

DOI: 10.7667/PSPC170110

基于山火时空特征的林区输电通道风险评估

熊小伏¹, 曾勇^{1,2}, 王建¹, 李浩然¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

摘要: 穿过林区的供电线路所处地理环境复杂, 输电通道山火灾害频发。为研究山火条件下林区输电通道风险评估问题, 对四川省凉山州地区某重要负荷的两条输电通道所经过的多个地区的气象数据按时间顺序进行统计。利用森林火险气象等级计算山火发生概率, 利用长空气间隙击穿理论计算山火条件下输电线路故障概率, 进而建立了具有时空分布特征的山火条件下输电通道风险评估模型, 并用算例验证了所提方法的有效性。还对一条输电通道故障, 潮流转移至另一条输电通道后的线路运行情况进行了分析, 并根据结果提出了相应的降风险措施。

关键词: 山火; 气象等级; 输电通道; 风险评估; 故障概率

Risk assessment of power transmission channels in forest regions based on spatial-temporal features of forest fire

XIONG Xiaofu¹, ZENG Yong^{1,2}, WANG Jian¹, LI Haoran¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Xichang Satellite Launching Center, Xichang 615000, China)

Abstract: The geographical environment around power transmission channels which pass through the forest is complicated and forest fire occurs frequently. In order to study the problem of risk assessment of power transmission channels in forest region, meteorological data of multiple areas in Liangshan Autonomous Prefecture, Sichuan Province where two power transmission channels of an important load pass through is collected and analyzed according to the chronological order. The occurrence probability of forest fire is calculated by forest fire danger weather ratings, and the fault probability of transmission lines under forest fire condition is calculated by breakdown characteristics of long air gaps theory. The temporal and spatial risk evaluation model of power transmission channels under forest fire condition is built. The validity of the proposed method is verified through a case analysis. Besides, the operation conditions of transmission lines are analyzed after power flow transferring due to one power transmission channel breaks down. Finally, some risk-mitigation measures are proposed according to the results.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFB0900600) and Major and Basic Project of State Grid Foresight Science and Technology (No. SG20141187).

Key words: forest fire; weather rating; power transmission channels; risk assessment; fault probability

0 引言

四川省凉山州地区输电线路经过区域多为林区, 森林覆盖率高^[1], 加上凉山州干湿分明的季节

特性, 极易发生森林火灾, 导致架空输电线路故障跳闸, 从而影响该地区的供电可靠性。根据四川省1979—2012年林火次数和受灾面积统计数据^[2]可得如图1所示的地区分布图, 可见凉山州林火发生次数占全省发生总次数的22%, 林火受灾面积占全省受灾总面积的51%, 两项数据均排在全省第一位, 凉山州也被列为四川省林火重灾区。

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600); 国家电网公司重大基础前瞻科技项目(SG20141187)

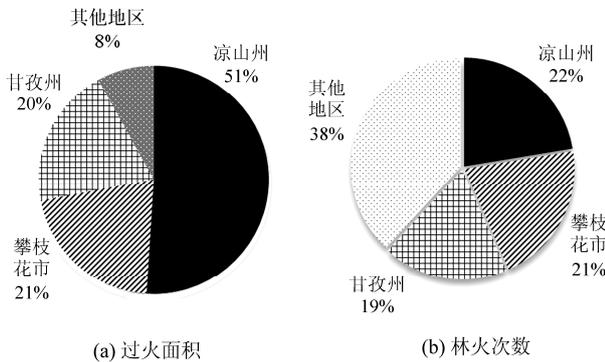


图 1 四川省 1979—2012 年林火过火面积和次数地区分布图
Fig. 1 Distribution of area and frequency of forest fires in Sichuan Province from 1979 to 2012

森林火灾的发生概率和气象条件是密不可分的。环境温度、降雨量、风速和相对湿度^[3]等气象条件对林火发生概率影响较大。为了准确评估林火对输电通道的影响，需要进行气象条件下的山林火险跳闸预测和输电线路风险分析。国内外学者在森林火灾及其对输电线路影响方面有很多研究，取得了大量的成果，研究大致分为三个方向：山火灾害的影响因素、输电线路山火跳闸机理和输电线路山火监控技术。

在山火灾害的影响因素分析方面，已有的研究通过对森林火险气象资料的研究，得出了森林火险的主要气象因子^[4]，划分了森林火险气象等级并确立了火险等级的预报方法^[5]，得到了森林火险概率的预测模型^[6]。

在输电线路山火跳闸机理分析方面，文献[7]分析了山火火焰中颗粒触发间隙放电的机理，颗粒在山火条件下间隙放电效应倍增，导致间隙绝缘强度降低，击穿电压最多下降到原来 10%。文献[8]分析了山火条件下输电线路的击穿机理，指出火焰高温和颗粒是导致间隙的绝缘降低和击穿电压下降的主要原因。文献[9-10]研究了颗粒长度与击穿电压之间的关系，结果表明随着颗粒长度变长，间隙绝缘强度急剧下降，击穿电压降低。

输电线路山火监控技术分析方面，文献[11-12]提出了运用气象卫星遥感数据的山火监控方法，其火点判断识别的方法只适用于 FY-3/VIRR 或 NOAA/AVHRR 气象卫星的数据；文献[13]对 MODIS、AVHRR 系列卫星遥感监测林火的火点识别原理和方法进行了研究。亦有研究提出了视频监控^[14]、激光雷达技术^[15]和传感器网络监控技术^[16-17]与气象卫星遥感数据相结合的山火监控方法；通过对卫星遥感数据火点识别算法进行优化^[18-19]，可以

准确快速地识别火点，提高山火监控的效率。

综上所述，现有研究方法主要考虑了气象因素对山火的影响，但对于具有时空分布特征的气象因素影响下的山火风险及其导致的输电通道风险尚缺乏研究。针对上述问题，本文以凉山州地区西昌市某重要负荷为研究对象，对山火条件下输电通道的风险进行评估，通过对输电通道所经过的多个地区的气象数据按时间顺序进行统计，利用森林火险气象等级计算山火发生概率，利用长空气间隙击穿理论计算山火条件下输电线路故障概率，进而建立了具有时空分布特征的山火条件下输电通道风险评估模型，并用算例验证了本方法的有效性。本文还针对一条输电通道故障时，潮流转移至另一条输电通道后的线路运行情况进行了分析，最后根据评估结果提出了相应的降风险措施。

1 凉山州山火灾害时空分布特征

气象灾害具有明显的季节和地域特性^[20]，暴露其中的输电线路在不同地域的故障概率存在差别，同一线路在气象灾害影响下的故障概率在不同时间段也有较大的波动^[21]，并且气象灾害的发生具有周期性，通过对历史气象数据和对应的线路故障概率规律的研究，可以得到这种气象灾害的时空相依的故障概率模型^[22]。下面基于上述思路针对山火灾害，分析其时空分布特征。

1.1 西昌某重要负荷输电通道简介

该重要负荷采用双电源供电的模式，分别由越西—喜德—冕宁和西昌—冕宁两条 110 kV 线路为其供电，输电通道及地理位置如图 2 所示。

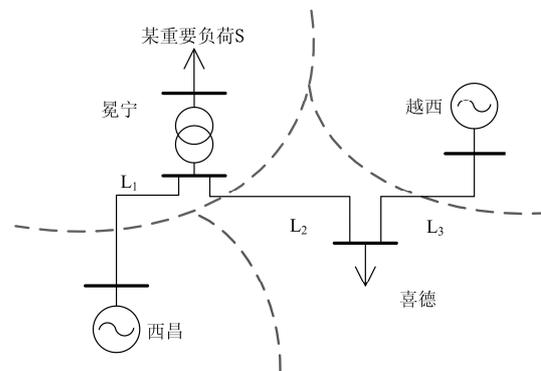


图 2 重要负荷 S 输电通道地理位置划分
Fig. 2 Geographic location division of transmission channels of an important load S

由图 2 可知，线路 L₁ 途经冕宁和西昌，山火统计结果表明，两地均属于山火高发地带，线路山火跳闸概率高，线路 L₂ 和 L₃ 大部分处于喜德和越西

地区, 山火发生概率相对较低。线路 L_1 即为输电通道 1, 线路 L_2 和 L_3 构成了输电通道 2。为研究负荷 S 的供电可靠性, 有必要对山火条件下输电通道的风险进行评估。

1.2 凉山州山火时空特性分析

研究表明, 山火灾害具有明显的时间和空间分布特征, 这与地理环境和气象条件的时空特性密切相关。

1) 时间分布特征

根据凉山州 2011—2015 年气象灾害年报的统计数据, 可得如图 3 所示的各月累积山火次数分布图。

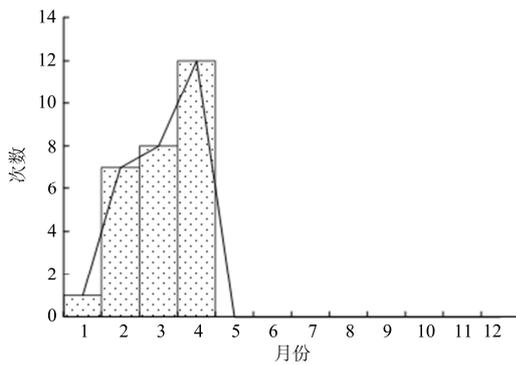


图 3 2011—2015 年凉山州各月累积山火次数分布图

Fig. 3 Cumulative number of forest fires in Liangshan from 2011 to 2015

由图 3 可以看出, 2011—2015 年期间, 仅有 1—4 月份发生过山火灾害, 其中 1 月份累计仅发生 1 次, 2 月份累计 7 次, 3 月份累计 8 次, 4 月份累计 12 次, 由此得出, 山火灾害主要集中在 2—4 月, 季节特征明显, 具有较强的时间分布特征。

2) 空间分布特征

根据 2011—2015 年凉山州气象灾害年报的统计数据, 按照凉山州的行政区划统计各县的间累计发生的山火次数, 如图 4 所示。

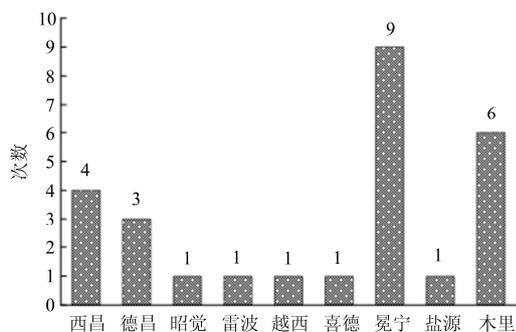


图 4 2011—2015 年全州各县林火分布图

Fig. 4 Distribution of forest fire in Liangshan from 2011 to 2015

由图 4 可知, 2011—2015 年在全州 17 个市县中, 仅有木里、冕宁、西昌、德昌、昭觉、雷波、越西、喜德和盐源 8 个市县发生成规模的山火灾害, 从统计结果发现山火灾害地域分布不均, 统计时间内总计发生 27 次山火灾害, 其中冕宁和木里山火灾害严重, 分别发生 9 次和 6 次, 两县发生山火占总次数的 56%, 西昌和德昌分别发生 4 次和 3 次, 占总次数的 26%, 其余 5 县均只发生了 1 次山火灾害, 占总次数的 18%。由此可知, 全州山火灾害集中发生在冕宁、木里、西昌和德昌四个市县, 地域特征明显, 具有较强的空间分布特征。

2 基于山火时空特征的林区输电通道风险评估

除了山火本身会对林区植被产生破坏外, 由山火引起的输电线路故障也会造成重大的经济损失。因此, 在山火风险评估的基础上, 进一步评估林区输电通道的风险是很有必要的。评估基于山火时空特征的输电通道风险流程如图 5 所示。

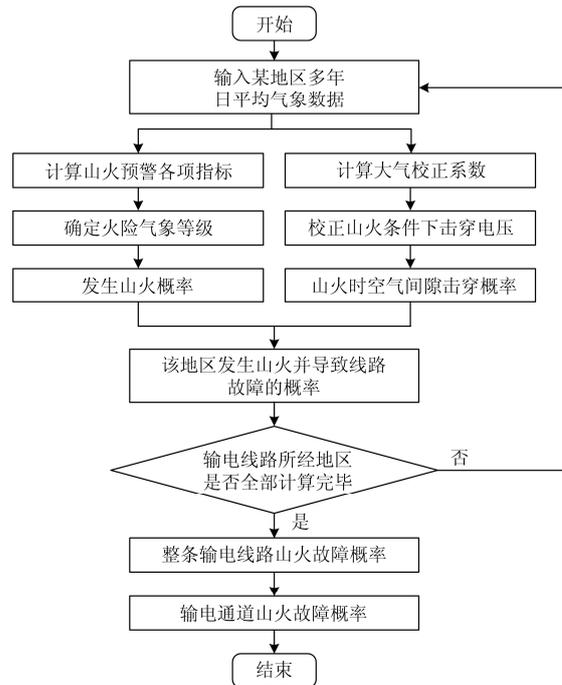


图 5 基于山火时空特征的输电通道风险评估流程图

Fig. 5 Flow chart of risk assessment of power transmission channels in forest region based on spatial-temporal feature of forest fire

2.1 山火发生概率

首先需要根据气象参数评估火险气象等级, 通过对研究地区的最高温度、最小相对湿度、降水量、风速等气象参数按累年日平均进行统计, 通过量化

评分的方式确定最高温度指数 A 、最小相对湿度指数 B 、降水量指数 C 和风力等级指数 D ，得到火险气象指数 $FDWI$ ，并参照 LY/T1172-1995《全国森林火险天气等级》和 QX/T77-2007《森林火险气象等级》，确定火险气象等级 $FDWR$ 。

1) 最高温度指数 A 的取值见表 1。

表 1 最高温度指数 A 取值

Table 1 Valuation of highest temperature index A

| 当日最高温度 $T_{max}/^{\circ}C$ | 最高温度指数 A 取值 |
|----------------------------|---------------|
| $T_{max} \leq 5$ | 0 |
| $5 < T_{max} \leq 10$ | 4 |
| $10 < T_{max} \leq 15$ | 8 |
| $15 < T_{max} \leq 20$ | 12 |
| $20 < T_{max} \leq 25$ | 16 |
| $25 < T_{max}$ | 20 |

2) 最小相对湿度指数 B 的取值见表 2。

表 2 最小相对湿度指数 B 取值

Table 2 Valuation of minimum relative humidity index B

| 最小相对湿度 $RH/\%$ | 最小相对湿度指数 B 取值 |
|-------------------|-----------------|
| $RH > 70$ | 0 |
| $60 < RH \leq 70$ | 4 |
| $50 < RH \leq 60$ | 8 |
| $40 < RH \leq 50$ | 12 |
| $30 < RH \leq 40$ | 16 |
| $RH \leq 30$ | 20 |

3) 降水量指数 C 的取值见表 3。

表 3 降水量指数 C 的取值

Table 3 Valuation of precipitation index C

| 降水量 P/mm | 降水日及其后的连续无降水日数的森林火险天气指数 C | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 当 天 | 1 天 | 2 天 | 3 天 | 4 天 | 5 天 | 6 天 | 7 天 | 8 天 |
| $0.3 \leq P < 2$ | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| $2 \leq P < 5$ | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |
| $5 \leq P < 10$ | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| $10 \leq P$ | 0 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |

4) 风力等级指数 D 的取值见表 4。

表 4 风力等级指数 D 的取值

Table 4 Valuation of wind power rating index D

| 风力等级 | 风速 $WS/(m/s)$ | 最大风速指数 D 取值 |
|--------|-----------------------|---------------|
| 0 级 | $0 < WS \leq 0.2$ | 0 |
| 1 级 | $0.2 < WS \leq 1.5$ | 5 |
| 2 级 | $1.5 < WS \leq 3.3$ | 10 |
| 3 级 | $3.3 < WS \leq 5.4$ | 15 |
| 4 级 | $5.4 < WS \leq 7.9$ | 20 |
| 5 级 | $7.9 < WS \leq 10.7$ | 25 |
| 6 级 | $10.7 < WS \leq 13.8$ | 30 |
| 7 级 | $13.8 < WS \leq 17.1$ | 35 |
| 8 级及以上 | $17.1 < WS$ | 40 |

5) 节气性敏感日系数 k 。

考虑到人为因素(如清明节祭祀燃烧纸钱)对山火发生的影响较大，引入节气性敏感日系数 k 对火险气象指数 $FDWI$ 进行修正^[23]，正常情况 $k=1$ ，节气性敏感日 $k=1.1 \sim 1.2$ ，如清明节前一周(3 月 26 日至 4 月 10 日)， k 取 1.2。

6) 火险气象指数 $FDWI$ 的计算公式如下：

$$FDWI = k(A + B + C + D) \quad (1)$$

其中： A 表示最高温度指数； B 表示最小相对湿度指数； C 表示降水量指数； D 表示风力等级指数； k 表示节气性敏感日系数。

7) 火险气象等级 $FDWR$ 。火险气象等级 $FDWR$ 的取值及危害描述见表 5。

表 5 火险气象等级 $FDWR$ 的取值及危害描述

Table 5 Valuation and hazard description of $FDWR$

| 火险气象等级 $FDWR$ | 火险气象指数 $FDWI$ | 危害描述 |
|------------------|---------------------|------|
| I 级 | $FDWI \leq 25$ | 没有危险 |
| II 级 | $25 < FDWI \leq 50$ | 低度危险 |
| III 级 | $50 < FDWI \leq 72$ | 中度危险 |
| IV 级 | $72 < FDWI \leq 90$ | 高度危险 |
| V 级 | $90 < FDWI$ | 极度危险 |

需要指出的是，除了本文依据我国标准推荐的 $FDWI$ 指数，亦有 Keetch-Byram 干旱指数 $KBDI$ ^[24] 和加拿大火险指数 FWI ^[4] 等，限于篇幅，本文不做详细对比，感兴趣的读者可查阅相关文献。

8) 火险气象等级对应的山火发生概率

灾害学的相关文献[25]研究了各火险气象等级所对应的山火发生概率，将火险气象等级下山火发生概率记为 P_{dn} ，其中 $n=1, 2, \dots, 5$ 分别对应火险气象等级中 I, II, ..., V 级， P_{dn} 的取值如表 6 所示。

表 6 各火险气象等级下山火发生概率

Table 6 Fire occurrence probability in the conditions of different forest fire weather ratings

| n | 火险气象等级 | 各等级对应的山火发生概率 $P_{dn}/\%$ |
|-----|--------|--------------------------|
| 1 | I 级 | 0.1513 |
| 2 | II 级 | 2.1033 |
| 3 | III 级 | 4.1333 |
| 4 | IV 级 | 8.3507 |
| 5 | V 级 | 17.0483 |

2.2 山火条件下输电线路故障概率

山火条件下输电线路故障主要是空气间隙被击穿导致的^[26]。在标准大气条件下，空气间隙的 50% 击穿电压 U_{50} 较高，系统正常运行时不会发生击穿。然而当发生山火时，空气温度急剧变化，受此影响，空气密度、湿度均会发生显著变化，使空

气绝缘性大大降低,因此需要引入大气校正系数 K_i ,且 $K_i=K_dK_h$,其中 K_d 为空气密度校正系数, K_h 为空气湿度校正系数^[27]。

空气密度校正系数 K_d 取决于空气相对密度 δ ,其表达式为

$$K_d = \delta^m \quad (2)$$

空气的相对密度的计算公式为

$$\delta = \frac{(273+t_0)p}{(273+t)p_0} \quad (3)$$

式中: p_0 与 p 分别为标准参考大气条件下和发生山火时的大气压强, kPa; t_0 与 t 分别为标准参考大气条件下与发生山火条件下的气体温度, °C。

空气湿度校正系数 K_h 为

$$K_h = K^W \quad (4)$$

指数 m 、 W 和系数 K 的取值可参考 GB/T16927.1—2011《高电压试验技术 第1部分:一般定义及试验要求》^[28]。

山火除了对空气温度和密度等产生影响之外,在植被、农作物等燃烧时还会产生浓烟,浓烟中包含大量固体小颗粒^[29],使间隙的绝缘强度发生明显降低,击穿电压最多可以下降到原来的10%^[7]。因此引入浓烟校正系数 K_p ,通常可取0.1。

综合考虑以上各校正系数,在山火条件下空气间隙的工频击穿电压为

$$U_{50}^0 = K_d K_h K_p U_{50} \quad (5)$$

研究表明,气隙击穿的概率分布接近于正态分布,通常可用50%击穿电压 U_{50} 和变异系数 z 来表示^[30]。其概率密度函数可表示为

$$p(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(U-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中: U 为实际电压; μ 为山火条件下校正后的50%击穿电压 U_{50}^0 ; σ 等于 zU_{50}^0 , z 为变异系数。在不同间隙的电场形式与不同类型的击穿电压下,分散性是不同的,变异系数 z 取值为2%~8%不等,在正常情况下,空气间隙工频击穿电压的分散性不大,取2%。但在发生山火发生时,颗粒导致空气间隙更不均匀,分散性会增大。所以山火发生时,变异系数 z 可取4%。山火时发生空气间隙击穿的概率可以表示为

$$P(U) = \frac{1}{0.04\sqrt{2\pi}U_{50}^0} e^{-\int_{-\infty}^U \frac{(x-U_{50}^0)^2}{0.0032U_{50}^0} dx} \quad (7)$$

2.3 发生山火并导致输电通道故障概率

记区域内发生山火为事件 X ,途经该区域的输电线路故障为事件 Y ,则发生山火并导致输电线路故障的概率可表示为 $P(XY)$,发生山火的概率可表

示为 $P(X)$,在山火条件下输电线路发生故障的概率可表示为 $P(Y|X)$ 。根据条件概率公式,三者的关系可表示为

$$P(XY) = P(Y|X) \times P(X) \quad (8)$$

根据前面的分析结果,有 $P(X)=P_{dn}$ 和 $P(Y|X)=P(U)$,由此可计算出某一地区发生山火并造成输电线路故障的概率 $P(XY)$,而一条线路可能是由跨越多个地区的区段组成的,输电通道又可能是由多条线路组成的,其中任意一点发生故障都会导致整条输电通道停运。由概率论可得多相容事件至少有一件发生的概率为

$$P(L) = P\left(\bigcup_{i=1}^n L_i\right) = \sum_{i=1}^n P(L_i) - \sum_{1 \leq i < j \leq n} P(L_i L_j) + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} P(L_i L_j L_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(L_1 L_2 \dots L_n) \quad (9)$$

当 L_i 表示处于 i 地区内的线路段时, $P(L)$ 为整条线路的故障概率;当 L_i 表示第 i 条线路时, $P(L)$ 为整条输电通道的故障概率。

2.4 算例分析

从图3可知1—4月是凉山州山火的高发期,因此本算例选取了前述某重要负荷 S 的两条输电通道所经过的冕宁、西昌、越西、喜德地区2006—2015年1—4月的累年平均的气象数据和线路 L_1 、 L_2 、 L_3 的参数进行研究。

根据前面提出的基于气象参数的山火条件下输电通道风险评估流程和评估方法,可得到上述四个地区输电线路发生山火的概率,如图6所示。

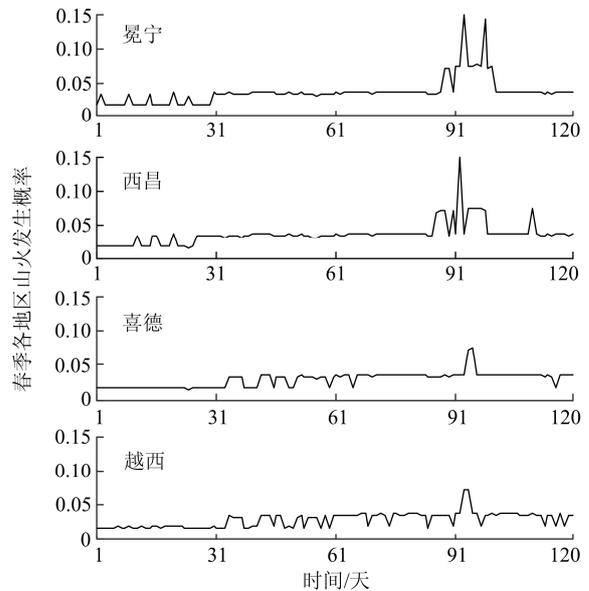


图6 输电线路途径地区发生山火概率的时间分布图
Fig. 6 Time distribution of forest fire occurrence probability in different regions where transmission lines pass through

从图 6 中可以看出, 这四个地区山火分布的时间特征为: 1—2 月山火发生概率较低, 3—4 月较高; 山火分布的空间特征为: 冕宁、西昌地区山火发生概率普遍高于越西、喜德地区。与 2011—2015 年凉山州山火灾害统计数据对比可知, 该方法评估效果比较理想。

进一步计算输电通道 1(西昌—冕宁段)和输电通道 2(越西—喜德—冕宁段)的山火故障概率, 结果如图 7 所示。

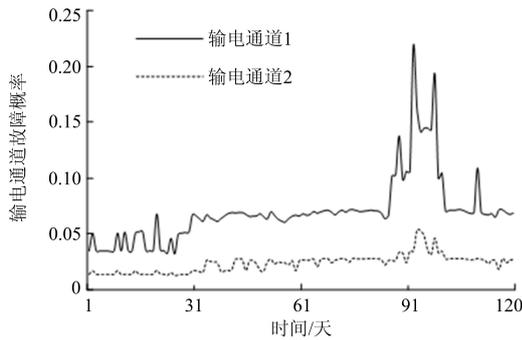


图 7 输电通道山火故障概率时间分布图

Fig. 7 Time distribution of forest fire induced fault probability of transmission channel

从图 7 中可以看出, 输电通道 1 山火故障概率较高, 输电通道 2 相对较低, 与实际情况一致。

3 山火下输电线路连锁跳闸风险

由前面的分析结果可知, 在春季山火高发时段, 相比输电通道 2, 输电通道 1 发生山火并导致线路故障的概率明显更高, 达到了 3~5 倍。在这一背景下, 假设输电线路 L_1 因山火导致故障停运。

根据该区域的潮流情况得到, 正常运行时线路 L_1 、 L_2 、 L_3 的载流量分别为 280 A, 100 A, 250 A。事故后经过潮流转移, L_2 、 L_3 线路的电流将分别阶跃至 380 A 和 530 A。用电流 III 段保护作为后备保护进行验算^[31], 保护装置的启动电流为

$$I_{\text{set}}^{\text{III}} = \frac{K_{\text{rel}}^{\text{III}} K_{\text{ss}}}{K_{\text{re}}} I_{\text{L,max}} \quad (9)$$

式中: $K_{\text{rel}}^{\text{III}}$ 为可靠系数; K_{ss} 为自启动系数; K_{re} 为电流继电器的返回系数; $I_{\text{L,max}}$ 为被保护线路正常运行时的最大负荷电流。架空输电线路 L_1 、 L_2 、 L_3 均采用型号为 LGJ-120 的钢芯铝绞线, 根据 GB/T 1179-2008《圆线同心绞架空导线》^[32]和《电气工程手册》可得, 该型号导线的长期允许电流为 330 A, 最大负荷电流为 430 A。由于负荷中包含大型电机, 自启动系数较大, 因此计算出的电流 III 段保护整定值 $I_{\text{set}}^{\text{III}}$ 也较大, 约为 625 A, 大于潮流转

移后线路 L_2 、 L_3 的电流, 因此保护不会动作。此时两条线路的电流已接近甚至超过了最大负荷电流, 加之输电通道经过林区、山地等复杂地形, 故障定位及故障修复需要的时间较长, 长时间运行必然会导致线路温度升高, 从而影响线路的热力和机械性能, 导致线路故障。

根据 IEEE Std. 738 标准^[33]。分别取线路 L_1 、 L_2 所经过的越西、喜德地区 2006—2015 年 3—4 月累年最高气温(20.78 °C)、平均风速(1.55 m/s)以及平均日照强度(637 W/m²)作为计算条件, 得出线路在电流阶跃情况下温度的变化情况, 计算结果如下。

图 8 为线路 L_2 电流由 100 A 阶跃至 380 A 及线路 L_3 电流由 250 A 阶跃至 530 A 后导线温度随时间的变化情况。取线路的最大允许温度为 70 °C, 计算可得线路 L_2 的稳态温度将达到 48.68 °C, 而线路 L_3 则将在 33.5 min 左右达到 70 °C, 在这段时间内若不采取相应的降风险措施, 输电通道 2 将出现温度安全判据越限, 继而诱发弧垂增长越限触树^[34], 引起线路连锁故障跳闸, 从而导致重要负荷的供电中断。

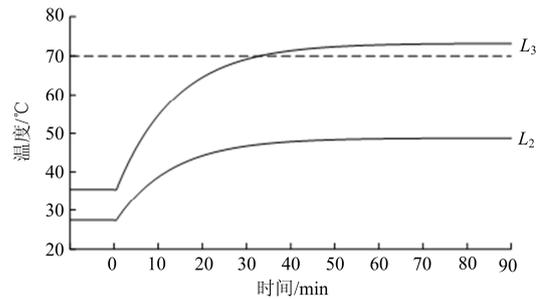


图 8 潮流转移后线路 L_2 和 L_3 导线温度随时间变化图

Fig. 8 L_2 and L_3 conductor temperature changing with time after power transferring

4 林区输电通道降风险运行措施

由于林区线路发生山火跳闸故障具有明显的时间和空间分布特征, 在山火风险预防方面, 可以针对事故风险高的西昌-冕宁线路采取以下措施:

1) 定期对输电线路, 尤其是经过山林地段的线路周边灌木、荒草进行清理, 对较高树枝修剪, 预防山火的危害。

2) 在 3—4 月份, 特别是清明节期间, 加强对周边人群的防火宣传, 加强巡线, 及时发现火情。

当西昌—冕宁线路发生山火跳闸导致潮流转移至输电通道 2 时, 当前负载线路风险应对措施:

1) 线路 L_2 即喜德—冕宁线的温度虽不会升高至线路的最大允许温度, 但电网运行人员仍应密切关注线路的运行情况, 排查安全隐患。

2) 线路 L_3 即越西—喜德线达到最大允许温度

的时间约为半小时, 电网调度人员应快速切除喜德地区的部分负荷, 尽量保证重要负荷的供电, 并通知其减少部分非生产用电, 启动备用电源以保证重要设备供电, 尽量减小停电损失。

5 结论

本文对凉山州西昌市某重要负荷途径林区的两条输电通道经过的多个地区的气象数据按时间顺序进行统计, 建立了具有时空分布特征的山火条件下输电通道风险评估模型。并对一条输电通道故障, 潮流转移至另一条输电通道后的线路运行情况进行了分析。通过上述研究得出以下结论:

1) 该重要负荷的林区输电通道周围是山火多发区, 山火灾害具有显著的时空分布特征, 每年春季特别是4月是山火高发期, 给林区输电通道安全运行带来较大风险。

2) 根据周边气象参数评估了森林火险气象等级, 进一步建立了具有时空分布特征的山火条件下输电通道风险评估模型, 算例表明所提方法适用于林区输电通道的山火风险评估。

3) 分析了一条输电线路故障时, 潮流转移至另一输电通道后线路的运行情况, 结果表明, 存在潮流转移后线路过负荷导致导线温度升高越限的问题。

4) 根据分析结果, 提出了在山火高发期加强巡线、注意用火安全的预防措施; 在山火发生后电网调度运维人员及时排查, 并校核导线温度安全判据, 如存在温度越限应及时调度削减负荷防止连锁跳闸, 启动备用电源保障生产用电等降风险措施, 保证该重要负荷的可靠供电。

致谢

感谢中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)和凉山州气象局(<http://lszqxj.com>)为本文研究提供气象资料。

参考文献

- [1] 李德. 四川省重点地区森林火灾与气象因子的关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
LI De. The relationship between forest fire and meteorological factors in the key areas of Sichuan province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [2] 甘薇薇, 刘博, 詹兆渝, 等. 四川省春季林火气候模型的建立[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 77-80.
GAN Weiwei, LIU Bo, ZHAN Zhaoyu, et al. Establishment of serious forest fire zone climatic model of spring in Sichuan province[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2014, 34(2): 77-80.
- [3] 梁慧玲, 郭福涛, 苏漳文, 等. 基于随机森林算法的福

- 建省林火发生主要气象因子分析[J]. 火灾科学, 2015, 24(4): 191-200.
- LIANG Huiling, GUO Futao, SU Zhangwen, et al. Analysis of meteorological factors on forest fire occurrence of Fujian based on random forest algorithm[J]. Fire Safety Science, 2015, 24(4): 191-200.
- [4] 胡晓径, 王盛坤. 森林火险等级气象指标系统的构建与预报方法研究综述[J]. 林业科技情报, 2010, 42(4): 27-29, 311.
HU Xiaojing, WANG Chengkun. Synthesizes of structures of the forest fire weather gradation index system and research of forecast methods[J]. Forestry Science and Technology Information, 2010, 42(4): 27-29, 311.
- [5] SANABRIA L, QIN X, LI J, et al. Spatial interpolation of McArthur's forest fire danger index across Australia: observational study[J]. Environmental Modelling & Software, 2013, 50(1): 37-50.
- [6] 李晓炜, 傅国斌, ZEPPEL M J B, 等. 中国不同气候区基于火险气象指数的火险概率模型[J]. 资源与生态学, 2012, 3(2): 105-117.
LI Xiaowei, FU Guobin, ZEPPEL M J B, et al. Probability models of fire risk based on forest fire indices in contrasting climates over China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(2): 105-117.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SUKHNANDAN A, HOCH D A. Fire induced flashovers of transmission lines: theoretical models[C] // IEEE AFRICON Africon Conference in Africa, October 2-4, 2002, George, South Africa: 617-622.
- [10] SUKHNANDAN A. A theoretical and experimental investigation into fire induced flashover of high voltage transmission lines[D]. KwaZulu-Natal: University of KwaZulu-Natal, 2004.
- [11] PEREIRA J M C. A comparative evaluation of NOAA-AVHRR vegetation indices for burned surface detection and mapping[J]. IEEE Transactions on

- Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 217-226.
- [12] MPHALE K, HERON M. Measurement of electrical conductivity for a biomass fire[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2008, 9(8): 1416-1423.
- [13] CUOMO V, LASAPONARA R, TRAMUTOLI V. Evaluation of a new satellite-based method for forest fire detection[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(9): 1799-1826.
- [14] 雷国伟, 何伟明, 林健枝. 架空输电线路走廊防火综合监测系统实现与应用[J]. 电气技术, 2013(12): 112-115.
- LEI Guowei, HE Weiming, LIN Jianzhi. The overhead transmission line corridor protection integrated monitoring system implementation and application of forest fire[J]. Electrical Engineering, 2013(12): 112-115.
- [15] 陈锡阳, 杨挺, 尹创荣, 等. 基于激光雷达技术的输电线路山火监测方法[J]. 激光与红外, 2014, 44(11): 1202-1206.
- CHEN Xiyang, YANG Ting, YIN Chuangrong, et al. Wildfire monitoring around transmission line based on laser radar technology[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(11): 1202-1206.
- [16] 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.
- [17] 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 Yujiang, 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.
- [18] 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.
- [19] 陆佳政, 刘毓, 吴传平, 等. 输电线路山火卫星监测与告警算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5511-5519.
- LU Jiazheng, LIU Yu, WU Chuanping, et al. Study on satellite monitoring and alarm calculation algorithm of wild fire near transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5511-5519.
- [20] 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.
- [21] 王建, 熊小伏, 梁允, 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1252-1259.
- WANG Jian, XIONG Xiaofu, LIANG Yun, et al. Geographical and meteorological factor related transmission line risk difference assessment: method and indexes[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1252-1259.
- [22] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114, 1.
- WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 109-114, 1.
- [23] 周宁, 熊小伏. 电力气象技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [24] 沈彦军, 李红军, 雷玉平. 干旱指数应用研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 128-133.
- SHEN Yanjun, LI Hongjun, LEI Yuping. Research review on application of drought index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 128-133.
- [25] 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.
- [26] EL-ZOHRI E H, ABDEL-SALAM M, SHAFHEY H M, et al. Mathematical modeling of flashover mechanism due to deposition of fire-produced soot particles on suspension insulators of a HVTL[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 95: 232-246.

- [27] 刘明军, 邵周策, 上官帖, 等. 输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 82-89.
LIU Mingjun, SHAO Zhouce, SHANGGUAN Tie, et al. Study on models and methods of risk assessment of transmission line fault caused by fire[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 82-89.
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 第1部分: 一般定义及试验要求: GB/T 16927.1—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. High voltage test technology part 1: general definitions and test requirements: GB/T 16927.1—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [29] 罗小鹏, 石践, 陈玉忠, 等. 煤粉在平面火焰携带流反应系统中着火延迟特性试验[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 37-42.
LUO Xiaopeng, SHI Jian, CHEN Yuzhong, et al. Experimental study on ignition delay characteristics of pulverized coal in flat flame entrained flow reactor system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 37-42.
- [30] 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.
- [31] 汪溢, 黄曙, 马凯. 继电保护在线校核技术研究[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 87-93.
WANG Yi, HUANG Shu, MA Kai. Relay protection online verifying technology[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(8): 87-93.
- [32] 中国国家标准化管理委员会. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Circular concentric stranded overhead wire GB/T 1179—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [33] IEEE Power and Energy Society. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors: IEEE Std 738—2012[S]. New York: IEEE, 2012.
- [34] 张龙跃, 肖先勇, 马超, 等. 潮流转移诱导线路触树故障的时间与概率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 64-70.
ZHANG Longyue, XIAO Xianyong, MA Chao, et al. Prediction of time and probability of line tree-related fault caused by power flow transferring[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 64-70.

收稿日期: 2017-01-19; 修回日期: 2017-03-26

作者简介:

熊小伏(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网、电力系统保护与控制、电力系统风险评估及气象灾害预警; E-mail: cqxxf@vip.sina.com

曾勇(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险评估及气象灾害预警; E-mail: cqzengyong@foxmail.com

王建(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统风险评估及气象灾害预警。E-mail: wangrelay@foxmail.com

(编辑 葛艳娜)