

基于混合 IGDT 的电-气综合能源系统弹性提升灾前规划方法

徐琴¹, 金海翔², 边晓燕³, 魏晓川¹, 黄华炜¹, 于心怡³

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 国网安徽省电力有限公司当涂县供电公司, 安徽 马鞍山 243100; 3. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 极端自然灾害的频发给电-气综合能源系统安全运行造成了严重影响, 而在灾害发生前制定合理的规划策略可以有效提升系统的弹性。综合考虑扩展与加固规划, 结合鲁棒优化与信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDT)提出了一种面向电-气综合能源系统弹性提升的灾前规划方法。首先, 以台风作为典型灾害进行灾害不确定性建模, 得到系统时空不确定故障集。其次, 建立了三级混合 IGDT 弹性规划模型, 上-中层为双层鲁棒扩展规划, 其中上层为正常投资扩展规划模型, 中层是在上层的基础上优化最严重灾害下的最小失负荷, 下层在上-中层规划的基础上基于 IGDT 对系统进行加固规划。然后, 采用列与约束生成算法对模型进行求解。最后, 通过算例验证了模型与该方法的有效性。

关键词: 电-气综合能源系统; 弹性; 信息间隙决策理论; 鲁棒优化; 台风灾害

Pre-disaster planning method for resilience enhancement of integrated electric-gas energy system based on hybrid IGDT

XU Qin¹, JIN Haixiang², BIAN Xiaoyan³, WEI Xiaochuan¹, HUANG Huawei¹, YU Xinyi³

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China;
2. Dangtu Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Maanshan 243100, China;
3. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The frequent occurrence of extreme natural disasters has a serious impact on the safe operation of the integrated electric-gas energy system. However, the resilience of the system can be effectively improved by formulating reasonable planning strategies before the disasters occur. A pre-disaster planning method for resilience enhancement of the integrated electric-gas energy system is proposed by combining expansion and reinforcement planning with robust optimization and information gap decision theory (IGDT). First, typhoon is taken as a typical disaster, its uncertainty modeling is built, and the spatio-temporal uncertain fault set of the system is obtained. Second, a three-level hybrid IGDT planning model of resilience enhancement is established. The upper and middle layer model is built as robust expansion planning. The upper layer is the normal investment expansion planning model, the middle layer optimizes the minimum load loss under the most severe disaster based on the upper layer, and the lower layer carries out the system reinforcement planning based on IGDT with the result of the upper and middle layer model. Then, the column and constraint generation algorithm is applied to solve the model. Finally, a test is given to verify the effectiveness of the model and the method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977127).

Key words: integrated electric-gas energy system; resilience; information gap decision theory (IGDT); robust optimization; typhoon disaster

0 引言

近年来, 随着化石能源造成的环境污染愈加严

重^[1-2], 推动能源转型, 构建“清洁低碳、安全高效”的能源体系已成为我国实现可持续发展的必然趋势^[3-4]。电-气综合能源系统(integrated electricity-gas energy system, IEGS)作为能源供应的重要环节, 通过多能耦合实现了多种能源的统筹互补与高效利用^[5-6], 受到了广泛关注。然而, 近年来随着极端灾

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977127); 国家电网有限公司科技项目资助(52094022001S)

害的频发,给 IEGS 能源供给的安全性和稳定性带来严峻挑战。例如:2021年,美国得州由于极端寒潮造成燃气及风电机组停运,引发了影响恶劣的大范围停电^[7];2019年,英国电网因雷击造成燃气机组、风电脱网,最终导致了约3.2%的负荷损失^[8]。

灾前规划作为 IEGS 时序弹性提升策略的第一步,可以通过加固风险元件和优化发电资源部署等技术措施提升系统弹性^[9],故为保障 IEGS 在极端灾害下的安全稳定运行,有必要对其弹性提升展开灾前规划方法研究。目前针对 IEGS 的弹性提升规划方法从时间尺度上可分为长期的扩展规划与短期的加固规划两种。在扩展规划方面,现有文献往往结合鲁棒优化、 $N-1$ 约束等方法展开研究。文献[10]提出了一种 IEGS 两阶段鲁棒扩展规划模型,但为简化模型忽略了气网的潮流;文献[11]基于 $N-1$ 准则,提出了一种考虑安全约束的 IEGS 扩展规划方法;文献[12]在文献[11]的基础上结合 $N-1$ 和概率可靠性准则,建立了考虑 P2G(power to gas)、燃气机组等耦合设备的鲁棒规划模型;文献[13]综合考虑了电动汽车充电站、分布式燃气机组和储能设备的规划,提出了一种考虑系统弹性约束的 IEGS 分布鲁棒扩展规划模型。

在加固规划方面,作为 IEGS 弹性提升最有效的方法之一,已有较多文献对此展开研究。文献[5]采用加固输电线路的措施,基于分布式鲁棒优化提出了一种考虑极端天气下线路故障概率信息的 IEGS 弹性提升策略;文献[14]提出了考虑多等级线路/管道损坏-加固的 IEGS 应对自然灾害的韧性提升三层鲁棒优化模型;文献[15]基于元件强化措施,提出了一种基于全局灵敏度分析的 IEGS 韧性提升规划方法;文献[16]针对不同灾害的严重程度,建立了基于鲁棒优化的 IEGS 规划模型。

上述文献分别从扩展规划与加固规划两方面针对 IEGS 灾前规划展开研究,短期的加固规划可以有效提升现有系统结构下的弹性,长期的扩展规划则可以合理规划设备以提升系统弹性,二者在规划过程中会相互影响,在扩展规划阶段考虑弹性可以有效降低加固阶段成本,加固规划也会影响下一阶段的扩展规划结果,故有必要对两者进行统筹规划。目前鲜有文献同时考虑扩展与加固规划进行 IEGS 弹性提升方法研究。文献[17]基于信息间隙决策(information gap decision theory, IGDT)理论建立了弹性规划模型,但其在扩展规划阶段未考虑极端灾害的影响,仍为正常的投资规划,且加固阶段对于极端灾害影响刻画过于模糊;文献[18]考虑了 P2G 与储能提出了一种结合规划和恢复策略的 IEGS 弹

性提升三级鲁棒规划框架,但其忽略了线路的扩展规划,导致整体投资过高。

基于上述背景,本文综合考虑扩展与加固规划,并结合鲁棒优化(robust optimization, RO)与 IGDT 思想提出了一种基于混合 IGDT 的 IEGS 灾前弹性提升规划方法。首先,针对典型灾害台风进行灾害不确定性建模,采用利于规划的内陆模型对风速衰减进行描述,并结合历史数据建立了 IEGS 的时空不确定故障集;其次,基于鲁棒优化及 IGDT 理论建立了三层混合 IGDT 灾前弹性规划模型,上-中层为扩展规划阶段,利用鲁棒优化的思想求解最严重灾害下的系统最小失负荷,下层为加固规划阶段,在扩展规划的基础上采用 IGDT 的思想对系统的元件进行加固;最后,采用列与约束生成算法对模型进行了求解,并通过算例验证了模型与方法的有效性。

1 灾害不确定性建模

台风、寒潮、地震等极端自然灾害是造成 IEGS 大规模故障的重要原因。本文以我国发生频率较高的台风灾害为例,进行灾害不确定性建模。本文未考虑其衍生灾害对天然气系统运行影响,故在元件上主要考虑输电线路在台风下的不确定故障集。

1.1 台风内陆风速衰减模型

台风对 IEGS 的影响主要为风速,现有文献大多针对台风移动路径进行复杂模拟,并提取典型场景进行随机规划^[19-20],其整体过于复杂且不利于规划决策,故本文忽略了台风移动路径的影响而聚焦风速变化,并采用内陆风速衰减模型^[21]对台风登陆后的极值风速变化进行描述。

$$V(t) = V_b + (RV_0 - V_b)e^{-\alpha t} - C \quad (1)$$

$$C = e \ln D + b \quad (2)$$

式中: $V(t)$ 为 t 时刻台风极值风速; V_b 、 V_0 分别为区域背景风速和台风登陆风速; R 为衰减因子; α 为衰减常数; C 为与台风平均移动距离相关的函数; e 、 b 为与时间相关的常数; D 为台风登陆移动的平均距离。

上述模型需要已知台风的移动速度与初始强度,本文基于灾害历史数据对其进行分布拟合,假设台风平均移动速度及初始压差服从对数正态分布^[22],见式(3)。

$$\begin{cases} f(V_T) = \frac{1}{V_T \sigma_T \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln V_T - \mu_T)^2}{2\sigma_T^2}\right) \\ f(\Delta H) = \frac{1}{\Delta H \sigma_H \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln \Delta H - \mu_H)^2}{2\sigma_H^2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_T 为台风平均移速; σ_T 、 μ_T 分别为移速的

标准差与均值； ΔH 为初始压差； σ_H 、 μ_H 分别为压差的标准差与均值。台风初始风速在已知压差与移速的情况下可通过 Batts 模型^[23]进行计算。

1.2 元件故障模型

由于燃气管道一般位于地下并具备一定防洪能力，在实际灾害发生过程中台风对燃气系统的影响较小，故本文忽略了台风的衍生灾害，并主要考虑台风对输电线路的影响，利用气网对台风灾害的抵御能力为电网供电恢复提供一定的支撑，从而实现系统整体的弹性提升。在计算得到台风登陆后的风速时，输电线路故障率可由式(4)计算^[24]。

$$\lambda_{w,l} = \exp\left(11 \times \frac{V_{w,l}}{V_{d,l}} - 18\right) \Delta L \quad (4)$$

式中： $\lambda_{w,l}$ 为线路 w 第 l 条线路的故障率； $V_{w,l}$ 为线路承受风速； $V_{d,l}$ 为设计风速； ΔL 为线路长度。

假设各分段线路的故障是独立的，则可得整条线路 w 的故障率，如式(5)所示。

$$\lambda_w = 1 - \prod_{l=1}^L (\lambda - \lambda_{w,l}) \quad (5)$$

式中， L 代表第 m 个输电走廊上的线路总数。

1.3 IEGS 时空不确定故障集

本文借鉴信息熵理论^[25]对 IEGS 时空不确定故障集进行描述，其中线路故障率选择历史数据计算下的期望值，根据地理位置而建立 IEGS 时空不确定故障集为

$$U = \left\{ -\sum_{w \in Z_i} \log_2(\lambda_w) z_w \leq -\log_2 \Delta_L \right\} \quad (6)$$

式中： z_w 为线路状态二进制变量，0 为损坏，1 为正常； $-\log_2 \Delta_L$ 为线路故障的不确定熵值。

2 基于混合 IGDT 的灾前弹性提升规划模型

本文综合考虑扩展与加固规划提出了一种基于混合 IGDT 的 IEGS 弹性提升规划模型，整体模型思路如图 1 所示，模型分为鲁棒扩展规划阶段与风险规避加固阶段。其中扩展规划阶段为 max-min-max 鲁棒优化模型，该阶段可分为上-中两层，上层为目标函数为最小化扩展规划成本，中层则基于上层结果优化最严重灾害下的最小失负荷；下层为风险规避阶段，则基于 IGDT 方法将扩展规划所得的最小失负荷量作为弹性基准值，其目标函数为最小化弹性指数的最大值。

2.1 上层扩展规划阶段

2.1.1 目标函数

上层扩展规划阶段主要以正常投资规划为主，

由于台风迁移过程对冷/热系统的影响较小，故为简化模型，本文暂忽略冷/热负荷的传输，主要考虑输电线路、燃气管道以及燃气机组等电-气设备的扩展规划，具体成本包括投资成本与年运营成本，其中投资成本包括了线路、管道、机组的投资费用，运营成本包括了气源出力以及机组出力成本，目标函数 f_1 为

$$\min f_1 = C_{INV} + C_{OPE} \quad (7)$$

$$C_{INV} = \left(\sum_{pl \in \Omega_{EL}} C_{pl}^{INV} v_{pl} + \sum_{gp \in \Omega_{GL}} C_{gp}^{INV} v_{gp} + \sum_{gi \in \Omega_{GP}} C_{gi}^{INV} v_{gi} \right) m_b \quad (8)$$

$$m_b = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (9)$$

$$C_{OPE} = 8760 \left(\sum_{i \in \Omega_{GT}} C_i^{gt} P_i^{gt} + \sum_{j \in \Omega_{GS}} C_j^{gs} P_j^{gs} \right) \quad (10)$$

式中： C_{INV} 、 C_{OPE} 分别为投资成本与运营成本； v_{pl} 、 v_{gp} 、 v_{gi} 均为投资二进制变量，0 代表投资，1 代表不投资； C_{pl}^{INV} 、 C_{gp}^{INV} 、 C_{gi}^{INV} 分别代表线路、管道以及燃气机组的投资成本； C_i^{gt} 为机组成本函数； C_j^{gs} 为气源的出力成本； m_b 为成本回收率， r 为贴现率； t 为规划年数； P_i^{gt} 、 P_j^{gs} 分别为机组与气源出力 (MW)； Ω_{GT} 、 Ω_{GS} 分别为机组与气源集合； Ω_{EL} 、 Ω_{GL} 、 Ω_{GP} 分别为输电线路、燃气管道及燃气机组的待选集合。

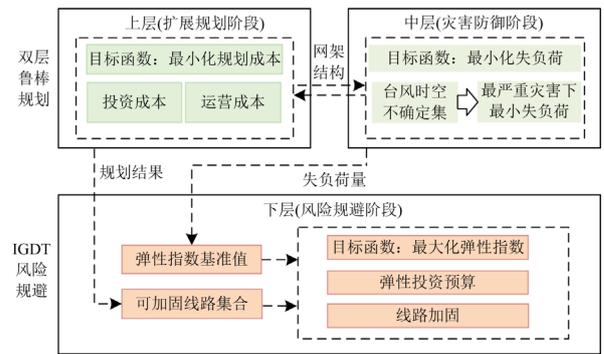


图 1 IEGS 弹性提升规划模型框架

Fig. 1 Framework of IEGS resilience enhancement model

2.1.2 约束条件

上层扩展规划的约束条件根据目标函数可分为投资约束与运行约束，本文考虑的耦合设备主要包括燃气轮机与气压缩机，相关的电-气耦合设备约束可详见文献[14-16]，其余约束条件如下所述。

1) 投资预算约束

上层投资规划需要满足一定预算，即

$$C_{\text{INV}} \leq C_{\text{MAX}} \quad (11)$$

式中, C_{MAX} 为最大投资预算。

2) 投资状态约束

当某个候选设备投入使用时, 其在后续的规划过程中将一直处于可用状态, 假设规划年限为 t , 则投资状态约束可表示为

$$\begin{cases} v_{pl,t-1} \leq v_{pl,t}, \forall pl, \forall t \\ v_{gp,t-1} \leq v_{gp,t}, \forall gp, \forall t \\ v_{gi,t-1} \leq v_{gi,t}, \forall gi, \forall t \end{cases} \quad (12)$$

3) 电力系统运行约束

电力系统运行约束考虑投资后电网的正常运行, 主要包括机组出力约束、直流潮流约束、功率平衡约束。

$$p_{gi,\min} v_{gi} \leq p_{gi} \leq p_{gi,\max} v_{gi} \quad (13)$$

$$p_{pl,t} = \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}}, pl \notin \Omega_{\text{EL}} \quad (14)$$

$$-M(1 - v_{pl,t}) \leq p_{pl,t} - \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}} \leq M(1 - v_{pl,t}), pl \in \Omega_{\text{EL}} \quad (15)$$

$$-p_{pl,t}^{\max} \leq p_{pl,t} \leq p_{pl,t}^{\min}, pl \notin \Omega_{\text{EL}} \quad (16)$$

$$-p_{pl,t}^{\max} v_{pl,t} \leq p_{pl,t} \leq p_{pl,t}^{\min} v_{pl,t}, pl \in \Omega_{\text{EL}} \quad (17)$$

$$\sum_{gi \in \Omega_{\text{GT}}} p_{gi,t} = p_{\text{load},t} \quad (18)$$

式中: p_{gi} 、 $p_{gi,\max}$ 和 $p_{gi,\min}$ 分别为机组出力及其上下限; $\theta_{i,t}$ 、 $\theta_{j,t}$ 分别为节点 i 、 j 的相角; x_{ij} 为线路电抗; $p_{pl,t}$ 为线路传输功率; $p_{\text{load},t}$ 为系统总负荷; M 为极大值。

4) 天然气系统运行约束

天然气系统运行约束主要包括节点压力约束、气源出力上下限约束、管道流量约束、压缩机传输约束和流量平衡约束, 由于模型考虑正常情况运行, 故本文忽略了气体惯性^[26], 采用稳态 weymouth 双向流动方程描述气流传输, 具体约束为

$$\Pi_m^{\min} \leq \Pi_m \leq \Pi_m^{\max} \quad (19)$$

$$Q_{s,i}^{\min} \leq Q_{s,i} \leq Q_{s,i}^{\max} \quad (20)$$

$$Q_{mn} |Q_{mn}| = k_{mn}^2 (\Pi_m^2 - \Pi_n^2) \quad (21)$$

$$\Pi_{\text{in}} R_{\text{esc}}^{\min} \leq \Pi_{\text{out}} \leq \Pi_{\text{in}} R_{\text{esc}}^{\max} \quad (22)$$

$$0 \leq Q_{\text{esc}} \leq Q_{\text{esc}}^{\max} \quad (23)$$

$$\sum_{s \in \Omega_s} Q_s - \sum_{gt \in \Omega_{\text{GT}}} Q_{gt} - \sum_{k \in \Omega_k} Q_k = 0 \quad (24)$$

式中: Π_m 为节点 m 的压力; Π_m^{\max} 、 Π_m^{\min} 分别为节点压力上下限; $Q_{s,i}$ 为气源出力; $Q_{s,i}^{\max}$ 、 $Q_{s,i}^{\min}$ 分别

为气源出力上下限; Q_{mn} 为管道 mn 流量; k_{mn}^2 为与管道温度、长度等相关的常数; Π_{in} 、 Π_{out} 为压缩机两端的压力; R_{esc}^{\max} 、 R_{esc}^{\min} 分别为压缩机压缩比上下限; Q_{esc} 为流过压缩机的流量; Q_{esc}^{\max} 为压缩机通过流量的上限; Ω_s 、 Ω_{GT} 、 Ω_k 分别为气源、燃气轮机、气负荷集合; Q_{gs} 、 Q_i 分别为燃气机组与气负荷耗气量。

2.2 中层灾害防御阶段

2.2.1 目标函数

中层整体模型的优化目标为发生最严重故障下系统最小失负荷, 整体函数为 max-min 形式, 外部 max 问题是在输电线路故障不确定集中寻找最严重的故障, 内部 min 问题是在外部最严重故障下优化 IEGS 的运行方式, 通过电-气能量转供最小化失负荷量, 具体目标函数 f_2 为

$$f_2 = \max_{z \in U} \min_y \sum_t P_{\text{loss},t} \quad (25)$$

式中: z 为 IEGS 时空不确定性变量, 具体为各线路的故障状态; y 为灾害发生后系统运行的变量集合; $P_{\text{loss},t}$ 为系统负荷损失值。

2.2.2 约束条件

在中层决策中, 系统将通过调度来最大限度地减少极端灾害的影响, 故相关约束条件会将进行修改。

1) 电力系统运行约束

电力系统运行约束在上层基础上考虑了极端灾害下线路中断的情况, 故对线路潮流约束以及功率平衡约束式(14)一式(17)进行了修改。

$$k_t = z_{pl,t} (1 - h_{pl,t}) \quad (26)$$

$$-Mk_t \leq p_{pl,t} - \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}} \leq Mk_t, pl \notin \Omega_{\text{EL}} \quad (27)$$

$$-M(1 - v_{pl,t} (1 - k_t)) \leq p_{pl,t} - \frac{\theta_{i,t} - \theta_{j,t}}{x_{ij}} \leq M(1 - v_{pl,t} (1 - k_t)), pl \in \Omega_{\text{EL}} \quad (28)$$

$$-(1 - k_t) p_{pl,t}^{\max} \leq p_{pl,t} \leq (1 - k_t) p_{pl,t}^{\min}, pl \notin \Omega_{\text{EL}} \quad (29)$$

$$-v_{pl,t} (1 - k_t) p_{pl,t}^{\max} \leq p_{pl,t} \leq v_{pl,t} (1 - k_t) p_{pl,t}^{\min}, pl \in \Omega_{\text{EL}} \quad (30)$$

式中: $z_{pl,t}$ 为线路故障二进制变量, 0 为未发生故障, 1 为发生故障; $h_{pl,t}$ 为下层线路加固变量, 0 为未加固, 1 为加固; 约束式(27)、式(28)表示在候选线路中只有被上层投资选择的线路才有可能发生故障, 否则不会受到灾害影响, 同时保证了线路一旦被加固后不会发生故障。线路加固变量 $h_{pl,t}$ 在上述

约束中为已知值，并非中层模型的优化变量之一，其值将由下层风险规避阶段求出。

2) 天然气系统运行约束

本文忽略了台风所造成的衍生灾害影响，假设位于地下的天然气管道不会受到台风灾害的影响，故在中层运行时天然气相关约束条件与上层投资规划一致。

2.3 下层风险规避阶段

下层风险规避阶段基于上-中层优化得出的IEGS系统规划网架以及最严重的失负荷情况，对系统线路进行加固从而尽可能规避台风灾害给系统安全运行所带来的风险，并提升系统整体弹性。

IGDT作为一种有效处理不确定性的数学优化方法^[27-28]，常用于系统的风险规避规划。本文以最严重灾害下系统最小的失负荷值 $P_{\text{loss},t}$ 作为风险规避策略中投资者预期失负荷的基准值，建立的模型为

$$\begin{cases} f_3 = \max R_c = \max(\sum_{t \in \Omega_t} R_t) \\ P_{\text{loss},t}^h \leq (1 - R_t) P_{\text{loss},t} \\ 0 \leq R_t \leq 1 \end{cases} \quad (31)$$

式中： R_c 为鲁棒函数； Ω_t 为规划周期集合； R_t 为各周期的弹性不确定系数； $P_{\text{loss},t}^h$ 为加固规划后的失负荷值。

由于上-中层已经辨识出系统发生的最严重灾害情况，相关的扩展规划变量以及故障变量已为定值，故下层主要是在有限的投资预算下采用线路加固，实现系统在最严重场景下弹性最优，主要优化变量为线路加固 0/1 变量，相关的约束条件如下所述。

1) 加固投资预算

在下层加固规划中，目标函数未涉及到投资成本与运行成本，故需要规定相关经济成本预算。

$$C_{\text{INVH}} = \sum_{i \in \Omega_h} h_i C_h L_i P_i^{\text{max}} \quad (32)$$

$$C_{\text{INVH}} \leq (1 + \sigma) C_{\text{INVH}}^{\text{max}} \quad (33)$$

式中： C_{INVH} 为加固规划成本； Ω_h 为候选加固线路集合； h_i 为线路是否加固 0/1 变量，0 为未加固，1 为已加固； C_h 为线路加固成本(美元/km·MW)； L_i 为线路长度； P_i^{max} 为线路最大传输容量； $C_{\text{INVH}}^{\text{max}}$ 为加固规划投资上限； σ 为风险规避系数。

2) 系统运行约束

下层运行约束与上-中层运行约束相比，潮流约束在公式形式上未发生变化，其中约束中的投资变量 $v_{pl,t}$ 与故障变量 $z_{pl,t}$ 为上-中层模型求解出的已知值。

3 求解算法

本文模型一共分为 3 层，其中上-中层为双层鲁棒扩展规划模型，传统数学优化算法难以直接求解，本文采取将相关约束进行线性化后利用列与约束生成(column-and constraint generation, C&CG)算法进行迭代求解，下层则为整数线性化模型，采用商业求解器可直接进行求解，其求解方法已经成熟，不再赘述。

3.1 约束条件线性化

上-中层模型中部分约束条件存在非线性项，会导致模型求解困难或者陷入局部最优，故针对相关约束展开线性化处理。

1) 0/1 变量乘积线性化

针对线路潮流约束式(26)一式(30)，由于其中涉及到 3 种二进制变量相乘，使得约束条件为非线性，故需要对其进行线性化处理，针对式中的非线性项 $(1 - v_{pl,t})z_{pl,t}$ 引入二进制变量 $K1$ 对其进行线性化。

$$\begin{cases} K1_{pl,t} = (1 - v_{pl,t})z_{pl,t}, K1_{pl,t} \in \{0, 1\} \\ K1_{pl,t} \leq 1 - v_{pl,t}, K1_{pl,t} \leq z_{pl,t} \\ K1_{pl,t} \geq z_{pl,t} - v_{pl,t} \end{cases} \quad (34)$$

经过上述约束线性化之后，可将原约束中的非线性项 $(1 - v_{pl,t})z_{pl,t}$ 用 0/1 变量 $K1$ 进行替代，之后采用相同的方法对非线性项 $v_{pl,t}(1 - z_{pl,t}(1 - h_{pl,t}))$ 进行线性化，引入二进制变量 $K2$ 进行线性化，如式(35)所示。

$$\begin{cases} K2_{pl,t} = v_{pl,t}(1 - z_{pl,t}(1 - h_{pl,t})), K2_{pl,t} \in \{0, 1\} \\ K2_{pl,t} \leq 1 - z_{pl,t}(1 - h_{pl,t}), K2_{pl,t} \leq v_{pl,t} \\ K2_{pl,t} \geq v_{pl,t} - z_{pl,t}(1 - h_{pl,t}) \end{cases} \quad (35)$$

式中的加固变量 $h_{pl,t}$ 由下层规划得出，为已知值，故在此处无需线性化。

2) 平方项变量线性化

首先针对上层中机组的二次成本函数进行线性化，本文采用分段线性化方法进行线性化，具体过程不再赘述。

其次在天然气系统管道流量双向流动约束式(21)、式(22)中，存在气压以及流量的平方项，导致约束条件为非线性，在本文上-中层鲁棒规划问题中，中层 max-min 问题需要借助对偶处理转换为单一 max 问题，若 min 问题中存在大量的 0/1 变量，将导致对偶条件不成立，造成 C&CG 算法求解困难，因此增量分段线性化方法在此处不再适用，本文选择二阶锥松弛的方法处理该方程，松弛后的管

道 weymouth 方程如式(36)所示。

$$\left\| \begin{matrix} Q_{mn} \\ Q_{mn} \cdot \Pi_n^- \end{matrix} \right\| \leq k_{mn} \cdot \Pi_m^+ \quad (36)$$

3.2 模型求解

针对上文所建立的上-中层鲁棒规划模型, 本文采用 C&CG 算法对其进行求解, 将原问题模型转化为主问题-子问题的鲁棒形式进行迭代。

4 算例分析

本文基于改进的 IEEE RTS-79 节点电力系统以及 15 节点天然气系统组成的 IEGS 为例展开算例分析, 假设该 IEGS 位于我国某沿海省, 实际地理位置如图 2 所示, 系统的具体拓扑图如图 3、图 4 所示, 其中虚线代表扩展规划待选的线路以及燃气机组, 电力系统一共有 46 条线路, 其中待选线路有 12 条, 发电机组一共 31 组, 其中备选的燃气机组共 5 组。本文假设所有的线路均可被加固, 天然气管道每条管道的最大扩展数为 2, 共有两个气源。在投资成本方面, 输电线路的投资成本为 10^5 美元/km^[28], 加固成本为 400 美元/(km·MW), 燃气管道投资成本为 1.5×10^5 美元/km^[29], 待规划机组参数见文献[30], 候选输电线路参数如表 1 所示, 考虑 5 年内的系统扩展规划, 年增长电、气负荷均为 6%, 燃气机组效率取 0.65, 贴现率为 8%, 设备规划年限为 10 年。

4.1 最严重灾害场景分析

本文结合近 20 年登陆我国东部沿海地区的西太平洋台风的统计记录^[31]作为台风的历史数据, 计算系统所在区域的极值风速, 根据历史数据可拟合台风中心气压以及移速概率分布, 参数如下: $\mu_T = 2.9001$, $\sigma_T = 0.6274$, $\mu_H = 2.6680$, $\sigma_H = 0.5185$, 采用熵值法对时空不确定故障集中的所有线路最大熵值进行计算, 如图 5 所示, 可以看出, 各线路在灾害下的熵值分布在 [0.5, 6] 内, 由信息熵的定义可

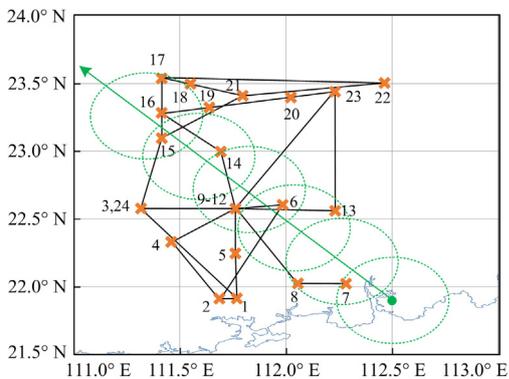


图 2 系统地理位置示意图

Fig. 2 System geographic location diagram

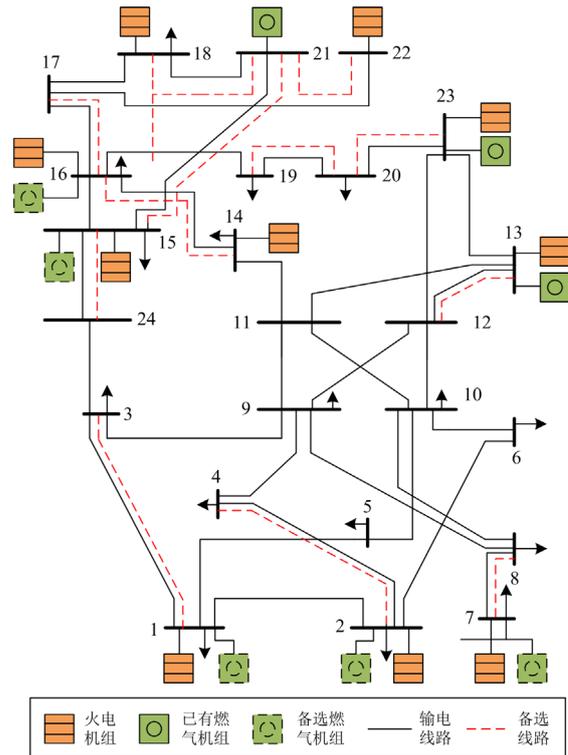


图 3 电力系统拓扑图

Fig. 3 Topology of power system

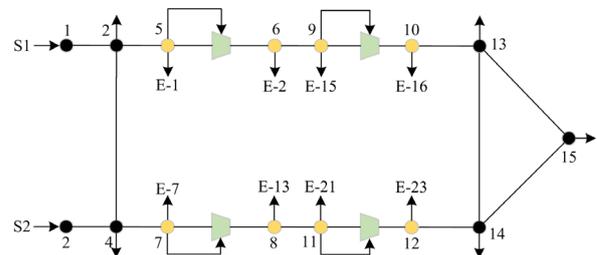


图 4 燃气系统拓扑图

Fig. 4 Topology of gas system

表 1 候选输电线路参数

Table 1 Candidate transmission line data

线路	容量/MW	现有数量	线路长度/km
1-3	175	1	74
2-4	175	1	57
7-8	175	1	25
12-13	500	1	52
14-16	500	1	43
15-21	500	1	54
15-24	500	1	58
16-17	500	1	29
18-21	500	1	29
19-20	500	1	43
20-23	500	1	23
21-22	500	1	74

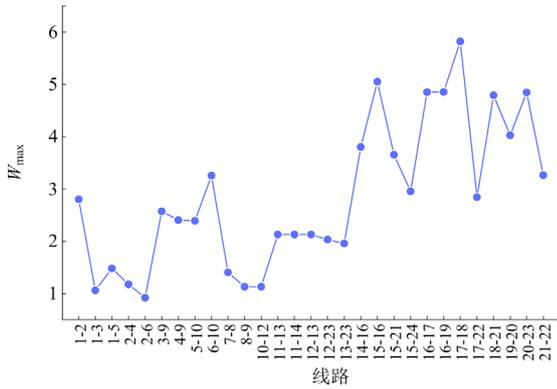


图5 线路最大熵值分布情况

Fig. 5 Maximum entropy distribution of the lines

知, 线路的故障率越高其对应的熵值越小, 系统在台风灾害下的熵值越大代表该情况的发生概率越小, 若在规划中系统熵值预估过大会导致规划结果过于保守, 因此在规划时需要合理考虑其值。

为得出熵值的合理范围, 本节不考虑弹性提升措施, 在 C&CG 算法中将上层模型修改为正常的扩展规划, 不进行迭代, 分别求解主问题与子问题, 同时不采用加固规划, 通过改变不确定集中的熵值预估 $-\log_2 \Delta_L$, 得出各熵值下的最严重灾害场景。为区分已有设备与候选设备, 规定已有线路、候选线路的标识分别为 EL_E 、 EL_C , 已有机组、候选机组的标识分别为 G_E 、 G_C , 已有管道、候选管道的标识分别为 GL_E^n 、 GL_C^n , n 为扩建数目。最后得出的不考虑弹性提升措施的最严重灾害场景如表 2 所示。

从表 2 可知, 随着熵值预估的不断增大, 系统所发生的故障越来越严重。当熵值预估处于 [1, 9] 时, 由于系统熵值预估较低, 故障率较高的线路易发生中断。当熵值预估增至 15 时, 中断线路随之增多, 线路 15-24、20-23 等距机组较近的低故障率线路发生故障, 导致系统的传输能力大大下降, 失负

荷量也进一步增加, 因此有必要在后续的规划过程中合理选择熵值预估。为不失一般性, 本文在后续的研究中选择熵值预估为 15, 值得一提的是, 此参数不会影响模型的效果, 实际规划时可根据投资者的需求进行更改。

表 2 不考虑弹性提升措施的最严重灾害场景

Table 2 The worst disaster scenario without considering resilience lifting measures

熵值 预估	最严重故障集	失负荷/ MWh
1	—	0
5	$EL_{1-5,E}, EL_{5-10,E}$	156.71
9	$EL_{1-5,E}, EL_{5-10,E}, EL_{2-4,C}, EL_{4-9,E}$	328.08
11	$EL_{1-5,E}, EL_{5-10,E}, EL_{2-4,C}, EL_{2-4,E}, EL_{4-9,E}$	513.31
15	$EL_{1-3,C}, EL_{7-8,E}, EL_{15-21,E}, EL_{15-24,E}, EL_{20-23,E}, EL_{1-5,E}, EL_{5-10,E}$	924.23

4.2 不同规划方法对比

为体现本文灾前规划方法对 IEGS 弹性提升的有效性, 本节采用不同的规划方法进行对比, 其中扩展规划预算设置为 1.6×10^8 美元, 加固规划预算设置为 2.6×10^7 美元, 下层风险规避阶段的风险规避系数 σ 为 0.2, 具体规划场景如下所述。

场景一: 不考虑弹性提升措施的 IEGS 扩展规划, 不考虑加固规划;

场景二: 考虑弹性提升措施的 IEGS 扩展规划, 不考虑加固规划;

场景三(本文): 考虑弹性提升措施的 IEGS 扩展规划, 且考虑加固规划。

各场景的具体规划成本、规划设备以及最小失负荷情况如表 3 所示。

从表 3 中可以出: 在规划阶段, 场景一由于没有考虑弹性提升, 仅以经济性为目标, 从而导致了系统产生了严重的失负荷; 在扩展规划阶段, 场景

表 3 不同场景下规划及最小失负荷结果

Table 3 Results of planning and minimum loss of load under different scenarios

不同场景	场景一	场景二	场景三
总成本/美元	1.2686×10^9	2.1093×10^9	1.7920×10^9
规划线路	$EL_{1-3,C}, EL_{2-4,C}, EL_{7-8,C}, EL_{24-15,C}, EL_{15-21,C}$	$EL_{1-3,C}, EL_{2-4,C}, EL_{7-8,C}, EL_{24-15,C}, EL_{15-21,C}, EL_{19-20,C}, EL_{20-23,C}, EL_{18-21,C}$	$EL_{1-3,C}, EL_{2-4,C}, EL_{7-8,C}, EL_{24-15,C}, EL_{15-21,C}, EL_{19-20,C}$
投资机组	$G_{1,C}, G_{2,C}, G_{7,C}, G_{15,C}$	$G_{1,C}, G_{2,C}, G_{7,C}, G_{15,C}, G_{16,C}$	$G_{1,C}, G_{2,C}, G_{7,C}, G_{15,C}, G_{16,C}$
规划管道	$PL_{1-3,C}, PL_{3-5,C}^2, PL_{6-9,C}, PL_{10-13,C}, PL_{12-14,C}$	$PL_{1-3,C}, PL_{3-5,C}^2, PL_{4-7,C}^2, PL_{6-9,C}^2, PL_{10-13,C}, PL_{12-14,C}$	$PL_{1-3,C}, PL_{3-5,C}^2, PL_{4-7,C}^2, PL_{6-9,C}^2, PL_{10-13,C}, PL_{12-14,C}$
加固线路	—	—	$EL_{1-3,E}, EL_{7-8,E}, EL_{2-6,E}, EL_{5-10,E}, EL_{15-21,E}$
最小失负荷/MWh	924.23	647.64	228.75

二在场景一的基础上, 考虑了弹性提升措施, 在线路投资上比场景一多投资了 19-20、20-23 等线路, 增加了系统供能的可靠性, 同时在投资机组方面, 16 节点处的候选燃气机组也被投入使用, 天然气系统方面新增管道 6-9 以满足燃气机组供能需求, 最终场景二最严重灾害下的最小失负荷相对场景一减少了 40.75%。

虽然场景二在扩展规划阶段通过增加线路与机组的方式提升了一定的弹性, 但是线路的增多造成了投资策略过于保守, 规划经济性较差, 同时由于可规划的设备与投资预算有限, 难以进一步提升系统弹性。场景三在场景二的基础上考虑了加固规划, 可以看出, 系统整体的最小失负荷明显下降, 系统弹性显著增强, 规划中加固了故障率较高的 1-3、7-8 等线路, 保障了上述线路在灾害中的供能能力, 同时在扩展规划阶段由于部分线路被加固, 故所需要考虑的扩建线路更少。在经济性方面, 由于加固线路的成本比扩展规划的投资更低, 因此整体方案的经济性也更优。

4.3 模型参数敏感性分析

在实际规划过程中, 规划预算是影响最终规划结果的关键因素, 在本文中不同的预算对弹性提升会有显著的影响, 因此本节针对模型中的不确定预算参数进行敏感性分析, 具体参数包括扩展规划投资预算 C_{MAX} 、加固规划预算 C_{INVH} 以及风险规避系数 σ , 为方便结果分析, 本文以 4.1 节中的参数为基准值, 失负荷量以场景三所得到的值为基准值, 以标幺值的形式进行分析。

图 6 为不同扩展规划投资预算 C_{MAX} 、加固规划预算 C_{INVH} 下系统失负荷 P_{loss} 的变化, 从图中可以看出, 失负荷 P_{loss} 随着 C_{MAX} 、 C_{INVH} 的增加而逐渐减少。当投资预算固定时, 系统的最小失负荷量会随着加固预算的增加最终归为 0, 而当加固预算固定时, 随着扩展规划预算的增加失负荷量会趋于稳定, 但不为 0, 这是因为扩展规划的候选线路以及机组有限, 即使全部投入仍然会导致一部分的负荷损失, 而被加固后的线路在灾害中将不会中断, 故加固预算到达一定程度时在投资者给定的熵值预估下, 系统将不会再产生失负荷。因此, 在实际规划中需要合理选择上述两参数的值, 在满足预算的情况下尽可能地增加系统的弹性。

在下层 IGDT 风险规避阶段, 风险规避系数 σ 将会影响加固规划的鲁棒性, 不同的系数会对加固策略产生一定的影响, 从而影响整个弹性规划的结果, 故开展模型对 σ 的敏感性分析。图 7 为不同风险规避系数 σ 对系统失负荷的影响, 从图中可以看

出, 随着不确定系数的增加, 规划决策者会更加倾向于规避灾害所带来的影响, 尽可能地对线路进行加固, 所以系统的失负荷量会逐渐减少, 但是同时加固投资的成本相应增加, 因此在加固阶段需要合理选择该参数, 灵活地调整风险规避系数与投资预算, 对其进行合理的权衡。

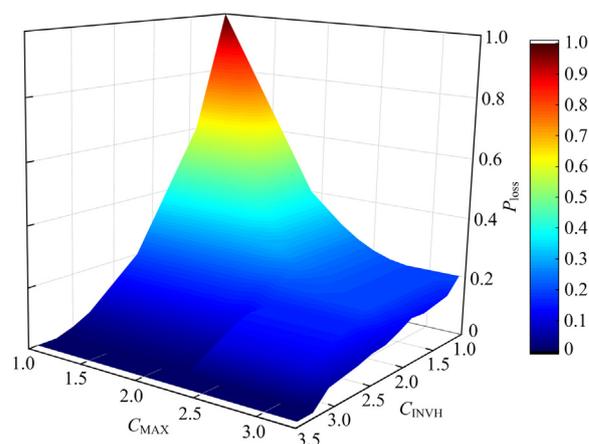


图 6 不同预算参数下失负荷量变化

Table 6 Load loss changes under different budget parameters

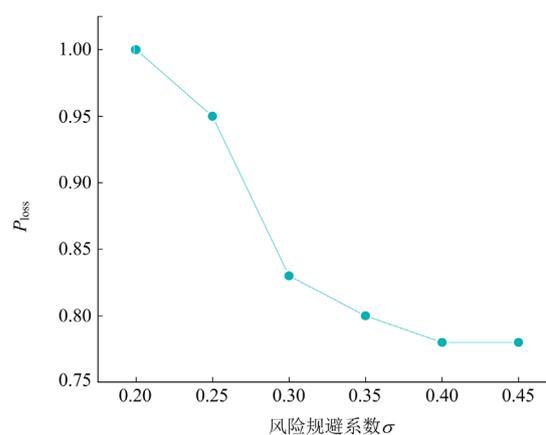


图 7 不同风险规避系数下失负荷变化

Table 7 Load loss changes under different risk aversion

5 结论

本文以 IEGS 灾前弹性提升为规划目标, 综合考虑扩展与加固规划, 建立了基于混合 IGDT 的灾前弹性规划模型。模型上-中层针对扩展规划问题进行鲁棒规划, 下层基于 IGDT 思想对加固规划问题进行不确定优化。所提规划方法有效地提升了 IEGS 灾前弹性, 并通过对 IEGS 的规划结果分析可以得出以下结论:

1) 在 IEGS 时空不确定集的建立过程中, 需要考虑系统熵值预估, 本文通过基于台风灾害历史数

据的模拟可以合理地得出系统熵值预估;

2) 单独的扩展规划或加固规划由于预算、候选设备数目等限制,难以兼顾规划方案的投资保守性与弹性提升有效性,而本文所提的规划方法统筹扩展与加固规划,可以有效地降低投资的保守性,同时使系统获得更佳的弹性提升。

参考文献

- [1] 臧海祥, 耿明昊, 黄蔓云, 等. 电-热-气混联综合能源系统状态估计研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 187-199.
ZANG Haixiang, GENG Minghao, HUANG Manyun, et al. Review and prospect of state estimation for electricity-heat-gas integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 187-199.
- [2] 代琼丹, 邓昕, 吴雪妍, 等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.
- [3] 朱浩昊, 朱继忠, 李盛林, 等. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(4): 383-397.
ZHU Haohao, ZHU Jizhong, LI Shenglin, et al. Review of optimal scheduling of integrated electricity and heat systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(4): 383-397.
- [4] 郭梦芳, 杜翔, 王飞. 考虑边界等式约束的电-气-热综合能源系统鲁棒状态估计方法[J]. 中国电力, 2023, 56(6): 101-106.
GUO Mengfang, DU Xiang, WANG Fei. Robust state estimation method for electric-gas-heat integrated energy system considering boundary equation constraints[J]. Electric Power, 2023, 56(6): 101-106.
- [5] 张亚超, 易杨, 胡志鹏, 等. 基于分布鲁棒优化的电-气综合能源系统弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 76-84.
ZHANG Yachao, YI Yang, HU Zhipeng, et al. Resilience enhancement strategy of electricity-gas integrated energy system based on distributionally robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 76-84.
- [6] 贾伯岩, 李丹, 李雄宇, 等. 电-气综合能源系统多故障两阶段恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 113-123.
JIA Boyan, LI Dan, LI Xiongyu, et al. Two-stage restoration strategy for multi fault of an electric gas integrated energy system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 113-123.
- [7] 侯验秋, 丁一, 包铭磊, 等. 电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7764-7775.
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7775.
- [8] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [9] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-22.
CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [10] 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.
- [11] HUI Z, VITTAL V, HEYDT G T, et al. A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1125-1133.
- [12] HE C, WU L, LIU T, et al. Robust co-optimization planning of interdependent electricity and natural gas systems with a joint N-1 and probabilistic reliability criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2140-2154.
- [13] 王沿胜, 何川, 刘绚, 等. 考虑极端灾害下系统韧性约束的气电联合配网分布鲁棒扩展规划[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 80-92.
WANG Yansheng, HE Chuan, LIU Xuan, et al. Distributionally robust expansion planning of integrated gas-electricity distribution system considering system resilience constraints under extreme disasters[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(1): 80-92.
- [14] 卿玉良, 刘天琪, 刘绚, 等. 考虑多等级加固的气电联合配网系统韧性鲁棒提升策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4938-4949.
QING Yuliang, LIU Tianqi, LIU Xuan, et al. Robust strategy of improving resilience of integrated gas-electricity distribution system considering multi-level reinforcement[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4938-4949.
- [15] 王晗, 侯恺, 刘晓楠, 等. 基于全局灵敏度分析的电气

- 互联系统韧性提升方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 59-67.
- WANG Han, HOU Kai, LIU Xiaonan, et al. Resilience enhancement method for electricity-gas interconnection system based on global sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 59-67.
- [16] WU L, HE C, DAI C, et al. Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5787-5798.
- [17] ALDARAJEE A, HOSSEINIAN S H, VAHIDI B, et al. A coordinated planner-disaster-risk-averse-planner investment model for enhancing the resilience of integrated electric power and natural gas networks[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119.
- [18] ENVELOPE F H, ENVELOPE H. Resilience enhancement of interdependent electricity-natural gas system considering gas storage and power to gas technology[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56.
- [19] HU B, LI M, NIU T, et al. Hardening planning of overhead distribution lines in typhoon-prone areas by considering the typhoon motion paths and the line load reliability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 120.
- [20] ZHANG Weixin, SHAO Changzheng, HU Bo, et al. Transmission defense hardening against typhoon disasters under decision-dependent uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2653-2665.
- [21] JOHN, KAPLAN, MARK, et al. A simple empirical model for predicting the decay of tropical cyclone winds after landfall[J]. Journal of Applied Meteorology, 1995, 34(11): 2499-2512.
- [22] LIU X, HOU K, JIA H, 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.
- [23] BATTS M E, CORDES M R, RUSSELL L R, et al. Hurricane wind speeds in the United States[J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(124).
- [24] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
- SONG Xiaozhe, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [25] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513, 681.
- [26] MIAO Cairan, WANG Qi, TANG Yi, et al. Multi-energy inertia-based power support strategy with gas network constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 303-320.
- [27] BEN-HAIM Y. Info-gap decision theory: decisions under severe uncertainty[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2006.
- [28] 李东东, 张凯, 姚寅, 等. 基于信息间隙决策理论的电动汽车聚合商日前需求响应调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 101-111.
- LI Dongdong, ZHANG Kai, YAO Yin, et al. Day-ahead demand response scheduling strategy of an electric vehicle aggregator based on information gap decision theory[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 101-111.
- [29] YUAN H, BIE Z, TAO D, et al. An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy, 2016, 167: 280-293.
- [30] 代璐, 田立勃, 王海亮, 等. 计及用户综合用能行为和政策导向的广域综合能源系统联合规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 57-71.
- DAI Lu, TIAN Libo, WANG Hailiang, et al. Integrated planning of supply and demand side considering the behavior analysis of energy users and the policy-oriented impact[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 57-71.
- [31] 台风路径[EB/OL]. [2022-11-23]. <https://typhoon.slt.zj.gov.cn/default.aspx>.
-
- 收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-07-03
- 作者简介:
- 徐琴(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析和城市配电网; Email: xuqingsgcc@163.com
- 金海翔(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统极端灾害防御与恢复研究; E-mail: 759046131@qq.com
- 边晓燕(1976—), 女, 通信作者, 教授, 研究方向为高比例新能源电力系统稳定与控制, 综合能源系统极端灾害防御与恢复等。E-mail: kuliz@163.com
- (编辑 姜新丽)