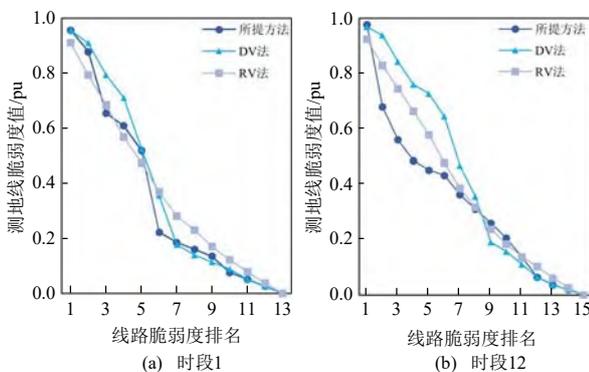


图 2 6 节点电网-7 节点气网互联系统测地线脆弱度
Fig. 2 Geodesic vulnerability of the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system

文所提脆弱线路辨识方法的结果均优于 DV 法和 RV 法，当依次从互联系统中断开脆弱线路后，本文所提方法的测地线脆弱度指标下降的更快。由于测地线脆弱度指标仅考虑到互联系统的拓扑结构，为进一步验证所提脆弱线路辨识方法的有效性，以时段 12 为例，按照脆弱度排序依次从电-气互联系统中移除前 5 条脆弱线路，对互联系统的供需不平衡量进行计算，评估脆弱线路断开后造成的影响，结果如表 3 所示。表 3 中，当移除燃气机组与天然气系统的联络线路 G5-N1 后，互联系统的供需不平衡量值减小，这是由于燃气机组在将天然气转化为电能的过程中，效率低于 100%，因而将 G5-N1 断开后，互联系统的供需不平衡量会变少。

表 3 6 节点电网-7 节点气网互联系统供需不平衡量
Table 3 Generation/load imbalances result of the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system

依次断开的脆弱线路数	所提方法		DV 法	
	线路编号	互联系统不平衡量/(MW·h)	线路编号	互联系统不平衡量/(MW·h)
1	E1-E4	19.39	E2-E4	0.00
2	C1-E4	849.10	E1-E2	25.80
3	G5-N1	803.84	E1-E4	229.53
4	N1-N2	1567.77	E2-E3	298.66
5	E2-E4	1610.67	E4-E5	344.93

如表 3 所示，本文所提方法辨识到的脆弱线路依次从互联系统中断开后，导致的互联系统供需不平衡量值更大，说明本文所提方法辨识到的线路比 DV 法辨识到的线路脆弱度更高。综上所述，本文所提脆弱线路辨识方法同时考虑了电-气互联系统中线路的拓扑结构脆弱性和运行特性脆弱性，比 DV 法的脆弱线路辨识结果更为准确。

为研究对电力系统或天然气系统影响较大的脆弱线路，以时段 12 为例，分别设置电-气互联系统协调调度模型在故障情况下的优化目标为最小化电力系统的供需不平衡量和最小化天然气系统的供需不平衡量，计算线路的脆弱度 $V_{i,j}$ ，互联系统线路的脆弱度排序结果如表 4 所示。断开后对电力系统影响较大的脆弱线路多为电力系统的支路，天然气系统的支路脆弱度排序均比较靠后。相比之下，断开后对天然气系统影响较大的脆弱线路多为其自身的支路，断开后对天然气系统影响最大的脆弱线路为 C1-E4，该支路为联系电驱动压缩机设备与天然气系统的关键支路，一旦断开，电驱动压缩机设备将停止工作，影响气井 W1 的天然气送出。

表 4 6 节点电网-7 节点气网互联系统时段 12 线路脆弱度排序

Table 4 Rank of vulnerable lines in the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system in hour 12

排序	线路编号	
	对电网影响较大的脆弱线路	对气网影响较大的脆弱线路
1	E2-E4	C1-E4
2	E4-E5	N4-N7
3	E1-E4	N1-N2
4	E1-E2	E2-E3
5	E2-E3	E2-E4
6	P1-N2	E4-E5
7	G5-N1	E1-E4
8	E3-E6	N3-N5
9	E5-E6	P1-N2
10	N3-N5	E5-E6
11	C1-E4	E1-E2
12	N5-N6	N5-N6
13	N1-N2	N2-N5
14	N4-N7	E3-E6
15	N2-N5	G5-N1

为进一步研究电、气系统互联优化与分开优化对脆弱线路辨识的影响，分别将燃气机组、电转气设备以及电驱动压缩机设备抽象成单独的节点，固定耦合设备的出力，对电力系统与天然气系统分别进行优化，辨识其脆弱线路。时段 12 的脆弱线路辨识结果如表 5 所示。可以看出，电力系统与天然气系统分别优化时，电力系统的线路脆弱度排序变化较大，E1-E4 不再是电力系统最脆弱的线路，主要原因在于电、气系统分开优化时，电驱动压缩机设备 C1 被看作是电力系统的负荷，天然气系统不再通过 C1 对电力系统提供支持，因此线路 E1-E4 在电力系统中的脆弱度排序下降较多。

表 5 电、气系统互联优化与分开优化线路脆弱度排序
Table 5 Rank of vulnerable lines for co-optimization and independent optimization in electricity and natural gas systems

排序	互联优化		分开优化	
	脆弱线路编号	电网脆弱线路编号	气网脆弱线路编号	
1	E1-E4	E4-E5	N1-N2	
2	C1-E4	E2-E3	N4-N7	
3	G5-N1	E1-E4	N3-N5	
4	N1-N2	E3-E6	N2-N5	
5	E2-E4	E2-E4	N5-N6	
6	N4-N7	E5-E6	—	
7	E4-E5	E1-E2	—	

4.2 24 节点电网-20 节点气网互联系统

24 节点电网^[32]-20 节点气网^[33]互联系统的拓扑结构图见附录 B，故障情况下互联系统协调调度模型的求解时间为 0.1040s。时段 12 各线路脆弱度指标 V_{i-j} 的分布结果如图 3 所示。可以看出，在线路的脆弱度分布值为 0.56 左右时，互联系统的线路脆弱度分布曲线出现转折点。当线路的脆弱度值高于 0.56 时，线路的脆弱度值下降快速，而线路的脆弱度值低于 0.56 时，线路的脆弱度值下降缓慢。由此可得出结论，对于电-气互联系统而言，只存在少量的高脆弱度线路，这些线路对互联系统的安全运行起着至关重要的作用。

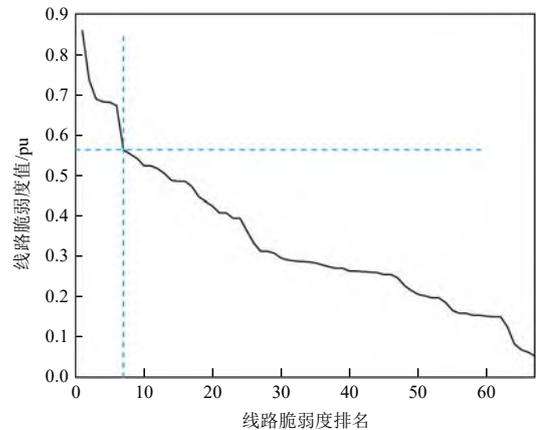


图 3 24 节点电网-20 节点气网互联系统线路脆弱度分布
Fig. 3 Distribution of line vulnerabilities in the 24 bus electricity-20 node natural gas integrated system

表 6 给出了基于所提方法及 DV 法的线路脆弱度排序，并依次从互联系统中移除前 25 条辨识到的脆弱线路，对其供需不平衡量进行计算，以评估脆弱线路断开后对互联系统造成的影响。表 6 中，编号为数字的线路为电力系统的输电线路，编号带有 N 的线路为天然气系统的传输管道，编号带有 G 的线路为燃气机组与天然气系统的联络线路。

表 6 24 节点电网-20 节点气网互联系统线路脆弱性分析
Table 6 Line vulnerabilities analysis result of the 24 bus electricity-20 node natural gas integrated system

依次断开 的脆弱线 路数	所提方法		DV 法	
	线路编号	互联系统不 平衡量 /(MW·h)	线路编号	互联系统不 平衡量 /(MW·h)
5	15;14;6;18;16	0.00	6;8;12;13;14	0.00
10	17;22;N5;13;29	4642.07	15;16;17;29;1	296.39
15	8;20;9;12;25	4987.28	2;4;9;23;24	441.29
20	26;N9;G20;N18;21	6158.17	3;10;18;19;20	656.64
25	1;4;2;10;N21	6378.40	21;28;5;11;22	947.54

DV 法只考虑电-气互联系统的拓扑结构特性，因此辨识到的排序前 25 的脆弱线路均为输电线路，相比之下，本文所提脆弱线路辨识方法同时考虑了互联系统的拓扑结构特性和运行状态特性，因此所辨识的脆弱线路中包含了更多的天然气系统传输管道。通过分别移除脆弱度排序靠前的前 5, 10, 15, 20, 25 条线路，计算互联系统的供需不平衡量，可以看出，与 DV 法相比，本文所提方法辨识到的脆弱线路从电-气互联系统中断开后，互联系统的供需不平衡量值更大。上述结果表明本文所提方法辨识到的线路比 DV 法辨识到的线路脆弱度更高。

为比较互联系统与电、气子系统脆弱线路辨识结果的差异，将所提脆弱线路辨识方法分别应用于 24 节点电力系统和 20 节点天然气系统，辨识其脆弱线路，排序前 10 的脆弱线路如表 7 所示。与表 6 中的线路脆弱度排序结果相比，可以发现电-气互联系统的脆弱线路并不是气、电子系统脆弱线路的简单组合。以天然气系统为例，子系统中脆弱度排序前三的天然气管道分别为 N9, N5 和 N8，而互联系统中脆弱度排序前三的天然气管道分别为 N5, N9 和 N18。因此，在对互联系统的脆弱线路进行分析时，应该考虑系统间的互联关系及子系统对彼此的影响。

为进一步研究风、光不确定性对电-气互联系统脆弱线路辨识结果的影响，忽略风、光出力的不确定性，分析互联系统中线路的运行特性脆弱性，并进一步求取各线路的脆弱度值 $V_{i,j}$ ，排序前 10 的脆弱线路对比结果如表 8 所示。由表 8 可知，考虑风光不确定性与忽略风光不确定性的脆弱线路辨识结果存在较大差异，即使两者辨识到的最脆弱线路均为线路 15，但两种情况下线路 15 的脆弱度值也不同。这是由于两种情况下，发电机组及天然气井的运行调度安排不同，相比之下，考虑风光不确定性的调度结果中，为减小风、光出力不确定性带来

表 7 电、气子系统线路脆弱度排序

Table 7 Rank of vulnerable lines in electricity and natural gas systems

脆弱线路排序	节点编号		脆弱线路排序	节点编号	
	天然气系统	电力系统		天然气系统	电力系统
1	N9	15	6	N16	20
2	N5	17	7	N18	13
3	N8	16	8	N19	12
4	N17	14	9	N12	18
5	N11	6	10	N14	21

表 8 考虑及忽略风光不确定性的脆弱线路辨识对比结果

Table 8 Comparison of vulnerable lines between considering and ignoring uncertainties of wind and photovoltaic power

脆弱线路排序	线路编号		脆弱线路排序	线路编号	
	忽略风光不确定性 ($V_{i,j}$ 值)	考虑风光不确定性 ($V_{i,j}$ 值)		忽略风光不确定性 ($V_{i,j}$ 值)	考虑风光不确定性 ($V_{i,j}$ 值)
1	15(0.6445)	15(0.8593)	6	29(0.5239)	17(0.6727)
2	16(0.6411)	14(0.7364)	7	55(0.5152)	22(0.5635)
3	17(0.6262)	6(0.6890)	8	13(0.5117)	N5(0.5517)
4	14(0.5995)	18(0.6824)	9	43(0.4887)	13(0.5416)
5	24(0.5298)	16(0.6806)	10	12(0.4650)	29(0.5234)

的风险，容量大、爬坡速度快的机组出力更多。因此，两种情况下电-气互联系统的潮流分布情况也不同，从而造成了脆弱线路辨识结果的差异。

5 结论

脆弱线路的准确辨识对电-气互联系统的安全运行具有重要意义，本文首先提出了考虑风光出力不确定性的电-气互联系统协调调度随机优化模型，分析互联系统故障前后的运行状态，而后综合考虑互联系统的拓扑结构特性和运行状态特性，提出脆弱线路辨识方法；最后基于测地线脆弱度和互联系统供需不平衡量指标，评估脆弱线路断开后对互联系统造成的影响。算例分析验证了所提出的脆弱线路辨识方法的有效性，同时也得出了以下结论：

1) 所提线路脆弱度指标为动态变化的指标，能够随电-气互联系统运行情况的改变有效辨识脆弱线路，所提脆弱线路辨识方法兼顾了线路的拓扑结构脆弱性和运行特性脆弱性，能够更准确地辨识互联系统的脆弱线路；

2) 对电-气互联系统而言，线路的脆弱性受系统耦合的影响，与其在电、气子系统中的脆弱性不同，本文所提出的脆弱线路辨识方法将电、气系统视作整体，能够有效地辨识互联系统中最为脆弱的部分线路；

3) 对电-气互联系统而言，只存在少量的高脆弱度线路，上述线路对互联系统的安全运行起着至关重要的作用，所提脆弱线路辨识方法能够辨识出高脆弱度线路，对其加强监控与保护能够降低电-气互联系统发生大规模故障的可能性。

参考文献

[1] Ministry of Energy. Gas markets[EB/OL]. Israel. <http://www.energy-sea.gov.il/English-Site/Pages/Gas%20Market>

- s/Natural-Gas-Domestic-Demand-.aspx.
- [2] Energy Information Administration. Natural gas monthly: June 2020[EB/OL]. U.S. https://www.eia.gov/naturalgas/monthly/pdf/ngm_all.pdf.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《依托能源工程推进燃气轮机创新发展的若干意见》的通知[R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2017.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on several opinions on promoting the innovative development of gas turbine relying on energy engineering[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2017 (in Chinese).
- [4] 国家能源局石油天然气司. 中国天然气发展报告(2019)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
Oil and gas Department of National Energy Administration, Report of Chinese natural gas developmen (2019)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019 (in Chinese).
- [5] 国家能源局. 2019年风电并网运行情况[EB/OL]. (2020-02-28). http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm.
National Energy Administration. Grid connected operation of wind power in 2019[EB/OL]. (2020-02-28). http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm (in Chinese).
- [6] 国家能源局. 2019年光伏发电并网运行情况[EB/OL]. (2020-02-28). http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827923.htm.
National Energy Administration. Grid connected operation of photovoltaic power in 2019[EB/OL]. (2020-02-28). http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm (in Chinese).
- [7] 窦迅, 赵文浩, 郎伊紫禾, 等. 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 165-173.
DOU Xun, ZHAO Wenhao, LANG Yizihe, et al. A review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas Technology[J]. Power system Technology, 2019, 43(1): 165-173(in Chinese).
- [8] 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).
- [9] 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): 34-43.
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): 34-43(in Chinese).
- [10] 王涛, 刘雨濛, 顾雪平, 等. 基于连锁故障时空图的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5962-5972.
WANG Tao, LIU Xuemeng, GU Xueping, et al. Vulnerable lines identification of power grid based on cascading fault space-time graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5962-5972(in Chinese).
- [11] DOKIC S B, RAJAKOVIC N L. Security modelling of integrated gas and electrical power systems by analyzing critical situations and potentials for performance optimization[J]. Energy, 2019, 184: 141-150.
- [12] LIU Cong, SHAHIDEHPOUR M, WANG Jianhui. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2011, 21(2): 025102.
- [13] HE Chuan, WU Lei, LIU Tianqi, et al. Robust co-optimization scheduling of electricity and natural gas systems via ADMM[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 658-670.
- [14] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 8-15, 121.
DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 8-15, 121(in Chinese).
- [15] 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 45-53.
HU Yuan, BIE Zhaohong, LI Gengfeng, et al. Integrated planning of natural gas network and composite power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 45-53(in Chinese).
- [16] ODETAYO B, KAZEMI M, MACCORMACK J, et al. A chance constrained programming approach to the integrated planning of electric power generation, natural gas network and storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6883-6893.
- [17] SU Huai, ZIO E, ZHANG Jinjun, et al. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 175: 79-91.
- [18] 张弘历, 李华强, 杨植雅, 等. 基于潮流增长率泰尔熵

的脆弱支路辨识[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2340-2346.
 ZHANG Hongli, LI Huaqiang, YANG Zhiya, et al. Identification of vulnerable line based on the Theil entropy of flow growth rate[J]. Power system Technology, 2017, 41(7): 2340-2346(in Chinese).

[19] FANG Ruiming, SHANG Rongyan, WANG Yandong, et al. Identification of vulnerable lines in power grids with wind power integration based on a weighted entropy analysis method[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(31): 20269-20276.

[20] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.
 CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Identification of vulnerable lines in urban power grid based on voltage grade and running state[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2124-2131(in Chinese).

[21] BEYZA J, GARCIA-PARICIO E, YUSTA J M. Ranking critical assets in interdependent energy transmission networks[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 172: 242-252.

[22] BEYZA J, YUSTA J M. Robustness assessment of the expansion of coupled electric power and natural gas networks under cascading failures[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(21): 5753-5760.

[23] OUYANG Min, HONG Liu, MAO Zijun, et al. A methodological approach to analyze vulnerability of interdependent infrastructures[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(5): 817-828.

[24] 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): 32-40.
 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): 32-40(in Chinese).

[25] WU Lei, SHAHIDEHPOUR M. Accelerating the Benders decomposition for network-constrained unit commitment problems[J]. Energy Systems, 2010, 1(3): 339-376.

[26] 艾小猛, 塔伊尔江·巴合依, 杨立滨, 等. 基于场景集的含风电电力系统旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 835-841.
 AI Xiaomeng, TAYIERJIANG B, YANG Libin, et al. Optimizing the spinning reserve in wind power system using scenario method[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 835-841(in Chinese).

[27] WU Lei, SHAHIDEHPOUR M, LI Tao. Stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 800-811.

[28] GAO Shuai, MA Jun, CHEN Zhumin, et al. Ranking the spreading ability of nodes in complex networks based on local structure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 403: 130-147.

[29] 王波, 王佳丽, 刘涤尘, 等. 基于高维随机矩阵理论的电网薄弱点评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1682-1691.
 WANG Bo, WANG Jiali, LIU Dichen, et al. Research on evaluating vulnerability of power network based on high-dimensional random matrix theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1682-1691(in Chinese).

[30] HE Chuan, ZHANG Xiaping, LIU Tianqi, et al. Distributionally robust scheduling of integrated gas-electricity systems with demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3791-3803.

[31] 史文超, 李晓明, 王孝琳, 等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 125-131.
 SHI Wenchao, LI Xiaoming, WANG Xiaolin, et al. Vulnerability assessment method for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 125-131(in Chinese).

[32] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

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

附录 A

式(A1)–(A10)为电力系统的不确定性约束；式(A11)–(A20)为天然气系统的不确定性约束。其中，上标 Δ 表示变量在场景 Δ 下的取值， \circ 为典型的风、光出力场景的集合。 $R_g^{\text{down}}/R_g^{\text{up}}$ 为发电机组 g 在不确定性场景下的上/下坡速率。

$$P_g^{\min} \cdot I_{g,t}^b \leq P_{g,t}^{\Delta} \leq P_g^{\max} \cdot I_{g,t}^b, \quad g \in ?, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A1})$$

$$0 \leq P_{h,t}^{\Delta} \leq P_h^{\max} \cdot I_{h,t}^{\Delta}, \quad h \in @, t \in L \quad (\text{A2})$$

$$I_{g,t}^b + I_{h,t}^{\Delta} \leq 1, \quad g, h \in N(e), h \in @, t \in L \quad (\text{A3})$$

$$-R_g^{\text{down}} \cdot I_{g,t}^b \leq P_{g,t}^{\Delta} - P_{g,t}^b \leq R_g^{\text{up}} \cdot I_{g,t}^b, \quad g \in ?, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A4})$$

$$\sum_{g \in N(e) \cap ?} P_{g,t}^{\Delta} + \sum_{a \in N(e) \cap \textcircled{9}} P_{a,t}^{\Delta} + \sum_{v \in N(e) \cap \textcircled{N}} P_{v,t}^{\Delta} - \sum_{s(l) \in N(e) \cap \textcircled{D}} P_{s,t}^{\Delta} + \sum_{r(l) \in N(e) \cap \textcircled{D}} P_{r,t}^{\Delta} - \sum_{h \in N(e) \cap \textcircled{0}} P_{h,t}^{\Delta} = \sum_{d \in N(e) \cap <} P_{d,t} + \sum_{c \in N(e) \cap =;} P_{c,t}^{\Delta}, \quad t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A5})$$

$$-P_l^{\max} \leq P_{l,t}^{\Delta} \leq P_l^{\max}, \quad l \in D, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A6})$$

$$P_{l,t}^{\Delta} = (\theta_{s(l)t}^{\Delta} - \theta_{r(l)t}^{\Delta}) / x_l, \quad l \in D, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A7})$$

$$\begin{cases} \theta_e^{\min} \leq \theta_{e,t}^{\Delta} \leq \theta_e^{\max} \\ \theta_{\text{ref},t}^{\Delta} = 0 \end{cases}, \quad e \in =, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A8})$$

$$0 \leq P_{a,t}^{\Delta} \leq P_a^{\max, \Delta}, \quad a \in \textcircled{9}, t \in L \quad (\text{A9})$$

$$0 \leq P_{v,t}^{\Delta} \leq P_v^{\max, \Delta}, \quad v \in N, t \in L \quad (\text{A10})$$

$$G_k^{\min} \leq G_{k,t}^{\Delta} \leq G_k^{\max}, \quad k \in C, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A11})$$

$$E_{s,t}^\Delta = E_{s,t-1}^\Delta + Q_{s,t}^{\text{in},\Delta} - Q_{s,t}^{\text{out},\Delta}, s \in K, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A12})$$

$$E_s^{\text{min}} \leq E_{s,t}^\Delta \leq E_s^{\text{max}}, s \in K, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A13})$$

$$Q_s^{\text{min}} \leq Q_{s,t}^{\text{in},\Delta} \leq Q_s^{\text{max}}, s \in K, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A14})$$

$$Q_s^{\text{min}} \leq Q_{s,t}^{\text{out},\Delta} \leq Q_s^{\text{max}}; s \in K, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A15})$$

$$\sum_{k \in G(f) \cap C} G_{k,t}^\Delta + \sum_{h \in G(f) \cap \text{C}} G_{h,t}^\Delta - \sum_{s(mn) \in G(f) \cap MN} G_{mn,t}^\Delta + \sum_{r(mn) \in G(f) \cap MN} G_{mn,t}^\Delta + \sum_{s \in G(f) \cap K} (Q_{s,t}^{\text{out},\Delta} - Q_{s,t}^{\text{in},\Delta}) = \sum_{g \in G(f) \cap ?M} G_{g,t}^\Delta + \sum_{w \in G(f) \cap O} G_{w,t}^\Delta + \sum_{c \in G(f) \cap ?;} G_{c,t}^\Delta, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A16})$$

$$G_{mn,t}^\Delta = \text{sgn}(\pi_{m,t}^\Delta, \pi_{n,t}^\Delta) \cdot K_{mn} \cdot \sqrt{|\pi_{m,t}^\Delta - \pi_{n,t}^\Delta|}, t \in L, m, n \in >, mn \in MN, \Delta \in \circ \quad (\text{A17})$$

$$\text{sgn}(\pi_{m,t}^\Delta, \pi_{n,t}^\Delta) = \begin{cases} 1, \pi_{m,t}^\Delta \geq \pi_{n,t}^\Delta \\ -1, \pi_{m,t}^\Delta < \pi_{n,t}^\Delta \end{cases}, m, n \in >, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A18})$$

$$\pi_m^{\text{min}} \leq \pi_{m,t}^\Delta \leq \pi_m^{\text{max}}, m \in >, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A19})$$

$$\pi_{m,t}^\Delta \leq \tau_c^2 \cdot \pi_{n,t}^\Delta, m, n \in >, t \in L, \Delta \in \circ \quad (\text{A20})$$

附录 B

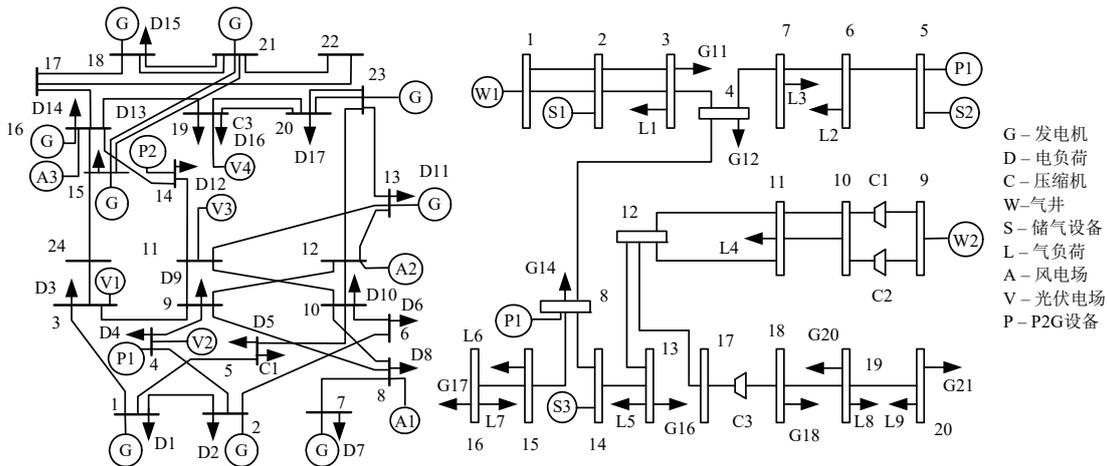


图 B1 24 节点电网-20 节点气网互联系统拓扑图

Fig. B1 Topology of the 24 bus electricity-20 node natural gas integrated system



南璐

在线出版日期: 2021-05-10。

收稿日期: 2021-01-27。

作者简介:

南璐(1994), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事电力系统、综合能源系统脆弱性分析及优化控制方面的研究工作, lnan@scu.edu.cn;

何川(1988), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 通信作者, 主要从事电力系统、综合能源系统优化运行、新能源并网方面的研究工作, he_chuan@scu.edu.cn;

刘天琪(1962), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析稳定与控制、高压直流输电、调度自动化等方面的研究工作, tqliu@scu.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Vulnerable Lines Identification of Integrated Electricity and Natural Gas Systems Considering Wind and Photovoltaic Generation Uncertainties

NAN Lu, HE Chuan, LIU Tianqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University)

KEY WORDS: integrated electricity and natural gas system; vulnerable line; local centrality; entropy; stochastic optimization

With the intensified integration of electricity and natural gas system (IEGS), any disturbance or failure of the vulnerable line in one subsystem may propagate to the other one, consequently resulting in failure of the whole integrated system. To this end, a novel method to identify vulnerable lines of integrated electricity and natural gas systems is proposed.

In this paper, to analyze vulnerability of the IEGSs, we define vulnerable lines as the ones that will severely compromise security performance when out of service. Topological vulnerability analysis and functional vulnerability analysis are the two generally used methods to identify vulnerable lines for independent electricity and natural gas systems. In observing distinct limitations of the aforementioned methods, this paper targets to develop an approach that simultaneously considers topological and functional characteristics to effectively identify vulnerable lines of the IEGSs.

A stochastic co-optimization model of integrated electricity and natural gas systems considering wind and photovoltaic generation uncertainties is constructed to access the normal and contingency operation conditions of the IEGS. Specially, the interconnection between electricity and natural gas system is fully considered through the modeling of gas-fired unit, power to gas equipment, and electric-driven compressor equipment.

Vulnerability of lines in the integrated electricity and natural gas system is discussed from the point of topological vulnerabilities and functional vulnerabilities via local centrality and power flow changing entropy, respectively. The line vulnerability index $VT_{i,j}$, which considers both topological and functional vulnerabilities, is constructed to identify vulnerable lines for the integrated electricity and natural gas system, as shown in (1)–(6):

$$V_{i-j} = \omega_T \cdot VT_{i-j} + \omega_F \cdot VF_{i-j} \tag{1}$$

$$VT_{i-j} = C_L(i) \times C_L(j) \tag{2}$$

$$VF_{i-j} = \sum_{k \in ?} \delta P_k / H_{i-j} \tag{3}$$

$$C_L(i) = \sum_{q \in \Gamma(i)} \sum_{p \in \Gamma(q)} N(p) \tag{4}$$

$$\delta P_k = \begin{cases} \sum_{u \in N(k)} \delta P_u + v_{1,k}^\nabla + v_{2,k}^\nabla \\ \left(\sum_{u \in G(k)} \delta P_u + v_{3,k}^\nabla + v_{4,k}^\nabla \right) \cdot \text{HHV} / \phi \end{cases} \tag{5}$$

$$H_{i-j} = \sum_{k \in ?} -r_{i-j,k} \ln r_{i-j,k} \tag{6}$$

Furthermore, the geodesic vulnerability and generation/load imbalances are used to quantify influences when the vulnerable lines are out of service. Numerical results of the 6-bus electricity/7-node natural gas integrated system show that the proposed method can effectively identify vulnerable lines of the IEGSs, as shown in Fig. 1 and Table 1.

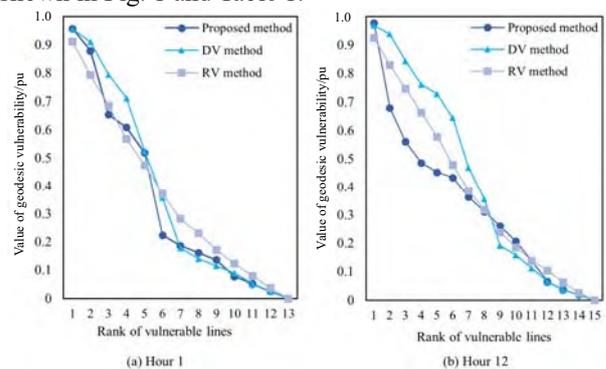


Fig. 2 Geodesic vulnerability of the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system

Table 1 Generation/load imbalance result of the 6 bus electricity-7 node natural gas integrated system

# of vulnerable line failures	Proposed method		DV method	
	Line ID	Generation/load imbalances/MWh	Line ID	Generation/load imbalances/MWh
1	E1-E4	19.39	E2-E4	0.00
2	C1-E4	849.10	E1-E2	25.80
3	G5-N1	803.84	E1-E4	229.53
4	N1-N2	1567.77	E2-E3	298.66
5	E2-E4	1610.67	E4-E5	344.93