

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.025

# 山火灾害下输电系统的弹性评估方法及其提升措施

方超颖<sup>1</sup>, 许军<sup>1</sup>, 丁志龙<sup>2</sup>, 程韵初<sup>1</sup>, 郑钟楠<sup>1</sup>, 张亚超<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**弹性能反映电力系统应对极端灾害的抵御能力和恢复能力。输电系统作为电力系统中的重要组成部分, 在小概率-高损失的山火灾害事件中, 往往会发生大面积停电事故。文中提出一种考虑山火灾害全过程的输电系统弹性评估框架。首先定量分析极端山火灾害对输电线路故障率的影响, 建立火点位置与线路故障率之间的数学关系, 并利用系统信息熵获取典型故障场景以描述山火灾害可能导致的故障规模; 其次, 结合故障元件的地理位置、检修人员调度资源和修复时间等因素, 构建以最小化山火灾害下负荷削减量为目标的输电系统恢复模型, 提出考虑灾害全过程的输电系统弹性评估方法; 最后, 以 IEEE RTS-79 节点输电系统为例, 验证了所提模型和弹性评估方法的有效性。算例结果表明, 该评估方法可有效、全面地衡量各因素对输电系统弹性提升性能的影响。此外, 定量分析了 3 种典型弹性提升技术措施的效果, 为电力部门应对极端山火灾害制定防御及恢复策略提供了可量化的参考依据。

**关键词:**极端山火灾害; 输电网弹性; 弹性评估; 弹性指标; 系统信息熵; 故障恢复

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)02-0239-09

## 0 引言

近年来, 随着特高压电网的建成和投入运行, 输电系统经常跨越高山峻岭地带, 人为、雷电和大风等因素引发的山火灾害严重影响输电网运行的稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。例如 2019 年由于植被接触输电线路造成短路故障, 进而引发美国加州南部圣费尔南多谷爆发山火<sup>[2]</sup>。频发的山火灾害显著增加了电力系统发生大面积停电的风险, 严重影响经济社会健康发展<sup>[3-4]</sup>。为了衡量电力系统应对此类小概率-高损失极端灾害的能力, 弹性的概念应运而生<sup>[5]</sup>。目前, 亟须深化输电系统弹性评估研究, 制定输电系统应对日益频发山火灾害的弹性提升策略。

当前, 国内外对极端灾害下的输电网弹性评估已展开了一定的研究。一方面从极端灾害对输电系统的影响这一角度展开, 文献[6]基于山火灾害信息、地理环境以及气象条件建立了山火蔓延模型, 通过该模型刻画了山火灾害对输电线路故障率的影响。文献[7-8]根据台风气象预测信息对台风进行时空建模, 并结合线路参数建立时空特性矩阵以描述台风灾害对电网线路故障率的影响。另一方面, 就弹性评估方法而言, 文献[9]提出一种考虑连锁故障并融入灾害持续时间以及故障场景概率的电力系统弹性评估方法。然而, 现有的大多数弹

性评估方法<sup>[10-13]</sup>对系统恢复模型进行简化的分类假设中未考虑修复资源、电力系统元件及检修部门的空间关系, 而灾后失负荷量与系统恢复至正常运行状态的时间是衡量电力系统弹性的关键因素, 因此现有研究缺乏对输电网灾后恢复过程的精细化建模, 有待深入完善。

为了缩小由极端山火灾害导致的输电系统停电范围, 提高电网应对山火灾害的能力, 须结合山火特性制定相应的弹性提升策略。文献[14]分析了风速、保护措施和线路过载对山火发生概率的影响, 以输电线路故障概率及周围植被燃烧概率来表征山火发生的概率, 定量分析电网故障引发山火灾害的可能性。文献[15]考虑了山火灾害下太阳辐射、风速和风向不确定性对线路故障率以及分布式电源出力的影响, 提出一种以最小化电力系统负荷削减量为目标的随机优化模型以提升系统弹性。文献[16-17]分析了美国加州山火引发的停电事故, 采取公共安全停电措施来降低山火灾害的影响。上述文献分析了山火灾害与电力系统之间的交互关系, 然而如何从弹性电力系统的角度提高电网应对山火灾害的能力仍有待进一步研究。

综上所述, 为完善现有弹性分析方法, 文中提出一种考虑山火灾害全过程的输电系统弹性评估方法。构建山火位置、风速以及地理位置等因素与输电线路故障率之间的关系模型, 量化山火灾害对输电线路的影响; 在此基础上, 通过系统信息熵筛选典型故障场景以确定极端灾害可能引发的输电

网故障规模;结合故障元件的地理位置、检修人员调度和修复时间等因素构建输电系统恢复模型,通过分析不同场景下系统的负荷削减量以及恢复到正常状态所需的时间,提出考虑灾害全过程的输电系统弹性评估方法,最后,以 IEEE RTS-79 节点系统为例进行仿真,分别分析线路加固数、维修队伍数以及线路修复时间等因素对输电系统弹性提升性能的影响,验证了所提模型和方法的有效性。

## 1 山火灾害下输电线路故障率模型

### 1.1 山火蔓延模型

目前常用的火点蔓延模型是改进的 Anderson 椭圆模型<sup>[18]</sup>,即在无风状态下,认为火场朝各个方向的蔓延速度一致,火场由火点中心向外呈圆形扩散;在有风状态下,认为火场以风向为长轴方向,以火点为焦点向外呈椭圆形扩散。据此山火蔓延范围方程如下:

$$\frac{\frac{x^2}{[1.2e^{1.8v}\varphi(\varphi - \sqrt{\varphi^2 - 1})R_0\Delta t]^2} + \frac{y^2}{[1.2e^{1.8v}(\varphi - \sqrt{\varphi^2 - 1})R_0\Delta t]^2}}{1} = 1 \quad (1)$$

式中: $v$ 为风速; $R_0$ 为山火蔓延初始速度,与初始风速有关; $\Delta t$ 为扩散时间; $\varphi$ 为椭圆火场的形状系数; $x$ 、 $y$ 分别为以火点为中心的椭圆的横、纵坐标数值。

设告警杆塔和火点的连线与最大蔓延速度方向夹角为 $\gamma$ ,则该方向山火蔓延速度 $R_\gamma$ 为:

$$R_\gamma = R_0 / \left[ 1 - \cos \gamma \left( 1 - \frac{1}{1.2e^{1.8v}} \right) \right] \quad (2)$$

### 1.2 极端山火灾害下的线路故障率模型

极端山火条件下影响线路故障率的环境因素众多,包括火点位置、降水量、地表植被、风力风向和温度等。假定火点位置信息可通过卫星监测得到,则输电线路故障的综合概率为<sup>[19]</sup>:

$$P = D_R D_B D_F P_V \quad (3)$$

式中: $P$ 为山火灾害下线路故障的综合概率; $D_R$ 为山火跳闸降水因子,仅当过去 3 h 内统计降水量小于 2 mm 且未来 1 h 内的预测降水量小于 1 mm 时取值为 1,否则取值为 0; $D_B$ 为地表植被因子,当火点与输电线路之间覆盖植被时取值为 1,如地形为草原或丛林,否则取值为 0,如地形为荒漠、河流公路等; $D_F$ 为山火蔓延因子,与山火蔓延范围有关; $P_V$ 为输电线路发生闪络故障的概率。

当火点的蔓延范围覆盖到线路或杆塔时,认为山火可能造成该线路故障。因此,山火蔓延因子可用式(4)进行表征。

$$D_F = \begin{cases} 0 & L_f > R_\gamma \Delta t + 100 \\ \frac{L_f - R_\gamma \Delta t}{200} + 0.5 & R_\gamma \Delta t \leq L_f \leq R_\gamma \Delta t + 100 \\ 1 & L_f < R_\gamma \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L_f$ 为火点与告警杆塔间的距离,可通过卫星辨识的火点经纬度坐标与告警杆塔坐标计算得到。

当输电线路受山火影响时,线路下方的间隙被划分为火焰区、离子区和烟尘区 3 个区域。各区域导致输电线路击穿的电压和机理各不相同,火焰区击穿电压 $U_f$ 、离子区击穿电压 $U_z$ 和烟尘区击穿电压 $U_s$ 的分析以及计算方法详见文献[20]。则山火条件下输电线路对地击穿电压 $U_{jc}$ 为:

$$U_{jc} = U_f + U_z + U_s \quad (5)$$

山火灾害中线路闪络故障概率近似服从正态分布,则输电线路闪络故障概率 $P_V$ 可计算为:

$$P_V = \begin{cases} 0 & U \leq 0.756U_{jc} \\ \frac{U - U_{99}}{U_{jc} - U_{99}} & 0.756U_{jc} < U \leq U_{jc} \\ 1 & U > U_{jc} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $U$ 为输电线路运行的相电压; $U_{99}$ 为输电线路 99% 耐受击穿电压, $U_{99} = 0.756U_{jc}$ 。

### 1.3 基于信息熵的场景生成方法

电网弹性评估需要选取山火灾害下的故障场景,而电网线路众多,故障场景数量巨大,因此有必要根据故障场景出现的可能性和不确定性进行筛选,选取典型的极端山火灾害故障场景对电网弹性进行评估。

文中采用系统信息熵来选取包含多个故障线路的典型故障场景集<sup>[21-22]</sup>,即根据山火灾害下单一输电线路故障概率来选取可能出现的故障场景。根据香农信息理论中信息熵的概念<sup>[23]</sup>,各故障场景中各输电线路是否发生故障构成不确定性事件,其信息熵可表示如下:

$$W = \sum_{l \in B} (-\log_2 p_{l,t}) z_{l,t} \quad (7)$$

式中: $B$ 为电网线路集; $p_{l,t}$ 为 $t$ 时段输电线路 $l$ 的故障率; $z_{l,t}$ 表示 $t$ 时段线路 $l$ 是否发生故障,发生故障取值为 1,否则取值为 0。

系统的总信息熵值反映了系统线路是否发生故障的不确定性程度,是系统本身的固有属性。将系统的总信息熵作为生成故障场景的不确定性预算,当输电线路发生故障的概率越大时,该线路发生故障所占用的不确定性预算越小;反之,当故障概率较低的线路发生故障时,需要占用系统更多的

不确定性预算。例如,当线路故障概率为1时,发生故障所占不确定性预算为0,则有 $z_{l,t} = 1$ ,即线路一定会发生故障;反之,当线路故障概率为0时,则需要无穷大的系统信息熵才能使 $z_{l,t} = 1$ ,即线路不会发生故障。综上,所选取典型故障场景的系统信息熵值须满足:

$$W_{\min} \leq \sum_{l \in B} (-\log_2 p_{l,t}) z_{l,t} \leq W_{\max} \quad (8)$$

式中: $W_{\min}$ 、 $W_{\max}$ 分别为选取故障场景中系统信息熵的最小和最大值。

通过式(8)选取的故障场景具有发生概率较大、故障后果严重的特点,可作为输电系统弹性评估的典型故障场景。通过分析典型故障场景可以确定山火灾害可能导致的故障规模及其概率分布。

## 2 山火灾害下输电系统的弹性评估方法

### 2.1 输电系统弹性评估指标

在输电系统遭受极端山火灾害期间,大量电力设备可能发生停运故障,系统将采取削减负荷甚至系统解列等紧急措施以满足安全静态条件<sup>[24]</sup>,由此导致系统供应的负荷水平大幅度下降。通常将系统负荷供应量作为衡量系统性能的核心要素,其曲线如图1所示, $L_0$ 为输电系统遭受灾害前的性能; $L_1$ 为输电系统遭受灾害后最低系统性能。极端灾害发生期间,根据系统性能将整个极端灾害过程分为准备与预防阶段( $t_0$ 之前)、抵御与吸收阶段( $t_0-t_1$ )、响应与适应阶段( $t_1-t_2$ )和恢复阶段( $t_2-t_3$ )。

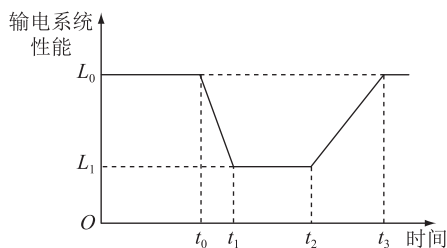


图1 山火灾害下系统性能曲线

Fig.1 System performance curve under mountain fire disasters

山火灾害下,输电系统中的线路在 $t_0$ 时刻开始发生故障,系统出现负荷缺供现象,直到降低至一个较低负荷水平继续稳定运行,系统抵御与吸收阶段、响应与适应阶段的最终时刻分别记为 $t_1$ 、 $t_2$ 。之后,维修人员开始对故障线路进行修复,系统性能逐渐恢复, $t_3$ 为恢复阶段的最终时刻,系统负荷恢复到原有水平。

综上,文中采用系统负荷曲线在极端山火灾害下的缺失面积来反映输电系统弹性<sup>[25-27]</sup>,该指标可

同时考虑系统恢复到正常所用的时间和灾害过程中故障的损失。

$$R = E \left( \frac{\int_{t_0}^{t_3} l_R(t) dt}{\int_{t_0}^{t_3} l_1(t) dt} \right) = \sum_{n=1}^N P_n \left( \frac{\int_{t_0}^{t_3} l_R(t) dt}{\int_{t_0}^{t_3} l_1(t) dt} \right) \quad (9)$$

式中: $E(\cdot)$ 为期望值; $P_n$ 为场景 $n$ 发生的概率; $N$ 为场景总数; $l_R(t)$ 为系统遭受山火灾害时的实际负荷曲线; $l_1(t)$ 为系统无故障情况下的正常负荷曲线; $R$ 为输电系统遭受山火灾害下的弹性, $R$ 越大系统应对山火灾害的能力就越强。

### 2.2 输电系统弹性评估流程

在弹性评估过程中考虑山火灾害对输电线路的影响,建立图2所示输电系统弹性评估流程。

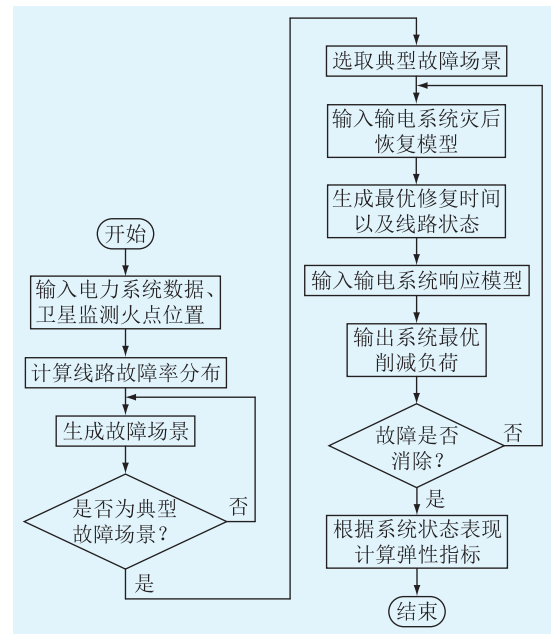


图2 山火灾害下的输电系统弹性评估流程

Fig.2 Resilience assessment procedures of power transmission systems under mountain fire disasters

弹性评估流程的具体步骤如下。

步骤1:输入输电系统数据、山火灾害信息以及气象条件,计算输电线路的故障概率,并根据该故障概率生成故障场景。其中输电网数据包括电气数据以及系统地理数据,山火灾害数据包括火点位置以及山火初始蔓延速度等。

步骤2:基于系统信息熵选取满足式(8)约束的典型故障场景,并用以输电系统弹性评估。

步骤3:将典型故障场景下的故障线路位置输入至元件修复模型,得出各场景下的最优修复时间以及修复过程的线路状态,并将其作为输电系统响应模型的输入值。

步骤4:根据输电系统响应模型确定各故障场

景的最优削减负荷。

步骤 5:判断系统中是否存在故障,若不存在则直接转入步骤 6,若存在则返回步骤 3。

步骤 6:根据系统各时刻的负荷供应量,利用式(9)计算输电系统弹性指标。

### 3 输电系统的灾中响应模型

在极端山火灾害下,输电系统中多条线路发生故障跳闸,须通过重新调度发电机出力及削减负荷的方式满足系统的静态安全条件。输电系统灾中响应模型目标函数和约束条件<sup>[28]</sup>如下:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_D} P_{j,t}^{\text{cur}} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^G = \sum_{j=1}^{N_D} (P_{j,t}^L - P_{j,t}^{\text{cur}}) \quad (11)$$

$$0 \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,\max}^G \quad (12)$$

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{cur}} \leq P_{j,t}^L \quad (13)$$

$$F_l = (\theta_{l,t}^r - \theta_{l,t}^o) / x_l \quad (14)$$

$$-f_{l,\max}(1 - z_{l,t}) \leq F_l \leq f_{l,\max}(1 - z_{l,t}) \quad (15)$$

式中:  $P_{i,t}^G$  为  $t$  时段第  $i$  台发电机组的有功出力;  $P_{j,t}^L$ 、 $P_{j,t}^{\text{cur}}$  分别为  $t$  时段节点  $j$  的负荷需求量和负荷削减量;  $P_{i,\max}^G$  为第  $i$  台发电机组的有功出力上限;  $x_l$ 、 $\theta_{l,t}^r$ 、 $\theta_{l,t}^o$  分别为线路  $l$  的电抗、首端和末端节点的电压相位角;  $F_l$ 、 $f_{l,\max}$  分别为线路  $l$  的有功潮流和有功潮流限值;  $T$  为总时段数;  $N_G$ 、 $N_D$  分别为发电机和负荷节点的数量。

式(11)为系统功率平衡约束,式(12)为发电机出力上下限约束,式(13)为负荷削减量约束,式(14)为线路潮流方程,式(15)为线路潮流约束。

### 4 输电系统的灾后恢复模型

在输电系统灾后恢复阶段,维修人员应尽快修复故障线路以恢复负荷供应,在此过程中应考虑维修人员到达各故障线路的时间及维修时间,对其检修路径进行优化。该优化问题可表述如下:维修队伍的索引及其构成的集合分别记为  $c$  和  $C$ ,维修队伍数量为  $n^{\text{crew}}$ ,维修队伍将沿着一定路径前往故障线路,以最短的时间扑灭线路周围山火并修复所有故障,返回检修中心。设有  $K$  条故障线路,检修中心与故障线路构成的集合设为  $D = \{0, 1, 2, \dots, K\}$ ,其中 0 为检修中心;  $1, 2, \dots, K$  为故障线路的编号。

输电系统灾后恢复模型的目标为所有故障线路总修复时间最小。设  $\tau_r$  为故障线路  $r$  的修复完成时间,则目标函数为:

$$\min \sum_{r \in D \setminus \{0\}} \tau_r \quad (16)$$

维修队伍  $c$  将某线路修复完成后,将前往下一故障线路,即满足:

$$\sum_{s \in D \setminus \{r\}} x_{r,s,c} - \sum_{s \in D \setminus \{r\}} x_{s,r,c} = 0 \quad r \in D; c \in C \quad (17)$$

式中:  $x_{r,s,c}$ 、 $x_{s,r,c}$  为维修人员调度路径决策变量。维修队伍  $c$  从故障线路  $r$  到达故障线路  $s$ ,  $x_{r,s,c}$  取值为 1, 否则为 0; 维修队伍  $c$  从故障线路  $s$  回到故障线路  $r$ ,  $x_{s,r,c}$  取值为 1, 否则为 0。

维修队伍  $c$  必须从检修中心出发,在完成所有检修任务后返回检修中心,该约束可表示为:

$$\sum_{c \in C} \sum_{r \in D \setminus \{0\}} x_{0,r,c} = \sum_{c \in C} \sum_{r \in D \setminus \{0\}} x_{r,0,c} = n^{\text{crew}} \quad (18)$$

维修队伍  $c$  从检修中心到达故障线路  $r$ ,  $x_{0,r,c}$  取值为 1, 否则为 0。维修队伍  $c$  从故障线路  $r$  回到检修中心,  $x_{r,0,c}$  取值为 1, 否则为 0。

设  $y_{r,c}$  为表示维修队伍  $c$  是否经过故障线路  $r$  的二进制变量,经过时取值为 1, 否则取值为 0, 满足:

$$y_{r,c} = \sum_{s \in D \setminus \{r\}} x_{r,s,c} \quad r \in D; c \in C \quad (19)$$

所有故障线路在维修过程仅需维修一次,即:

$$\sum_{c \in C} y_{r,c} = 1 \quad r \in D \setminus \{0\} \quad (20)$$

设维修队伍修复故障线路  $r$  所需时间为  $t_{r,c}$ , 维修小组  $c$  从  $r$  点行驶至  $s$  点的时间为  $t_{r,s,c}^{\text{tr}}$ , 维修队伍  $c$  到达故障线路  $r$  的时间为  $T_{r,c}$ , 则维修队伍  $c$  到达下一故障线路  $s$  的时间  $T_{s,c}$  满足:

$$T_{r,c} - T_{s,c} + t_{r,c} + t_{r,s,c}^{\text{tr}} \leq M(1 - x_{r,s,c}) \quad (21)$$

$$\begin{cases} 0 \leq T_{r,c} \leq M y_{r,c} & r \in D \setminus \{0\} \\ T_{0,c} = t_{\text{ini}} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $M$  为一足够大的正数;  $t_{\text{ini}}$  为检修队伍启程准备时间。

故障线路  $r$  维修时间满足:

$$\tau_r \geq \sum_{c \in C} (T_{r,c} + t_{r,c} y_{r,c}) \quad r \in D \setminus \{0\} \quad (23)$$

引入二进制变量  $h_{r,t}$  表示故障线路  $r$  修复完成的时段。若故障线路  $r$  在  $t$  时段修复完成,则  $h_{r,t}$  取值为 1, 否则为 0, 则有:

$$\tau_r \leq \sum_{t=1}^T t h_{r,t} \leq \tau_r + 1 - \varepsilon \quad r \in D \setminus \{0\} \quad (24)$$

式中:  $\varepsilon$  为一任意小的实数。

引入二进制变量  $q_{r,t}$  表示故障线路  $r$  的修复状态。若在  $t$  时段故障线路  $r$  已修复完成,则  $q_{r,t}$  取值为 1, 否则为 0, 则有:

$$q_{r,t} = \sum_{m=1}^{t-1} h_{r,m} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (25)$$

## 5 算例分析

### 5.1 基础数据

文中采用 IEEE RTS-79 系统为例,验证所提模型的有效性,其中输电系统的具体参数参见文献[29]。系统的地理位置如图 3 所示,其中数字编号为节点编号,各节点经纬度设定参见文献[24],线路编号及系统拓扑结构参见文献[30],火点位置信息参见文献[20]。

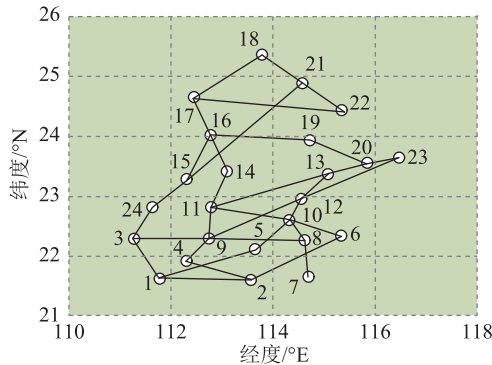


图 3 输电系统的地理位置

Fig.3 Geographic location of power transmission system

### 5.2 输电线路故障率仿真结果

将 5.1 节系统数据以及火点位置信息代入 1.2 节输电线路故障率模型,可计算得出各线路的山火跳闸概率如图 4 所示。

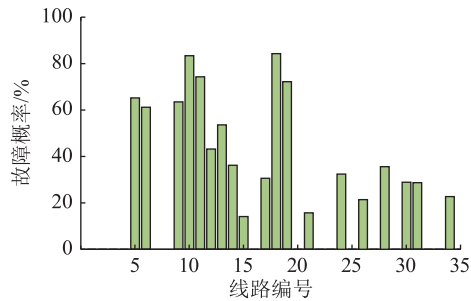


图 4 山火灾害下各线路故障概率

Fig.4 Line failure probability under the mountain fire disasters

降水量充足的地区或者火点与输电线路之间存在河流、公路等地形障碍时,线路不会受山火影响而跳闸,输电线路故障概率为 0。山火强度随着时间衰减,故离火点越近的线路故障概率越高。其中,线路 18 故障概率最高,为 84.30%,其次为线路 10、11 和 19,分别为 83.40%、74.30%和 72.20%。为了更好地减小山火灾害对线路的影响,可对输电网受灾时故障率较高的线路进行加固。

### 5.3 弹性评估分析场景

通过 5.2 节计算的线路故障率生成故障场景,

由不同故障场景下故障线路  $z_{i,t}$  结合式(7)可计算得到各场景对应的系统熵值,则各故障场景的概率分布即为对应系统熵值分布。系统信息熵的概率分布如图 5 所示,熵值大小与系统特性有关,熵值出现的概率越高,则对应场景在山火灾害中出现的可能性越大。由图 5 可知,熵值在 11~15 之间概率较高,对应的场景即为典型故障场景。

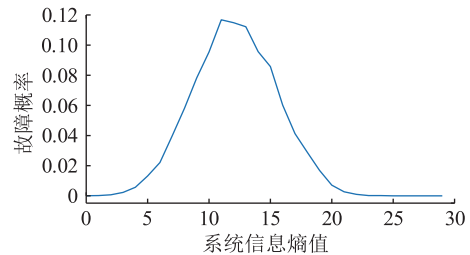


图 5 熵值概率分布

Fig.5 Probability distribution of entropy

综上,文中算例在式(8)中的  $W_{\min}$  和  $W_{\max}$  分别取 11 和 15,以筛选得到典型的极端山火灾害故障场景集。选取故障线路数为 8 的 20 个典型故障场景作为文中算例的分析场景,如图 6 所示。

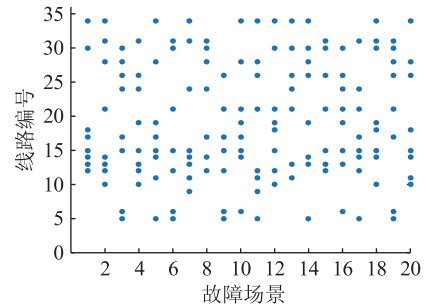


图 6 IEEE RTS-79 系统故障场景

Fig.6 Fault scenarios for the IEEE RTS-79 system

### 5.4 输电网弹性评估分析

为了验证所提模型的有效性,探究弹性提升措施的影响,文中结合不同的弹性提升策略,设计如下 4 种情况,并按 2.2 节输电系统弹性评估流程进行测试。

情况 1:系统按 5.1 节输电系统参数设定进行配置,维修队伍数量为 1,修复故障线路所需时间设置为 2 h。

情况 2:在情况 1 中对山火灾害下故障线路较高的 4 条线路即线路 10、11、18 和 19 进行加固,并认为加固后的线路将不受山火影响。

情况 3:在情况 1 的基础上,将原来 1 支检修队伍扩展到 2 支检修队伍。

情况 4:在情况 1 的基础上将各线路修复时间减半。

假设山火灾害在 01:00 时刻发生,维修人员准备时间为 0.5 h,以 1 h 为时间步长,在 MATLAB 平台调用 CPLEX 求解器进行计算。图 7 为输电系统正常运行的负荷曲线以及遭受山火灾害后 4 种情况下的负荷曲线。

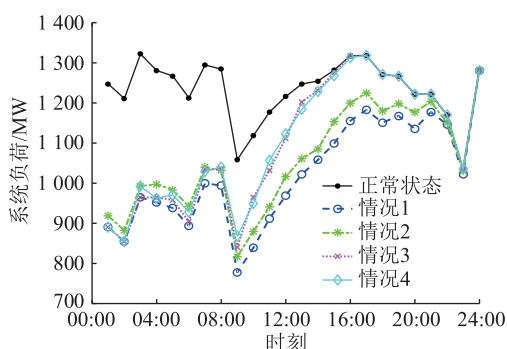


图 7 各情况下系统负荷曲线

Fig.7 System load curves under different scenarios

由图 7 情况 1 的负荷曲线可知,在 01:00 时刻山火灾害开始影响输电系统,输电系统发生大规模线路故障跳闸。系统弃负荷量达到最大,为 356.87 MW,占系统总负荷的 28.61%。在 05:00 时刻维修人员逐渐将故障线路修复,系统负荷逐渐恢复,并在 23:00 时刻完全恢复到正常状态。

由情况 2 的负荷曲线可知,加固故障率较高的 4 条线路(线路 10、11、18 和 19)后,以上线路在所筛选的故障场景中不再由于山火灾害而发生跳闸,系统抵御外界干扰的能力增强。具体体现在系统最大弃负荷量为 328.81 MW,占系统总负荷的 26.36%,与情况 1 相比,系统负荷恢复量增加了 28.06 MW。此外,情况 2 加固了较高故障率的线路,故障线路数量与情况 1 相比有所减少,检修人员须维修的线路减少,因此系统所需的恢复时间也小于情况 1,22:00 时刻系统已恢复到正常状态。

系统在情况 3 和情况 4 下的最大弃负荷量与情况 1 一致,其原因在于故障线路数量并未减少。但情况 3 中维修队伍从 1 增加到 3,因此总体维修时间小于情况 1,系统在 16:00 已经恢复到正常状态。而情况 4 中系统负荷在 03:00 开始逐渐恢复并在 16:00 时恢复到正常状态,原因是情况 4 中故障修复时间减半,从而提高了维修效率,系统可以更快地恢复到正常状态。

综上所述,结合 2.2 节弹性评估流程,利用式(9)计算出当前山火灾害下输电系统在各情况下的弹性指标,情况 1—情况 4 的弹性指标分别为 0.831 1、0.858 3、0.891 5 和 0.894 1。由各情况弹性指标可知,情况 2、3、4 的弹性指标分别比情况 1 提

高了 3.27%、7.27%、7.58%。因此,加固线路、增加维修队伍以及提高修复效率等措施均可有效提升系统弹性。此外,文中所提弹性评估方法可对不同措施的性能进行准确的定量评估,可为制定最优弹性提升决策提供参考。

### 5.5 弹性提升措施分析

为了进一步探究弹性提升措施的性能,从线路加固数、维修队伍数和系统修复效率 3 个因素出发,在情况 1 的基础上采用单一变量控制法进行实验,定量分析各措施对系统弹性的影响。

#### 5.5.1 线路加固数

通过在输电线路周围设置隔离带、清理茅草以及加强其应对山火的强度等加固方式,可以有效保护输电线路免受山火影响,但加固所有线路的经济成本太高,所以须优先加固故障率较高的线路。文中根据线路故障概率从高到低的优先级顺序对线路进行加固,系统弹性指标与线路加固数量的关系曲线如图 8 所示。

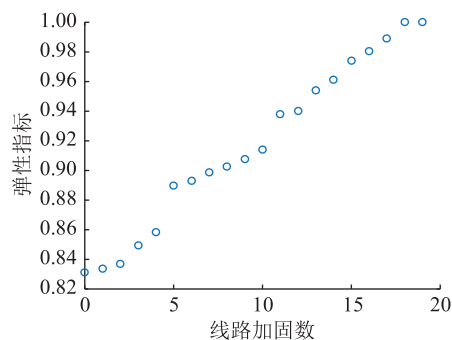


图 8 不同线路加固数下的弹性指标

Fig.8 Resilience index with different hardening line numbers

由图 8 可知,线路未被加固时系统弹性指标为 0.831 1,系统弹性指标随线路加固数增多而逐渐增大。当线路加固数为 5 时,弹性指标增长幅度最大。当线路加固数达到 18 时,弹性指标达到最大值 1,即输电系统已最大限度抵御该山火灾害的影响。

#### 5.5.2 维修队伍数量

极端山火灾害往往导致输电系统发生大规模线路跳闸。当系统维修队伍数量不足时,将按照输电线路的重要程度依次进行检修;而当维修队伍数量充足时,各输电线路的维修可以同时进行,从而大大缩短系统恢复时间。因此,有必要研究维修队伍数量对系统弹性指标的影响,两者关系如图 9 所示。

由图 9 可知,随着维修队伍数量的增加,系统弹性指标呈对数形式增长。当维修队伍数量增加为 2

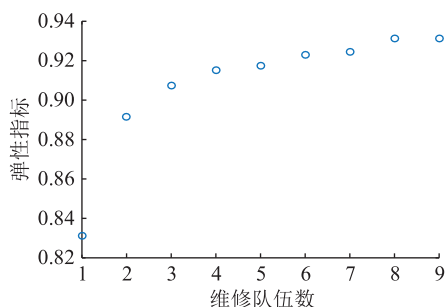


图9 不同维修队伍数下的弹性指标

Fig.9 Resilience index under different number of repair teams

时,弹性指标增长幅度最大,而后维修队伍数量增加对弹性指标的影响逐渐变小。当维修队伍数量增加到8时,系统的弹性指标增长达到饱和状态,其值为0.9314。故障线路的修复时间随着维修队伍数量增加而减小,但不可能忽略不计,因此系统的弹性指标无法达到1。

### 5.5.3 修复效率

维修队伍可通过提高故障类型、位置的识别速度、加强专业培训以及提升检修装备等方式提高其修复效率。当系统配备更高修复效率的队伍时,系统所需恢复时间更短,则系统弹性水平更高。为了更好地反映系统弹性指标与修复效率之间的关系,引入 $\zeta$ 表示系统修复效率,其与故障线路修复时间的关系为:

$$T_{Nc} = (1 - \zeta) T_c \quad (26)$$

式中:  $T_{Nc}$  为修复效率提高后的故障线路修复时间;  $T_c$  为常规配置下故障线路修复时间,设置为2 h。

图10为检修效率与弹性指标之间的关系,由图可知,检修效率与弹性指标呈正相关关系。检修效率提高会缩短故障线路修复时间,甚至还会影响故障线路的修复顺序。当 $\zeta = 1$ 时,即理想状态下,故障线路修复时间为0,此时弹性指标为0.9579,由于维修队伍到达故障线路需要时间,因此弹性指标无法达到1。

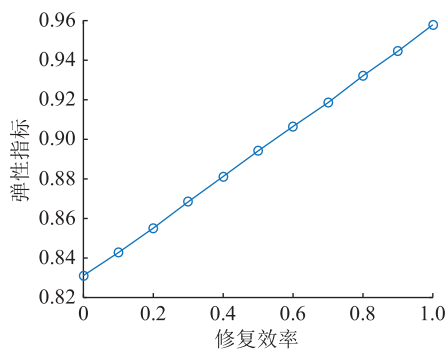


图10 不同修复效率下的弹性指标

Fig.10 Resilience index under different repair efficiency

## 6 结语

针对日益频发的山火灾害,文中提出一种考虑灾害全过程的输电系统弹性评估方法,通过设定多种运行情况进行仿真测试,分析了各弹性提升措施在应对山火灾害时的效果,并进一步探究了各弹性提升措施与系统弹性指标之间的关系。文中所提的弹性评估方法可定量分析各弹性提升措施的提升效果,为制定最优弹性提升决策提供参考。此外,所提弹性评估方法基于山火演变过程建立线路故障概率模型,可应用于电力系统的预警系统,在合理评估电网应对山火灾害的能力以及减少故障损失方面具有重要意义。

### 致谢

本文得到国网福建省电力有限公司科技项目“基于空天地协同的电力线路山火监测和故障预警技术研究”(521304220007)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 周恩泽,胡思雨,张录军,等. 电网山火灾害特征及风险预警技术[J]. 电力工程技术,2020,39(3):58-64.  
ZHOU Enze, HU Siyu, ZHANG Lujun, et al. Characteristics and risk warning technology of wildfire disaster in power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 58-64.
- [2] 吉日伍呷,田宏岭,刘雅琴. 喜德县“6.4”山火泥石流灾害特征与防治建议[J]. 科学技术与工程,2022,22(17):6880-6887.  
JIRI Wuga, TIAN Hongling, LIU Yaqin. Characteristics of the “6.4” forest fire-induced debris flow in Xide County and disaster preventing advices[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(17): 6880-6887.
- [3] 徐华杰. 山火灾害对输电线路稳定运行的影响[J]. 通信电源技术,2020,37(2):214-215.  
XU Huajie. The influence of mountain fire disaster on the stable operation of transmission line[J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(2): 214-215.
- [4] 杨淳岚,宁鑫,徐会凯,等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述[J/OL]. 电网技术: 1-13[2023-04-06]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2267>.  
YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand [J/OL]. Power System Technology: 1-13[2023-04-06]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2267>.
- [5] 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):2735-2745.  
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): 2735-2745.
- [6] 刘辉,杨韬,林济铿,等. 山火条件下输电线路跳闸概率计算

- [J]. 中国电力,2022,55(3):125-133.  
LIU Hui,YANG Tao,LIN Jikeng,et al. Calculation of transmission line trip probabilities under forest fire condition[J]. Electric Power,2022,55(3):125-133.
- [7] 王钰山,邓晖,王旭,等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(9):42-51.  
WANG Yushan,DENG Hui,WANG Xu,et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon [J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(9):42-51.
- [8] 杨欢红,洪雨,史博文,等. 储能站动力电池逆变单元过电压保护方案优化研究[J]. 电瓷避雷器,2021(6):76-80.  
YANG Huanhong,HONG Yu,SHI Bowen,et al. Optimization of overvoltage protection scheme of power battery inverter unit in energy storage station[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(6):76-80.
- [9] 李家钰,秦文萍,景祥,等. 台风灾害下考虑连锁故障的电力系统弹性评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(1):14-22.  
LI Jiayu,QIN Wenping,JING Xiang,et al. Power system resilience assessment considering cascading failure under typhoon disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2023,35(1):14-22.
- [10] 王法顺. 考虑多利益主体的主动配电网规划与弹性评估[D]. 上海:上海电力大学,2020.  
WANG Fashun. Considering the active distribution network planning of multi-stakeholder and resilience evaluation [D]. Shanghai:Shanghai University of Electric Power,2020.
- [11] 彭寒梅,刘子威,谭貌,等. 面向弹性提升的主动配电网重构与元件修复协同方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(17):35-44.  
PENG Hanmei,LIU Ziwei,TAN Mao,et al. Collaborative method for an active distribution network reconfiguration and component repair for resilience improvement [J]. Power System Protection and Control,2022,50(17):35-44.
- [12] 吴疆,吕林,黄媛,等. 灾害全过程配电网弹性评估方法及提升策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(3):32-42.  
WU Jiang,LYU Lin,HUANG Yuan,et al. Evaluation method and promotion strategy for distribution network resilience during the entire process of disaster [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(3):32-42.
- [13] 李振坤,王法顺,郭维一,等. 极端天气下智能配电网的弹性评估[J]. 电力系统自动化,2020,44(9):60-68.  
LI Zhenkun,WANG Fashun,GUO Weiyi,et al. Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather [J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(9):60-68.
- [14] MUHS J W,PARVANIA M,NGUYEN H T,et al. Characterizing probability of wildfire ignition caused by power distribution lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2021,36(6):3681-3688.
- [15] TRAKAS D N,HATZIARGYRIOU N D. Optimal distribution system operation for enhancing resilience against wildfires [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(2):2260-2271.
- [16] 王则凯,丁涛,李立,等. 美国加州地区提高山火灾害下电网弹性的公共安全停电政策和措施[J]. 电力自动化设备,2022,42(3):36-44.  
WANG Zekai,DING Tao,LI Li,et al. Policies and measures of public safety power shutoff for enhancing grid resilience under catastrophic wildfire in California state of America [J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(3):36-44.
- [17] 王开正,付一桐,钱国超,等. 基于时空上下文的输电线路山火自动识别算法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(18):83-91.  
WANG Kaizheng,FU Yitong,QIAN Guochao,et al. An automatic identification algorithm for wildfire occurrences near transmission line corridors based on spatio-temporal context [J]. Power System Protection and Control,2022,50(18):83-91.
- [18] 周志宇. 山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.  
ZHOU Zhiyu. Research on risk assessment of power grid transmission-line trips due to wildfire disasters [D]. Beijing:North China Electric Power University,2019.
- [19] 周恩泽,黄勇,龚博,等. 基于朴素贝叶斯网络的输电走廊山火风险评估模型[J]. 南方电网技术,2021,15(8):120-129.  
ZHOU Enze,HUANG Yong,GONG Bo,et al. Wildfire risk assessment model of power transmission line corridors based on naive Bayes network [J]. Southern Power System Technology,2021,15(8):120-129.
- [20] 周恩泽,樊灵孟,黄勇,等. 基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J]. 电网技术,2022,46(7):2778-2785.  
ZHOU Enze,FAN Lingmeng,HUANG Yong,et al. Risk distribution assessment of wildfire-induced trips in transmission line based on flame combustion model [J]. Power System Technology,2022,46(7):2778-2785.
- [21] 王守相,黄仁山,潘志新,等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术,2020,46(1):123-132.  
WANG Shouxiang,HUANG Renshan,PAN Zhixin,et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather [J]. High Voltage Engineering,2020,46(1):123-132.
- [22] 王振浩,罗剑潇,成龙,等. 面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(22):34-48.  
WANG Zhenhao,LUO Jianxiao,CHENG Long,et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon [J]. Power System Protection and Control,2023,51(22):34-48.



- [23] 张广伦,钟海旺. 信息熵在电力系统中的应用综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2023,43(16):6155-6181.  
ZHANG Guanglun,ZHONG Haiwang. Review and prospect of information entropy and its applications in power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(16):6155-6181.
- [24] 唐文虎,杨毅豪,李雅晶,等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7):2244-2254,2403.  
TANG Wenhui,YANG Yihao,LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(7):2244-2254,2403.
- [25] 郭伟,安佳坤,贺春光,等. 计及冰灾影响的电力系统韧性评估与提升方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(8):116-122.  
GUO Wei,AN Jiakun,HE Chunguang, et al. Resilience assessment and improvement method for power system considering the influences of ice disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(8):116-122.
- [26] 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.
- [27] 刘泽洪,周原冰,金晨. 支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J]. 全球能源互联网,2023,6(2):101-112.  
LIU Zehong,ZHOU Yuanbing,JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2023,6(2):101-112.
- [28] 黄丽平. 面向电网韧性提升的电力调度优化模型及其评估方法研究[D]. 广州:广东工业大学,2022.  
HUANG Liping. Power dispatch optimization model for grid resilience enhancement and its evaluation method[D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology,2022.
- [29] 赵宁远. 冰灾下输电系统韧性评估与全时段韧性增强策略[D]. 天津:天津大学,2020.  
ZHAO Ningyuan. Resilience assessment and full-time resilience enhancement strategies for transmission system under ice disaster[D]. Tianjin:Tianjin University,2020.
- [30] 张亚超,朱蜀,谢仕炜. 基于动态模糊集的多阶段数据驱动鲁棒机组组合模型[J]. 电网技术,2022,46(6):2190-2200.  
ZHANG Yachao,ZHU Shu,XIE Shiwei. Multi-stage data-driven robust unit commitment based on dynamic ambiguity set[J]. Power System Technology,2022,46(6):2190-2200.

#### 作者简介:



方超颖

方超颖(1990),男,硕士,高级工程师,从事输电线路防灾减灾技术相关工作(E-mail:fc5658779@163.com);

许军(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析与故障诊断相关工作;

丁志龙(1999),男,硕士在读,研究方向为弹性电力系统。

## Resilience assessment method and enhancement measures of power transmission system under mountain fire disasters

FANG Chaoying<sup>1</sup>, XU Jun<sup>1</sup>, DING Zhilong<sup>2</sup>, CHENG Yunchu<sup>1</sup>, ZHENG Zhongnan<sup>1</sup>, ZHANG Yachao<sup>2</sup>

(1. State Grid Fujian Electric Power Co.,Ltd. Research Institute,Fuzhou 350007,China;

2. College of Electrical Engineering and Automation,Fuzhou University,Fuzhou 350108,China)

**Abstract:** Resilience describes the system capability of defense and recovery to extreme disasters. The transmission system, as an important part of the power system, may occur large-area power blackouts under extreme mountain fire disasters which are low-probability but highly-risk events. A resilience assessment framework considering the whole process of disaster under extreme mountain fire disasters is developed. Firstly, the influence of extreme mountain fire disaster on transmission line failure rate is quantitatively analyzed, and the mathematical relationship between the location of fire point and the line failure rate is established. Then, failure scenarios are obtained by using the system information entropy to describe the possible failure scale that caused by mountain fire disasters. Secondly, considering the geographical location of failure components, repair crews dispatch and repair time, the power transmission system restoration model, aiming at minimizing load reduction under mountain fire disasters, is established. The resilience assessment method of power transmission system considering the whole process of disasters is proposed. Finally, taking IEEE RTS-79 bus system as an example, the effectiveness of the proposed model and the resilience assessment method is verified. The numerical results show that the proposed method can effectively and comprehensively measure the influence of various factors on the elastic performance of transmission system. In addition, the effects of three typical technical measurements on improving elasticity are quantitatively analyzed, which provides a quantifiable reference for the power sector to formulate prevention and recovery strategies for extreme wildfires.

**Keywords:** extreme mountain fire disaster; power transmission system resilience; resilience assessment; resilience index; system information entropy; fault recovery