

计及地震灾害不确定性的电气互联系统 韧性评估与提升方法

王晗, 侯恺*, 余晓丹, 贾宏杰

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

The Assessment and Improvement Method of Electricity-gas System Resilience Considering Earthquake Disaster Uncertainty

WANG Han, HOU Kai*, YU Xiaodan, JIA Hongjie

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: Earthquake disaster may cause serious damage to the infrastructure of electricity-gas systems, leading to power outage and gas outage accidents. To assess and improve the energy supply capacity of electricity-gas system under earthquake disaster, this paper first constructed the failure probability model of electricity-gas system components considering the uncertainty of earthquake spatial distribution and magnitude. Then, an optimal load shedding algorithm of electricity-gas system based on two-stage gas network optimization power flow model was proposed, which improves the convergence and calculation efficiency. On this basis, the resilience assessment and improvement method of electricity-gas system under earthquake was established. Finally, an electricity-gas test system was built on the basis of IEEE RTS 79 power grid and 14-node gas network, which is used to verify the proposed method. The results illustrate that the resilience assessment and improvement method of electricity-gas system proposed in this paper can help planners to judge the resilience level of the system under earthquake disaster, and can choose the best resilience promotion scheme in combination with economy.

KEY WORDS: electricity-gas system; resilience assessment; resilience improvement; optimal load shedding; earthquake disaster

摘要: 地震灾害可能造成电气互联系统基础设施的严重损坏, 导致停电停气事故。为评估和提升地震灾害下电气互联系统的能源供应能力, 该文首先构建计及地震空间分布和震

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077150); 英国工程与物理科学研究委员会联合基金项目(52061635103, EP/T021969/1)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52077150); Project Supported by Joint Research Project of National Natural Science Foundation of China and Engineering and Physical Sciences Research Council of UK (52061635103, EP/T021969/1).

级不确定性的电气互联系统元件失效概率模型; 其次, 提出基于两阶段气网优化潮流模型的电气互联系统最优负荷削减算法, 提升收敛性和计算效率, 在此基础上, 建立地震灾害下电气互联系统韧性评估及提升方法; 最后, 基于 IEEE RTS 79 电网和 14 节点气网, 搭建电气互联测试系统, 并利用此系统验证所提韧性评估及提升方法。结果表明, 所提出的电气互联系统韧性评估及提升方法能够协助规划人员评判系统面向地震灾害的韧性水平, 并能结合经济性选择最佳韧性提升方案。

关键词: 电气互联系统; 韧性评估; 韧性提升; 最优负荷削减; 地震灾害

0 引言

近年来全球地震灾害频发, 不仅对人民的生命财产安全构成威胁, 也对能源系统造成了破坏性影响。例如, 1995 年, 日本神户地震导致一批 220kV 和 275kV 变电站被破坏, 使得 260 万户用户停电; 2008 年, 中国汶川 8.0 级地震, 灾区内都江堰市燃气管道破裂 10 余处, 造成的经济损失达 6000 余万元。地震灾害下, 输电网和输气网的基础设施失效概率剧增, 而随着两者之间的耦合程度日益加深, 不同能源系统在地震下的能量交互过程也不容忽视。因此, 有必要综合分析地震对电气互联系统造成的影响, 评估电气互联系统在地震下的韧性。

电气互联系统韧性, 指的是电气互联系统遭受极端自然灾害时能够抵御灾害冲击并快速恢复到正常供能状态的能力^[1]。近年来, 电气互联系统韧性评估已成为国内外学者的研究热点。文献[2]对飓风下的电气互联系统进行韧性评估, 证实极端灾害下各能源系统间的强相互依赖性会带来风险; 文

献[3]从电力系统和燃气系统协调规划的角度,提出利用抗飓风能力较强的燃气地埋管道提升电网韧性的方法。由于飓风等天气灾害几乎不会威胁到燃气管道,面向这类灾害的研究一般仅考虑电网元件受损可能。然而,地震导致的永久地面变形将大幅增加燃气管道破损的概率,因此评估电气互联系统在地震下的韧性时必须同时考虑燃气管道的受灾情况。针对气象灾害的系统韧性研究已渐趋完善,而面向地震灾害的系统韧性研究才刚刚起步。文献[4]基于输电杆塔结构可靠性计算地震下输电线故障率,从而评估地震对电力系统的影响,但并未考虑与之耦合的天然气系统;文献[5]从鲁棒性、快速性和冗余性三个方面对地震灾害下海岛综合能源系统的韧性进行评估,但是该文献将整个海岛置于同一地震烈度区内,没有考虑地震空间分布和震级的不确定性。

电气互联系统的韧性评估指标一般与系统负荷削减量相关,为此一些学者针对电气互联系统的负荷削减优化问题开展了相关研究。文献[6]对天然气系统的非线性约束做线性化处理,使其能够与直流潮流模型组成线性优化模型,但是由于对电力系统约束和天然气系统约束均进行了简化处理,该模型的精度较低。文献[7]采取序贯二阶锥算法对电气互联系统协调负荷削减优化模型进行求解,该算法通过迭代求解一个带罚函数项的广义二阶锥问题以得到此非凸问题的最优解,初值由凸松弛后的初始二阶锥问题的解提供。这一算法巧妙地处理了天然气系统的非线性约束,但是迭代速度和收敛效果受罚函数参数影响极大,在韧性评估中可行性较差。

综上,现有研究未考虑长时间尺度下地震空间分布、震级等不确定因素对电气互联系统韧性的影响。此外,目前的电气互联系统优化潮流算法在复杂高阶故障下常常遇到收敛性问题。针对上述问题,本文首先构建了基于潜在震源区三级划分方案的地震灾害概率模型,进而得到基于地震烈度衰减分布的电气互联系统元件失效概率模型;其次,提出了基于两阶段气网优化潮流模型的电气互联系统最优负荷削减算法,并以此为基础构建计及地震不确定性的电气互联系统韧性评估及提升方法。

1 计及地震不确定性的元件失效概率模型

1.1 地震灾害概率模型

地震最重要的特征参数为震源位置、地震震级

M 和地震烈度 I 。震源位置即地震发生的起始位置,地震震级指的是地震本身的大小强弱,地震烈度则代表地震造成的破坏的程度。同一次地震中,震级只有一个数值,而各地烈度则随着离震源距离的增加而降低。本节分析了这三者的分布特征。

1.1.1 地震活动性模型

GB18306—2015《中国地震动参数区划图》提出描述地震活动的三级潜在震源区划分方案:首先,划分地震统计区用以统计地震活动性参数;然后,在地震统计区内划分背景源以表现不同背景地震活动特征;最后,在背景源内根据局部构造条件划分构造源^[8]。图 1 给出了潜在震源区三级划分方案的示意图,其中 M_u 代表震级上限。

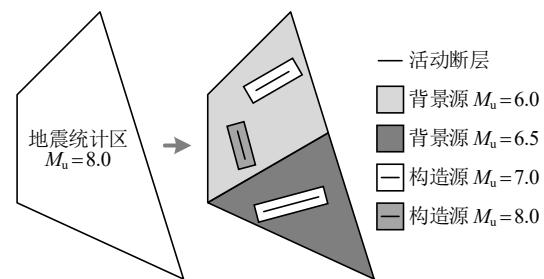


图 1 潜在震源区三级划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-level division of latent focal region

将地震统计区内的地震等分为数个震级档,设 $M_j \in [M_j - \Delta M/2, M_j + \Delta M/2]$ 为第 j 个震级档的中心值, ΔM 为震级间隔,则发生的地震属于第 j 档震级的概率为

$$P(M_j) = \frac{2 \exp[-\beta(M_j - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_u - M_0)]} \cdot \text{sh}\left(\frac{\beta}{2} \Delta M\right) \quad (1)$$

式中: $\beta = b \ln 10$, 其中 b 为地震统计区 G-R 关系的系数; M_0 为地震统计区震级下限,也称起算震级,一般取 4。

本文将背景源和构造源统称为潜在震源区。在潜在震源区内部,地震发生在各点的概率相等^[8],则发生的地震属于第 j 档震级且震源位于第 i 个潜在震源区内点 (x, y) 的概率为

$$P(x, y, M_j) = P(M_j) \cdot P((x, y) | M_j) = \\ P(M_j) \cdot \alpha_i / (A_i \sum_{k=1}^N \alpha_k) \quad (2)$$

式中: N 为地震统计区内潜在震源区的个数; A_i 为第 i 个潜在震源区的面积; α_i 为第 i 个潜在震源区的活动性权重^[9],由式(3)求出:

$$\alpha_i = \begin{cases} A_i \times (M_{u,i} - M_0), & M_j \leq M_{u,i} \\ 0, & M_j > M_{u,i} \end{cases} \quad (3)$$

地震可能在地震统计区内任意一个地点、以任意一档震级爆发。考虑到地震发生的不确定性，本文对震源位置和震级档位进行组合枚举。如图2所示，首先在地震统计区内均匀取点，然后在所取潜在震源点处枚举可能发生的地震档位(取震级间隔 $\Delta M=0.5$)，最终得到潜在地震场景集。

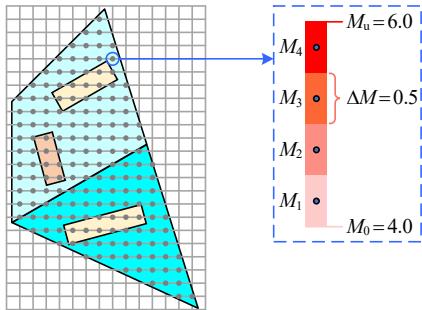


图2 组合枚举示意图

Fig. 2 Combinatorial enumeration diagram

假定潜在地震场景 w 属于第 j 个震级档，且其震源位于第 i 个潜在震源区，则地震统计区内发生的地震为 w 的概率为

$$P_w = P(M_j) \cdot \frac{\alpha_i}{c_i \sum_{k=1}^N \alpha_k} \quad (4)$$

式中 c_i 为第 i 个潜在震源区内枚举震源点的个数。

1.1.2 地震烈度衰减分布

地震烈度小于6度时一般不会损坏电气互联系统基础设施，而烈度大于8度的情况非常少见且范围较小。因此本文只考虑地震烈度为6、7、8度的分布。

为了表征地震烈度沿不同方向衰减的不均匀性，常采用沿长轴和短轴分别统计分析的椭圆衰减模型^[10]。在短轴或长轴方向上各点的地震烈度 I 由下式给出：

$$I = A + BM + C \lg(r + r_0) \quad (5)$$

式中： M 为地震震级； r 为震中距； A 、 B 、 C 和 r_0 为回归参数，长、短轴有不同的回归参数。

由式(5)可得椭圆等震线，这些等震线均以震源为中心，并有相同的长轴方向。本文确定长轴方向的原则为：构造源内地震长轴方向与此构造源的活动断层方向一致，背景源内地震长轴方向与距震源最近的构造源长轴方向一致^[11]。

图3给出了直角坐标系上的地震烈度分布图。

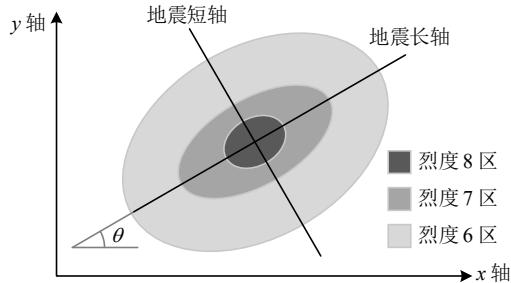


图3 地震烈度分布图

Fig. 3 Schematic diagram of earthquake intensity distribution

假设地震长轴方向与水平轴夹角为 θ ，烈度 I 区椭圆边界的长轴半径为 $r_{a,I}$ ，2个焦点的坐标分别为 $(x_{1,I}, y_{1,I})$ 和 $(x_{2,I}, y_{2,I})$ ：

地震受灾区任一点 (x,y) 满足以下判据时，可认为其位于烈度 I 区椭圆边界内：

$$\|(x - x_{1,I}, y - y_{1,I})\| + \|(x - x_{2,I}, y - y_{2,I})\| \leq 2r_{a,I} \quad (6)$$

式中 $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数。

根据此判据可确定点 (x,y) 所处的烈度区。例如，若判定点 (x,y) 位于烈度 6 区界内，同时判定其不在烈度 7 区界内，则可知此点属于烈度 6 区。各级烈度区层层嵌套，因此应当从最外围的烈度 6 区向高等级烈度区逐层判定。

考虑到地震发生时活动断层破裂持续时间与地震传播时间均为秒级，期间调度人员来不及执行应急调度，因此本文在面向规划的韧性研究中忽略了上述过程所需时间，而直接对地震造成的结果进行分析。

1.2 基于烈度分布的元件失效概率建模

地震灾害对输电网中的变压器、输电线路和输气网中的燃气管道具有较强的破坏力，故本文只考虑这三类元件的受损情况。

1.2.1 变压器

变压器在电气互联系统拓扑图中为一个点模型，确定变压器地点所处烈度区后，即可得到变压器基于地震烈度的失效概率^[12]。假定单台变压器地震下的失效概率为 p_{tr} ，且配有 n 台备用，则变压器实际失效概率为

$$P_{tr} = p_{tr}^{n+1} \quad (7)$$

1.2.2 输电线路

输电线路主要考虑架空线路，因此本文只讨论架空线路的失效概率。输电线的低频振动对输入地震能量存在解耦作用，故架空线路抗震性能主要由起支撑作用的杆塔决定^[12]。

设杆塔间距为 d , 则一条长度为 L 的架空线路上的杆塔数量为

$$n = \frac{L}{d} \quad (8)$$

假定该线路跨越了 K 个地震烈度区, 且同一烈度区内杆塔的失效概率相同。考虑到同一条线路上的杆塔之间是串联关系, 整条线路的失效概率为

$$\begin{cases} P_{\text{line}} = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - p_{\text{line},i})^{n_i} \\ \sum_{i=1}^K n_i = n \end{cases} \quad (9)$$

式中: $p_{\text{line},i}$ 为跨越的第 i 个烈度区内杆塔的失效概率; n_i 为此线路位于第 i 个烈度区内杆塔的数量。

1.2.3 燃气管道

燃气管道失效概率可通过震害率进行分析^[13]:

$$\begin{cases} R_f = C_d C_g 10^{0.8(I-9)} \\ P_{\text{pipe}} = 1 - e^{-R_f L} \end{cases} \quad (10)$$

式中: R_f 为管道的震害率; C_d 为管径影响系数; C_g 为场地土影响系数。

当燃气管道跨越 K' 个烈度区时, 管道不同部分的震害率可能不同, 无法直接应用式(10)。为此本文将燃气管道均分为长度为 ΔL 的元管道, 则一条长度为 L' 的管道上的元管道数量为

$$m = \frac{L'}{\Delta L} \quad (11)$$

ΔL 足够小时, 元管道可以类比为燃气管道上的“杆塔”, 其拓扑由中点代替, 则整条管道的失效概率为

$$\begin{cases} P_{\text{pipe}} = 1 - \prod_{i=1}^{K'} (1 - p_{\text{pipe},i})^{m_i} \\ \sum_{i=1}^{K'} m_i = m \end{cases} \quad (12)$$

式中: $p_{\text{pipe},i}$ 为跨越的第 i 个烈度区内元管道的失效概率, 由式(10)可求得; m_i 为此燃气管道位于第 i 个烈度区内元管道的数量。

2 地震下电气互联系统韧性评估及提升方法

2.1 韧性评估指标

2.1.1 系统级韧性指标

本文采用系统级韧性指标 R_{sys} 衡量地震下电气互联系统的整体韧性^[14]:

$$R_{\text{sys}} = \sum_{w=1}^W P_w E[Q_w] \quad (13)$$

式中: W 为潜在地震场景集; $E[Q_w]$ 为地震 w 下电气互联系统最小负荷削减量的期望值。

最小负荷削减量 Q_w 可由下式表示:

$$Q_w = P_{\text{shed}} + \lambda Q_{\text{shed}} \quad (14)$$

式中: P_{shed} 为电力子系统的电负荷削减量; Q_{shed} 为天然气子系统的气负荷削减量; λ 为气负荷与电负荷的转换系数, 可以根据天然气热值求出。

本文采用基于影响增量的状态枚举法 (impact-increment-based state enumeration, IISE) 求解 $E[Q_w]$, 该方法提高了低阶故障状态的权重, 从而大大减轻了忽略高阶状态对计算精度造成的影响^[15]。基于 IISE 法, 式(13)可改写为

$$R_{\text{sys}} = \sum_{w=1}^W P_w \sum_{j=1}^J \sum_{s \in \Omega_j} \left(\prod_{i \in s} p_{w,i} \right) \Delta I_{w,s} \quad (15)$$

式中: Ω_j 为 j 阶故障状态集, 其中故障状态 s 由失效元件集表示; J 为 IISE 法枚举的最高事故阶数; $p_{w,i}$ 为地震 w 下元件 i 的失效概率; $\Delta I_{w,s}$ 为地震 w 下故障状态 s 的影响增量。

系统级韧性指标的物理意义为地震统计区发生一次地震时电气互联系统的预期负荷削减量, 因此 R_{sys} 越小, 系统应对地震灾害的韧性越强。

2.1.2 元件级韧性指标

本文应用元件级韧性指标来寻找系统的薄弱环节^[16]。电气互联系统中第 m 个元件的元件级韧性指标 R_m 由下式给出:

$$R_m = R_{\text{sys}} - R_{\text{sys},m} \quad (16)$$

式中 $R_{\text{sys},m}$ 为当第 m 个元件在任何地震场景下均不发生故障时的系统级韧性指标值。

元件级韧性指标 R_m 本质上是元件 m 失效概率变为 0 引起的系统级韧性指标下降值。因此 R_m 越大, 强化该元件对系统韧性的提升越显著。

需要说明的是, 本文面向输电网和输气网耦合形成的电气互联系统的规划需求, 重点关注系统抵御地震灾害的能力。因此所采用的韧性评估指标只考虑了系统受到地震灾害后的性能下降过程, 暂未考虑故障后的恢复过程。

2.2 基于两阶段气网优化潮流模型的电气互联系统最优负荷削减算法

计算韧性指标必须有合适的最优负荷削减算法支持。然而, 地震灾害下电气互联系统会发生多类元件的多阶故障, 系统运行状态变化大, 非线性优化模型初值难找, 收敛性能差; 此外, 文献中广

泛使用的简化优化模型^[6]存在模型精度不足的缺陷。为此,本文提出一种基于两阶段气网优化潮流模型的电气互联系统最优负荷削减算法。

2.2.1 解耦优化框架

本文在解耦框架下求解电气互联系统的最优负荷削减量,从而提升计算效率并对各能源子系统应用更精确的模型^[17]。

为便于计算,本文只考虑燃气发电厂一种耦合设施。解耦的思路就是对电力子系统和天然气子系统进行交替优化,直到天然气子系统可以满足燃气发电厂的供气需求,即对应的供气负荷削减量小于收敛阈值,优化过程结束。

电气互联系统负荷削减解耦优化框架如图4所示,其中 P_u 和 $P_{u,\max}$ 为燃气发电厂的有功出力和有功出力上限, G_u 和 G_s 为燃气发电厂的供气需求负荷和供气负荷削减量, a 为耗气转化参数。

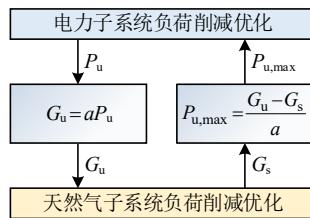


图4 解耦优化框架

Fig. 4 Decoupling optimization framework

2.2.2 交流电网优化潮流模型

在解耦框架下,电力子系统负荷削减优化可以应用精确的交流潮流模型^[18],Matpower能对其进行良好求解。

2.2.3 两阶段气网优化潮流模型

天然气子系统最优负荷削减是一个混合整数非线性优化问题,现有商业求解器难以高效求解此类问题。为此,本文提出了两阶段气网优化潮流模型,采用固定0/1型决策变量的方法^[19],同时参考电力系统交流优化模型以直流潮流最优解为计算初值的思路,集成了混合整数线性模型和非线性连续模型。图5给出了两阶段气网优化潮流模型的示意图,其中 g_{ij}^+ 、 g_{ij}^- 是表示管道 ij 天然气流向的0/1型决策变量。

如图5所示,本文首先求解第1层的混合整数线性模型,从而得到实数型变量和0/1型变量的优化值。前者包括气源出力 S_i 、节点气压 π_i 、压缩机压缩比 k_c 、气负荷削减量 G_{si} ,可作为第2层非线性连续模型的内点法初值。后者包括压缩机状态

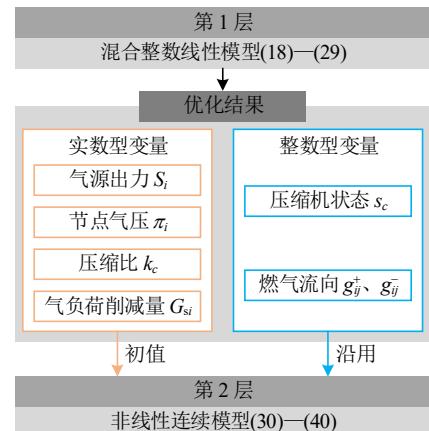


图5 两阶段气网优化潮流模型

Fig. 5 Two-stage gas network optimal power flow model

s_c 和管道燃气流向变量 g_{ij}^+ 、 g_{ij}^- ,可为第2层模型所沿用。

1) 混合整数线性模型。

压缩机耗气量一般较小,在第1层模型中可视
为0。

管道天然气流量满足Weymouth方程:

$$f_{ij}^2 = K_{ij} |\pi_i^2 - \pi_j^2| \quad (17)$$

式中: f_{ij} 为管道 ij 通过的天然气流量; K_{ij} 为管道参数; π_i 、 π_j 分别为管道始、末端节点的气压。

对式(17)采取简化处理,首先,引入 V 消去节点气压平方项:

$$\begin{cases} V_i = \pi_i^2 \\ V_j = \pi_j^2 \end{cases} \quad (18)$$

然后,引入 $T_{ij} = |V_i - V_j|$ 消去绝对值^[7]:

$$\begin{cases} T_{ij} \geq V_j - V_i + (\underline{V}_i - \bar{V}_j)(g_{ij}^+ - g_{ij}^- + 1) \\ T_{ij} \geq V_i - V_j + (\bar{V}_i - \underline{V}_j)(g_{ij}^+ - g_{ij}^- - 1) \\ T_{ij} \leq V_j - V_i + (\bar{V}_i - \underline{V}_j)(g_{ij}^+ - g_{ij}^- + 1) \\ T_{ij} \leq V_i - V_j + (\underline{V}_i - \bar{V}_j)(g_{ij}^+ - g_{ij}^- - 1) \\ (\underline{V}_i - \bar{V}_j)g_{ij}^- \leq V_i - V_j \leq (\bar{V}_i - \underline{V}_j)g_{ij}^+ \\ g_{ij}^+ + g_{ij}^- = 1 \end{cases} \quad (19)$$

最后,对非线性项 f_{ij}^2 分段线性化^[6]:

$$\begin{cases} f_{ij}^2 = f_{ij,L}^2 + \sum_{k=1}^{n_{\text{seg}}} (f_{ij,k+1}^2 - f_{ij,k}^2) \delta_k \\ f_{ij} = f_{ij,L} + \sum_{k=1}^{n_{\text{seg}}} (f_{ij,k+1} - f_{ij,k}) \delta_k \\ f_{ij,k} = f_{ij,L} + \frac{(k-1)(f_{ij,U} - f_{ij,L})}{n_{\text{seg}}}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, n_{\text{seg}} + 1\} \\ \delta_{k+1} \leq \varphi_k \leq \delta_k, \quad \varphi_k = \{0, 1\}, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, n_{\text{seg}} - 1\} \\ 0 \leq \delta_k \leq 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, n_{\text{seg}}\} \end{cases} \quad (20)$$

式中: n_{seg} 为 f_{ij} 可行域的分段段数; $f_{ij,\text{U}}$ 、 $f_{ij,\text{L}}$ 分别为 f_{ij} 可行域的上下界; δ_k 、 φ_k 为分段线性法引入的变量。

通过忽略压缩机耗气量和线性化处理式(17), 本文得到一个混合整数线性优化模型:

$$\min \sum_{i \in \psi} G_{si} \quad (21)$$

$$\text{s.t. } (18) \text{---}(20)$$

$$S_i - \sum_{j \in i} f_{ij} - (G_{di} - G_{si}) = 0 \quad (22)$$

$$0 \leq G_{si} \leq G_{di} \quad (23)$$

$$-\bar{f}_{ij}g_{ij}^- \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij}g_{ij}^+ \quad (24)$$

$$\underline{S}_i \leq S_i \leq \bar{S}_i \quad (25)$$

$$\underline{\pi}_i^2 = \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i = \bar{\pi}_i^2 \quad (26)$$

$$-Ms_c \leq V_{c,out} - V_{c,in} \leq Ms_c \quad (27)$$

$$V_{c,out} - k_c^2 V_{c,in} \geq -M(1-s_c) \quad (28)$$

$$V_{c,out} - \bar{k}_c^2 V_{c,in} \leq M(1-s_c) \quad (29)$$

式中: ψ 为天然气子系统节点集; G_{di} 为节点 i 的气负荷, 即常规供气负荷或燃气发电厂需求供气负荷; $V_{c,in}$ 、 $V_{c,out}$ 分别为气压缩机 c 入口节点和出口节点气压的平方; M 为一个极大的正实数。

2) 非线性连续模型。

将 0/1 型变量固定后, 天然气子系统负荷削减优化模型转换为一个非线性连续模型:

$$\min \sum_{i \in \psi} G_{si} \quad (30)$$

$$\text{s.t. } f_{ij}^2 = K_{ij}(g_{ij}^+ - g_{ij}^-)(\pi_i^2 - \pi_j^2) \quad (31)$$

$$S_i - \sum_{j \in i} f_{ij} - (G_{di} - G_{si}) - \sum_{c \in i} G_c = 0 \quad (32)$$

$$\pi_{c,out} = k_c \pi_{c,in} \quad (33)$$

$$G_c = D_c f_c (\frac{\alpha-1}{k_c^\alpha} - 1) \quad (34)$$

$$(g_{ij}^+ - g_{ij}^-) f_{ij} \geq 0 \quad (35)$$

$$s_c(k_c - 1) + 1 \leq k_c \leq s_c(\bar{k}_c - 1) + 1 \quad (36)$$

$$\underline{S}_i \leq S_i \leq \bar{S}_i \quad (37)$$

$$-\bar{f}_{ij} \leq f_{ij} \leq \bar{f}_{ij} \quad (38)$$

$$0 \leq G_{si} \leq G_{di} \quad (39)$$

$$\underline{\pi}_i \leq \pi_i \leq \bar{\pi}_i \quad (40)$$

式中: $c \in i$ 为入口节点为节点 i 的气压缩机; $\pi_{c,in}$ 、

$\pi_{c,out}$ 分别为气压缩机 c 入口节点和出口节点的气压; G_c 为气压缩机 c 的耗气量; f_c 为通过气压缩机 c 的天然气流量; α 为气压缩机的多变指数; D_c 为转换系数。

式(31)是基于已知天然气流向的 Weymouth 方程。式(32)是节点流量平衡方程, 其中将压缩机耗气量看作附加给入口节点的气负荷。式(34)是燃气驱动压缩机的耗量方程, 具有较强的非线性。式(36)对压缩机在不同状态下的压缩比进行描述。

此非线性连续模型的初值由第 1 层的混合整数线性模型提供, 求解第 2 层模型是对第 1 层模型解的合理修正。

2.3 韧性提升策略

当系统级韧性指标高于设定标准值 R_{set} 时, 系统韧性不满足要求, 有必要采取韧性提升策略, 即对元件进行强化。

元件强化可分为硬件升级和增设冗余。前者对元件硬件水平进行升级, 从而降低元件在各烈度等级下的失效概率, 例如, 将混凝土结构杆塔换为自力式铁塔; 采用带延性接头的燃气管道。后者指增建备用元件, 也能起到降低元件失效概率的作用。

元件级韧性指标体现了各个元件对系统韧性的影响程度, 可协助制定韧性提升策略。此外, 不同元件的强化成本有差异, 经济性也是规划人员需要考虑的因素。因此, 规划人员可以根据元件级韧性指标得到多个备选强化方案, 然后比较各方案的成本效益, 确定最合适强化方案。

2.4 电气互联系统韧性评估及提升流程

电气互联系统韧性评估及提升方法如图 6 所示, 根据此图将韧性评估及提升流程描述如下:

步骤 1: 对震源位置及震级档位组合枚举, 并根据地震灾害概率模型(1)---(4)得到各潜在地震场景的概率;

步骤 2: 由烈度衰减模型(5)、(6)得到不同地震场景的烈度分布, 然后根据现有规划方案预建的电气互联系统求出基于烈度的元件失效概率;

步骤 3: 应用基于两阶段气网优化潮流模型的电气互联系统负荷削减优化算法求解各阶故障状态下负荷削减量;

步骤 4: 根据元件失效概率和负荷削减量计算韧性指标, 若系统级韧性指标 R_{sys} 低于设定标准值 R_{set} , 规划方案达标, 反之则需实施韧性提升策略;

步骤 5: 根据元件级韧性指标得到多个备选方

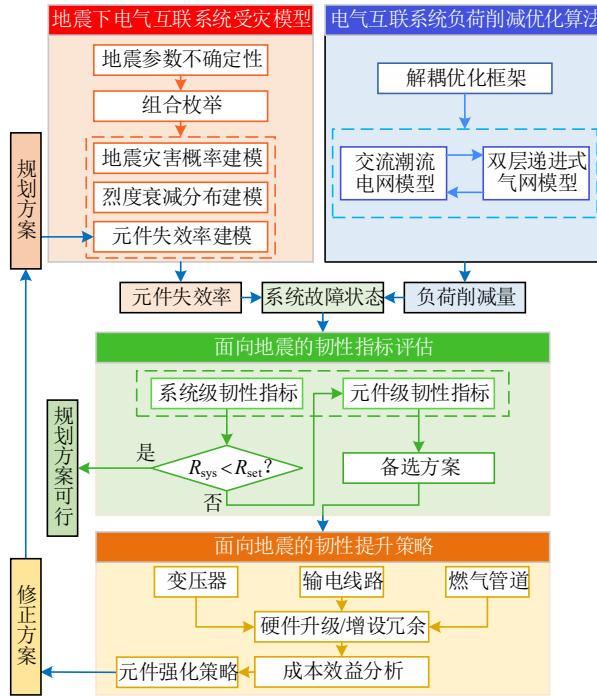


图6 韧性评估及提升方法

Fig. 6 Resilience assessment and improvement method

案，然后通过成本效益分析制定出最合适的元件强化方案，以此对规划方案进行修正，返回步骤2。

需要指出的是，流程中的步骤1根据GB18306—2015《中国地震动参数区划图》提出的地震活动性模型，独立考虑震级为4级及以上的地震场景，暂未特别分析各次地震之间的关联性。

3 算例分析

3.1 算例介绍

本文选择IEEE RTS79电网^[20]和14节点气网组成的电气互联系统作为算例。燃气发电的应用热度与日俱增，故假定电气互联系统中装有4个燃气发电厂，装机量占比达到了41.06%。图7给出了此电气互联系统的示意图，燃气发电厂和天然气系统的详细参数见附录A。

中国的潜在震源区分布复杂，难以获取其准确坐标。为便于分析，本文构建了一个结构简单的地震统计区作为算例背景，并将电气互联系统附在上面。电力子系统和天然气子系统空间上是重叠的，因此在图8中分别表示它们在坐标轴上的位置。

如图8所示， $200\text{km} \times 300\text{km}$ 的长方形地震统计区由构造源A1、构造源A2和背景源A3构成。A1为平行四边形，端点坐标分别为(0, 200)、(0, 250)、(200, 250)和(200, 300)，A2为梯形，端点坐标分别为(0, 0)、(40, 0)、(0, 200)和(40, 210)。A1内的活动断裂与水平轴夹角为 $\arctan(1/4)$ ，A2内的活动断裂沿垂直轴方向。A1、A2、A3的震级上限分别为8.0、7.5和6.5。目前远离活动断裂修建设施已成为共识，因此本文将电气互联系统定位在背景源A3内。

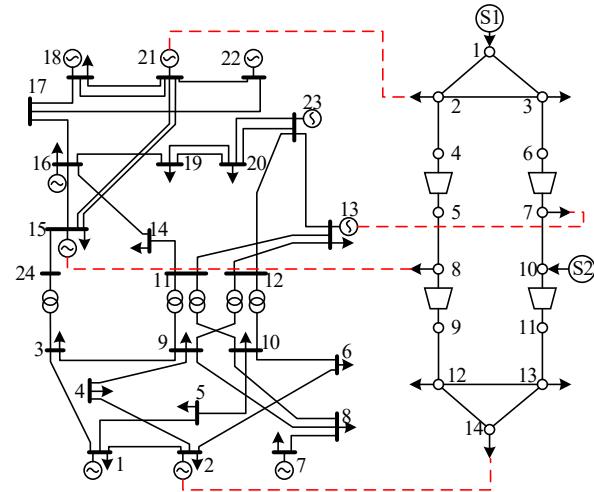


图7 电气互联系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the electricity-gas system

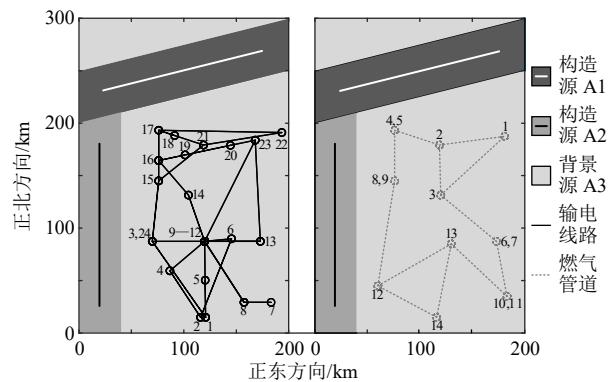


图8 地震统计区内电气互联系统的位置

Fig. 8 Location of the electricity-gas system in the earthquake statistics area

断裂与水平轴夹角为 $\arctan(1/4)$ ，A2内的活动断裂沿垂直轴方向。A1、A2、A3的震级上限分别为8.0、7.5和6.5。目前远离活动断裂修建设施已成为共识，因此本文将电气互联系统定位在背景源A3内。

设该地震统计区位于中国川藏强震区，G-R参数 b 与龙门山地震统计区一致，取0.71，烈度衰减参数则由文献[21]提供。各类元件失效概率的相关参数在附录A中给出。

3.2 特定地震场景下的电气互联系统韧性评估

假定在点(30, 100)处发生了7.0~7.5震级档位的地震，以档位中点震级7.25分析其影响。图9给出了电气互联系统在烈度分布图中的位置，震源中心和各个烈度区边界线也在图中标出。

3.2.1 元件失效概率计算过程

设杆塔间距 $d=300\text{m}$ ，元管道长度 $\Delta L=500\text{m}$ ，则可求出各类型元件在地震下的失效概率。本文用 $\text{line}(a, b)$ 表示连接电网节点 a, b 的输电线路， $T(a, b)$

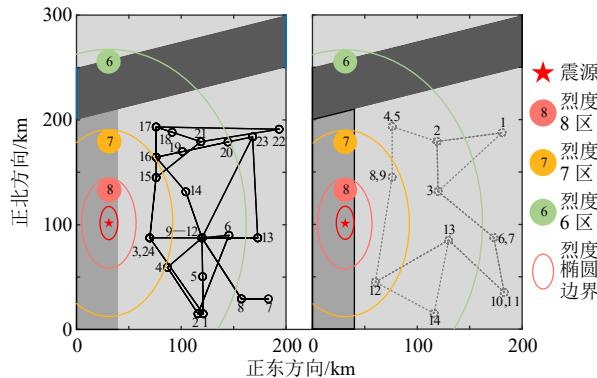


图 9 地震烈度分布图中的电气互联系统

Fig. 9 The electricity-gas system in the earthquake intensity distribution map

表示连接电网节点 a 和 b 的变压器, $\text{pipe}(a, b)$ 表示连接气网节点 a 和 b 的燃气管道。以 $\text{line}(3, 9)$ 为例介绍元件失效概率的计算过程。

$\text{line}(3, 9)$ 长度为 49.89km, 则该线路共有 166 个输电杆塔, 并能求得各个杆塔的坐标。根据 1.1.2 介绍的方法确定各个杆塔所属的烈度区, 可知有 96 个杆塔位于烈度 6 区, 70 个杆塔位于烈度 7 区, 则 $\text{line}(3, 9)$ 的失效概率:

$$p_{\text{line}(3,9)} = 1 - (1 - p_{I=6})^{96} \times (1 - p_{I=7})^{70} \approx 0.0406 \quad (41)$$

式中 $p_{I=6}$ 、 $p_{I=7}$ 分别为地震烈度 6 区和地震烈度 7 区内杆塔的失效概率。

变压器和燃气管道的失效概率计算过程与输电线路类似, 在此不再赘述。

3.2.2 韧性指标分析

本文分别采用影响增量法(IISE)和传统状态枚举法(state enumeration, SE)求解此地震场景下的 $E[Q_w]$, 最大状态枚举阶数 $J=2$ 。选择蒙特卡洛法(MCS)作为比照基准, MCS 法收敛判据为 10^6 次, 收敛结果方差系数为 0.0048。3 种方法的计算结果在表 1 中给出。

由表 1 可知, IISE 和 SE 所需计算时间远少于 MCS, 而 IISE 在计算精度上又远高于 SE, 误差仅

表 1 特定地震场景下的系统级韧性指标

Table 1 System-level resilience index under the specific earthquake scenario

方法	$E[Q_w]/\text{MW}$	误差/%	计算时间/s	收敛指标/%
MCS	7.231	—	36540.103	—
SE	4.976	31.189	84.560	100.000
IISE	7.095	1.872	86.780	100.000
IISE-L	6.629	8.322	51.846	100.000
IISE-R	18.770	159.577	264.113	65.961

为 1.872%。IISE 能够兼顾速度和精度, 因此选择 IISE 方法计算 $E[Q_w]$ 是合理且高效的。

为验证两阶段气网优化潮流模型的优越性, 选取 IISE-L 和 IISE-R 与本文所提方法进行对比分析, 计算结果见表 1, 收敛指标代表收敛状态占总状态数量的百分比。IISE-L 采用气网混合整数线性模型求解最优切气负荷, 将 IISE 与 IISE-L 进行对比, 可以看到 2 种算法收敛性较好, 而本文所提算法可以对简化解进行良好的修正。IISE 与 IISE-R 分别采用线性简化模型和凸松弛二阶锥模型^[7]为气网非线性优化模型提供初值, 然而 IISE-R 仅有少于 70% 的状态可以收敛, 在不到 70% 的能够收敛的故障状态中又存在相当一部分收敛至局部最优解, 导致得到的切负荷期望值 $E[Q_w]$ 高于本文所提算法。显然凸松弛二阶锥简化模型提供的初值质量较差, 相比之下, 混合整数线性模型可以得到一个足够好的初值, 在收敛性能和计算速度上的表现都相当优异, 因此选择混合整数线性模型提供内点法初值是可行的。

3.3 考虑地震不确定性的电气互联系统韧性分析

设 (x_0, y_0) 为地震统计区内的潜在震源点, 并令 $x_0 \in \{0, 1, \dots, 200\}$, $y_0 \in \{0, 1, \dots, 200\}$, 在每个潜在震源点枚举震级档, 从而得到潜在地震场景集。

应用 IISE 法求各潜在地震场景的 $E[Q_w]$, 得到系统级韧性指标 R_{sys} 。然后, 根据计算过程中所得到的各阶影响增量直接求出元件级韧性指标 R_m 。表 2 给出了 R_{sys} 和 3 个最脆弱元件的 R_m , 表 3 则列出依据 R_m 选出的各类元件优先级前 3 的强化目标。

本文考虑增设冗余作为元件强化措施, 而不同元件的强化成本有明显差异。依据文献[22], 本文

表 2 电气互联系统韧性指标

Table 2 Resilience index of the electricity-gas system

韧性指标	结果/kW
R_{sys}	80.730
$R_{\text{pipe}(11,13)}$	44.060
$R_{\text{line}(15,24)}$	19.810
$R_{\text{line}(6,10)}$	5.841

表 3 元件强化优先级排序

Table 3 Strengthening priority order of various types of components

优先级	输电线路	变压器	燃气管道
1	line(15,24)	T(3,24)	pipe(11,13)
2	line(6,10)	T(9,11)	pipe(1,2)
3	line(2,6)	T(9,12)	pipe(1,3)

设定输电线路造价为 700 万元/km, 燃气管道造价为 1400 万元/km, 参考多家主流制造厂商的现行价格, 设定单台变压器造价为 400 万元。规划人员在制定元件强化策略时, 需要综合衡量其成本效益。为此, 本文根据表 2、3 提出 5 种元件强化方案:

方案 1: 强化最脆弱的 3 个元件, 即元件 pipe(11, 13)、元件 line(15, 24)和元件 line(6, 10);

方案 2: 强化最脆弱的 3 条输电线路, 即元件 line(15, 24), 元件 line(6, 10)和元件 line(2, 6);

方案 3: 强化最脆弱的 3 条燃气管道, 即元件 pipe(11, 13), 元件 pipe(1, 2)和元件 pipe(1, 3);

方案 4: 强化最脆弱的 3 个变压器, 即元件 T(3, 24), 元件 T(9, 11)和元件 T(9, 12);

方案 5: 选择最脆弱的输电线路 line(15, 24)、燃气管道 pipe(11, 13)和变压器 T(3, 24)进行强化。

各强化方案的效果及成本在表 4 中给出, 其中 S 和 ΔS 分别表示系统级韧性指标降低量和降低的百分比, C_q 表示强化成本, 费效比 $C_q/\Delta S$ 表示此方案降低 1% 的系统级韧性指标所需平均成本。

表 4 强化方案的效果及成本

Table 4 Effectiveness and cost of strengthening schemes

强化方案	S/kW	$\Delta S/%$	$C_q/(10^9 \text{ 元})$	$C_q/\Delta S$
方案 1	66.230	82.038	1.606	0.0196
方案 2	26.670	33.030	1.149	0.0348
方案 3	45.390	56.219	3.055	0.0543
方案 4	2.162	2.678	0.012	0.0045
方案 5	62.650	77.593	1.430	0.0184

从表 4 可知, 同样强化 3 个元件, 方案 1 韧性提升效果最佳, 而费效比只能排到第 3, 方案 4 韧性提升效果最差, 但费效比却远超其余 4 种方案。同时, 设定标准值会对最佳方案产生影响。例如, 当 R_{set} 为 78kW 时, 5 种方案均能提升系统韧性至合格水平, 方案 4 经济性最好, 是最合适的选择; 当 R_{set} 为 40kW 时, 方案 1、3、5 均满足需求, 其中方案 5 成本最低, 是最优方案。

4 结论

本文提出一种计及地震灾害不确定性的电气互联系统韧性评估与提升方法。首先, 根据三级潜在震源区划分方案和烈度椭圆衰减关系, 构建了计及地震空间分布和震级不确定性的地震灾害模型, 在此基础上构建了电气互联系统元件失效概率模型, 有效提升了收敛性和计算效率; 然后, 提出基于两阶段气网优化潮流模型的电气互联系统最优

负荷削减算法, 该算法通过集成气网的混合整数线性模型和非线性连续模型, 确保了算法的模型精度和计算效率; 以此为基础, 建立地震灾害下电气互联系统的韧性评估及提升方法。最后, 基于 IEEE RTS 79 电网和 14 节点气网构建电气互联测试系统, 验证了本文所提方法的可行性和有效性; 此外, 根据元件级韧性指标制定多个元件强化方案, 对各个方案的经济效益进行分析, 结果表明规划人员可结合系统级韧性指标的设定标准值与元件强化成本选择最佳方案。

参考文献

- [1] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2744.
- [2] BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744(in Chinese).
- [3] ZHANG Huajun, WANG Peng, YAO Shuhan, et al. Resilience assessment of interdependent energy systems under hurricanes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3682-3694.
- [4] SHAO Chengcheng, SHAHIDEHPOUR M, WANG Xifan, et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4418-4429.
- [5] HAO Wenbin, ZHANG Yagang, MOU Miao. Research on reliability evaluation of power grid considering structural reliability of tower under seismic conditions[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(4): 17-20(in Chinese).
- [6] LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5476-5492(in Chinese).
- [7] CORREA-POSADA C M, SÁNCHEZ-MARTÍN 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.
- [8] 黄刚. 面向系统韧性提升的智能电网调度优化方法研究

- [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HUANG Gang. Smart grid dispatch optimization for system resilience enhancement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018(in Chinese).
- [8] 潘华, 高孟潭, 谢富仁. 新版地震区划图地震活动性模型与参数确定[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1): 11-23.
- PAN Hua, GAO Mengtan, XIE Furen. The earthquake activity model and seismicity parameters in the new seismic hazard map of china[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 11-23(in Chinese).
- [9] 叶友清, 史丙新, 刘玉法, 等. 基于潜源区样本空间确定空间分布函数[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(S1): 100-107.
- YE Youqing, SHI Bingxin, LIU Yufa, et al. Determination of spatial distribution function using source sample space[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S1): 100-107(in Chinese).
- [10] 陈达生, 刘汉兴. 地震烈度椭圆衰减关系[J]. 华北地震科学, 1989, 7(8): 31-42.
- CHEN Dasheng, LIU Hanxing. Elliptical attenuation relationship of earthquake intensity[J]. North China Earthquake Sciences, 1989, 7(8): 31-42(in Chinese).
- [11] 郁璟贻, 陈亚男, 谭庆全. 基于 GIS 的地震影响场长轴方向自动判定技术研究[J]. 防灾科技学院学报, 2020, 22(2): 46-49.
- YU Jingyi, CHEN Yanan, TAN Qingquan. GIS-based automatic determination technology of long-axis direction of seismic influence field[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2020, 22(2): 46-49(in Chinese).
- [12] 贺海磊, 郭剑波. 基于地震区划的电力系统元件损坏概率分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 38-42.
- HE Hailei, GUO Jianbo. Components damage probability analysis of power system based on seismic zonation[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 38-42(in Chinese).
- [13] 金康锡, 任爱珠. 煤气管道的震害率分析[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 148-153.
- KIM K S, REN Aizhu. Analysis of earthquake damage ratio of buried gas pipe[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(3): 148-153(in Chinese).
- [14] LIU Xiaonan, HOU Kai, JIA Hongjie, et al. A planning-oriented resilience assessment framework for transmission systems under typhoon disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5431-5441.
- [15] 侯恺. 电力系统可靠性评估方法改进与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- HOU Kai. Power system reliability assessment methodology improvement and its application[D].
- Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese).
- [16] LIU Xiaonan, HOU Kai, JIA Hongjie, et al. A resilience assessment approach for power system from perspectives of system and component levels[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105837.
- [17] 赵长伟, 张慧颖, 刘春玲, 等. 面向综合能源系统可靠性评估的最优负荷削减分层解耦计算方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 538-546.
- ZHAO Changwei, ZHANG Huiying, LIU Chunling, et al. Hierarchical decoupling optimal load curtailment algorithm for integrated energy systems reliability evaluation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 538-546(in Chinese).
- [18] 张鑫, 王楠, 王伟, 等. 考虑台风天气的电力系统韧性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8): 21-26.
- ZHANG Xin, WANG Nan, WANG Wei, et al. Resilience assessment on power system under typhoon[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8): 21-26(in Chinese).
- [19] BORRAZ-SÁNCHEZ C, BENT R, BACKHAUS S, et al. Convex relaxations for gas expansion planning[J]. Informs Journal on Computing, 2016, 28(4): 645-656.
- [20] Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.
- [21] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1): 24-33.
- YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of china[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(1): 24-33(in Chinese).
- [22] 牛启帆, 武鹏, 张菁, 等. 考虑电转气的电-气耦合系统协同优化规划方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 24-31.
- NIU Qifan, WU Peng, ZHANG Jing, et al. Collaborative optimal planning method for electricity-gas coupling system considering power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 24-31(in Chinese).

附录 A

表 A1 燃气发电厂参数

Table A1 Parameters of gas-fired power plants

编号	电网节点	气网节点	$P_{u,\min}/\text{MW}$	$P_{u,\max}/\text{MW}$	耗量参数 $a/(\text{m}^3/(\text{MW}\cdot\text{h}))$
1	2	14	0	192	180
2	13	7	0	591	180
3	15	8	0	215	180
4	21	2	0	400	180

表 A2 天然气系统节点参数

Table A2 Node parameters of natural gas system

节点编号	节点类型	$G_d/$	$\underline{S}/$	$\bar{S}/$	$\pi_{\min}/$	$\pi_{\max}/$
		MMCFD	MMCFD	MMCFD	psia	psia
1	S	0	0	250	600	1200
2	L	GT	—	—	400	700
3	L	40	—	—	400	700
4	L	0	—	—	600	1200
5	L	0	—	—	600	1200
6	L	0	—	—	600	1200
7	L	GT	—	—	400	700
8	L	GT	—	—	400	700
9	L	0	—	—	600	1200
10	S	0	0	250	600	1200
11	L	0	—	—	600	1200
12	L	50	—	—	400	700
13	L	50	—	—	400	700
14	L	GT	—	—	400	700

注: S—气源节点; L—负荷节点; GT—该节点的气负荷与对应燃气电厂的出力相关。

表 A3 天然气系统管道参数

Table A3 Pipe parameters of natural gas system

管道编号	入口节点	出口节点	管道参数 K	长度/km
1	1	2	0.1321	62.5634
2	1	3	0.0997	82.7830
3	2	3	0.1685	47.7344
4	2	4	0.1865	45.0616
5	3	6	0.1222	68.9798
6	5	8	0.1743	48.2803
7	7	10	0.0664	53.3592
8	9	12	0.0312	101.3107
9	11	13	0.0433	72.8629
10	12	13	0.0441	80.6226
11	12	14	0.0559	63.5522
12	13	14	0.0443	71.3812

表 A4 压缩机参数

Table A4 Parameters of Compressors

编号	入节点	出节点	压缩比下限	压缩比上限	D_c
1	4	5	1.2	1.8	0.0129
2	6	7	1.2	1.8	0.0129
3	8	9	1.2	1.8	0.0129
4	10	11	1.2	1.8	0.0129

表 A5 电气互联系统元件失效概率相关参数

Table A5 Parameters related to failure rate of electricity-gas system components

地震烈度	输电杆塔失效概率/ 10^{-5}	变压器失效概率/ 10^{-6}	燃气管道震害率
6	6.446	2.546	0.0001
7	50.400	7.027	0.0010
8	257.000	182.600	0.0100



王晗

在线出版日期: 2021-04-06。

收稿日期: 2020-11-21。

作者简介:

王晗(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统韧性评估, hanw19@tju.edu.cn;

*通信作者: 侯恺(1988), 男, 副教授, 研究方向为电力系统、综合能源系统可靠性评估等, khou@tju.edu.cn;

余晓丹(1973), 女, 副教授, 研究方向为综合能源系统、电力系统安全性与稳定性等, yuxd@tju.edu.cn;

贾宏杰(1973), 男, 教授, 研究方向为大电网稳定性分析、电网规划、新能源集成等, hjjia@tju.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)

The Assessment and Improvement Method of Electricity-gas System Resilience Considering Earthquake Disaster Uncertainty

WANG Han, HOU Kai*, YU Xiaodan, JIA Hongjie

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University))

KEY WORDS: electricity-gas system; resilience assessment; resilience improvement; optimal load shedding; earthquake disaster

According to the division scheme of three-level latent focal region, an earthquake zone includes tectonic sources and background sources. The combinatorial enumeration method is used to get the set of potential earthquake scenarios: enumerate the potential source points in the earthquake zone and the possible earthquake magnitude grades at each potential source point. Fig. 1 shows the diagram of the combinatorial enumeration method, where M_u and M_0 respectively represent the upper and lower limits of magnitude at each point, ΔM indicates magnitude span.

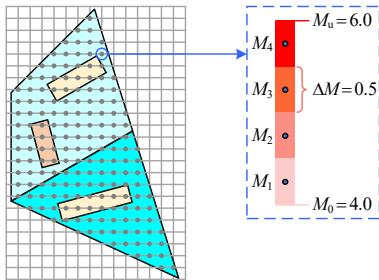


Fig. 1 Combinatorial enumeration diagram

Based on the ellipse attenuation relation of earthquake intensity, the intensity distribution can be obtained. Then, the components failure probability based on the earthquake intensity can be calculated.

The system-level resilience index R_{sys} is the expected load shedding of electricity-gas system when an earthquake occurs in the earthquake zone. Besides, the component-level resilience index R_m is the decrease value of R_{sys} caused by the failure probability of component m becoming 0. In order to calculate R_{sys} and R_m , it's necessary to get the load shedding expectation $E[Q_w]$ under each potential earthquake scenario.

The impact increment-based state enumeration method (IISE) is used to solve $E[Q_w]$. IISE method needs to calculate the optimal load shedding value of low order fault state. However, the load shedding optimization model of electricity-gas system is a mixed integer nonlinear problem (MINP), which has poor convergence performance and is hard to find the initial value. To solve the problem, this paper decouples the load shedding optimization problem of electricity-gas system. Then, Matpower toolkit is used to solve the optimization part of power grid, while the two-stage gas network optimal power flow model is proposed to solve the optimization

part of gas network. As Fig. 2 shows, two-stage gas network optimal power flow model integrates mixed integer linear model and nonlinear continuous model. The simplified solution is obtained by solving the first stage model, in which the real variable value is used as the initial value of the second stage model, and the integer variable value is fixed in the second stage model.

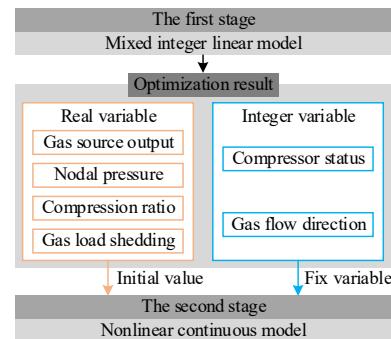


Fig. 2 Two-stage gas network optimal power flow model

The electricity-gas test system is attached to an earthquake area. Firstly, the resilience of electricity-gas system in specific earthquake scenario is analyzed to verify the feasibility of the proposed algorithm and model. Considering that the power grid and gas network overlap each other, their positions in the intensity distribution map are shown in Fig. 3 respectively.

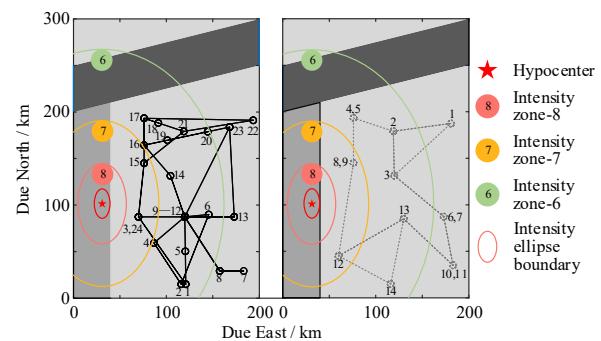


Fig. 3 The electricity-gas system in the earthquake intensity distribution map

Then, the resilience indices based on the set of potential earthquake scenarios are calculated. When R_{sys} is higher than the standard value R_{set} , several component strengthening schemes can be put forward according to R_m . Combined with the standard set value and the strengthening cost of each component, the most suitable scheme can be determined.