

地震条件下综合能源系统的多时间尺度韧性提升方法

朱喜玥, 刘鑫蕊, 侯敏, 王睿, 孙秋野

(东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省沈阳市 110819)

摘要: 地震灾害具有难预测、波及广等特点,在低震级或非震中地区,虽然不会造成建筑物倒塌、人员伤亡等,但可能会破坏架空电力线路和地下管道,对供能系统产生较大影响。文中针对电-气-热综合能源系统,提出地震灾前规划和应急响应预案制定、灾时抢先地震波传播时间差完成负荷超前转供的多时间尺度韧性提升方法。首先,建立了地震影响的综合能源系统网格化故障概率模型。其次,在解耦框架下提出了综合能源系统的双环最优负荷削减模型,并考虑建筑物热惯性的负荷满意度,提出韧性评估和多时间尺度韧性提升方法。最后,通过仿真算例验证了该方法的有效性。

关键词: 综合能源系统; 韧性; 多时间尺度韧性提升方法; 最优负荷削减; 应急响应

0 引言

地震极有可能引发综合能源系统(integrated energy system, IES)的用能中断等经济损失,本文关注发生概率更高、影响范围更大的低震级地震或非震中的 IES 情况。此时,虽然地震未影响人身安全或毁损基础设施,但对能源网络的供能可靠性提出了更高要求。

现有文献大多针对飓风、冰雪等天气展开了对 IES 韧性提升的研究^[1-2],但该类天气灾害几乎不会破坏地下管道,故一般仅考虑对电力元件的影响。评估 IES 的韧性时必须将地下天然气管道和热力管道的脆弱性考虑在内。

在韧性评估方面,近年来大多研究基于韧性三角形或韧性梯形^[3-4],将单一的失负荷量作为评估指标^[5]。文献[6]从鲁棒性、快速性和冗余性3个方面构建 IES 的韧性指标,评估灾时和灾后的供电能力,但是由于未考虑建筑物的热惯性,无法准确评估热负荷的实际用能情况。

在灾前韧性提升方面,文献[7-9]通过增加冗余或加固元件等规划方案来提升系统韧性,但灾前规划无法动态响应实际地震场景,需配合灾后韧性恢复。目前,利用网络重构方法来提升配电网的灾后韧性水平已有不少成果^[10-14],其中包括的单/多优化

目标有失负荷总量最小、重要负荷失电量最小、开关操作次数最少等。文献[15]考虑次生故障影响,提出了一种窗口滚动的网架重构模型。但上述研究仅针对电力系统。针对 IES,文献[16]在电气互联系统中利用网络重构方法对系统进行灾后恢复,但是仅对配电线路实施了重构,没有考虑天然气网络。文献[17]利用电力线路和天然气管道的网络重构及多能源协同恢复,提高了系统抗灾韧性。上述文献都是仅从灾前或灾后开展 IES 韧性提升研究,没有将二者有效结合。

目前,中国的地震预警系统能够在地震发生后,第一时间向大众发布地震信息,并利用地震波传播速度小于电磁波传播速度的特性,对地震波尚未到达的地方进行预警。因此,在地震发生时,充分利用这一短暂的地震传播时间差,可对地震波尚未破坏到的 IES 实施韧性提升措施。

综上,本文提出了地震条件下 IES 的多时间尺度韧性提升方法。首先,基于地震影响下的 IES 故障概率模型和解耦框架下的 IES 最优负荷削减模型,提出考虑负荷满意度的韧性评估方法。然后,通过在灾前实施规划策略并制定应急响应预案集,灾时从预案集中匹配两阶段灾时响应方案来对重要负荷超前转供,构建了多时间尺度韧性提升方法。最后,在 IEEE 33 节点电力-14 节点天然气-7 节点热力耦合的电-气-热 IES (IES E33-G14-H7) 中验证了所提方法的有效性。

1 地震灾害模型

三级潜在震源区模型^[18]规定,地震可以发生在

收稿日期: 2023-08-05; 修回日期: 2023-11-29。

上网日期: 2024-01-24。

国家自然科学基金资助项目(62173074);国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702203);国家自然科学基金联合基金资助项目(U20A20190)。

统计区内的任意点,但是震中点的地震等级不会超过该点所属的潜在震源区的震级上限。以潜在震源区的震级上限为界,将震级可行域划分为若干个区间,各震级区间对应不同的潜在震中点集合,如附录A图A1所示。

首先,从某个震级可行域内枚举震级 m_c ;然后,从对应的潜在震中点集合中枚举震中点的位置,即生成了一个潜在地震场景,依次枚举所有的震级和震中点,就得到了潜在地震场景集。 m_c 级地震的发生概率 $P(m_c)$ 由式(1)计算得到^[18]。

$$P(m_c) = \frac{2\exp[-\beta(m_c - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - m_0)]} \operatorname{sh}\left(\frac{\beta\Delta m}{2}\right) \quad (1)$$

式中: m_c 为第 c 震级段中点, $(m_c - 1)/(2\Delta m) \leq m_c \leq (m_c + 1)/(2\Delta m)$; Δm 为震级档距; $\beta = b \ln 10$,其中, b 为震级-频度关系系数; m_0 和 m_{uz} 分别为地震统计区的震级下限和上限。

当确定了地震等级 m_c 后,震中点在第 B_i 背景源内的位置 (x, y) 处的概率 $P((x, y)|m_c)$ 为^[19]:

$$P((x, y)|m_c) = \frac{\alpha_{B_i}}{N_s \sum_{B_k=1}^{N_s} \alpha_{B_k}} \quad (2)$$

式中: N_s 为地震统计区内背景源的数量; s_{B_i} 为第 B_i 背景源的面积; α_{B_k} 和 α_{B_i} 分别为第 B_k 和第 B_i 背景源的活动权值,其大小与震级有关,如式(3)所示。

$$\alpha_{B_i} = \begin{cases} s_{B_i}(m_{u, B_i} - m_0) & m_c \leq m_{u, B_i} \\ 0 & m_c > m_{u, B_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中: m_{u, B_i} 为第 B_i 个潜在震源区的震级上限。

因此,在地震统计区内位置 (x, y) 处发生 m_c 级地震的概率 P_c 为:

$$P_c = P(m_c)P((x, y)|m_c) \quad (4)$$

地震烈度 I 表征地震引起的地面震动的强弱程度,它从震中点以椭圆形向四周衰减,震中的烈度最高。目前,中国最常用的地震烈度衰减关系为:

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

式中: A 、 B 和 C 均为回归系数; r 为震中距; r_0 为回归参数^[20]。

因此,当发生不同等级的地震时,相同震中距位置处的地震烈度也大不相同。根据地震烈度表,IES所在的地区地震烈度达到6度($5.5 \leq I < 6.5$)以下时,未对建筑基础设施造成破坏,但是极有可能对供电系统产生较大影响,故取 $I=5.5$ 代入式(5),根据文献[5]取 $A=5.7123$, $B=1.3626$, $C=4.2903$, $r_0=25$,计算可得不同地震等级下可能使IES影响的最大震中距 r_{\max} 为:当 $m_c=5$ 时, $r_{\max}=18.4$ km;

当 $m_c=6$ 时, $r_{\max}=65.2$ km;当 $m_c=7$ 时, $r_{\max}=125.4$ km;当 $m_c=8$ 时, $r_{\max}=364.3$ km。因此,IES所在的地区地震烈度为6度以下是本文讨论的范围,例如,当发生6.7级地震时,本方法适用于震中距在2.5 km至125.4 km的IES,相关计算分析详见第4.2节。

地震的峰值地面加速度表征发生地震时建筑物受到最大地震作用力的大小^[21],用 r_{PGA} 表示,有

$$\lg r_{\text{PGA}} = 0.583 + 0.651m_c - 1.652 \times \lg[r + 0.182\exp(0.707m_c)] \quad (6)$$

地震直接参数与震中距和震级的关系如附录A图A2所示。在同一震级下,震中距相差不大的位置(约1 km内), I 近似相等, r_{PGA} 也近似相等。故本文以1 km为间距从震中点向四周以椭圆形依次划分为若干个网格,认为每个网格内的地震直接影响参数相等。

2 基于网格化的故障概率模型

2.1 电力子系统故障概率模型

配电网各元件所处位置的地质结构通常基本相同。因此,土质差异不作为主要影响因素^[22]。架空电力线路的故障概率由导线和杆塔的受损状态综合决定。

导线在地震影响下的故障概率^[8]为:

$$\begin{cases} P_{j,m}^{\text{lead}} = \frac{l_{j,m}}{l_{\text{all}}} \sum_{k=1}^4 Z_k P_{j,m}^k \\ l_{\text{all}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{N_{G,j}} l_{j,m} \\ P_{j,m}^k = \int_0^{r_{\text{PGA},m}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_k s} \exp\left[-\frac{(\ln s - \lambda_k)^2}{2\xi_k^2}\right] \right\} ds \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{j,m}^{\text{lead}}$ 为线路 j 在网格 m 中的导线段的失效概率; $l_{j,m}$ 为第 j 条线路在网格 m 内的长度; l_{all} 为配电网中所有线路的总长度; J 为配电线路的数量; $N_{G,j}$ 为线路 j 涉及的网格数量; $r_{\text{PGA},m}$ 为网格 m 内的峰值地面加速度; k 为配电线路不同的受损状态; $P_{j,m}^k$ 为线路 j 在网格 m 中处于第 k 种受损状态的概率; s 为当前线路破坏状态的强度; λ_k 、 ξ_k 和 Z_k 分别为第 k 种受损状态下脆弱性曲线的对数均值、标准差和受损比例^[23]。

地震可能会使杆塔倒塌,进而影响线路的正常运行。地震影响下杆塔的失效概率模型为^[22]:

$$\begin{cases} \ln L_{\max} = \kappa \ln(r_{\text{PGA}}) + \iota \\ P_{j,m}^{\text{tower}} = 1 - \exp\left(-\frac{\ln L_{d_i} - \mu_{\ln L_{\max}|r_{\text{PGA},m}}}{2\sigma_{\ln L_{\max}|r_{\text{PGA},m}}} T_{j,m}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: L_{\max} 为杆塔在 r_{PGA} 时的顶点最大水平位移; $P_{j,m}^{\text{tower}}$ 为线路 j 在网格 m 中的杆塔处于第 L_{d_i} 种地震灾害等级的概率, $d_i=1,2,3,4$ 分别代表轻微、中度、严重破坏和接近倒塌; $T_{j,m}$ 为线路 j 在网格 m 内的杆塔数量; κ 和 ι 为关系常数; $\mu_{\ln L_{\max} r_{\text{PGA},m}}$ 和 $\sigma_{\ln L_{\max} r_{\text{PGA},m}}$ 分别为该正态分布的期望和标准差。

本文综合考虑地震对导线和杆塔的影响,得到了配电线路 j 的综合故障概率 $P_j^{\text{line, fault}}$ 为:

$$P_j^{\text{line, fault}} = 1 - \prod_{m=1}^{N_{G,j}} [(1 - P_{j,m}^{\text{lead}}) P_{j,m}^{\text{tower}}] \quad (9)$$

2.2 天然气子系统故障概率模型

天然气管道 g 基于地震烈度的震害率 H_g 为^[6]:

$$H_g = C_d C_f 10^{0.8(I-9)} \quad (10)$$

式中: C_d 为管道的管径影响系数,取 0.25; C_f 为场地土影响系数,取 2.0。

天然气管道在地震影响下的故障概率模型为:

$$\begin{cases} P_g^{\text{gas, fault}} = 1 - \prod_{m=1}^{N_{G,g}} \exp(-H_{g,m} l_{g,m}) \\ l_{g,\text{all}} = \sum_{m=1}^{N_{G,g}} l_{g,m} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_g^{\text{gas, fault}}$ 为天然气管道 g 的故障率; $N_{G,g}$ 为天然气管道 g 所涉及的网格数; $H_{g,m}$ 为管道 g 在网格 m 内的震害率; $l_{g,m}$ 为管道 g 在网格 m 内的长度; $l_{g,\text{all}}$ 为管道 g 的总长度。

2.3 热力子系统故障概率模型

热力管道的故障概率模型为:

$$P_h^{\text{heat, fault}} = 1 - \prod_{m=1}^{N_{G,h}} \exp(-H_{h,m} l_{h,m}) \quad (12)$$

式中: $P_h^{\text{heat, fault}}$ 为热力管道 h 的故障率; $N_{G,h}$ 为管道 h 所涉及的网格数; $l_{h,m}$ 为管道 h 在网格 m 内的长度; $H_{h,m}$ 为管道 h 在网格 m 上的震害率,与供热管道直径 D_h 相关^[6],如式(13)所示。

$$H_{h,m} = \begin{cases} 1.90 \times 10^{-8} r_{\text{PGA},m}^{4.42} & 20 \leq D_h \leq 50 \\ 2.26 \times 10^{-13} r_{\text{PGA},m}^{6.34} & 65 \leq D_h \leq 600 \end{cases} \quad (13)$$

3 基于负荷满意度的韧性评估与提升方法

3.1 基于负荷满意度的韧性评估方法

本文采用系统级韧性指标 R_{sys} 衡量地震影响下 IES 的韧性水平。当 $R_{\text{sys}} > R_{\text{set}}$ (R_{set} 为设定的韧性指标合格值, $R_{\text{set}} \in [0, 1]$) 时,认为该系统的韧性水平不合格,需要借助元件级韧性指标 R_n 制定灾前规划方案^[7]。

3.1.1 系统级韧性指标

$$R_{\text{sys}} = \sum_{u=1}^{E_N} P_{e,u} E_u(W_{\text{shed}}) \quad (14)$$

式中: E_N 为地震场景数; u 为潜在地震场景序号; $P_{e,u}$ 为场景 u 的发生概率; $E_u(W_{\text{shed}})$ 为 IES 在场景 u 中的综合负荷满意度 W 削减量。

3.1.2 元件级韧性指标

R_n 为当元件 n 在任何地震场景中都不发生故障时系统级韧性指标与原系统韧性指标之间的差值,故 R_n 越大,说明灾前加固该元件对系统韧性水平的提升效果越显著^[1]。

$$R_n = R_{\text{sys}} - R_{\text{sys}}|_{p_n=0} \quad (15)$$

式中: p_n 为元件 n 的故障率; $R_{\text{sys}}|_{p_n=0}$ 为在任何地震场景下元件 n 均不会失效时系统的韧性。

3.2 负荷满意度建模

$$W = \sum_{n_e \in S_B} \omega_{n_e} C_{n_e} + \sum_{n_g \in S_G} \omega_{n_g} C_{n_g} + \sum_{n_h \in S_H} \omega_{n_h} C_{n_h} \quad (16)$$

式中: ω_{n_e} 、 ω_{n_g} 和 ω_{n_h} 分别为电力、天然气和热力节点的负荷等级权重系数; C_{n_e} 、 C_{n_g} 和 C_{n_h} 分别为电力节点 n_e 、天然气节点 n_g 和热力节点 n_h 的负荷满意度; S_B 、 S_G 和 S_H 分别为电力节点集合、天然气节点集合和热力节点集合。

$$C_{n_e} = \left(1 - \frac{P_{\text{Lshed},n_e}(t)}{P_{\text{D},n_e}(t)} \right) \times 100\% \quad (17)$$

$$C_{n_g} = \left(1 - \frac{G_{\text{Lshed},n_g}(t)}{G_{\text{L},n_g}(t)} \right) \times 100\% \quad (18)$$

式中: $P_{\text{D},n_e}(t)$ 和 $P_{\text{Lshed},n_e}(t)$ 分别为节点 n_e 在 t 时刻的电力负荷需求量和削减量; $G_{\text{L},n_g}(t)$ 和 $G_{\text{Lshed},n_g}(t)$ 分别为节点 n_g 在 t 时刻的天然气负荷需求量和削减量。

热/冷负荷的 C_{n_h} 与用户室内温度相关(如式(19)所示),而室内温度需要根据建筑物热量损失和热惯性模型求解^[24-28],求解过程如附录 B 所示。以下以冬季用热负荷场景为例,夏季冷负荷的分析同理。

$$C_{n_h} = \frac{\phi_{n_h,t}^{\text{L}} - \phi_{n_h,t}^{\text{shed}}}{\phi_{n_h,t}^{\text{L}}} \left[2.43 - \frac{3.76(T_c - T_t^{\text{in}})}{D(R_c + 0.1)} \right] \quad (19)$$

式中: T_t^{in} 为该建筑物在 t 时刻的室内温度; D 为人体能量代谢率; R_c 为服装耐热阻; T_c 为人体皮肤处于舒适状态下的平均温度; $\phi_{n_h,t}^{\text{L}}$ 和 $\phi_{n_h,t}^{\text{shed}}$ 分别为 t 时刻节点 n_h 的热负荷需求量和削减量。

负荷满意度与节点的负荷削减量相关,本文为了提高计算速度,提出了解耦框架下的 IES 最优负荷削减模型。

3.3 解耦框架下的 IES 最优负荷削减模型

本文讨论以热电联产(combined heat and power, CHP)机组和燃气轮机(gas turbine, GT)作

为耦合设备的 IES 的最优负荷削减问题,其中,CHP 机组采用以热定电模式。本文从热网入手将 IES 的优化问题解耦为各能源子网的负荷削减优化,如图 1 所示。图中: ϕ_{CHP} 和 $\phi_{\text{CHP,max}}$ 分别为 CHP 机组的实际产热量和最大产热量; P_{CHP} 为 CHP 机组的发电量; $G_{\text{r,CHP}}^{\text{max}}$ 和 $G_{\text{r,GT}}^{\text{max}}$ 分别为 CHP 机组和 GT 接入节点的最大供气量; $G_{\text{r,CHP}}$ 和 $G_{\text{r,GT}}$ 分别为 CHP 机组和 GT 的天然气需求量; P_{GT} 和 $P_{\text{GT,max}}$ 分别为 GT 的实际发电量和最大发电量。

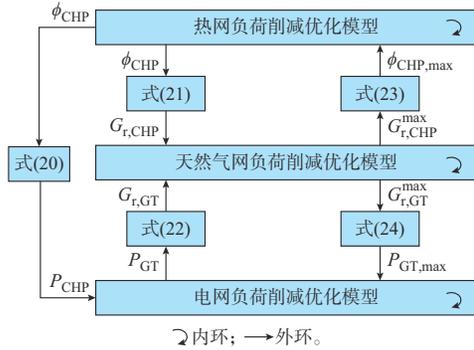


图 1 解耦框架下 IES 的双环最优负荷削减模型

Fig. 1 Two-loop optimal load reduction model of IES in decoupling framework

在内环,各能源子系统以自身负荷削减量最小为目标进行最优潮流计算;在外环,利用式(20)至式(24)对内环各子网的负荷削减结果进行修正。内外环迭代求解,当天然气网中耦合元件接入节点的天然气削减量小于 e^{-7} 时,说明求得的各子网最优负荷削减状态满足耦合条件,得到 IES 的全局最优解。具体步骤如下。

步骤 1: 计算热网的最优负荷削减状态,得到此时的 ϕ_{CHP} ;

步骤 2: 由 ϕ_{CHP} 得出电网中 CHP 接入节点的 P_{CHP} ,将其作为已知条件输入电网削减优化模型中,计算电网的最优负荷削减状态,得到此时的 P_{GT} ;

步骤 3: 根据 ϕ_{CHP} 和 P_{GT} 求得天然气网中各耦合元件接入节点的天然气需求量 $G_{\text{r,CHP}}$ 和 $G_{\text{r,GT}}$,将其作为气负荷需求量输入天然气负荷削减优化模型中,计算各气节点的供气负荷削减量;

步骤 4: 若耦合节点的气负荷削减量大于 e^{-7} ,说明这种优化结果中耦合元件不能正常运行,气网不足以支持电网和热网的运行状态。根据式(23)和式(24),由耦合节点的最大供气量 $G_{\text{r,CHP}}^{\text{max}}$ 求得 $\phi_{\text{CHP,max}}$ 和 $P_{\text{GT,max}}$,将其作为约束条件输入热网和电网的负荷削减优化模型,转入步骤 1 进行下一次迭代计算。

$$P_{\text{CHP}} = \frac{\phi_{\text{CHP}}}{c_m} \quad (20)$$

$$G_{\text{r,CHP}} = \frac{\phi_{\text{CHP}}}{q_{\text{gas}} \eta_{\text{h,CHP}}} + \frac{P_{\text{CHP}}}{q_{\text{gas}} \eta_{\text{e,CHP}}} \quad (21)$$

$$G_{\text{r,GT}} = \frac{P_{\text{GT}}}{q_{\text{gas}} \eta_{\text{GT}}} \quad (22)$$

$$\phi_{\text{CHP,max}} = \frac{q_{\text{gas}} \eta_{\text{e,CHP}} \eta_{\text{h,CHP}} c_m}{\eta_{\text{e,CHP}} c_m + \eta_{\text{h,CHP}}} G_{\text{r,CHP}}^{\text{max}} \quad (23)$$

$$P_{\text{GT,max}} = G_{\text{r,GT}}^{\text{max}} q_{\text{gas}} \eta_{\text{GT}} \quad (24)$$

式中: q_{gas} 为天然气热值; $\eta_{\text{h,CHP}}$ 和 $\eta_{\text{e,CHP}}$ 分别为 CHP 机组的产热效率和发电效率,分别取 0.6 和 0.5; c_m 为 CHP 机组的热电比,取 0.6; η_{GT} 为 GT 的发电效率,取 0.9。

3.3.1 电网最优负荷削减模型

电网最优负荷削减模型的目标函数如式(25)所示。该模型中需要对节点电压、功率和发电机的出力进行约束,具体约束见附录 C 式(C1)。该优化模型可以使用 Matpower 工具包快速求解。

$$\min \sum_{n_e \in S_B} P_{\text{Lshed}, n_e} \quad (25)$$

式中: P_{Lshed, n_e} 为节点 n_e 的电力负荷削减量。

3.3.2 天然气网最优负荷削减模型

本文研究的时间尺度为小时级别,在对天然气网建模时,忽略电力系统与天然气系统间的潮流传输差异,采用天然气的稳态潮流模型^[4-6]。

天然气网最优负荷削减模型的优化目标如式(26)所示。

$$\min \sum_{n_g \in S_G} G_{\text{Lshed}, n_g} \quad (26)$$

式中: G_{Lshed, n_g} 为节点 n_g 的气负荷削减量。

在该模型中需要对天然气节点气压、管道流量以及气源出力进行约束。此外,天然气管道流量与两端节点电压满足 Weymouth 约束,而该约束的存在使天然气网最优负荷削减模型为非线性非凸优化问题,故需要对其进行线性化处理,转换为混合整数线性凸优化问题,以便利用 CPLEX 求解器快速计算。具体的约束条件和线性化处理过程如附录 C 式(C2)至式(C6)所示。

3.3.3 热网最优负荷削减模型

本文采用质调节方式来调节热功率,基于热网的水力模型和热力模型,提出了热网负荷削减优化模型。目标函数如式(27)所示,具体约束条件如附录 C 式(C7)至式(C8)所示。

$$\min \sum_{n_h \in S_H} \phi_{\text{Lshed}, n_h} \quad (27)$$

式中: ϕ_{Lshed, n_h} 为节点 n_h 的热负荷削减量。

该模型为线性凸优化问题,能够使用 CPLEX 求解器快速求解。

3.4 地震影响下 IES 的多时间尺度韧性提升方法

本文面向地震影响下的 IES 提出了多时间尺度韧性提升方法,在多时间尺度上,通过灾前和灾时分别采取具有针对性的方案提升 IES 的韧性;在多空间尺度上,合理调度处于不同空间的电、气、热资源,采用多能协调策略来恢复尽可能多的重要负荷。相关结构图如附录 A 图 A3 所示。

灾前枚举潜在地震场景,一方面,实施合理的规划策略;另一方面,制定每种潜在地震场景对应的两阶段灾时应急响应预案。

灾时根据地震信息从预案中匹配两阶段灾时响应方案并直接实施,若在预案中未寻得匹配的地震场景,则需要重新计算两阶段灾时响应方案,并在灾害结束后将该策略加入应急响应预案集中,完善灾前制定的预案。

这样灾前的规划方案和应急响应预案能够削弱灾时的负荷损失程度,灾时实施的方案又能完善灾前的应急响应预案集。通过灾前和灾时的有效配合,能够节省灾时的计算时间,在短暂的地震传播时间差内更多地恢复重要负荷。

为了防止故障扩大,假定在地震发生时停运耦合元件、断开电力子网与大电网的连接。应急响应预案集中的灾时响应方案分两阶段进行。

第 1 阶段:在地震传播时间差内考虑负荷重要度,通过开关/阀门的配合将薄弱管线主动断开,并制定重要负荷的超前转供策略,使尽可能多的重要负荷对灾害无感。制定以 W 最大为目标的负荷超前转供策略,如式(28)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \max W \\ \text{s.t.} \quad \sum_{n_c \in S_b} \omega_{n_c} + \sum_{n_g \in S_G} \omega_{n_g} + \sum_{n_h \in S_H} \omega_{n_h} = 1 \\ \gamma_{n_i, n_j} + \gamma_{n_j, n_i} = \zeta_{n_i, n_j} \\ \gamma_{n_i, n_i} = 0 \\ \sum_{n_i, n_j \in N} \gamma_{n_i, n_j} = 1 \quad \forall n_i \in N/n_r \end{array} \right. \quad (28)$$

式中:节点 $n_i \in N$; 节点 $n_j \in N$; N 为 IES 节点集; n_r 为根节点; γ_{n_i, n_j} 和 γ_{n_j, n_i} 为 n_i 和 n_j 之间的关系系数,是 0-1 型变量; ζ_{n_i, n_j} 为引入变量,是 0-1 型变量。

若 n_i 为 n_j 的父节点,则 $\gamma_{n_i, n_j} = 1$; 若 n_i 和 n_j 无连接,则 $\gamma_{n_i, n_j} = 0$, 且 γ_{n_i, n_j} 和 γ_{n_j, n_i} 不能同时为 1^[17]。除根节点外,每个节点只有一个父节点。

第 2 阶段:在一阶段结束后的拓扑中闭合耦合设备开关,利用多能源协同恢复更多的负荷,进一步

提升 IES 的韧性。

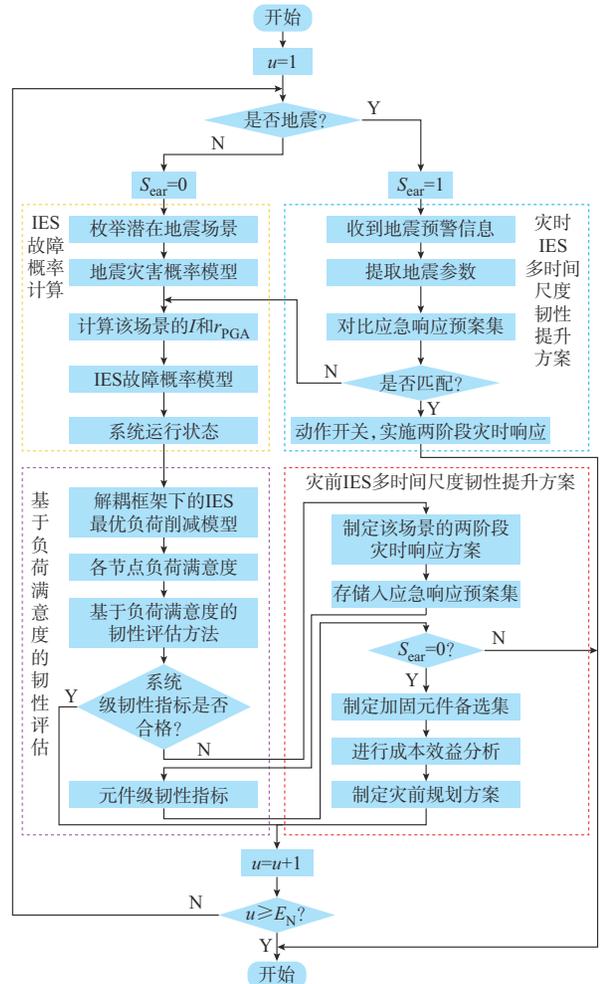


图 2 地震影响下 IES 的多时间尺度韧性评估与提升方法流程

Fig. 2 Flowchart of multi-timescale resilience assessment and improvement methods for IES under earthquake

图 2 给出了地震影响下 IES 的多时间尺度韧性评估与提升方法的流程图。图中: S_{car} 为地震发生与否的状态变量。具体步骤如下。

步骤 1: 灾前阶段枚举潜在地震场景;

步骤 2: 根据第 1 章和第 2 章计算管/线故障概率;

步骤 3: 根据第 3 章计算 IES 的韧性水平;

步骤 4: 若该场景下的韧性指标不合格, 则根据应急响应预案, 参照元件级韧性指标实施规划策略;

步骤 5: 灾时阶段, 根据地震监测局发布的地震信息从预案集中匹配两阶段灾时响应方案。若匹配失败, 则返回步骤 2。

4 算例仿真

本文以附录 D 图 D1 所示的 IES E33-G14-H7 为

例进行仿真,图中:S1至S3为线路开关;S4至S6为联络线开关;V1至V5为管道阀门;GS1、GS2为气源;MG1和MG2为两个微电网区域;SS1和SS2为两个微气网区域;PV1和PV2为两个分布式电源。

该系统共有44个负荷节点,分别是电力节点2至33、天然气节点1至6以及热力节点1至6。采用蒙特卡洛法来随机生成负荷权重值,如附录D图D2所示。三级负荷权重值为0~0.02,二级负荷权重值为0.02~0.06,一级负荷权重值为0.06~0.10。本算例 R_{set} 取0.2,系统其他相关参数见附录E。

4.1 考虑地震不确定性的灾前阶段

4.1.1 灾前规划方案

灾前考虑地震不确定性,以1 km×1 km将该统计区划分为6 300个网格,假设每个网格的中心点代表一个潜在震源点,根据震级与潜在震源点的关系,枚举得到24 960个潜在地震场景。在每个潜在地震场景中计算脆弱元件,模拟系统的运行状态,基于IES最优负荷削减模型得到韧性评估结果。

附录D图D3给出了系统级韧性评估结果 R_{sys} 和每个子网络中前3个最脆弱元件的 R_n ,该IES中电力线路13的 R_n 最高,为0.286,说明强化该元件对整个系统的韧性水平提升效果显著。但是这些元件的 R_n 相差不大,故在制定灾前规划策略时还需要考虑成本效益。

本文根据元件脆弱程度和 R_n 提出了5种灾前规划方案如下:

方案1:强化电力子网中最薄弱的3条线路,即电力线路16、13和23;

方案2:强化天然气子网中最薄弱的3条管道,即天然气管道5、7和8;

方案3:强化热力子网中最薄弱的3条管道,即热力管道5、6和3;

方案4:分别选择各子网中 R_n 最高的元件,即强化电力线路13、天然气管道8和热力管道5;

方案5:选择IES中 R_n 最高的元件,即对电力线路13、23和热力管道5进行强化。

本文通过增加冗余来强化元件,电力线路、天然气管道和热力管道的强化成本分别为600、1 200、5 600万元/km^[29]。5种规划方案的韧性提升成本效益如附录D图D4所示,发现在同样强化3个元件时,各方案的韧性提升效果却不尽相同。例如,方案5的韧性提升效果比方案1略好,却比方案1多花费530万元。

4.1.2 应急响应预案集

本节以潜在地震场景集中的一个地震场景为例,演示两阶段灾时响应方案的生成过程,该地震

场景为:假设在距该IES设施最近为83 km处的某点发生了6.7级地震,IES的实际管线走势如附录D图D5所示。遍历所有潜在地震场景即可生成应急响应预案集。

在该场景下的脆弱元件如附录D表D1所示。本节通过对比4种灾时响应方案来验证所提两阶段灾时响应策略的优越性,具体如下:

方案1:无措施;

方案2:仅采用负荷超前转供策略,地震波到来前主动断开表D1中的脆弱管线并闭合联络线开关S5、S6和阀门V4;

方案3:仅在受到地震破坏的最终网络拓扑中闭合耦合设备GT1、GT2和CHP机组的开关,实施多能协调恢复策略;

方案4:采用两阶段灾时响应策略,即在地震波到达前完成负荷超前转供,然后在开关动作后的拓扑中闭合耦合设备。实施该方案后的拓扑如附录D图D6所示。

图3和图4比较了4种灾时响应方案在系统稳定后的负荷满意度。方案1中大部分节点的负荷满意度为0。方案2中恢复了部分电力负荷,由于在这种方案中没有投入耦合设备,故热力负荷满意度依旧为0。方案3中恢复了部分热力负荷和电力负荷,但是受到故障天然气管道影响,节点2、4、5的负荷满意度为0。方案4中整体的负荷满意度处于高水平,恢复效果最佳。

在附录D图D7中,由于方案4实施的两阶段灾时响应策略能够恢复更多负荷,故该方案中各耦合元件的输出量都比方案3高。

附录D图D8给出了4种响应方案中重要负荷恢复比例。图中: E_{rest} 为电网中除了两个微网外的其他区域; G_{rest} 为气网中除了两个微网外的其他区域;Gas为天然气网;Heat为热网。天然气管道的故障不会影响到SS2中二级负荷节点的用能,故方案1中SS2的二级负荷恢复比例均为100%;方案2中的超前转供技术可以恢复大部分重要负荷;方案3由于投入了耦合设备,多能协同作用恢复了重要热力负荷;方案4中的两阶段灾时响应策略能够恢复IES的所有重要负荷,恢复效果最佳。

4.2 确定地震场景的灾时阶段

为了方便分析,假设该地震统计区内实际发生了与4.1.2节一致的地震。首先,从预案集中查询匹配的两阶段灾时响应方案,在使用的CPU型号为Intel Core i5-10200H,主频为2.40 GHz的环境下,查询时间不超过0.2 s。而策略的实际执行速度与智能开关/阀门的动作时间相关,现有电、气、热智能开

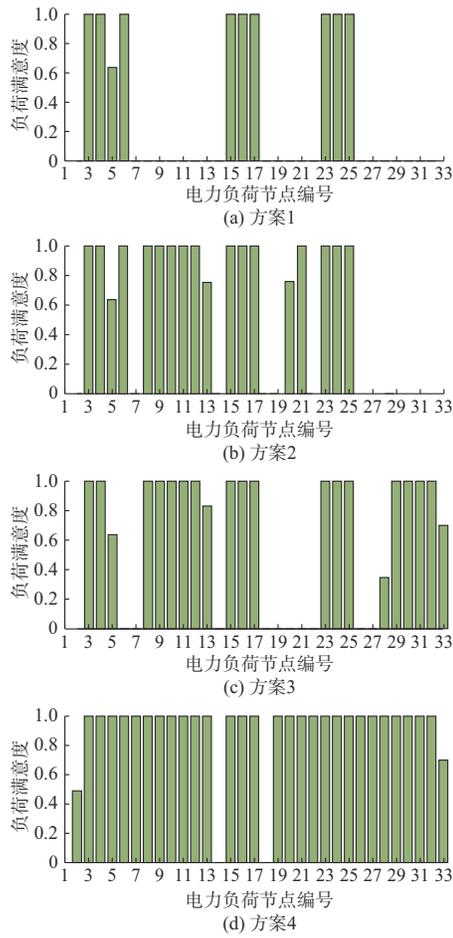


图3 4种灾时响应方案中的电力负荷满意度

Fig. 3 Satisfaction of electrical load in four disaster response schemes

关/阀门一般在3 s内完成动作^[30-32],由于IES中开关/阀门在收到指令后几乎是同时动作的,故它们的最长动作时间即为紧急调度决策的实际执行时间。假设实际发生的地震情况无法与预案集匹配,还需要重新计算灾时响应方案,以完成的24 960个地震场景为例,其响应方案的平均计算时间为5.42 s。本算例中,从震中点发出的地震波到达该IES的时间为11.86 s。因此,本文方法足够在地震传播时间差内完成紧急调度决策的执行。

当地震波从震中传播到某处的时间大于等于该处开关/阀门动作完毕的时间时,地震传播时间差能够保证有意义的预警。设使预警有意义的最小震中距为 x ,则 x 须满足以下算式:

$$\frac{x}{v_1} \gg \frac{x}{v_2} + 5.42 + 3 \quad (29)$$

式中: v_1 为地震波传播速度(约为 3.8×10^3 m/s); v_2 为电磁波传播速度(约为 3.0×10^8 m/s)。

经计算可知,在距震中2.5 km以上的距离处,

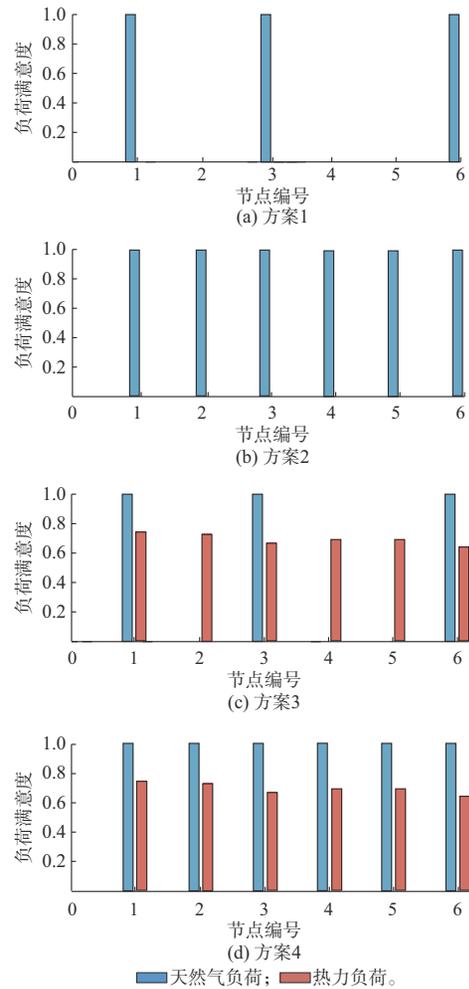


图4 4种灾时响应方案中天然气和热力的负荷满意度

Fig. 4 Satisfaction of natural gas and thermal loads in four disaster response schemes

该地震传播时差能保证有意义的预警。

图5给出了当预案集中输入的是4种不同的响应方案时IES的性能曲线。对于多时间尺度韧性提升方案: $t_0 = 4 995$ s时发生地震,开始从预案集中查询两阶段灾时响应方案;查询过程耗时0.17 s,到 $t_1 = 4 995.17$ s时开始执行响应方案;开关/阀门动作时间耗时2.8 s,到 $t_2 = 4 997.97$ s时响应方案执行完毕,综合负荷满意度得到提升。这样,通过本文的多时间尺度韧性提升方案能够在地震波到达前(即 $t_3 = 5 006.86$ s)将系统的用能满意度恢复至较高水平。

开关/阀门动作时电力负荷满意度能够迅速达到稳态,而由于建筑物热惯性影响,热负荷满意度需要一定时间才能达到稳态。因此,从长时间尺度来看系统综合负荷满意度变化率先急后缓。

表1给出了多时间尺度韧性提升策略的效果,显然,实施了多时间尺度韧性提升策略的IES在地

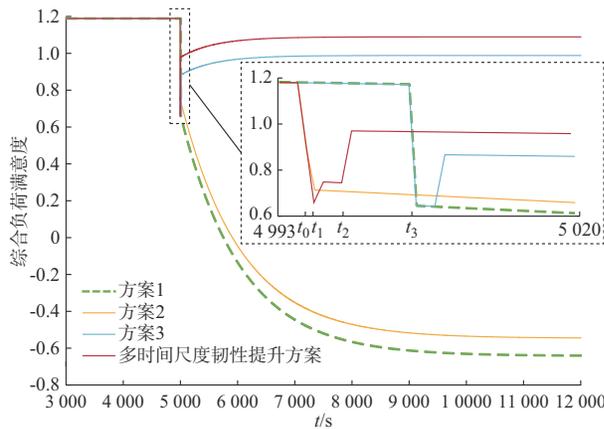


图5 不同韧性提升方案对IES灾时性能的影响
Fig. 5 Impact of different resilience enhancement schemes on disaster performance of IES

震影响下的综合负荷满意度最高,韧性指标最高,对灾害无感知的生命线负荷比例最大。

表1 多时间尺度韧性提升策略的效果
Table 1 Effect of multi-timescale resilience enhancement strategy

实施策略	系统韧性指标	综合负荷满意度	对灾害无感知的生命线负荷比例/%
无任何提升策略	2.63	-0.65	43.43
仅灾前规划策略	1.98	-0.58	51.28
仅两阶段灾时响应策略	0.31	1.14	43.43
多时间尺度韧性提升策略	0.15	1.34	100.00

由于篇幅限制,本文仅对非震中场景进行了仿真分析,低震级震中场景的分析方法同理。

5 结语

本文提出的多时间尺度韧性提升方法适用于设置了智能开关(例如,电力系统的断路器、联络开关,气/热网系统的电磁阀门)的IES,主要结论如下:

1)提出了适应于地震灾害空间分布特征的网格化故障概率模型,能够解决IES中元件的脆弱性难以统一计算的问题;

2)提出了IES双环最优负荷削减模型,可以将IES最优负荷削减问题转化为单一的最优潮流算法,降低了计算复杂度并提高了计算速度;

3)提出了两阶段灾时响应方法,通过负荷超前转供和多能源协调恢复能够保障更多重要负荷的用电满意度;

4)提出了多时间尺度韧性提升方法,通过灾前和灾时的有效配合,制定了应急响应预案集,保障了生命线负荷的用电对灾害无感,显著提高了IES的韧性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] WANG H, HOU K, ZHAO J B, et al. Planning-oriented resilience assessment and enhancement of integrated electricity-gas system considering multi-type natural disasters[J]. Applied Energy, 2022, 315: 118824.
- [2] BAO M L, DING Y, SANG M S, et al. Modeling and evaluating nodal resilience of multi-energy systems under windstorms[J]. Applied Energy, 2020, 270: 115136.
- [3] JOHNSON B, CHALISHAZAR V, COTILLA-SANCHEZ E, et al. A Monte Carlo methodology for earthquake impact analysis on the electrical grid[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184: 106332.
- [4] 王晗,侯恺,余晓丹,等.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[J].中国电机工程学报,2022,42(3): 853-864.
WANG Han, HOU Kai, YU Xiaodan, et al. The assessment and improvement method of electricity-gas system resilience considering earthquake disaster uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 853-864.
- [5] 吴彬,高军彦,班全,等.地震灾害下的电气耦合系统韧性评估[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(5):59-69.
WU Bin, GAO Junyan, BAN Quan, et al. Resilience assessment on integrated electricity-gas system under earthquake disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2022, 34(5): 59-69.
- [6] 李雪,孙霆锴,侯恺,等.地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5476-5493.
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): 5476-5493.
- [7] ESPINOZA S, PANTELI M, MANCARELLA P, et al. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 352-361.
- [8] 雷霞,郑国鑫,胡益.地震灾害下配电网的脆弱性分析及弹性提升措施[J].电网技术,2021,45(9):3674-3680.
LEI Xia, ZHENG Guoxin, HU Yi. Vulnerability analysis and resilience improvement of distribution network under earthquake disasters[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3674-3680.
- [9] 王月汉,刘文霞,姚齐,等.面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(15):37-45.
WANG Yuehan, LIU Wenxia, YAO Qi, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 37-45.
- [10] 王子昊,王旭,蒋传文,等.基于近端策略优化算法的灾后配电网韧性提升方法[J].电力系统自动化,2022,46(21):62-70.
WANG Zihao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Resilience improvement method for post-disaster distribution network based on proximal policy optimization algorithm[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 62-70.
- [11] LI Y L, XIE K G, WANG L F, et al. Exploiting network topology optimization and demand side management to improve bulk power system resilience under windstorms [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 171: 127-140.
- [12] 陈碧云,李翠珍,覃鸿,等.考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J].电力系统自动化,2018,42(6):47-52. CHEN Biyun, LI Cuizhen, QIN Hong, et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 47-52.
- [13] XU J C, ZHANG T T, DU Y X, et al. Islanding and dynamic reconfiguration for resilience enhancement of active distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106749.
- [14] 张亚超,谢仕炜.面向配电网弹性提升的多时间尺度恢复策略协调优化框架[J].电力系统自动化,2021,45(18):28-34. ZHANG Yachao, XIE Shiwei. Coordinated optimization framework of multi-timescale restoration strategies for resilience enhancement of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 28-34.
- [15] 李少岩,赵汉广,顾雪平,等.考虑次生故障差异化影响下韧性主动提升的输电系统网架重构策略[J/OL].中国电机工程学报[2023-08-05].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222558>. LI Shaoyan, ZHAO Hanguang, GU Xueping, et al. A novel transmission network reconfiguration strategy considering active improvement of system resilience under the differential influence of contingencies [J/OL]. Proceedings of the CSEE [2023-08-05]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222558>.
- [16] 陈健,林咨良,赵浩然,等.考虑信息耦合的电-气综合能源系统韧性优化方法[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6854-6864. CHEN Jian, LIN Ziliang, ZHAO Haoran, et al. Optimization method for resilience of integrated electric-gas system with consideration of cyber coupling [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6854-6864.
- [17] LI X, DU X X, JIANG T, et al. Coordinating multi-energy to improve urban integrated energy system resilience against extreme weather events [J]. Applied Energy, 2022, 309: 118455.
- [18] 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.
- [19] 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(增刊1):100-107. YE Youqing, SHI Bingxin, LIU Yufa, et al. Determining spatial distribution function based on the sample space of latent source area [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(S1): 100-107.
- [20] 任静,徐志双,段乙好,等.中国各省区地震烈度衰减关系模型甄别[J].地震地磁观测与研究,2020,41(3):75-82. REN Jing, XU Zhishuang, DUAN Yihao, et al. Identification of earthquake intensity attenuation relationship models in various provinces of China [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2020, 41(3): 75-82.
- [21] 席远,耿淑伟,董满生,等.基于我国现行规范场地划分标准的中小震地震动峰值加速度衰减关系[J].工业建筑,2014,44(1):1-4. XI Yuan, GENG Shuwei, DONG Mansheng, et al. The attenuation relation of the small-moderate earthquake ground motion PGA based on classified site criterion in Chinese current seismic design code [J]. Industrial Construction, 2014, 44(1): 1-4.
- [22] 王守相,王林,王洪坤,等.地震灾害下提升恢复力的配电网优化恢复策略[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(6):28-35. WANG Shouxiang, WANG Lin, WANG Hongkun, et al. Optimal recovery strategy for distribution network to improve its resilience under earthquake disasters [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 28-35.
- [23] 郑国鑫.地震灾害下配电网的脆弱性及弹性分析[D].成都:西华大学,2021. ZHENG Guoxin. Vulnerability and elasticity analysis of distribution network under earthquake disaster [D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [24] 孙鹏,滕云,冷欧阳,等.考虑供热系统多重热惯性的电热联合系统协调优化[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6059-6071. SUN Peng, TENG Yun, LENG Ouyang, et al. Coordinated optimization of combined heat and power systems considering multiple thermal inertia of heating system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6059-6071.
- [25] 刘洪,赵晨晓,葛少云,等.基于精细化热网模型的电热综合能源系统时序潮流计算[J].电力系统自动化,2021,45(4):63-72. LIU Hong, ZHAO Chenxiao, GE Shaoyun, et al. Sequential power flow calculation of power-heat integrated energy system based on refined heat network model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 63-72.
- [26] 王亦昭,刘雄.供热工程[M].北京:机械工业出版社,2007. WANG Yizhao, LIU Xiong. Heating engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [27] WU C Y, GU W, JIANG P, et al. Combined economic dispatch considering the time-delay of district heating network and multi-regional indoor temperature control [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 118-127.
- [28] 董彧彤,王艳松,倪承波,等.计及用热舒适度弹性的电热联合优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(23):26-34. DONG Yutong, WANG Yansong, NI Chengbo, et al. Dispatch of a combined heat-power system considering elasticity with thermal comfort [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 26-34.
- [29] 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.
- [30] 孙少达.河东66 kV输变电工程电气一次系统设计[D].长春:长春工业大学,2018.

- SUN Shaoda. Design on electrical primary system to Hedong 66 kV power transmission and transformation project [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018.
- [31] 兰洪. 城市燃气输配站监控系统研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- LAN Hong. Research on monitoring system of urban gas transmission and distribution station [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2014.
- [32] 陈雪勇, 刘兴中, 陈强. 一种高温高压燃气电磁阀的设计与研究[J]. 现代机械, 2017(4):40-43.
- CHEN Xueyong, LIU Xingzhong, CHEN Qiang. Design and research of a gas solenoid valve working in high temperature and

high pressure[J]. Modern Machinery, 2017(4): 40-43.

朱喜玥(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 综合能源系统韧性评估与提升。E-mail: 2971528299@qq.com

刘鑫蕊(1981—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电网信息物理系统、配电网故障分析及自愈控制、综合能源系统优化控制。E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn

侯敏(1999—), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 综合能源系统优化控制。E-mail: 3270861291@qq.com

(编辑 杨松迎)

Multi-timescale Resilience Enhancement Method for Integrated Energy System Under Earthquake Disaster

ZHU Xiyue, LIU Xinrui, HOU Min, WANG Rui, SUN Qiuye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Earthquake disasters have the characteristics of low predictability and wide impact. In low magnitude or non-epicenter areas, although ground vibrations do not cause building collapse or casualties, they may damage overhead power lines and underground pipelines, and have a significant impact on energy supply systems. Therefore, this paper proposes a multi-timescale resilience enhancement method for the electricity-gas-heat integrated energy system, which includes pre-earthquake planning and emergency response plan formulation, as well as preemptive seismic wave propagation time difference during disasters to complete load forwarding in advance. Firstly, this paper establishes a grid-based fault probability model for the integrated energy system affected by earthquakes. Secondly, this paper proposes a dual-loop optimal load reduction model for integrated energy systems within a decoupling framework. Considering the load satisfaction of building thermal inertia, this paper proposes resilience assessment and multi-timescale resilience improvement methods. Finally, The effectiveness of the method is verified by simulation cases.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62173074), National Key R&D Program of China (No. 2018YFA0702203), and Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (No. U20A20190).

Key words: integrated energy system; resilience; multi-timescale; optimal load reduction; emergency response

