

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240347

# 计及次生灾害影响的电力信息物理系统恢复方法研究

龚立<sup>1</sup>, 田猛<sup>2</sup>, 董政呈<sup>2</sup>, 王先培<sup>1</sup>, 朱紫阳<sup>1</sup>, 李晓旭<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 在极端自然灾害愈加频发的背景下, 电网调度人员不仅需要考虑如何调度维修资源加快电力信息物理系统的恢复, 还需要考虑如何降低引发的次生灾害造成的负面影响。针对上述问题, 提出了一种计及次生灾害影响的电力信息物理系统恢复方法, 根据信息物理协同的特点和次生灾害发生的概率调度维修资源至受灾区域, 减少停电损失。首先, 建立了基于以太无源光纤网络和应急电源协同的电力信息物理系统模型, 研究信息网络和物理网络对系统韧性提升的效果。然后, 提出了一种计及次生灾害影响的协同维修方法, 并与单独维修方法进行对比。最后, 搭建了一种求解所提恢复方法的分析框架, 并在 IEEE 33 节点系统上进行仿真, 确定最佳的维修资源调度策略。仿真结果表明, 所提方法能降低次生灾害造成的负面影响、提高维修资源的利用率。

**关键词:** 次生灾害; 电力信息物理系统; 协同维修; 系统恢复; 韧性提升

## A recovery method of cyber physical power system considering secondary disasters

GONG Li<sup>1</sup>, TIAN Meng<sup>2</sup>, DONG Zhengcheng<sup>2</sup>, WANG Xianpei<sup>1</sup>, ZHU Ziyang<sup>1</sup>, LI Xiaoxu<sup>1</sup>

(1. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** As extreme natural disasters become more frequent, grid dispatchers not only consider how to dispatch repair resources to accelerate the recovery speed of cyber physical power system, but also need to reduce the negative impact of secondary disasters caused by extreme natural disasters. To solve the above problems, a recovery method considering the impact of secondary disasters is proposed. It dispatches the maintenance resources to the affected areas based on the characteristics of cyber physical collaboration and the occurrence probability of secondary disasters to reduce power losses. First, a cyber physical power system model based on the coupling of Ethernet passive fiber optic network and emergency power supply is established, and the effect of cyber physical system on resilience enhancement is researched. Then, a coordinated repair method considering the impact of secondary disasters is proposed, and compared with individual repair methods. Finally, an analytical framework for method solving is proposed, and it is simulated on the IEEE 33-node system to determine the optimal repair resource dispatching strategy. The results show that the proposed recovery method can reduce the impact of secondary disasters and improve the utilization of maintenance resources.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177109).

**Key words:** secondary disasters; cyber physical power system; coordinated repair; system recovery; resilience enhancement

## 0 引言

随着新兴技术的不断发展和应用, 电力系统逐渐过渡到数字化、自动化、智能化程度越来越高的电力信息物理系统, 信息物理互相影响的特点愈发明显, 单个网络中发生的安全事故将双向扩散, 导致事故持续恶化<sup>[1-3]</sup>。在 2003 年美加大停电事故中,

一条输电线路因被树枝挂断, 引发停电事故后, 至少 5000 万用户在家无法正常使用照明、通信等功能, 造成的经济损失高达 250 亿美元。因此, 电力信息物理系统的恢复问题引起人们的重视<sup>[4-6]</sup>。

传统电力系统恢复的研究主要分为黑启动、网络重构、负荷恢复<sup>[7-10]</sup>。文献[11]为了避免出现线路过电压的情况, 分析不同恢复操作的电压波动情况, 方便电网调度人员采取更加科学的恢复方案维持线路电压的稳定。文献[12]根据节点重要程度、节点

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177109)

时变状态，建立网架重构的优化模型，实现重要节点的多阶段操作协调。文献[13]根据用户的用电习惯和需求，合理削减负荷恢复量，保证单次恢复的成功率。但是，此类措施忽略了恢复方案的信息物理协同特点对系统恢复效果的提升。文献[14]根据信息物理协同的特点，利用无人机提高系统应对极端自然灾害的能力。但是，很少有研究考虑次生灾害对制定具有信息物理协同特征方案的影响。在2021年河南省郑州市遭遇的强降雨中，大量降水引起的房屋倒塌、交通瘫痪等情况导致500名群众被困于地铁中，5人受伤、12人经抢救无效死亡。由此可见，开展次生灾害的相关研究十分重要<sup>[15]</sup>。

在此背景下，本文提出一种考虑次生灾害影响的电力信息物理系统恢复方法。首先分析电力信息物理系统中存在的次生灾害隐患，指出电网调度人员面临的具体场景；其次将光纤通信技术作为信息网络的韧性提升措施，将应急电源作为物理网络的韧性提升措施，建立信息物理协同模型；再次提出考虑次生灾害影响的协同维修方法，维修信息网络和物理网络中发生故障的线路。最后提出一种基于逐步对冲算法(progressive hedging algorithm, PHA)的求解框架，验证所提方法的有效性。

### 1 次生灾害的影响

极端自然灾害的频发会造成大量的人员伤亡和经济损失，除去主要灾害的影响外，滑坡、塌陷、火灾、水灾、污染、阻塞等次生灾害引起的损失不容忽视，而且次生灾害对电力信息物理系统造成的影响甚至有可能超过主要灾害，必须得到重视。

#### 1.1 次生灾害对电力信息物理系统的影响

电力信息物理系统往往无法有效预防极端自然灾害的发生，电力电子设备在受灾过程将出现大规模的故障，而大量损坏的物理设备、路由设备将影响供电、通信的可靠性，这会严重威胁系统的韧性。实际上，单个极端自然灾害往往伴随其他类型的极端事件<sup>[16-18]</sup>，如台风过后的暴雨、地震引发的海啸。电力信息物理系统灾后面临的次生灾害隐患主要包括以下环节。

- 1) 发电环节：发热的机组、被击穿的绕组、短路的铁芯等容易诱发火灾、爆炸等次生灾害。
- 2) 输电环节：正常工作的机组受到绝缘层的脱落、不同电位的导线互联等因素影响发生故障，造成火灾、爆炸等次生灾害。
- 3) 变电环节：变电设备出现漏气、漏油、火花放电等异常情况将引发火灾、噪声等次生灾害。
- 4) 配电环节：配电柜体受到挤压、开关的错位

连接等将引发电力火灾事故。

5) 用电环节：一方面高温、腐蚀性液体的泄漏等将诱导电力故障发生，另一方面电力系统与其他系统的交互也会引发各种次生灾害。

6) 通信环节：通信设备受到影响后，容易出现漏传、误传、延迟传输等情况，诱发的次生灾害将对灾后系统的恢复造成极大的影响。

由此可见，当电力信息物理系统遭遇极端自然灾害后，电网调度人员可以投入各种资源增强系统韧性，但是此类措施很少考虑次生灾害，导致系统的恢复工作无法达到预期要求。

#### 1.2 考虑次生灾害影响的场景分析

电网调度人员从荷、网、源、储、攻击、检测、保护等角度制定恢复方案<sup>[19-24]</sup>。本文根据电力设计规程，将部署应急电源作为物理网络的韧性提升措施，将搭建无源光纤网络作为信息网络的韧性提升措施<sup>[25]</sup>，构建信息物理协同模型，并在此基础上考虑次生灾害对系统恢复的影响，如图1所示。

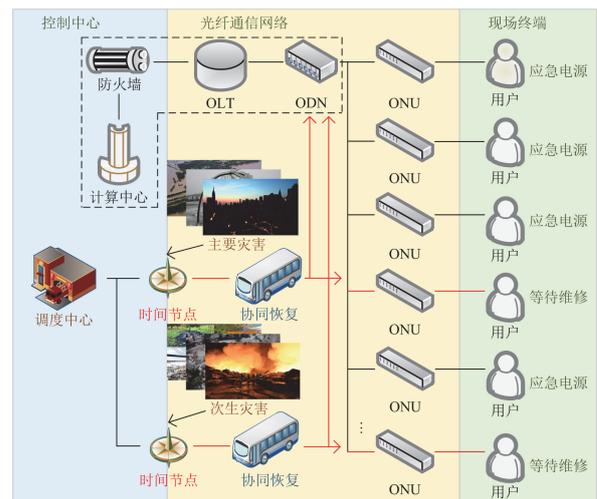


图1 次生灾害对电力信息物理的影响

Fig. 1 Impact of secondary disasters on cyber physical power system

在极端自然灾害日渐频发的背景下，虽然用户能依赖应急电源保障正常供电，但是仍需依赖维修人员加快灾区的恢复。在等待维修人员的过程中，由于主要灾害发生后往往伴随着不同类型的次生灾害，如引发的火灾、水灾等，如若放任不管，此类次生灾害同样会对系统造成巨大的损失。因此，电网调度人员必须制定恢复方案提升电力信息物理系统应对主要灾害和次生灾害的能力。

### 2 考虑次生灾害影响的恢复方法建模

本文所提方法的目标函数  $f$  为

$$f = \min \sum_s p_s c_s \Delta p_{L,i,t,s} \quad (1)$$

式中:  $p_s$  表示次生灾害发生的概率;  $c_s$  表示停电损失成本;  $\Delta p_{L,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  的切负荷, 其中场景  $s$  由场景  $s_{md}$ 、 $s_{sd}$  构成,  $s_{md}$  表示主要灾害引发的线路故障场景,  $s_{sd}$  表示次生灾害引发的线路故障。

本文所提方法的数学模型包括目标函数和信息网络通信路径约束、节点可观可控性约束、协同维修约束等, 建模流程为: 首先引入无源光纤通信技术作为具体的通信技术; 其次, 建立节点可观可控性的数学模型, 考虑节点中应急电源的影响, 建立信息物理协同模型; 最后, 从灾后恢复的角度出发, 提出一种协同维修方法。本文将解决两个问题:

- 1) 当主要灾害发生后, 电网调度人员如何调度维修资源, 对物理网络和信息网络进行维修;
- 2) 当次生灾害发生后, 电网调度人员如何调度维修资源对故障线路进行维修。

所提恢复方法将光纤通信作为信息网络的影响因素, 将应急电源的供电时间作为物理网络的影响因素, 通过节点的状态实现光纤通信、应急电源的协同, 方便开展维修资源协同调度的研究。

#### (1) 光纤通信技术接入的约束条件

引入光纤通信技术后, 物理网络中装载的光线路终端、光分配网络、光网络终端构成信息网络的主体, 形成树形结构, 如式(2)所示。

$$v_{olt,t} = 1 \quad (2)$$

式中,  $v_{olt,t}$  表示  $t$  时刻光线路终端的连接状态, 其值为 1 表示光线路终端与调度中心相连, 其值为 0 表示光线路终端不与调度中心相连。

$$v_{i,t} = v_{j,t}, \forall ij \in \Omega_{bus}, \Omega_d \quad (3)$$

式中:  $v_{i,t}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  与调度中心的连接状态, 其值为 1 表示该节点通过物理线路与调度中心相连, 其值为 0 表示该节点不与调度中心相连;  $\Omega_{bus}$  表示系统节点的集合;  $\Omega_d$  表示维修线路的集合。

$$v_{i,t} = v_{j,t} \wedge h_{ij,t,s}, \forall ij \in \Omega_{bus} \cap \Omega_d \quad (4)$$

式中:  $h_{ij,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻线路  $ij$  的维修状态, 其值为 1 表示场景  $s$  下  $t$  时刻线路  $ij$  的维修工作已经完成, 其值为 0 表示场景  $s$  下  $t$  时刻线路  $ij$  的维修工作没有完成; “ $\wedge$ ” 表示逻辑运算与。

$$\kappa_{k,t} = v_{i,t} \wedge \tau_{k,t}, \forall i \in \Omega_{onu} \quad (5)$$

式中:  $\kappa_{k,t}$  表示信息节点的接入状态, 其值为 1 表示信息节点与调度中心相连, 其值为 0 表示信息节点不与调度中心相连;  $\tau_{k,t}$  表示  $t$  时刻信息节点  $k$  在  $t$  时刻能从物理网络或者信息网络中获取足够的电力供给, 其值为 0 表示信息节点  $k$  在  $t$  时刻不能从物理网络或者信息网络中获取足够的电力供给;  $\Omega_{onu}$  表示光网络终端的集合。

$$\kappa_{k,t} = v_{i,t}, \forall i \in \Omega_{olt} \quad (6)$$

式中,  $\Omega_{olt}$  表示光线路终端的集合。

#### (2) 节点可观可控性的约束条件

如图 2 所示, 在场景 A 中, 使用无源光网络前, 物理网络中线路 1 发生故障, 导致节点 1 和 2 断开连接, 线路 1 需要维修; 使用无源光网络后, 光网络终端有充足的电力供给, 线路 1 的故障信息能通过光分配网络传输至调度中心, 电网调度人员能准确获悉物理节点、信息节点和相应线路的状态, 并且电网调度人员能通过信息节点对物理节点进行控制, 此时物理网络中各设备的状态是可控且可观的。在场景 B 中, 物理网络中线路 1 发生故障, 信息网络中光分配网络线路 2 发生故障, 物理网络中线路 3 的开关自动断开, 形成以节点 5 为电力供给来源的孤岛, 光网络终端有充足的电力供给, 物理节点 3 的状态能通过无线通信传输至调度中心, 此时物理网络中设备的状态是不可控但可观的。在场景 C 中, 物理网络中线路 1 发生故障, 信息网络中光分配网络线路 2 发生故障, 物理网络中线路 3 的开关自动断开, 节点 2 缺乏电力供给, 此时节点 2 的状态是不可控且不可观的。

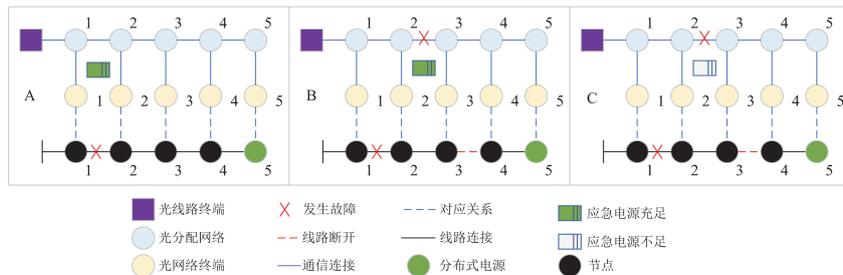


图 2 节点的可控可观性

Fig. 2 Controllability and observation of buses

如果节点的数量较少, 电网调度人员可以将无法确定状态的节点视为故障节点, 但是随着节点数量的增加, 一方面不可控的节点越来越多, 混淆电网调度人员的视野, 另一方面人工持续性的投入将分散电网调度人员的精力, 容易引发其他事故的发生。因此, 有必要准确分析节点的可控可观状态。

进一步分析线路中手动开关和远动开关的动作造成的影响: 对于远动开关, 如果信息节点或线路发生故障, 远动开关的状态将保持初始状态, 此时, 电网调度人员无法通过无线传输的方式控制远动开关的状态; 对于手动开关, 手动开关仅依赖有线传输, 且故障后必须派遣维修人员进行现场维修, 因此本节认为故障发生前手动开关的状态是已知的, 故障发生后, 维修人员通过无线传输的方式接收调度中心和孤岛内通信人员下达的指令, 重新调整手动开关的状态, 其状态可视为保持初始状态(故障发生前, 该状态被电网调度人员和维修人员掌握)。由此, 远动开关与信息节点的关系为

$$\mu_{ij,t}^1 = \begin{cases} \{0,1\}, \kappa_{k,t} = 1 \\ \mu_{ij,t}^0, \kappa_{k,t} = 0 \end{cases} \quad \forall ij \in \Gamma_{rk} \quad (7)$$

式中:  $\mu_{ij,t}^1$  表示  $t$  时刻远动开关的状态, 其值为 1 表示  $t$  时刻远动开关闭合, 其值为 0 表示  $t$  时刻远动开关断开;  $\mu_{ij,t}^0$  表示  $t$  时刻远动开关的初始状态;  $\Gamma_{rk}$  表示系统中远动开关受到信息节点  $k$  控制的集合。

由图 2 可知, 孤岛的产生将影响节点的可控可观性: 场景 B 中光分配网络节点 3、5 和光网络终端节点 3、5, 由于物理线路 3 断开, 形成以节点 5 为核心的孤岛, 在孤岛内这些节点的状态均可控且可观。由此可见, 节点的可控可观性将影响远动开关、手动开关的实际状态。

如图 2、图 3 所示, 以物理节点 5 为例, 将线路分为外部线路、边界线路和内部线路。外部线路的开关状态不受孤岛的影响, 边界线路的开关自动断开, 内部线路的开关状态将受到分布式电源的影响。

外部线路的开关状态为

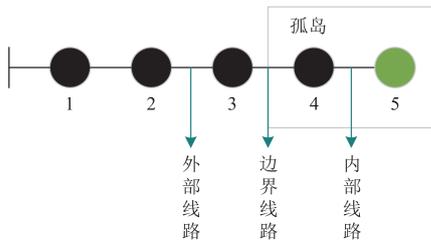


图 3 孤岛对系统恢复的影响

Fig. 3 Impact of isolated island on system recovery

$$\mu_{ij,t}^3 = \begin{cases} \mu_{ij,t}^1, \forall ij \in \Gamma_{out} \cap \Gamma_r, \forall t \\ \{0,1\}, \forall ij \in \Gamma_{out} \cap \Gamma_m, \forall t \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\mu_{ij,t}^3$  表示  $t$  时刻开关的状态, 其值为 1 表示  $t$  时刻开关闭合, 其值为 0 表示  $t$  时刻开关断开;  $\Gamma_r$  表示系统中远动开关的状态集合;  $\Gamma_m$  表示系统中手动开关的状态集合;  $\Gamma_{out}$  表示外部线路的集合。

边界线路的开关状态为

$$\mu_{ij,t}^3 = \begin{cases} \mu_{ij,t}^1 \wedge \mu_{ij,t}^2, \forall ij \in \Gamma_{id} \cap \Gamma_r, \forall t \\ \mu_{ij,t}^2, \forall ij \in \Gamma_{id} \cap \Gamma_r, \forall t \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mu_{ij,t}^2$  表示  $t$  时刻位于边界线路的开关状态, 其值为 1 表示  $t$  时刻该开关不受电网调度人员、维修人员控制, 其值为 0 表示  $t$  时刻该开关受电网调度人员、维修人员控制;  $\Gamma_{id}$  表示边界线路的集合。

其中  $\mu_{ij,t}^2$  满足:

$$\mu_{ij,t}^2 \leq \kappa_{k,t}, \forall ij \in \Gamma_{idk}, \forall t \quad (10)$$

式中,  $\Gamma_{idk}$  表示倾向与分布式电源节点形成孤岛的边界线路的集合。

内部线路的开关状态为

$$\mu_{ij,t}^3 = \begin{cases} \{0,1\}, \tau_{k,t} = 1, \forall ij \in \Gamma_{in} \cap \Gamma_r, \forall t \\ \mu_{ij,t}^0, \tau_{k,t} = 0, \forall ij \in \Gamma_{in} \cap \Gamma_r, \forall t \\ \{0,1\}, \forall ij \in \Gamma_{in} \cap \Gamma_m, \forall t \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\Gamma_{in}$  表示内部线路的集合。

由于不同位置手动开关和远动开关的状态对线路状态的影响, 与线路相连的节点负荷也在不断变化。因此, 注入节点的有功功率和无功功率满足:

$$q_{L,i,t,s} = p_{L,i,t,s} \tan \theta, \forall i \in \Omega_p, \forall t \quad (12)$$

式中:  $p_{L,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  注入的有功功率;  $q_{L,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  注入的无功功率;  $\theta$  表示功率因数角;  $\Omega_p$  表示系统节点的集合。

在孤岛内, 节点能从物理网络或者信息网络中获得足够的电力供给, 满足:

$$0 \leq p_{L,i,t,s} \leq \bar{P}_{L,i,t,s} \quad (13)$$

式中,  $\bar{P}_{L,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  注入的最大有功功率。

节点不能从物理网络或者信息网络中获得足够的电力供给, 满足:

$$p_{L,i,t,s} = 0 \quad (14)$$

节点供电正常, 且该节点与信息节点相连, 满足约束条件式(13)。

该节点不与信息节点相连, 而且节点负荷并未

完全切除, 满足:

$$p_{L,i,t,s} = \bar{P}_{L,i,t,s} \quad (15)$$

如果节点负荷被完全切除, 或者节点缺少充足的电力供给, 满足约束条件式(14)。

通过对手动开关、远动开关的状态及节点负荷的分析可知, 电力供给十分重要, 将直接影响节点的可控可观性。因此, 引入变量  $\beta_{i,t}$ 、 $\gamma_{i,t}$ , 有

$$\gamma_{i,t} = \Pi(p_{L,i,t,s} \geq p_{thr,i}), \forall i \in \Omega_{onu} \quad (16)$$

式中:  $p_{thr,i}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  所需的最低电力供给;  $\Pi$  表示函数关系,  $\Pi(\cdot)=1$  表示  $\Pi(\cdot)$  关系成立,  $\Pi(\cdot)=0$  表示  $\Pi(\cdot)$  关系不成立。

$$\beta_{i,t} = \Pi(\varphi_i \leq T_i), \forall i \in \Omega_{onu} \quad (17)$$

式中:  $\beta_{i,t}$  表示信息网络中应急电源的供电状态, 其值为 1 表示  $t$  时刻信息节点  $i$  的应急电源能正常提供电力供给, 其值为 0 表示  $t$  时刻信息节点  $i$  的应急电源不能正常提供电力供给;  $T_i$  表示  $t$  时刻应急电源的工作时间。

$$\tau_{k,t} = \beta_{i,t} \vee \gamma_{i,t}, \forall i \in \Omega_{onu} \quad (18)$$

式中,  $\gamma_{i,t}$  表示物理网络中应急电源的供电状态, 其值为 1 表示  $t$  时刻物理节点  $i$  的应急电源能正常提供电力供给, 其值为 0 表示  $t$  时刻物理节点  $i$  的应急电源不能正常提供电力供给; “ $\vee$ ” 表示逻辑运算或。

### (3) 维修资源调度的约束条件

维修资源从起点出发、回到终点的约束条件为

$$\sum_k v_{p,k,s} \leq R \quad (19)$$

$$\sum_k v_{k,q,s} \leq R \quad (20)$$

式中:  $v_{p,k,s}$  表示场景  $s$  下维修起点  $p$  向维修节点  $k$  移动的状态, 其值为 1 表示维修起点  $p$  向维修节点  $k$  移动, 其值为 0 表示维修起点  $p$  没有向维修节点  $k$  移动;  $v_{k,q,s}$  表示场景  $s$  下维修节点  $k$  向维修终点  $q$  的移动状态, 其值为 1 表示维修节点  $k$  向维修终点  $q$  移动, 其值为 0 表示维修节点  $k$  没有向维修终点  $q$  移动;  $R$  表示维修起点和终点允许调度的维修人员的数量。

$$\sum_k v_{k,l,s} = 1, k \neq l, k \neq q \quad (21)$$

式中,  $v_{k,l,s}$  表示场景  $s$  下维修人员在线路中的移动状态, 其值为 1 表示维修人员从节点  $k$  移动至  $q$ , 其值为 0 表示维修人员没有从节点  $k$  移动至  $q$ 。

当维修人员在线路间移动时, 有

$$-M(1-v_{k,l,s}) \leq \chi_{k,s} + T_{k,s}^r + T_{k,l,s} - \chi_{l,s}, \forall k, l \in \Omega_d \quad (22)$$

$$\chi_{k,s} + T_{k,s}^r + T_{k,l,s} - \chi_{l,s} \leq M(1-v_{k,l,s}), \forall k, l \in \Omega_d \quad (23)$$

式中:  $\chi_{k,s}$  表示场景  $s$  下维修人员在节点  $k$  开始维修的时间;  $T_{k,s}^r$  表示场景  $s$  下维修人员在节点  $k$  的维修时间;  $T_{k,l,s}$  表示场景  $s$  下维修人员在节点  $k$ 、 $l$  的移动时间;  $\chi_{l,s}$  表示场景  $s$  下维修人员在节点  $l$  开始维修的时间;  $M$  为一个很大的常数。

由于上述约束无法体现不同时刻节点的维修状态, 故引入变量  $f_{k,t,s}$ , 有

$$\sum_t f_{k,t,s} = 1 \quad (24)$$

式中,  $f_{k,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $k$  的维修状态, 其值为 1 表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $k$  已经完成维修, 其值为 0 表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $k$  没有完成维修。

$$\chi_{k,s} + T_{k,s}^r \leq \sum_t t \cdot f_{k,t,s}, \forall k \in \Omega_d \quad (25)$$

$$\sum_t t \cdot f_{k,t,s} \leq \chi_{k,s} + T_{k,s}^r + 1 - \varepsilon, \forall k \in \Omega_d \quad (26)$$

式中,  $\varepsilon$  表示一个很小的变量。

当线路维修完成后, 电网调度人员需要获取当前时刻线路的实际状态, 根据约束条件式(4)可确定当前线路的状态。

$$h_{k,t,s} = \sum_{i=1}^t f_{k,i,s} \quad (27)$$

进一步考虑线路中开关的影响, 有

$$\mu_{ij,t,s} = \begin{cases} \mu_{ij,t,s}^3, \forall ij \in \Gamma_p / \Omega_d \\ \mu_{ij,t,s}^3 \wedge h_{ij,t,s}, \forall ij \in \Omega_d \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $\mu_{ij,t,s}$  表示线路的实际状态, 其值为 1 表示线路正常, 其值为 0 表示线路故障;  $\Gamma_p$  表示线路的集合。

虽然所提协同维修方法和单独维修方法中维修人员在物理网络和信息网络中的移动路径不同, 但是移动路径、维修时间等约束条件基本保持一致。即本节所提约束条件能作为物理网络和信息网络维修资源调度的约束条件, 例如, 物理网络中 3、5、7 节点发生故障, 信息网络中 2、5、6 节点发生故障, 首先认为节点 2、3、5、6、7 发生故障, 维修人员移动路径为 2-3-5-6-7, 然后根据网络类型确定维修人员在网络中的移动路径, 物理网络中维修人员的移动路径为 3-5-7, 信息网络中维修人员的移动路径为 2-5-6。

### (4) 网络连通性的约束条件

网络重构后, 保持系统的拓扑结构不变十分重要。因此, 引入虚拟节点、虚拟潮流, 有

$$\sum_{ij} \mu_{ij,t,s} = n, \forall ij \in \Gamma_p \cup \Gamma_f \quad (29)$$

式中:  $n$  表示系统节点的数量;  $\Gamma_f$  表示虚拟线路的集合。

$$\sum_{ij \in \Omega_{\text{bus}}} F_{ij,t,s} - \sum_{ij \in \Gamma_p \cup \Gamma_f} F_{ij,t,s} = 1, \forall i \in \Omega_p \quad (30)$$

式中,  $F_{ij,t,s}$  表示虚拟潮流。

$$-\mu_{ij,t,s} M \leq F_{ij,t,s} \leq \mu_{ij,t,s} M, \forall ij \in \Gamma_p \cup \Gamma_f \quad (31)$$

(5) 线路潮流的约束条件

结合节点的功率平衡约束、电压幅值约束、潮流约束等基本条件, 有

$$\sum_k P_{ik,t,s} = \sum_j P_{ij,t,s} - p_{L,i,t,s} + p_{G,i,t,s} + \Delta p_{L,i,t,s}, \forall i \in \Omega_p \quad (32)$$

$$\sum_k Q_{ik,t,s} = \sum_j Q_{ij,t,s} - q_{L,i,t,s} + q_{G,i,t,s} + \Delta q_{L,i,t,s}, \forall i \in \Omega_p \quad (33)$$

式中:  $P_{ij,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻线路  $ij$  的有功功率;  $p_{G,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻注入节点  $i$  的有功功率;  $Q_{ij,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻线路  $ij$  的无功功率;  $q_{G,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻注入节点  $i$  的无功功率;  $\Delta q_{L,i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  切除的无功负荷。

$$-(1 - \mu_{ij,t,s})M \leq V_{j,t,s} - V_{i,t,s} + (r_{ij} P_{ij,t,s} + x_{ij} Q_{ij,t,s}) / V_0 \leq (1 - \mu_{ij,t,s})M, \forall i, j \in \Omega_p \quad (34)$$

式中:  $V_{i,t,s}$  表示场景  $s$  下  $t$  时刻节点  $i$  的电压幅值;  $r_{ij}$  表示线路  $ij$  的阻抗;  $x_{ij}$  表示线路  $ij$  的电抗。

$$-\mu_{ij,t,s} \bar{P}_{ij} \leq P_{ij,t,s} \leq \mu_{ij,t,s} \bar{P}_{ij}, \forall ij \in \Gamma_p \quad (35)$$

$$-\mu_{ij,t,s} \bar{Q}_{ij} \leq Q_{ij,t,s} \leq \mu_{ij,t,s} \bar{Q}_{ij}, \forall ij \in \Gamma_p \quad (36)$$

式中:  $\bar{P}_{ij}$  表示线路  $ij$  有功功率的最大值;  $\bar{Q}_{ij}$  表示线路  $ij$  无功功率的最大值。

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t,s} \leq V_i^{\max}, \forall i \in \Omega_p \quad (37)$$

式中:  $V_i^{\max}$  表示节点  $i$  电压的最大值;  $V_i^{\min}$  表示节点  $i$  电压的最小值。

$$P_{G,i}^{\min} \leq p_{G,i,t,s} \leq P_{G,i}^{\max}, \forall i \in \Omega_p \quad (38)$$

$$Q_{G,i}^{\min} \leq q_{G,i,t,s} \leq Q_{G,i}^{\max}, \forall i \in \Omega_p \quad (39)$$

式中:  $P_{G,i}^{\max}$ 、 $P_{G,i}^{\min}$  分别表示注入节点  $i$  有功功率的最大、最小值;  $Q_{G,i}^{\max}$ 、 $Q_{G,i}^{\min}$  分别表示注入节点  $i$  无功功率的最大、最小值。

### 3 方法简化及 PHA 求解

#### 3.1 约束条件线性化

本文提出的协同维修方法为式(1)一式(39), 对

式(4)、式(5)、式(7)、式(9)、式(11)、式(13)一式(18)、式(28)等约束条件进行线性化处理。

式(4)、式(5)、式(9)、式(28)的线性化处理方式一致, 以约束条件式(4)为例, 有

$$\begin{cases} v_{i,t} \leq v_{j,t} \\ v_{i,t} \leq h_{ij,t,s} \\ v_{i,t} \geq v_{j,t} + h_{ij,t,s} - 1 \end{cases} \quad (40)$$

式(7)一式(11)的线性化处理方式一致, 以约束条件式(7)为例, 有

$$(1 - \kappa_{k,t})\mu_{ij,t}^0 \leq \mu_{ij,t}^1 \leq \kappa_{k,t} + \mu_{ij,t}^0 \quad (41)$$

结合约束条件式(7)一式(11), 对式(13)一式(15)进行线性化处理后, 有

$$\begin{cases} 0 \leq p_{L,i,t,s} \leq \tau_{k,t} \bar{P}_{L,i,t,s} \\ 0 \leq p_{L,i,t,s} \leq (\kappa_{k,t} + \lambda_{i,t}) \bar{P}_{L,i,t,s} \\ p_{L,i,t,s} - \bar{P}_{L,i,t,s} \leq (2 + \kappa_{k,t} - \tau_{k,t} - \lambda_{i,t})M \\ -(2 + \kappa_{k,t} - \tau_{k,t} - \lambda_{i,t})M \leq p_{L,i,t,s} - \bar{P}_{L,i,t,s} \end{cases} \quad (42)$$

式中,  $\lambda_{i,t}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  的负荷状态, 其值为 1 代表  $t$  时刻节点  $i$  的负荷没有被切除, 其值为 0 代表  $t$  时刻节点  $i$  的负荷被完全切除。

对式(16)进行线性化处理后, 有

$$\begin{cases} -p_{L,i,t,s} + p_{\text{thr},i} \leq U_1(1 - \gamma_{i,t}) \\ -p_{L,i,t,s} + p_{\text{thr},i} \geq L_1 \gamma_{i,t} + \varepsilon \end{cases} \quad (43)$$

式中,  $U_1$ 、 $L_1$  分别表示  $\gamma_{i,t}$  的最大值和最小值。

对式(17)进行线性化处理后, 有

$$\begin{cases} -T_i + \varphi_i \leq U_2(1 - \beta_{i,t}) \\ -T_i + \varphi_i \geq L_2 \beta_{i,t} + \varepsilon \end{cases} \quad (44)$$

式中,  $U_2$ 、 $L_2$  分别表示  $\beta_{i,t}$  的最大值和最小值。

对式(18)进行线性化处理后, 得到式(45)。

$$\begin{cases} \tau_{k,t} \geq \gamma_{i,t} \\ \tau_{k,t} \geq \beta_{i,t} \\ \tau_{k,t} \leq \gamma_{i,t} + \beta_{i,t} \end{cases} \quad (45)$$

#### 3.2 PHA 求解

所有约束条件均进行线性化处理后, 本节使用 PHA 求解, 如表 1 所示。

### 4 仿真分析

如图 4 所示, 本节以 IEEE 33 节点系统为例进行测试, 分布式电源位于节点 6、18、21、24、30, 容量为 100 kW + 50 kvar, 所有开关的初始状态均闭合, 维修人员的移动时间为 0 h, 维修人员数量的限制为 3 个, 维修时间为 1.2 h, 应急电源供电时间

表 1 PHA 求解过程

Table 1 Solution process of PHA

Algorithm. 逐步对冲算法(PHA)	
Input:	目标函数 $x_s^k$ , 惩罚值 $\rho$ , 阈值 $\varepsilon$ , 迭代次数 $k$ , 场景 $s$ .
Output:	优化值 $\bar{x}^{(k)}$ .
1:	$x_s^k = \arg \min_s c_s \Delta p_{L,I,J,S}$ ;
2:	$\bar{x}^{(k)} = \sum_{s \in S} p_s x_s^k$ ;
3:	$w_s^k = \rho(x_s^k - \bar{x}^{(k)})$ ;
4:	for $k=0$ ;
5:	$x_s^{(k)} = \arg \min_s (w_s^{(k-1)} x + \frac{\rho}{2} \ x - \bar{x}^{(k-1)}\ ^2 + c_s \Delta p_{L,I,J,S})$ ;
6:	$\bar{x}^{(k)} = \sum_{s \in S} p_s x_s^{(k)}$ ;
7:	$w_s^k = w_s^{k-1} + \rho(x_s^k - \bar{x}^{(k)})$ ;
8:	$g^{(k)} = \sum_{s \in S} p_s \ x_s^k - \bar{x}^{(k)}\ $ ;
9:	If $g^{(k)} < \varepsilon$
10:	End if
11:	End for
12:	return $\bar{x}^{(k)}$

为 1.5 h, 远动开关接入线路 9、14、28、30,  $c_s = 10$  元/kWh。计算机的配置为 CPU 为 i7-9700, 内存为 32 GB。

### 4.1 通信技术和应急电源对系统恢复的影响

#### 4.1.1 无源光纤通信技术接入对系统恢复的影响

本节分析物理网络和信息网络中不同位置的线路故障对负荷损失的影响, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 当故障线路的数量保持不变时, 信息线路故障造成的损失小于物理线路故障造成的损失, 表明信息网络接入的光网络终端、远动开关等设备能有效降低线路故障的影响。

随着故障线路数量的增多, 负荷损失增大, 但是线性增加的趋势逐渐不明显, 机组出力、节点负荷需求、线路潮流等均不同, 线路发生故障时节点切除负荷不同, 导致线性增加的趋势不明显。

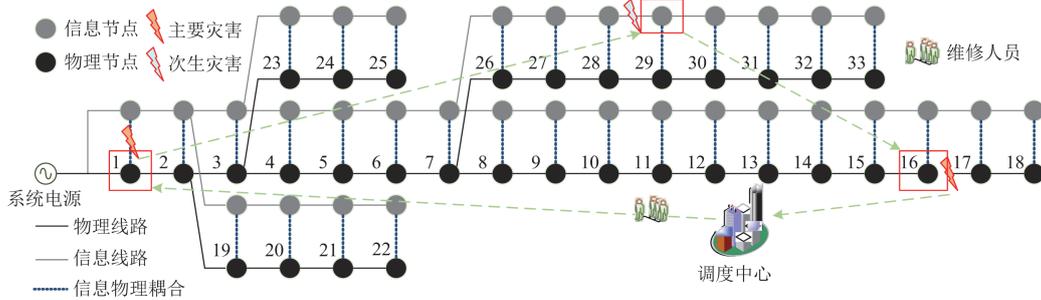


图 4 IEEE 33 节点系统

Fig. 4 IEEE 33-node system

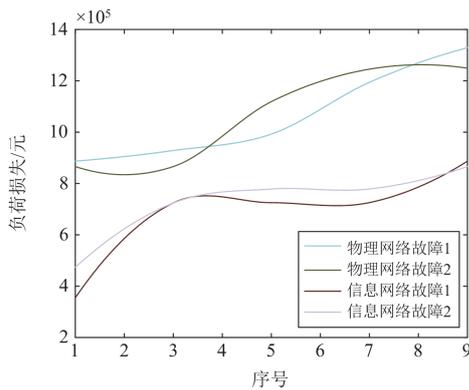


图 5 光纤通信技术对系统恢复的影响

Fig. 5 Impact of fiber optic communication technology on system recovery

引入分布式电源、无源光纤网络后, 负荷损失不会随着故障线路数量的增多而增大。例如, 在物理网络故障 1 和物理网络故障 2 中, 故障线路均能

获取稳定的电力供给, 导致负荷损失的变化曲线几乎重合; 在信息网络故障 1 和信息网络故障 2 中, 光网络终端接入信息节点 30, 分布式电源接入节点 30, 线路 29、32、33 发生故障后, 受故障影响的节点不仅能利用光网络终端维持正常的通信, 还能从节点 30 获取稳定的电力供给, 导致负荷损失的变化曲线几乎重合; 在信息网络故障 1 的基础上, 增加发生故障线路的数量(7、9、39、32), 分布式电源位于节点 6、30, 光网络终端位于节点 9、30, 保障受故障影响的节点正常通信和供电, 因此负荷损失基本保持不变。此时, 受灾节点是可观且可控。

#### 4.1.2 应急电源供电时间对系统恢复的影响

根据电力规程设计, 电力电子设备具备从应急电源获取电力供给的能力。例如配电开关监控终端在极端自然灾害发生后能利用内置的微型应急电池维持约 7 h 的正常工作。由此可见, 应急电源的作用十分重要, 本节分析应急电源供电时间对系统恢

复的影响。

如图 6 所示，应急电源供电时间的长短对负荷损失的影响十分明显。在故障场景 1 中，当供电时间为 0.5 h 时，负荷损失为 1 435 667 元；当供电时间为 1.5 h 时，负荷损失为 1 329 265 元；负荷损失明显增加，主要原因如下。

1) 应急电源能及时为受灾用户供电。

2) 应急电源的供电时间过短，不利于电网调度人员调整维修人员的移动路径，增加灾区用户等待供电的时间，导致负荷损失的增加。

3) 应急电源的供电时间和维修人员的维修时间相关：应急电源供电时间不小于维修人员的维修时间时，负荷损失将保持不变。例如，在故障场景 1 中，供电时间为 0.8 h，负荷损失为 1 369 966 元；供电时间为 1.2 h，负荷损失为 1 329 265 元。这表明合理规划维修时间和应急电源的供电时间能有效减少负荷损失。

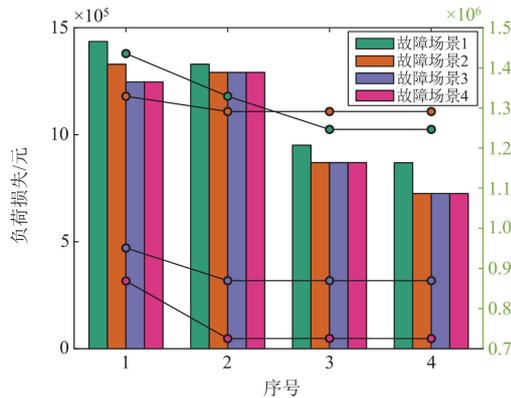


图 6 供电时间对系统恢复的影响

Fig. 6 Impact of power supply time on system recovery

#### 4.2 协同维修对系统恢复的影响

由 4.1 节可知，引入无源光纤通信技术及应急电源能有效减少停电损失。实际上，维修人员的技术熟练度也会影响系统的恢复。本节根据维修人员的技术熟练度不同提出协同维修方法，研究其对系统恢复的影响，并与单独维修方法进行对比。

由图 7 可知，对比故障场景 1 和 2、故障场景 1 和 3、故障场景 1 和 4、故障场景 2 和 3、故障场景 2 和 4，前者无论是物理网络还是信息网络，故障线路的数量均较多，负荷损失较大，这表明随着系统中故障线路数量的增多，负荷损失将增大。在故障场景 1 和 2 中，物理网络中增加故障线路 7 和 12，负荷损失增加 134 302 元，负荷损失增加 10%；在故障场景 3 和 4 中，信息网络中故障线路的数量相同，负荷损失增加 57 635 元，负荷损失仅增加 2%，

主要原因如下。

1) 物理网络中线路的故障对系统的影响更大。物理网络中线路发生故障后，受故障影响的节点十分依赖分布式电源和应急电源提供的电力供给，节点的状态难以确定；信息网络中线路发生故障后，电网调度人员利用无源光纤网络获悉受故障影响节点的状态，及时调度维修资源，同时受故障影响的节点也能利用分布式电源或应急电源保证正常的供电，避免更多的停电损失。

2) 故障线路造成的损失受到分布式电源、应急电源、无源光纤通信等接入位置的影响。例如，故障场景 3 和 4 中，故障线路的数量相同，但是故障线路的位置不同。在故障场景 3 中，故障线路 7 所处支路接入的分布式电源、光网络终端的数量较多；在故障场景 4 中，故障线路 29 所处支路接入的分布式电源、光网络终端的数量较少。一旦线路 7 发生故障，其产生的负面影响大于线路 29 发生故障，因此故障场景 3 中负荷损失较大。

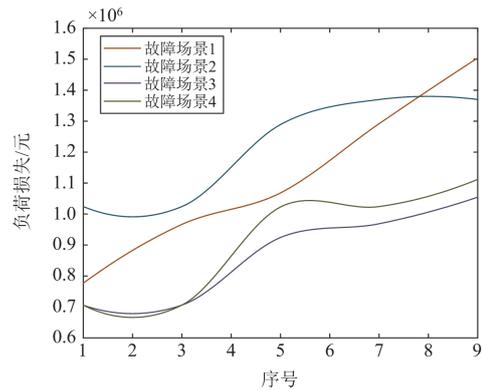


图 7 协同维修对系统恢复的影响

Fig. 7 Impact of coordinated repair on system recovery

协同维修方法与单独维修方法的对比如图 8 所示，绿色曲线代表协同维修方法，橙色曲线代表单独维修方法，物理线路故障代表故障线路集中在物理网络中，信息线路故障代表故障线路集中在信息网络中。由图 8 可知，随着故障线路数量的增加，负荷损失增加，与 4.1 节的结论一致；采取单独维修方法的负荷损失小于协同维修方法，这表明维修人员的移动路径会影响系统的恢复。例如，在物理线路故障-场景 1 中，维修人员的移动路径为物理线路 2-物理线路 7-物理线路 29-物理线路 15-物理线路 32-物理线路 12-物理线路 18-物理线路 33，信息线路 2-信息线路 7-信息线路 33，维修人员的移动距离为 8；在信息线路故障-场景 1 中，维修人员的移动路径为信息线路 2-信息线路 29-物理线路 15-物理线

路 32-物理线路 12-物理线路 2-物理线路 18-物理线路 29-物理线路 7-信息线路 32-物理线路 33, 维修人员的移动距离为 11; 采取协同维修方法时维修人员移动的距离较长, 导致负荷损失增大。

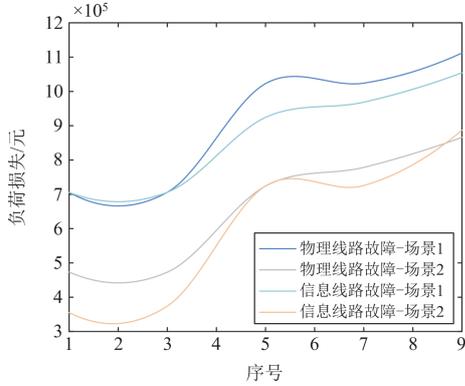


图 8 方法对比

Fig. 8 Comparison of methods

### 4.3 次生灾害对系统恢复的影响

极端自然灾害发生后, 主要灾害和次生灾害均会造成线路故障, 本节根据故障线路的位置调度维修资源, 分析次生灾害对系统的影响。

由表 2 可知, 主要灾害和次生灾害引发的故障线路越多, 负荷损失越大。例如, 物理网络中故障线路的数量从 2 增加至 5 时, 负荷损失从 1 111 231 元增加至 1 455 683 元, 信息网络中故障线路的数量从 2 增加至 5 时, 负荷损失从 1 209 253 元增加至 2 104 611 元。在物理网络发生线路故障的前提下, 随着次生灾害引发的故障线路数量增多, 负荷损失保持不变。例如, 主要灾害引发线路 2、12、15、18、33 发生故障, 在次生灾害引发线路 32 发生故障的情况下, 逐渐增加故障线路的数量, 负荷损失均为 1 211 468 元。这表明孤岛形成后, 受故障影响的节点能获取稳定的电力供给, 避免切除更多的负荷: 分布式电源接入节点 30 后, 能为孤岛内其他节点供电。在次生灾害引发线路 31、32 故障的情况下, 逐渐增加故障线路的数量, 负荷损失仍为 1 211 468 元。即降低次生灾害的影响是电网调度人员必须考虑的问题, 引入的分布式电源、应急电源、光纤通信技术可以减小次生灾害造成的损失。

由表 2 可知, 信息网络中故障线路数量的多少对负荷损失的影响十分明显: 次生灾害引发线路 4、9、13、23、29 故障时, 负荷损失为 1 906 006 元。由 4.1 节、4.2 节的可知, 物理网络中线路发生故障后, 负荷损失应大于 1 906 006 元, 但是实际的负荷损失为 1 455 683 元。这表明, 在信息网络中, 分布

式电源、应急电源、光网络终端、远动开关等无法为故障线路提供的供电和通信功能后, 将导致大量负荷被切除, 负荷损失增大。

表 2 次生灾害对系统恢复的影响

Table 2 Impact of secondary disasters on system recovery

物理网络线路故障, 次生灾害发生概率为 1, 单一场景。		
主要灾害引发的故障	次生灾害引发的故障	负荷损失/元
2、7、15、18、29、33	32	1 211 468
2、12、33	15、18、29、32	1 791 690
	18、19、26、29、32	1 455 683
2、7、12、15、33	4、13、23、29	1 251 649
	13、23、29	1 144 708
	18、32	1 111 231
信息网络线路故障, 次生灾害发生概率为 1, 单一场景。		
主要灾害引发的故障	次生灾害引发的故障	负荷损失/元
2、7、15、18、29、33	32	1 286 793
2、7、33	15、18、29、32	1 250 089
	18、19、2、4、26、29、32	2 104 611
2、7、15、33	4、9、13、23、29	1 906 006
	18、19、32	1 276 893
	13、23、29	1 209 253

在表 2 的基础上分析不同次生灾害发生概率对系统恢复造成的影响, 如图 9 所示。由图 9 可知, 故障线路的数量越多, 负荷损失越大; 次生灾害对物理网络造成的负荷损失大于对信息网络造成的负荷损失; 次生灾害发生的概率越随机, 电网调度人员预估负荷损失的难度越大。这表明, 次生灾害的随机性特点增加电网调度人员获悉线路状态的难度, 导致灾区用户等待供电和通信的时间变长, 负荷损失增大。

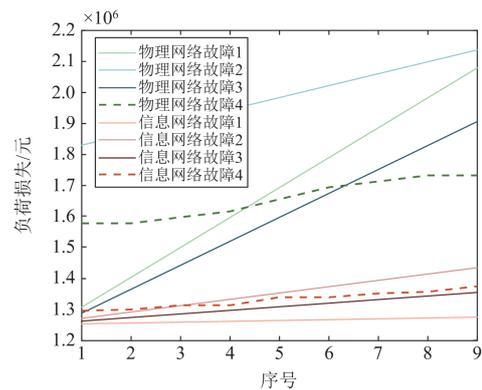


图 9 次生灾害概率的影响

Fig. 9 Impact of the secondary disasters' probability

考虑次生灾害的影响后, 主要灾害对负荷损失的影响占主要地位, 主要灾害引发故障线路的数量越多, 负荷损失越大; 随着次生灾害引发的故障线

路的数量的增多,次生灾害的随机性特点更加明显,预估负荷损失的难度更大。

为了减小次生灾害对系统恢复的影响,本文提出一种使用 PHA 求解的协同维修方法。首先优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序,然后根据次生灾害可能引发的故障线路确定维修顺序,如图 10 所示。场景 1 中次生灾害引发的故障线路数量最多,主要灾害引发的故障线路的数量和场景 3 中相同,场景 2、3 中次生灾害引发的故障线路的数量相同,主要灾害引发的故障线路的数量不同。

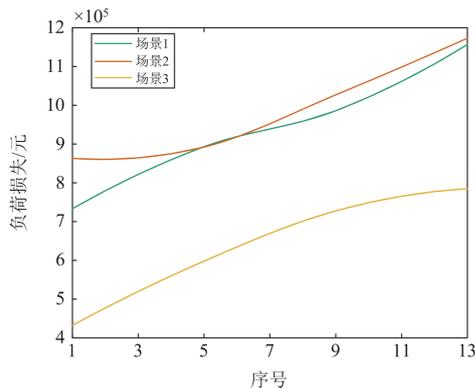


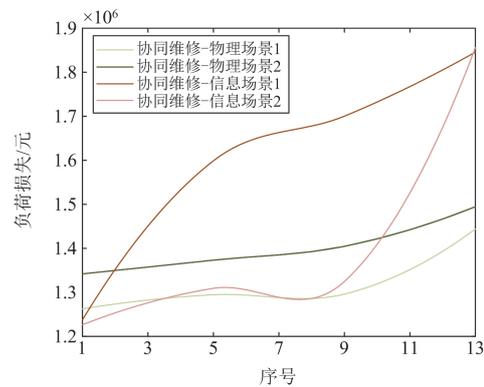
图 10 物理网络的影响

Fig. 10 Impact on the physical system

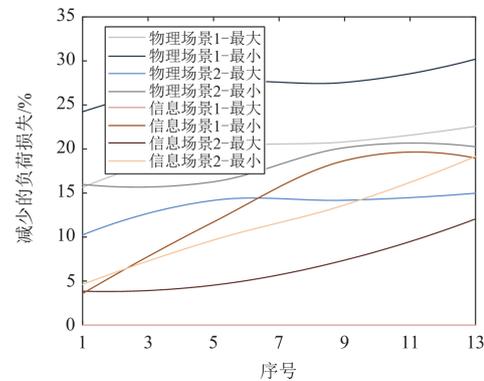
由图 10 可知,随着次生灾害引发的故障线路的数量增多,负荷损失逐渐增大。在场景 1 中,主要灾害引发故障线路的维修顺序为物理线路 2-15-12-7-33,预估的负荷损失为 733 480.6 元;根据次生灾害引发线路故障的数量和位置,最小负荷损失为 7 334 033.5 元,最大负荷损失为 791 960.95 元。由此可知,优先确定主要灾害引发故障线路的维修顺序可以减少负荷损失(约 7%)。对比场景 1、2,场景 1 中次生灾害引发的故障线路数量较多,场景 2 中次生灾害引发的线路故障概率较大,因此场景 1 和 2 的负荷损失接近。对比场景 2、3,虽然次生灾害引发的故障线路的数量相同,但是场景 2 中故障的物理线路 4 距离分布式电源较远,负荷损失增大。此时,主要灾害引发的故障线路的维修顺序为物理线路 2-15-12-4-33,优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序减少约 14%的负荷损失。在场景 3 中,主要灾害引发的故障线路的维修顺序为物理线路 2-15-12-7-33,优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序减少约 10%的负荷损失。即面对有可能发生的次生灾害,采取优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序可以有效减小负荷损失。

采取协同维修方法后,负荷损失的变化规律如

图 11 所示。物理场景表示次生灾害引发的故障线路集中在物理网络中,场景 1 表示主要灾害引发的故障线路为物理线路 2、7、12、15、33,场景 2 表示主要灾害引发的故障线路为物理线路 2、4、12、15、33;信息场景表示次生灾害引发的故障线路集中在信息网络中,场景 1 表示主要灾害引发的故障线路为信息线路 2、15、18,场景 2 表示主要灾害引发的故障线路为信息线路 2、4、18;场景 1 中故障线路的数量多于场景 2,场景 2 中受次生灾害影响后线路发生故障的概率大于场景 1。由图 11 可知,随着次生灾害引发的故障线路数量的增大,负荷损失逐渐变大。



(a) 协同恢复方法的影响



(b) 减少的切负荷损失

图 11 PHA 求解后的方法对比

Fig. 11 Methods comparison after PHA solving

如图 11(a)所示,采取协同维修方法后,电网调度人员优先维修故障的信息线路,然后再维修故障的物理线路,这增加了维修人员移动的距离,负荷损失因此增大。但是,采取协同维修方法后,故障线路的维修时间变短:在物理场景 1 中,所有故障线路的维修时间为 8.4 h,采取单独维修方法后,维修时间为 9.6 h;在物理场景 2 中,采取协同维修方法后,维修时间为 7.2 h,采取单独维修方法后,维

修时间为 8.4 h。

如图 11(b)所示, 使用 PHA 求解后, 优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序能减少次生灾害造成的负荷损失。以物理场景 1 为例, 获悉所有线路的状态后, 最大负荷损失为 1 712 187 元, 最小负荷损失为 1 241 877 元; 使用 PHA 求解后, 主要灾害引发的故障线路的维修顺序为物理线路 2-15-12-7-33, 预估的停电损失为 1 444 125.39 元, 优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序可以减少负荷损失(约 16%)。面对有可能发生的次生灾害, 采取本文提出的恢复方法, 能减小负荷损失。

## 5 结论

本文提出一种计及次生灾害影响的电力信息物理系统恢复方法, 通过对方法的建模、简化、求解和验证, 得出如下结论。

1) 构建以无源光纤通信为基础的信息网络可以减小极端自然灾害对系统造成的影响, 光网络终端可以降低灾区信息获取的难度。

2) 电网调度人员需要根据实际需求制定维修计划, 采取单独维修方法可以减小系统的停电损失, 采取协同维修方法可以减少维修资源的时间。

3) 当系统遭遇极端自然灾害后, 优先确定主要灾害引发的故障线路的维修顺序, 再根据次生灾害引发的故障线路的位置和信息调度维修资源可以减小次生灾害的影响。

## 参考文献

- [1] 盛成玉, 高海翔, 陈颖, 等. 信息物理电力系统耦合网络仿真综述及展望[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 100-105.  
SHENG Chengyu, GAO Haixiang, CHEN Ying, et al. Summary and prospect of cyber physical power system simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 100-105.
- [2] U.S. Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14th blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. 2004.
- [3] TIAN M, DONG Z C, GONG L, et al. Coordinated repair crew dispatch problem for cyber-physical distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2288-2300.
- [4] 郭明鑫, 李少岩, 顾雪平. 计及台风灾害全过程模拟的配电网差异化加固规划韧性提升方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 53(3): 62-73.  
GUO Mingxin, LI Shaoyan, GU Xueping. Differentiated reinforcement planning method for a distribution network considering simulation of the whole process of typhoon disasters[J]. Power System Protection and Control, 2024, 53(3): 62-73.
- [5] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国德州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4043.  
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043.
- [6] 龚立, 王先培, 田猛, 等. 电力信息物理系统韧性的概念与提升策略研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 169-187.  
GONG Li, WANG Xianpei, TIAN Meng, et al. Concepts and research progress on enhancement strategies for cyber physical power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 169-187.
- [7] WEN Z, NEILL D, MAEI H. Optimal demand response using device-based reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2312-2324.
- [8] LIU C H, DAI Z, ZHAO Y, et al. Distributed and energy-efficient mobile crowd sensing with charging stations by deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 20(1): 130-146.
- [9] 彭向阳, 王柯, 肖祥, 等. 大型无人直升机电力线路智能巡检宽带卫星通信系统[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 368-376.  
PENG Xiangyang, WANG Ke, XIAO Xiang, et al. Broadband satellite communication system in the intelligent inspection of electric power line base on large scale unmanned helicopter[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 368-376.
- [10] SILVER D, HUBERT T. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and go through self-play[J]. Science, 2018, 62: 1140-1144.
- [11] 程改红, 徐政. 电力系统故障恢复过程中的过电压控制[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 29-33.  
CHENG Gaihong, XU Zheng. A method to control sustained overvoltage during power system restoration[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 29-33.
- [12] 顾雪平, 李少岩, 周光奇, 等. 计及特级负荷恢复的网架重构时段全局优化方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 138-149.  
GU Xueping, LI Shaoyan, ZHOU Guangqi, et al. Global optimization by multi-time-stage coordination for network reconfiguration considering vital load restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 138-149.
- [13] 范睿, 孙润稼, 刘玉田. 考虑空调负荷需求响应的负

- 荷恢复量削减方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2869-2877.
- FAN Rui, SUN Runjia, LIU Yutian. A load restoration amount reduction method considering demand response of air conditioning loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2869-2877.
- [14] 刘瑞环, 陈晨, 叶志刚, 等. 基于无人机应急通信的配电网灾后信息物理协同恢复策略[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 1218-1230.
- LIU Ruihuan, CHEN Chen, YE Zhigang, et al. Cooperative cyber-physical distribution system restoration with UAV-based emergency communications after disasters[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1218-1230.
- [15] 李振洪, 王建伟, 胡羽丰, 等. 大范围洪涝灾害影响下的交通网受损快速评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1039-1049.
- LI Zhenhong, WANG Jianwei, HU Yufeng, et al. Rapid assessment of traffic inefficiency under flood scenarios over wide regions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(7): 1039-1049.
- [16] DU J, JI Y, QU D, et al. Three-stage mixed integer robust optimization model applied to humanitarian emergency logistics by considering secondary disasters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 223255-223270.
- [17] 黄秋昊, 黄盛楠, 陆新征, 等. 高层建筑围护结构地震破坏导致次生灾害的初步研究[J]. 工程力学, 2013, 30: 94-98.
- HUANG Qiuhaohao, HUANG Shengnan, LU Xinzheng, et al. A primary study on the secondary disasters induced by the damage of high-rise building envelopes under earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30: 94-98.
- [18] 曹永兴, 邓鹤鸣, 蔡炜, 等. 电力设施应对地震及其次生灾害的研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1962-1974.
- CAO Yongxing, DENG Heming, CAI Wei, et al. Research progress in prevention of earthquake and secondary disasters on power facilities[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1962-1974.
- [19] WANG C, ZHANG T, LUO F, et al. Impacts of cyber system on microgrid operational reliability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 105-115.
- [20] CHRISTODOULOS S, CONSTANTINOS P, IOANNISK K. Low-complexity base station selection scheme in mm wave cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 4049-4064.
- [21] LEI S, WANG J, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2030-2041.
- [22] ARIF A, WANG Z, CHEN C, et al. A stochastic multi-commodity logistic model for disaster preparation in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 565-576.
- [23] DEGHANIAN P, ASLAN S, DEGHANIAN P. Maintaining electric system safety through an enhanced network resilience[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4927-4937.
- [24] 王建, 熊张恣, 南东亮, 等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 16-26.
- WANG Jian, XIONG Zhangzi, NAN Dongliang, et al. Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 16-26.
- [25] 张施令, 姚强, 李新田. 基于法兰式光纤传感技术的高压组合电器HF气体在线检测[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 402-409.
- ZHANG Shiling, YAO Qiang, LI Xintian. On-line monitoring of HF gas in high voltage GIS based on flange optical fiber sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 402-409.

收稿日期: 2024-03-28; 修回日期: 2024-09-16

作者简介:

龚立(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全、系统韧性提升; E-mail: ligong@whu.edu.cn

田猛(1989—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统安全与可靠性、电力系统自动化。E-mail: tm@whut.edu.cn

(编辑 许威)