

DOI: 10.7667/PSPC150844

输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究

刘明军¹, 邵周策², 上官帖¹, 童军心¹, 周龙武¹, 罗毅², 龚泽², 王晓冀²

(1. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 输电线路山火故障与输电线路运行时的气象条件、人为因素等密切相关, 近年来输电线路山火故障逐年增加。建立了输电线路山火故障跳闸风险评估模型, 该模型包括输电线路走廊山火发生概率模型和山火条件下输电线路故障模型两部分。应用该模型, 可以根据宏观气象条件预测山火引起的输电线路故障概率。可以在山火发生后, 根据山火的蔓延模型预测输电线路山火故障风险随时间的变化情况。可以根据输电走廊及其附近的植被情况, 计算火源点与输电线路山火故障风险之间的关系, 并制定输电线路山火故障等级分布图。研究成果可用于制定输电线路山火故障预案和防灾减灾措施。

关键词: 风险评估; 风险指标; 山火; 输电线路山火故障; 火源点

Study on models and methods of risk assessment of transmission line fault caused by fire

LIU Mingjun¹, SHAO Zhouce², SHANGGUAN Tie¹, TONG Junxin¹, ZHOU Longwu¹, LUO Yi², GONG Ze², WANG Xiaojie²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Transmission line fault that caused by fire is closely related to weather conditions, human behavior factors and so on. In recent years, transmission line fault is increasing year by year. This paper builds a risk assessment model of transmission line fault caused by fire. This model includes two sub models: the fire occurrence probability model of the area that transmission line pass through and the probability model of transmission line fault under the fire condition. Using this model can predict the probability of transmission line fire fault according to the macro-meteorological conditions. When the fire is spreading to the line, according to the spreading model of fire, this model can estimate the time-variant risk condition of the transmission line fault. Based on the geographic conditions and vegetation near the transmission line, this risk assessment model can calculate the relationship between the fire spots and the risk of transmission line fault, so as to make a fault level distribution maps of the transmission line fault. Results in this paper can be used to formulate contingency plans for transmission line fire fault and disaster prevention measures.

Key words: assessment; risk indicator; fire; transmission line fire fault; fire spots

0 引言

随着我国电网的迅速发展, 输电线路经常要穿过山岭地带, 极易受到各类自然灾害和气象条件的威胁^[1-3]。统计显示, 山火、烧荒引起的线路故障跳闸停电、停运事件有逐年增多的趋势。以江西省为例, 2010年到2014年输电线路附件共发生山火333次^[4], 2014年仅一月份山火故障就多达10起。这些事故在给人民生活生产造成损失和困扰的同时, 也对电网的正常稳定运行带来了新的挑战。对各种气象灾害对输电线路故障影响和措施的研究已被逐渐重视^[5-9], 但目前鲜有针对山火引起的输电线路

故障的风险评估研究。因此, 针对不同运行条件的输电线路, 评估输电线路的山火故障风险水平, 对输电线路的安全稳定运行和降低停电停运损失有着重要意义。

国内外研究大多集中在对现有电网山火故障的历史数据进行统计、分析并提出对策。或者对山火引起输电线路跳闸的机理和特点的研究^[10-12], 结果表明输电线路的山火故障跳闸主要是由于火焰引起的温度、导电率改变以及灰烬烟雾的共同作用, 致使间隙绝缘水平急剧降低, 从而发生击穿跳闸。还有一部分学者对山火的监测预警技术在电网中的应用进行研究^[13-14], 现有的监测手段主要有大范围

的卫星遥感监测技术和小范围的传感器监测技术。但均没有涉及到对山火导致的输电线路故障概率预测、评估故障风险水平的研究。

本文引入模糊判别方法, 结合气象条件计算山火发生概率, 继而建立山火条件下输电线路的故障概率模型, 得到山火造成的输电线路故障概率。同时结合山火蔓延模型得到线路周围区域不同火源点起火对线路故障的影响, 综合形成输电线路的山火故障风险评估模型。根据该方法可以对未来可能的山火引起的输电线路故障跳闸进行提前预警和合理的应对措施。

1 输电线路山火故障风险评估模型

评估输电线路山火故障风险需考虑未来气象条件、输电线路山地地形以及杆塔线路自身情况等因素。同时, 初始火源点不同, 其火场蔓延范围将覆盖不同的输电线路区段, 对输电线路的影响程度也不相同。本文遵循概率性评估准则, 来评估输电线路的山火情况下的故障风险。

1.1 输电线路山火条件下的故障概率

根据大量山火情况下输电线路发生故障跳闸事件的统计分析, 山火发生时线路故障的主要是由空气间隙击穿造成。山火发生时输电线路故障跳闸事件可以视为一个条件概率事件, 即

$$P_l = P(A) \times P(B|A) \quad (1)$$

式中: P_l 表示山火造成的输电线路故障的概率; $P(A)$ 表示发生山火的概率; $P(B|A)$ 表示输电线路在山火条件下出现故障的概率。

在山火条件下, 击穿概率接近正态分布^[13], 其概率密度函数可表示为

$$p(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中: U 为实际电压; 均值 μ 等于 U_{50}^G (50%的击穿电压), σ 等于 zU_{50}^G , z 表示变异系数。

由于电场间隙和击穿电压的不同, z 可以是 2%~8%不等, 通常取 2%^[16]。山火条件下电场间隙分布更不均匀, 故取变异系数 z 为 4%。则击穿概率如式(3)所示。

$$P(U) = \frac{1}{0.04\sqrt{2\pi}U_{50}^G} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(x-U_{50}^G)^2}{0.0032U_{50}^G{}^2}} dx \quad (3)$$

也即

$$P(B|A) = P(U) \quad (4)$$

由式(3)可知, 击穿电压 U_{50}^G 是影响 $P(U)$ 的主要因素。通常情况下, 输电线路的线间距离和线地间

距离较大, 其工频击穿电压 U_{50}^{G0} 较高, 线路运行情况正常时不会发生击穿。但是山火发生时, 空气温度剧烈升高, 大气湿度、密度也必然随之变化, 由此引入大气校正系数 $K_r = K_d \times K_h$, 其中 K_d 为空气密度校正系数, K_h 为空气湿度校正系数^[17]。系数 K_d 和空气相对密度 δ 相关:

$$K_d = \delta^m \quad (5)$$

空气湿度校正系数 K_h 为

$$K_h = K^W \quad (6)$$

式(5)~式(6)中, 指数 m 、 W 及系数 K 的具体取值可参考相关国家标准^[17]。在输电线路下方着火的情况下, 火线强度可以表示为^[18]

$$I = 0.0167\gamma S_{FC}R \quad (7)$$

式中: I 为火线强度; γ 为可燃物发热量; S_{FC} 为可燃物消耗量。获得火线强度之后, 可以根据芬·韦格尔经验公式计算温升 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = 3.9(I)^{\frac{2}{3}} / H \quad (8)$$

式中, H 为距离地面的高度。这样式(5)中的空气相对密度 δ 可以由式(9)、式(10)计算。

$$\delta = \frac{(273 + \theta^0)p}{(273 + \theta)p^0} \quad (9)$$

$$p = p^0 e^{-\frac{mg_h}{kT}} \quad (10)$$

式中: p^0 和 p 分别为标准大气压和山火时的气压, kPa; θ^0 和 θ 分别为标准大气压条件下与山火时的气体温度, °C。

除了大气条件的改变之外, 山火燃烧植被将产生大量浓烟, 包含大量飞灰, 炭黑以及灰烬和木屑等长条状、大尺寸颗粒。在火焰条件下和正常空气中, 颗粒触发放电的特性具有明显区别, 在山火中灰烬触发间隙放电具有倍增效应, 这使得气隙的绝缘强度发生剧烈下降, 击穿电压最多可以下降到原来的 10%^[19]。考虑到山地植被情况复杂, 而不同植被, 不同风速、风向都将影响浓烟对击穿电压的影响程度。因此这里引入浓烟校正系数 K_r , 并令其等于 1/10, 即

$$K_r = \frac{1}{10} \quad (11)$$

综上所述, 修正后间隙的工频击穿电压为

$$U_{50}^G = K_d K_h K_r U_{50}^{G0} \quad (12)$$

1.2 基于模糊判别法的山火概率计算

山火发生的概率 $P(A)$ 是评估输电线路山火故障风险的要素之一, 其概率和线路途经区域的天气因素有关。森林火险以及影响火灾发生的各个因素

如每日降水量、空气温度、空气相对湿度、风速风向等的预报皆有不准确性,故使用模糊综合评判的方法对山火概率进行预报^[19-20]。

模糊综合判别法是对某事物受多个因素影响时,做出合理综合考虑的综合判别,可以用权重代表每个因素对事物判别重要程度的差别。

选择若干对火灾发生有影响的因子,根据历史的山火故障信息,考虑到火灾多为农民、百姓在农耕烧荒、节日祭祖时引发,选定因子集为

$$X = (R, T, H, W, K)$$

式中: R 为日降水量; T 为日最高气温; H 为日最小相对湿度; W 为日平均风速; K 为人为因子,作为衡量人类行为对山火的干扰。各个因子的权重可以由专家打分法决定。

$$A = (a_R, a_T, a_H, a_W, a_K) = (0.05, 0.2, 0.2, 0.15, 0.4)$$

式中, a_R 、 a_T 、 a_H 、 a_W 、 a_K 为各因子权重。

按照《全国森林火险天气等级》和《森林火险气象等级》规范,可以将火险评判等级划分为5级,并进行区域林火概率量化^[20],具体值参见表1。

表1 火险等级划分

Table 1 Fire risk classification

火险等级	危险程度	易燃程度	区域林火概率
1级	没有危险	不能燃烧	小于1.41%
2级	低度危险	难以燃烧	1.41%~2.82%
3级	中度危险	可以燃烧	2.82%~5.65%
4级	高度危险	容易燃烧	5.65%~11.31%
5级	极度危险	极易燃烧	大于11.31%

决策判别集表示为

$$U = (1级, 2级, 3级, 4级, 5级)$$

根据火险评判等级与因子量值是正相关还是负相关,继而选择戒下型或戒上型隶属函数原型式来表征各因子与决策判别量之间的隶属关系,如式(13)和式(14)所示。

$$f = \begin{cases} \frac{1}{1+(a(c-x))^b} & x < c \\ 1 & x \geq c \end{cases} \quad (13)$$

$$f = \begin{cases} \frac{1}{1+(a(x-c))^b} & x > c \\ 1 & x \leq c \end{cases} \quad (14)$$

式中: x 为 X 中 R, T, H, W, K 各因子的测量值或预测值,分别用 r, t, h, w, k 表示; f 为对应的隶属函数原型式; a, b, c 为求解待定系数,可以对收集各因子测量数据做如下处理。

(1) 将得到的各因子测量统计数据按照自然断

点法形成若干因子区间,统计一段时间内每个因子区间中存在的因子个数。

(2) 统计各区间内出现山火的次数并除以相应的因子数,计算出该区间内的山火发生概率。

(3) 对火险概率归一化处理。画出每个影响因子进行归一化后的分布图并以此求解待定系数 a, b, c 。可以得到每日降水量 R (0.1 mm)、最高气温 T 、相对湿度 H 、日平均风速 W (0.1 m/s)、人为因子 K (月)的隶属函数原型式分别如式(15)~式(19)所示。

$$f(r) = \begin{cases} 1 & r = 0 \\ 0.8 & 0 < r \leq 80 \\ 0 & r > 80 \end{cases} \quad (15)$$

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{1+(0.25 \times (38-t))^{1.5705}} & t \leq 38 \\ 1 & t > 38 \end{cases} \quad (16)$$

$$f(h) = \begin{cases} \frac{1}{1+(0.11 \times (h-28))^{1.6433}} & h \geq 28 \\ 1 & h < 28 \end{cases} \quad (17)$$

$$f(w) = \begin{cases} \frac{1}{1+(0.09 \times (56-w))^{0.85}} & w \leq 56 \\ 1 & w > 56 \end{cases} \quad (18)$$

$$f(k) = \begin{cases} 0.8 & k = 1, 2, 3, 4 \\ 0 & k = 5, 6, 7, 8 \\ 0.2 & k = 9, 10, 11, 12 \end{cases} \quad (19)$$

将各因子对火险决策判别集的隶属度记作:

$$M = [M_1 \ M_2 \ M_3 \ M_4 \ M_5] \quad (20)$$

式中, $M_i = (R_i, T_i, H_i, W_i, K_i)^T$,表示各因子对第 i 级火险的隶属度。

综上所述,隶属函数 R_i, T_i, H_i, W_i, K_i 就能按照各自对应的原型式 f 在每个火险等级相应的区域林火概率的最大值和最小值计算关键截域来计算,基于文献[18]建立了各因子隶属函数表,具体详见表2。考虑到各因子的影响程度不同,由专家打分法确定权重后可得

$$B = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5] = A \times M \quad (21)$$

式中: $b_j = a_R \times R_j + a_T \times T_j + a_H \times H_j + a_W \times W_j + a_K \times K_j$, $j=1, 2, 3, 4, 5$ 。按照最大隶属度原则选定为哪一级火险,继而可以根据表1得到该区域内发生山火概率。

为了评估需要,取对应火险等级下区域林火概率的最大值作为山火发生概率 $P(A)$ 。在实际应用中,可以用该模型在应用地区运行一段时间,再根

据每一级火险着火的天数除以每一级火险的天数, 得到该等级火险发生山火的概率。

表 2 各因子隶属函数

Table 2 Membership function of each factor

$R_1 = \begin{cases} 1, & r \geq 8 \\ 0.8, & 0 < r < 8 \\ 0.2, & r = 0 \end{cases}$	$R_2 = \begin{cases} 0.8, & r \geq 8 \\ 0.64, & 0 < r < 8 \\ 0.6, & r = 0 \end{cases}$	$R_3 = \begin{cases} 0.6, & r \geq 8 \\ 0.48, & 0 < r < 8 \\ 0.6, & r = 0 \end{cases}$	$R_4 = \begin{cases} 0.4, & r \geq 8 \\ 0.32, & 0 < r < 8 \\ 0.8, & r = 0 \end{cases}$
$R_5 = \begin{cases} 0.2, & r \geq 8 \\ 0.16, & 0 < r < 8 \\ 1, & r = 0 \end{cases}$	$T_1 = \begin{cases} 1, & t < 19 \\ 1.08 - F(t), & 19 \leq t < 38 \\ 0, & t \geq 38 \end{cases}$	$T_2 = \begin{cases} 0.92 + F(t), & t < 19 \\ 1, & 19 \leq t < 26 \\ 1.16 - F(t), & 26 \leq t < 38 \\ 0, & t > 38 \end{cases}$	$T_3 = \begin{cases} 0.86 + F(t), & t < 26 \\ 1, & 26 \leq t < 31 \\ 1.31 - F(t), & 31 \leq t < 38 \\ 0, & t \geq 38 \end{cases}$
$T_4 = \begin{cases} 0.69 + F(t), & t < 31 \\ 1, & 31 \leq t < 35 \\ 1.62 - F(t), & 35 \leq t < 38 \\ 0, & t \geq 38 \end{cases}$	$T_5 = \begin{cases} 0.38 + F(t), & t < 35 \\ 1, & t \geq 35 \end{cases}$	$H_1 = \begin{cases} 1, & h > 85 \\ 1.05 - F(h), & 28 < h \leq 85 \\ 0, & h \leq 28 \end{cases}$	$H_2 = \begin{cases} 0.95 + F(h), & h > 85 \\ 1, & 64 < h \leq 85 \\ 1.09 - F(h), & 28 < h \leq 64 \\ 0, & h \leq 28 \end{cases}$
$H_3 = \begin{cases} 0.91 + F(h), & h > 64 \\ 1, & 62 < h \leq 64 \\ 1.1 - F(h), & 28 < h \leq 62 \\ 0, & h \leq 28 \end{cases}$	$H_4 = \begin{cases} 0.9 + F(h), & h > 62 \\ 1, & 41 < h \leq 62 \\ 1.35 - F(h), & 28 < h \leq 41 \\ 0, & h \leq 28 \end{cases}$	$H_5 = \begin{cases} 0.65 + F(h), & h > 41 \\ 1, & h \leq 41 \end{cases}$	$W_1 = \begin{cases} 1, & w < 10 \\ 1.20 - F(w), & 10 \leq w < 56 \\ 0, & w > 56 \end{cases}$
$W_2 = \begin{cases} 0.77 + F(w), & w < 10 \\ 1, & 10 \leq w < 18 \\ 1.26 - F(w), & 18 \leq w < 56 \\ 0.1, & w > 56 \end{cases}$	$W_3 = \begin{cases} 0.74 + F(w), & w < 18 \\ 1, & 18 \leq w < 23 \\ 1.28 - F(w), & 23 \leq w < 56 \\ 0, & w \geq 56 \end{cases}$	$W_4 = \begin{cases} 0.72 + F(w), & w < 23 \\ 1, & 23 \leq w < 49 \\ 1.60 - F(w), & 49 \leq w < 56 \\ 0, & w \geq 56 \end{cases}$	$W_5 = \begin{cases} 0.40 + F(w), & w < 49 \\ 1, & w \geq 49 \end{cases}$
$K_1 = \begin{cases} 0.2, & k = 1, 2, 3, 4 \\ 1, & k = 5, 6, 7, 8 \\ 0.4, & k = 9, 10, 11, 12 \end{cases}$	$K_2 = \begin{cases} 0.4, & k = 1, 2, 3, 4 \\ 0.8, & k = 5, 6, 7, 8 \\ 0.5, & k = 9, 10, 11, 12 \end{cases}$	$K_3 = \begin{cases} 0.6, & k = 1, 2, 3, 4 \\ 0.6, & k = 5, 6, 7, 8 \\ 0.6, & k = 9, 10, 11, 12 \end{cases}$	$K_4 = \begin{cases} 0.8, & k = 1, 2, 3, 4 \\ 0.4, & k = 5, 6, 7, 8 \\ 0.7, & k = 9, 10, 11, 12 \end{cases}$
$K_5 = \begin{cases} 1, & k = 1, 2, 3, 4 \\ 0.2, & k = 5, 6, 7, 8 \\ 0.8, & k = 9, 10, 11, 12 \end{cases}$			

1.3 山火蔓延模型及算法

山火的发生可以分布在线路途经区域的任意某点, 而经过一定时间山火蔓延不到输电线路附近, 此时讨论输电线路因山火发生故障显然是没有意义的。因此根据实际情况, 本文引入山火蔓延情况的计算, 用以评估山地的时空条件对输电线路山火风险的影响。

山地林火蔓延是一种多组相可燃物在各种气象条件和地形条件作用下燃烧和蔓延的极其繁杂的行为^[22]。人们依据现实中和实验中的观察, 提取一些要素, 建立相应的数学模型。现在各国都有研究或使用不同的林火模型^[23]。在中国, 王正非林火蔓延模型是使用较为普遍的。但每个数学模型都有自身的适用范围, 当模型的假设条件不成立时, 就会产生极大误差。

针对王正非模型仅对上坡和风向为上坡两种情况有效的缺点, 文献[24]计及风向和坡度的影响获得了上坡、下坡、左平坡、右平坡、风方向的 5 个蔓延计算方程。且输入量少, 容易获取。因此本文采取毛贤敏等人修正后的王正非林火模型。王正非

林火模型如式(22)所示。

$$R = R_0 K_s K_w K_\phi = R_0 K_s e^{0.1783v} \times e^{3.533(\lg\phi)^{1.2}} \quad (22)$$

式中: R_0 是初始蔓延速度; K_s 表示可燃物配置格局更正系数; K_w 表示风力更正系数; K_ϕ 表示地形坡度更正系数, ϕ 表示地形坡度角。

式(22)仅适用于上坡且风向为上坡方向, 而风与地形各种组合情况下的方程组为

$$R = R_0 K_s e^{0.1783v \cos\theta} \times e^{3.533(\lg\phi)^{1.2}} \quad (23)$$

$$R = R_0 K_s e^{0.1783v \cos(180^\circ - \theta)} \times e^{-3.533(\lg\phi)^{1.2}} \quad (24)$$

$$R = R_0 K_s e^{0.1783v \cos(\theta + 90^\circ)} \quad (25)$$

$$R = R_0 K_s e^{0.1783v \cos(\theta - 90^\circ)} \quad (26)$$

$$R = \begin{cases} R_0 K_s e^{0.1783v} \times e^{3.533[\lg(\phi \cos\theta)]^{1.2}}, & \theta = 0^\circ \sim 90^\circ \text{ 或 } 270^\circ \sim 360^\circ \\ R_0 K_s e^{0.1783v} \times e^{-3.533[\lg(\phi \cos(180^\circ - \theta))]^{1.2}}, & \theta = 90^\circ \sim 270^\circ \end{cases} \quad (27)$$

式(23)~(27)分别为上坡、下坡、左平坡、右平坡、风方向的蔓延速度表达式。式中, θ 为上坡方向按顺时针转到风向时所旋转的角度。

山火蔓延算法有多种,对于不同的数据格式和计算方法,其算法的复杂度和精确度不同。例如边界插值算法,边界外延算法,迷宫算法,元胞自动机算法等。由于简便、容易实现等原因,本文采取边界差值算法。

边界插值算法是一种基于栅格数据的算法,利用插值法形成火场边界。由于火场的植被条件、地形、风速、风向等条件不同,每一点着火后,向周围不同方向的蔓延速度不同。边界插值算法只计算从初始着火点算起的8个方向,分别为正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西、西北。每个方向上每次只计算初始火源点到该方向上的下一个栅格,其他栅格忽略不计,给定山火蔓延的时间就可以得到8个方向上最终蔓延到的8个边界点。以正北方向为例,从初始着火点向正北方向计算,每个栅格向正北方向蔓延的速度不同,视在每个栅格内蔓延速度不变,一次计算一个栅格,直到计算至给定时间为止,得到火场向正北方向蔓延的边界点,其他方向上的蔓延计算同理。根据这8个边界点,进行插值计算即可得到火灾蔓延边界,并在实际地形图上进行重合显示就可以获得整个火场的蔓延形状和覆盖区域。

2 输电线路山火故障风险量化评估方法

2.1 输电线路山火故障风险量化指标

基于上述评估模型,本文引入了输电线路山火故障风险指标 P_l 和火源点故障风险指标 P_f 来量化输电线路的山火故障风险。

(1) 输电线路山火故障风险指标 P_l , 表示山火导致的输电线路故障停运概率,用于评估在当前或未来气象条件下输电线路各个区段可能由于发生山火引起跳闸的概率。

(2) 火源点故障风险指标 P_f , 用于评估不同火源点、山地植被分布对输电线路故障停运的影响,或者评估当山火发生后火灾蔓延对输电线路故障停运的影响。

2.2 输电线路山火风险量化评估方法

2.2.1 输电线路山火故障风险指标 P_l 计算

在进行输电线路山火风险评估时,先将输电线路分为 n 段,则第 i 段输电线路的山火故障概率 P_{li} 为

$$P_{li} = P_i(U) \times P(A) \quad (28)$$

式中: $P_i(U)$ 表示线路第 i 段的山火条件下故障概率; P_{li} 越大则表示该第 i 段线路受到山火影响导致故障的风险越高。

首先根据线路附近地形高度数据以及未来评估日的气象条件(如日降水量、日最高气温、日最小相

对湿度、日平均风速等),按照1.2节所述山火概率计算模型和表2中的公式计算出输电线路途经山林区域的山火发生概率 $P(A)$ 。

然后按照1.1节所述模型,根据线路气隙长度,通过估算或查表得到气隙击穿的工频电压 U_{50}^{G0} ,根据式(5)、式(6)、式(11)计算山火条件下的温度、湿度、颗粒等参数变化影响 U_{50}^{G0} 的校正系数 K_d 、 K_h 、 K_r ,再按照式(12)校正工频击穿电压得到 U_{50}^G ,结合线路实际电压代入式(3)计算线路各区段山火条件下故障概率 $P_i(U)$ 。

最后按照公式(28)计算 P_{li} 得出沿线山火故障概率分布。

2.2.2 火源点故障风险指标 P_f 计算

根据线路周围的地形数据和1.3节所述山火蔓延模型,计算在一定时间 t 下,输电线路周围某个火源点起火蔓延后形成的火场,记录输电线路与火场重叠的部分,设输电线路有 n 段被火场覆盖则

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{li}) \quad (29)$$

P_f 越大,表示该火源点起火之后,输电线路山火故障的概率越大,该火源点对输电线路山火故障的影响程度越大。对线路附近的每个火源点都进行上述计算即可得到火源点风险度分布。

综上所述,输电线路山火风险评估的流程如图1所示。

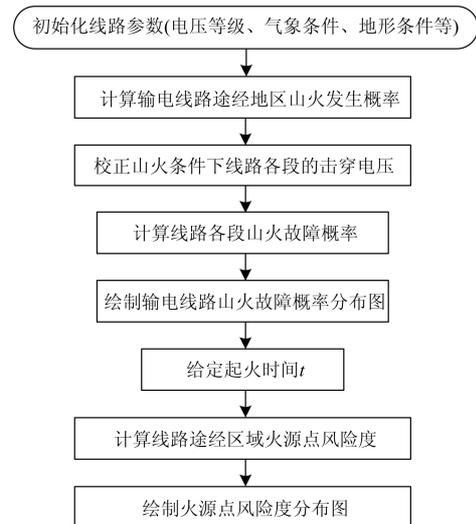


图1 输电线路山火风险评估流程

Fig. 1 Process of fire risk assessment of transmission line

3 算例测试及薄弱点分析

3.1 输电线路山火故障风险评估

本算例以江西电网某 220 kV 输电线路某一个

档距为对象建模, 线路架设在两个山头之间, 塔高为 11.5 m, 线间距离为 4.25 m, 忽略绝缘子并令线路离地高度等于塔高, 忽略输电线路的下垂弧度。假设山地植被均匀分布。日期为 4 月份, 天气晴, 气温 19 °C, 相对湿度 30%, 风向为正北, 风速为 3 m/s。每一个栅格代表边长为 5 m 的正方形。

根据算例提供的日期、天气、气温、相对湿度、风速等信息, 由 2.2.1 节所述 P_{li} 的计算方法计算得到本算例的火险等级为 5 级, 取山火发生概率为 11.31%。将两个塔间的线路均匀分段, 根据电压等级为 220 kV、线对地高度以及地面植被高度, 计算线路各段故障概率 P_{li} , 将结果以灰度图表示如图 2 所示。

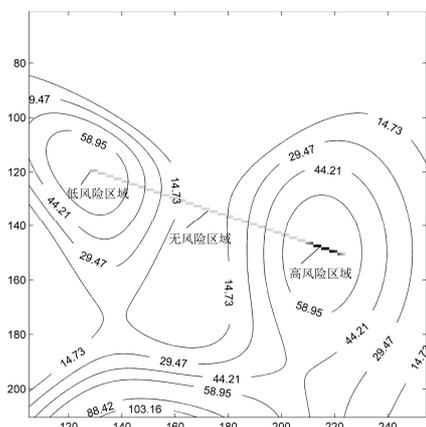


图 2 输电线路山火风险评估图

Fig. 2 Fire risk assessment of transmission line

从图 2 中可以看出, 输电线路的山火故障高风险段处于山头位置, 此时输电线路离地面距离最近, 而处于山谷上方的中间部分, 山火对高空输电线路不会产生影响。

3.2 输电线路山火故障时空风险评估

算例条件同 3.1 节。首先计算山火发生 60 min 时火源点故障风险指标 P_{fi} 。分别选择点 A(135, 215) 和 B(155, 215) 为例进行计算。

首先根据 1.3 节所述模型进行火场蔓延计算, 可以得到山火发生 60 min 时, 火场分布如图 3 所示。火源点 A 点并没有蔓延到线路附近, 不会对线路安全运行造成影响, 此时评估结果可认为是 0; 而火源点 B 点山火发生 60 min 时则会覆盖输电线路, 对线路运行造成较大影响。将线路被山火覆盖区段的 P_{li} 带入式(29)计算 B 点的火源点故障风险指标 P_{fi} , 就可以评估 B 火源点山火发生 60 min 时对线路山火故障的影响程度大小。

进一步将线路区域内每一点都进行火场蔓延

计算和火源点故障风险指标 P_{fi} 计算, 忽略不会蔓延到输电线路的火源点, 其结果如图 4 阴影部分所示。

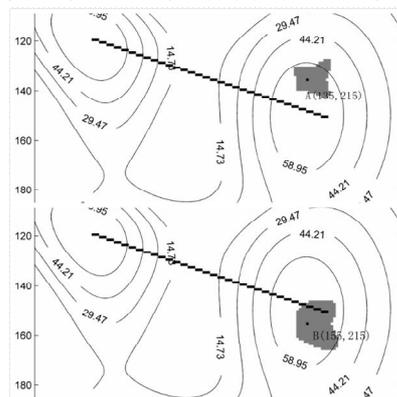


图 3 不同火源点火场蔓延比较图

Fig. 3 Fire spread comparison between different fire spots

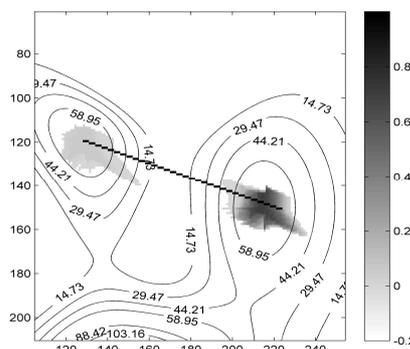


图 4 60 min 火源点风险划分图

Fig. 4 Fire spot risk map in 60 minutes

由图 4 可知在 60 min 内, 能对输电线路造成影响火源点的分布及其边界, 处于不同位置的火源点故障风险指标值不同, 并不是简单按照离输电线路越远风险越低的规律分布, 风向、地形等因素会对火场的蔓延情况造成影响, 使得不同位置的初始火源点对输电线路造成不同严重程度的影响。

然后, 计算设定山火发生为 120 min 时输电线路山火故障风险。结果如图 5 阴影部分所示。

比较图 4 和图 5, 火源点故障风险指标大小有明显的分层, 且火源点故障风险指标分布也不尽相同。等高线越密集的部分表示山地地形越陡峭, 对火焰蔓延速度的增益作用也越大, 因此距离输电线路较远距离的火源点也能对输电线路产生影响。由于风向是正北, 线路南面的火源点是顺风上坡, 可以影响到线路的高风险火源点分布更广。此外, 起火时间越长, 对线路有影响的火源点范围越大, 但根据地形、风速、风向等条件其影响范围形状又有不同。因此本方法可以满足不同时间标准下的火源

点风险评估,形成不同时间标准的风险等级划分图,用以做出针对性防护工作,对线路山火防护具有指导作用。

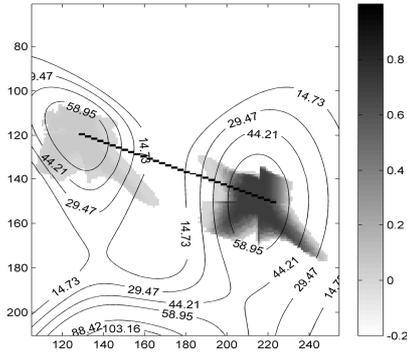


图 5 120 min 火源点风险划分图

Fig. 5 Fire spot risk map in 120 minutes

4 结语

本文引入了输电线路山火故障风险指标和火源点故障风险指标的概念,结合气象条件、地理条件以及线路自身情况,建立了输电线路的山火故障风险评估模型。模型输入量为输电线路途经区域的宏观气象条件和地理条件,计算得出山火造成输电线路故障概率及沿线分布,并对不同初始火源点对输电线路故障的影响进行了量化风险评估。

采用本文的评估方法,一方面可以从宏观气象条件对输电线路进行山火故障风险评估,预报线路出现山火故障的高危区段,并获得可视化结果。由此可以针对高风险部分采取相应措施,提高线路抗山火水平。另一方面可以计算着火后火势的蔓延覆盖情况,得到火势的重点扑救区域,以及线路是否受到影响或即将被山火覆盖的故障集中区域,用以确定线路是否合理停运规避故障风险。同时还能计算对线路故障有较高风险的火源点区域,这对加强防火宣传和线路巡视,针对性清理线路下方可燃物,制造相应防火道有重要作用。本文所述评估方法从源头和过程两方面减少山火对电网运行的影响,为安全预案制定和事故处理对策提供了参考依据。

参考文献

- [1] 林铭瀚, 胡永洪, 薛毓强, 等. 基于mesh网络的输电线路山火预警监视系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 134-138.
LIN Minghan, HU Yonghong, XUE Yuqiang, et al. Research and application of forest fire early-warning and monitor system based on wireless mesh network for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 134-138.
- [2] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [3] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [4] 彭福先, 熊心. 江西 500 kV 输电线路山火跳闸故障分析及对策[J]. 江西电力, 2014, 38(2): 58-60.
PENG Fuxian, XIONG Xin. 500 kV transmission line fires fault and countermeasure in Jiangxi province[J]. Jiangxi Electric Power, 2014, 38(2): 58-60.
- [5] 汪飒, 易畅, 温定筠, 等. 特高压直流耐压实验用防风抗晕导线的设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 247-254.
WANG Feng, YI Chang, WEN Dingjun, et al. Design of anti-wind and anti-corona 24-bundle conductors for UHV DC voltage withstand test[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 247-254.
- [6] 刘毓, 蒋兴良, 舒立春, 等. 复合绝缘子伞裙结构特征参数对其冰闪特性的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 319-326.
LIU Yu, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. Influence of characterizing shed configuration parameters of composite insulators on icing flashover performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 319-326.
- [7] 许俊, 郭耀杰, 曹珂, 等. 考虑多档导线及绝缘子串影响的覆冰及脱冰输电导线线形分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 87-91.
XU Jun, GUO Yaojie, CAO Ke, et al. Research on form-finding of icing and ice-shedding transmission line considering the influence of multi-span and insulator string[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 87-91.
- [8] 巢亚锋, 杨力, 彭晓亮, 等. 输电线路覆冰特点及防冰技术研究综述[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 131-138.
CHAO Yafeng, YANG Li, PENG Xiaoliang, et al. Review of the researches on icing characteristics of transmission lines and anti-icing technologies[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 131-138.

- [9] 马成廉, 孙黎, 尚教会. 抗灾型电网安全风险评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(9): 12-18.
MA Chenglian, SUN Li, SHANG Jiaohui. Study on safety risk assessment method of anti-disaster power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(9): 12-18.
- [10] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 138-143.
WU Tian, RUAN Jiangjun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 138-143.
- [11] 吴田, 阮江军, 胡毅, 等. 500 kV 输电线路的山火击穿特性及机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 163-170.
WU Tian, RUAN Jiangjun, HU Yi, et al. Study on forest fire induced breakdown of 500 kV transmission line in terms of characteristics and mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 163-170.
- [12] 吴田, 胡毅, 阮江军, 等. 交流输电线路模型在山火条件下的击穿机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1115-1122.
WU Tian, HU Yi, RUAN Jiangjun, et al. Air gap breakdown mechanism of model AC transmission line under forest fires[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1115-1122.
- [13] 陆佳政, 吴传平, 杨莉, 等. 输电线路山火监测预警系统的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 89-95.
LU Jiazheng, WU Chuanping, YANG Li, et al. Research and application of forest fire monitor and early-warning system for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 89-95.
- [14] 叶立平, 陈锡阳, 何子兰, 等. 山火预警技术在输电线路的应用现状[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 145-153.
YE Liping, CHEN Xiyang, HE Zilan, et al. Present situation of forest fire early warning technology used for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 145-153.
- [15] 宋嘉婧, 郭创新, 张金江, 等. 山火条件下的架空输电线路停运概率模型[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 100-105.
SONG Jiajing, GUO Chuangxin, ZHANG Jinjiang, et al. A probabilistic model of overhead transmission line outage due to forest fire[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 100-105.
- [16] 周泽存, 沈其工, 方瑜, 等. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [17] GBT 16927.1-2011 高电压试验技术 第 1 部分: 一般定义及试验要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] 张景忠, 肖非, 廉明起. 林火行为相关参数综合测报仪的研究[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(6): 112-115.
ZHANG Jingzhong, XIAO Fei, LIAN Mingqi. The comprehensive measuring instrument of parameters relating to forest fire behavior[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(6): 112-115.
- [19] 普子恒, 阮江军, 吴田, 等. 火焰中颗粒对间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 103-110.
PU Ziheng, RUAN Jiangjun, WU Tian, et al. Influence of particles in flame on the characteristics of gap discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 103-110.
- [20] 田光辉, 陈汇林, 许向春. 基于模糊综合判别的森林火险等级预报研究[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 117-122.
TIAN Guanghui, CHEN Huilin, XU Xiangchun. Study on grade prediction on forest fire based on fuzzy synthetic discriminant[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 117-122.
- [21] 徐志光, 林韩, 陈金祥, 等. 基于模糊模型识别的福建电网火烧山预警研究[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1142-1144.
XU Zhiguang, LIN Han, CHEN Jinxiang, et al. Forest fire pre-warning based on fuzzy pattern recognition for Fujian Power Grid[J]. East China Electric Power, 2009, 37(7): 1142-1144.
- [22] 唐晓燕, 孟宪宇, 易浩茗. 林火蔓延模型及蔓延模拟的研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(1): 87-91.
TANG Xiaoyan, MENG Xianyu, YI Haoming. Review and prospect of researches on forest fire spreading models and simulating method[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(1): 87-91.
- [23] 骆介禹. 燃烧能量学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1991.
- [24] 毛贤敏. 风和地形对林火蔓延速度的作用[J]. 应用气象学报, 1993, 4(1): 100-104.
MAO Xianmin. The influence of wind and relief on the speed of the forest fire spreading[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1993, 4(1): 100-104.

收稿日期: 2015-05-19; 修回日期: 2016-01-28

作者简介:

刘明军(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备状态检测及其故障风险评估; E-mail: lmj_hust@163.com

邵周策(1993-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统风险评估; E-mail: szc11121@163.com

上官帖(1958-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: dky_shanggt@jx.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)