

# 基于多维极值分布的风雨荷载下输电线路 风偏放电概率分析

邓红雷<sup>1</sup>, 周 晨<sup>1</sup>, 夏 桥<sup>1</sup>, 张莉彬<sup>1</sup>, 唐崇旺<sup>1</sup>, 陈涛威<sup>2</sup>, 朱 凌<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001)

**摘 要:**大风天气下通常伴随着降雨, 强风雨荷载的冲击会对输电线路可靠性产生不利影响, 导致风偏放电事故, 对电力企业及用户侧造成重大损失。提出一种基于风速、风向和雨强三维联合分布模型的输电线路风偏放电概率预测模型。首先, 以极值风速、极值雨强及其风向角为变量刻画风速、雨强、风向的分布特性, 然后, 考虑风速、雨强、风向的概率相关性, 采用 Archimedean Copulas 函数建立多维联合概率分布, 以此为基础得到输电线路风偏放电的实时概率预测模型。最后, 通过 Matlab 编程实现该预测模型, 并通过实例数据验证该输电线路风偏放电概率预测模型的合理性和有效性。

**关 键 词:**输电线路; 风偏放电; Archimedean Copula 函数; 多维联合分布模型; 故障概率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.008 中图分类号: TM75 文章编号: 1673-9140(2021)02-0067-09

## Probability analysis of windage yaw discharge under wind and rain loads based on the multidimensional extreme value distribution

DENG Honglei<sup>1</sup>, ZHOU Chen<sup>1</sup>, XIA Qiao<sup>1</sup>, ZHANG Libin<sup>1</sup>, TANG Chongwang<sup>1</sup>,  
CHEN Taowei<sup>2</sup>, ZHU Ling<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001, China)

**Abstract:** Heavy wind is usually accompanied by rainfall, the strong wind and rain load will have negative impacts on the reliability of transmission lines, which could result in windage yaw discharge accidents and leads to significant losses of power enterprises and the consumers. Therefore, a probability distribution model is proposed in this paper based on a three-dimensional joint distribution model, including the wind speed, wind direction and rainfall intensity. Firstly, the distribution characteristics of wind speed, rainfall intensity and wind direction are described by the extreme wind speed, extreme rainfall intensity and wind direction angle. Then, considering the probability of wind speed, rainfall intensity, and direction, Archimedean Copulas function is utilized to build the multidimensional joint probability distribution, which can further be used to build the real-time probability prediction model of windage yaw discharge of transmission line. Finally, the prediction model is realized by Matlab programming, and the effectiveness of the proposed probability prediction model for the windage yaw of transmission lines is verified through the realistic power systems data.

**Key words:** transmission line; windage yaw discharge; Archimedean Copula function; multidimensional joint distribution model; failure probability

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(031300KK52160012)

通信作者: 邓红雷(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力设备在线监控与故障诊断研究; E-mail: denghl@scut.edu.cn

一直以来,输电线路的风偏放电都严重影响着电网的安全可靠运行。尤其是近年来,气象多变,大风天气多有发生,110~500 kV 输电线路风偏闪络事故频繁发生,发生频率已超过电力系统安全运行的限度<sup>[1]</sup>。同时理论与实践证明,风偏闪络对电网造成的影响通常都比雷电冲击闪络和操作冲击闪络严重,主要是因为大部分风偏闪络事故是在工作电压下发生的,同时由于风的连续性,跳闸后重合闸一般不成功,从而导致线路停运,一旦停运将严重威胁社会生产生活的正常进行<sup>[2-3]</sup>。因此,如果能实时获取输电线路在大风下的风偏状况,对可能发生的电网风偏故障进行预测预警,对电网防风减灾工作具有重要的实用意义。

国内外学者针对架空输电线路的风偏监测和预警进行了大量研究,文献[4-5]采用无线风偏监测仪,设计了一种新型输电线路风偏在线监测系统,准确的反映了实际的导线风偏情况;文献[6-7]则从运行角度出发提出了一种基于气象信息的耐张塔风偏放电的在线预警方法,结合精细化气象预报信息并考虑降雨修正,计算最小风偏距离与规程规定的允许最小间隙进行比较,得到预警结果;同时考虑到微气象因素对风偏的影响,文献[8]考虑到微气象因素对风偏的影响,提出了4种不同的数学模型对风偏角进行预测,预警结果更加精确;针对强对流天气下输电线路面临的风偏放电风险,文献[9-10]基于天气雷达对强对流的监测数据,构建了强对流大风预测模型,结合风力预测结果和输电线路的风偏临界风速,计算风偏放电概率并发布相应等级的预警。

综合当前研究现状,已有的研究在计算风偏距离的时候,为方便起见,通常只考虑最不利的情况,即风向与导线垂直<sup>[11]</sup>,这样计算得到的故障概率并不十分精确,同时未考虑风速风向的相关性对风偏的影响,降雨对线路的影响也未考虑进去。鉴于此,该文采用风速、雨强、风向的联合概率分布函数构建输电线路风偏放电的实时概率预测模型。最后,通过算例,分析风、雨共同作用下的线路风偏放电概率情况,与历史风偏情况对比,以验证模型的有效性。

## 1 大风天气下的风雨荷载

大风天气下急速运动的气流通常携带着大量降水,在这种天气带来的强风、暴雨环境下,输电线路往往同时受到风、雨2种荷载的作用。

### 1.1 输电线路的风荷载

根据 GB 50545—2010<sup>[12]</sup>可知,输电线路承受的风荷载为

$$\begin{cases} F_{wx} = \frac{1}{1.6} \alpha \mu_z \mu_{sc} \beta_c d_1 L_p B (v \cdot \sin \varphi)^2 \\ F_{wi} = \frac{1}{1.6} \mu_z B S_{wi} \cdot v^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $F_{wx}$ 、 $F_{wi}$  分别为导线、绝缘子串风荷载, N;  $\alpha$ 、 $\mu_z$ 、 $\mu_{sc}$ 、 $\beta_c$ 、 $B$  均可根据输电线路相关材料参数查阅 GB 50545—2010 获取;  $d_1$  为导线外径或覆冰时的计算外径, 分裂导线取所有子导线外径总和, m;  $L_p$  为导线水平档距, m;  $v$  为导线高度处的风速, m/s;  $S_{wi}$  为绝缘子串的受风面积, m<sup>2</sup>;  $\varphi$  为风向与导线夹角,  $\varphi = |\beta - \alpha|$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为输电线路走向角和风向角。

导线高度处的风速为

$$v = v_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\gamma_0} \quad (2)$$

式中  $z$ 、 $v$  分别为导线高度及相应风速;  $z_0$ 、 $v_0$  分别为风速仪标准高度及其提供的相应风速;  $\gamma_0$  为地貌分类参量, GB 50545—2010 规定 4 类地貌 A、B、C、D 的指数率分布参量  $\gamma_0$  分别为 0.12、0.16、0.22、0.30。

输电线路走向角  $\alpha$  和风向角如图 1 所示, 若相邻两杆塔二维坐标为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ , 则该段输电线路走向角为

$$\alpha = \arctan \left( \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right) \quad (3)$$

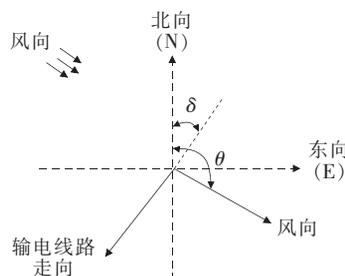


图 1 风向角与线路走向角

Figure 1 Wind angle and line angle

## 1.2 输电线路的雨荷载

强风天气一般伴随着降雨,需考虑雨荷载对风荷载的附加作用。中国气象部门一般采用的降雨强度标准分为 7 级,如表 1 所示。

表 1 降雨强度标准

Table 1 Classification of rain

等级	降水量/(mm/h)	等级	降水量/(mm/h)
小雨	2.5	大暴雨(弱)	64
中雨	8	大暴雨(中)	100
大雨	16	大暴雨(强)	200
暴雨	32		

输电线路的雨荷载<sup>[13-14]</sup>为

$$\begin{cases} F_{RX} = \frac{2}{9} \pi d_0^3 S_{RX} n \mu_z v^2 \\ F_{RI} = \frac{2}{9} \pi d_0^3 S_{RI} n \mu_z v^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $F_{RX}$ 、 $F_{RI}$  分别为导线和绝缘子串所受雨荷载, N;  $d_0$  为雨滴直径, m;  $n$  为单位体积内的雨滴个数;  $S_{RX}$ 、 $S_{RI}$  为导线和绝缘子串迎雨面的面积;  $\mu_z$  为风压高度变化系数<sup>[11]</sup>;  $v$  为导线高度处的风速, 由式(2)可得。

$d_0$  可根据降雨等级(如中雨、大雨、暴雨等)取得, 在单位体积内直径为  $d_0$  的雨滴个数可以表示为

$$n(d_0) = n_0 \exp(-\Lambda d_0) \quad (5)$$

式中 系数  $n_0 = 8 \times 10^3$  个/( $\text{m}^3 \cdot \text{mm}$ );  $\Lambda$  为斜率因子,  $\Lambda = 4.1I - 0.21$ ;  $I$  为降雨强度, mm/h。

## 2 最小风偏放电距离计算模型

为便于在线校核计算, 中国电力行业常假定导线单位长度上的荷载沿档距均匀分布, 悬垂绝缘子串采用刚性静力学模型<sup>[15]</sup>进行风偏角计算, 假设风向与绝缘子串位于同一平面, 各类杆塔(边相/中相)的风偏情况均可简化为如图 2 所示。

根据力矩平衡(图 2), 绝缘子串风偏角  $\varphi$  的计算公式<sup>[16]</sup>为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{F}{G}\right) =$$

$$\arctan \frac{\left( (F_{WX} + F_{RX}) + \frac{1}{2} (F_{WI} + F_{RI}) \right)}{G_X + \frac{1}{2} G_I} \quad (6)$$

式中  $F$ 、 $G$  分别为横、垂向总荷载;  $F_{WX}$ 、 $F_{RX}$  为导线上的风、雨荷载;  $F_{WI}$ 、 $F_{RI}$  分别为绝缘子串的风、雨荷载;  $G_X$ 、 $G_I$  分别为导线、绝缘子的自重荷载。

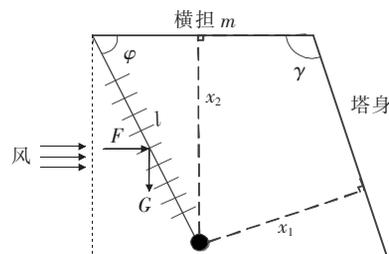


图 2 垂绝缘子串风偏受力(刚性静力学模型)

Figure 2 Some diagram of suspension string on denection caused by wind(rigid model)

风偏放电包含 2 种情况(图 2), 在 2 种空气间隙( $x_1$ 、 $x_2$ )下均可能发生风偏放电, 可计算输电线路对塔身放电距离  $x_1$ 、 $x_2$  为

$$\begin{cases} x_1 = m \cdot \sin \beta - l \cdot \cos(\varphi - \gamma) \\ x_2 = l \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中  $m$  为边相/中相横担长度, m;  $\gamma$  为杆塔主材和边相/中相横担夹角, ( $^\circ$ );  $l$  为绝缘子长度, m。则线路一杆塔最小空气间隙距离  $x$  为  $x_1$  和  $x_2$  间最小者, 即

$$x = \min\{x_1, x_2\} \quad (8)$$

## 3 基于风速、风向、雨量联合分布的风偏放电概率计算

### 3.1 风速、风向、雨量的独立概率分布模型

风速、风向、雨量是影响输电线路风偏放电的主要参数, 根据实测数据风速、风向采用 1 min 平均值进行分析, 而雨量采用每小时降雨量即雨强进行分析。

平均风速的变化可以认为是平稳随机过程, 用极值分布曲线拟合最为常见<sup>[17-18]</sup>。该文采用近年

来广泛应用的广义极值(GEV)分布拟合,即将极值 I 型(Gumbel 分布)、II 型(Fréchet 分布)和 III 型分布(Weibull 分布)统一到一个形式,风速的累积分布函数和概率密度分布(PDF)函数分别为

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (9)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \cdot \left[1 + \xi\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)\right]^{-1-1/\xi} \quad (10)$$

式中  $u, \sigma, \xi$  分别为位置、尺度、形状参数,尺度参数必须大于零,  $\sigma > 0$ ;  $x$  为极值风速度量。

对风向的圆周分布,目前应用较为广泛的是 von Mises 分布<sup>[17]</sup>:

$$f(y) = \frac{\exp[k \cos(y-k)]}{2\pi I_0(k)} \quad (11)$$

式中  $\mu$  为位置参数,  $-\pi < \mu \leq \pi$ ;  $k$  为刻度参数,  $k > 0$ ;  $I_0$  为零阶修正贝塞尔函数,计算式为

$$I_0(k) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[k \cos(y-\mu)] dy \quad (12)$$

实际应用中发现,极值风速风向  $\theta$  的概率密度分布(PDF)一般呈多峰值,单一 von Mises 分布无法完整描述风向圆周分布特性,通常采用多阶混合 von Mises 分布表示风向角变量的分布<sup>[19]</sup>:

$$f(y) = \sum_{i=1}^c (w_i f_i(y)) \quad (13)$$

式中  $c$  为混合 von Mises 分布的阶数,根据风向峰值分布特征确定;  $w_i$  为第  $i$  阶 von Mises 分布的权重值。

在雨强概率分布模型中,描述雨强概率密度分布时一般比较合适的有 GEV、Gamma 和指数分布<sup>[20]</sup>。为准确计算极值雨量的边缘分布,采用这 3 种模型拟合对比得到最优分布。

Gamma 分布的概率分布函数和概率密度函数分别为

$$F(z) = \frac{1}{\Gamma(b)} a^b \int_0^z t^{b-1} e^{-at} dt, z > 0 \quad (14)$$

$$f(z) = \frac{1}{\Gamma(b)} a^b z^{b-1} e^{-az}, z > 0 \quad (15)$$

其中,  $\Gamma$  为 Gamma 函数,记作  $Z \sim \Gamma(b, a)$ ,  $a$  为尺度参数,  $b$  为形状参数,且  $a > 0, b > 0$ 。

指数分布的概率分布函数和概率密度函数分别为

$$F(z) = 1 - \exp(-z/\lambda) \quad (16)$$

$$f(z) = \exp(-z/\lambda) / \lambda \quad (17)$$

其中,  $\lambda$  为  $z$  的期望,  $E(z) = \lambda, D(z) = \lambda^2$ 。

### 3.2 基于 Archimedean Copula 的风速、风向、雨量三维联合分布模型

风偏放电的 3 个影响参数的三维联合分布模型采用单参数三维 Archimedean Copulas 函数建立,相比较二维的 Copula 函数,三维的 Copula 函数构造较为困难<sup>[21]</sup>。常用的单参数三维 Archimedean Copula 函数有 4 种:Gumbel Copula、Clayton Copula、Frank Copula 和 AMH Copula 函数<sup>[22]</sup>,其分布函数形式和参数范围如表 2 所示,其中,  $C(u, v, w)$  为 Copula 函数,  $u, v, w$  均为变量的边缘分布函数,  $\theta$  为单参数三维 Archimedean Copula 函数的参数。

表 2 三维 Archimedean Copula 函数的种类

Table 2 Kinds of three dimensional Archimedean Copula function

函数名称	基本形式 $C(u, v, w)$	参数范围
Gumbel	$e^{-[(\ln u)^\theta + (\ln v)^\theta + (\ln w)^\theta]^{1/\theta}}$	$[1, \infty)$
Clayton	$\max[(u^{-\theta} + v^{-\theta} + w^{-\theta} - 2)^{-1/\theta}, 0]$	$[-1, \infty) / \{0\}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)(e^{-\theta w} - 1)}{(e^{-\theta} - 1)^2}\right]$	$(-\infty, \infty) / \{0\}$
AMH	$\frac{uvw}{1 - \theta(1-u)(1-v)(1-w)}$	$[-1, 1)$

针对上述 4 种 Copula 函数,可采用极大似然法对其进行参数估计并拟合优度评价指标进行检验,其拟合优度评价指标为均方根误差值(root mean squared error, RMSE)、最小信息准则值(akaike information criterion, AIC)以及偏差值 Bias, 指标数值越小,表明对应的 Copula 函数拟合优度越高<sup>[23]</sup>,由此选出最适合的风速( $x$ )、风向( $y$ )、雨量( $z$ )联合分布函数:

$$F(x, y, z) = P(X \leq x, Y \leq y, Z \leq z) = C(u, v, w) \quad (18)$$

式中  $u = F(x)$ ,  $v = F(y)$ ,  $w = F(z)$ 。进一步得到风速、风向、雨量的联合密度函数:

$$f(x, y, z) = c(F(x), F(y), F(z)) \cdot f(x) \cdot f(y) \cdot f(z) \quad (19)$$

其中,  $c(\cdot)$  为 Copula 的概率密度函数。

### 3.3 基于风速、风向、雨量联合分布的风偏放电故障率模型

输电线路设计规范对不同电压等级输电线路的安全间隙有着明确规定。在大风情况下,输电线路带电部分离铁塔的距离较近,容易发生风偏闪络。可以根据气象站提供的预测气象数据在线校核悬垂绝缘子串距离塔身的最小空气间隙是否小于允许的安全间隙,以其小于安全距离的概率作为输电线路风偏放电预警的判据。

基于风速、风向、雨量的联合概率分布,提出风偏跳闸概率的数学模型:

$$P = P(d < d_{\min}) = \iiint_{d(x, y, z) < d_{\min}} f(x, y, z) dx dy dz = \int_{d(x_0, y_0, z_0)}^{d_{\min}} f(x, y, z) dx dy dz \quad (20)$$

式中  $x_0, y_0, z_0$  分别为  $t$  时段预测的实时风速、风向、雨量数据; $d(x_0, y_0, z_0)$  为  $t$  时段计算得到的导线—杆塔最小空气间隙,由式(6)~(8)计算得到; $d_{\min}$  为该电压等级输电线路允许的最小空气间隙。

计算步骤:①整理风速、风向和雨量实测信息;②使用 Matlab 软件拟合最优的风速 PDF(概率密

度分布函数)、风向 PDF、雨量 PDF 模型参数,获得模型表达式;③使用 Matlab 软件拟合风速、风向、雨量的三维 Copula 函数的相关性系数,获得最优的三维联合分布表达式;④根据该文概率模型和常规模型计算在不同的风速及雨量等级下的风偏放电故障概率,分析比较结果;⑤获得实时的气象预测数据,编程计算实时风偏放电故障概率,进行故障重演。

## 4 仿真算例

基于中国广东省某市电网的实际故障情况对该文所提方法进行验证。该市供电局管辖的某 220 kV 输电线路于 2017 年 6 月 20 日 19:27 因风雨天气发生风偏跳闸,故障点为该线路 N 10 杆塔边相跳线。故障杆塔 N 10 及两侧线路的基本参数:杆塔所在地形为 B 类地形,杆塔型号为 SJC 2,呼高为 30 m,线路型号为 LGJX-2×240/30,绝缘子串型号 FXBW 4-220/100,水平和垂直档距分别为 420、22 m。假设“现在时刻” $t$  为 19:00,计算该杆塔在  $t$  之后的风偏故障情况。

JPDF 模型参数的计算数据为该市气象站 2006 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日 10 m 高度处的日最大风速值(10 min 平均时距)和相应的风向记录和每小时降雨量统计结果。

采用 Matlab 软件进行风速、风向、雨量的累计分布和概率密度函数各参数的拟合,并计算相关性系数,参数计算结果如表 3 所示,同时,绘出风速、风向和雨量的累计分布函数和概率密度函数曲线,并与各自实测分布曲线的拟合度进行对比,如图 3 所示。

由表 3 及图 3 可知,风速  $x$  服从 GEV 分布、风向  $y$  服从混合 von Mises 分布,雨量  $z$  的最优分布为 Gamma 分布,该文所选风速、风向和雨量的一维分布模型都是合理的。

采用 Matlab 软件用 Gumbel、Clayton、Frank 和 AMH 这 4 种三维 Archimedean Copula 函数对风速、风向、雨量的联合分布进行拟合,计算分布参

数和拟合优度评价指标 RMSE、AIC 和 Bias 值,如表 4 所示。

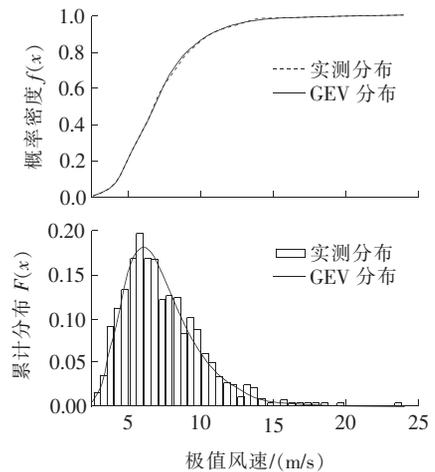
由表 4 可以看出风速、风向和雨量的 4 种 Copula 三维联合分布模型拟合结果:Clayton Copula 函数拟合的参数值不收敛;Gumbel Copula 和 AMH Copula 拟合的参数值不在规定的参数取值范围内;Frank Copula 函数的拟合的参数值符合参数范围。在 Gumbel、Clayton、Frank 和 AMH 这 4 种函数中,确定参数  $\theta = -1.1974$  的 Frank Copula 函数为影响风偏放电的三参数风速、风向和雨量三维联合分布模型。

基于该故障概率模型计算其故障杆塔在不同等级风速和降雨等级下的风偏闪络概率,以此分析不同降雨强度对输电线路 N 10 杆塔风偏放电的影响程度,如图 4 所示,可以看出不同降雨强度对输电线路风偏放电概率的影响程度。相同风速时降雨量越大,导致的风偏放电故障概率越大;同时,风速越大,降雨对输电线路风偏故障的影响越大,说明风速与雨量具有相关性。图 4 中还可明显看出,最不利情况下的风雨荷载导致的输电线路风偏放电概率较大。因此,降雨对输电线路风偏放电的影响不可忽视。

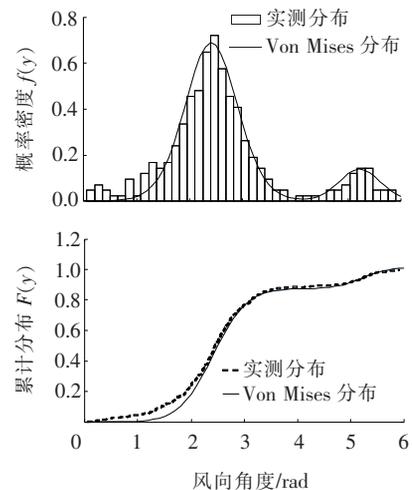
表 3 风速、风向、雨量的分布模型的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of distribution models of wind speed, wind direction and rainfall

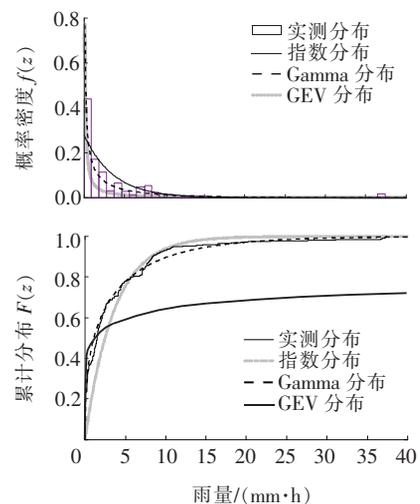
变量	分布形式	相应参数	相关系数	
			概率密度函数	累计分布函数
风速 ( $x$ )	GEV 分布	$\mu = -0.018,$ $\sigma = 2.008,$ $\kappa = 5.961$	0.993 8	0.999 3
		$c = 2,$ $\tau_1 = 0.889,$ $\mu_1 = 2.410,$ $k_1 = 4.192,$ $\tau_2 = 0.111,$ $\mu_2 = 5.216,$ $k_2 = 6.764$		
风向 ( $y$ )	混合 von Mises 分布	$\mu = -0.251,$ $\sigma = 1.287,$ $\kappa = 5.118$	0.980 2	0.999 3
雨量( $z$ )	GEV 分布	$\mu = -0.251,$ $\sigma = 1.287,$ $\kappa = 5.118$	0.874 5	0.965 3
	Gamma 分布	$a = 0.308,$ $b = 11.215$	0.984 0	0.987 8
	指数分布	$\lambda = 3.449$	0.897 5	0.991 9



(a) 极值风速分布



(b) 风向圆周分布情况



(c) 雨量分布情况

图 3 风速、风向和雨量的累计分布和概率密度函数曲线

Figure 3 Curve of cumulative density function and probability density function of wind speed, wind direction and rainfall

表 4 Gumbel、Clayton、Frank 和 AMH 函数的

参数估计值和拟合优度检验值

Table 4 Parameter estimation and goodness of fit test of Gumbel, Clayton, frank and AMH functions

Copula 函数名称	$\theta$	RMSE	AIC	Bias
Gumbel	0.992 1	0.086 2	-615.9	-147.2
Clayton	—	—	—	—
Frank	-1.197 4	0.047 7	-744.2	-77.4
AMH	1.377 9	0.062 2	-597.1	-158.9

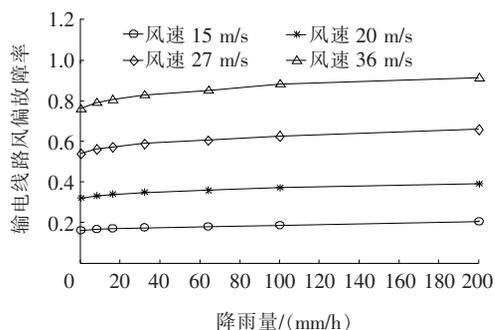


图 4 不同风雨等级下的输电线路风偏故障概率

Figure 4 Windage bias probability of transmission lines under different wind and rain levels

通过气象部门获取 2017 年 6 月 20 日当年 24 h 的气象站预测数据,进行风偏跳闸预警重演,气象部门每隔一小时预报下一小时的气象数据,6 月 20 日当天为强风雨天气,预测数据如图 5 所示。

根据式(20)和图 5 中的风速预测气象数据可得到 6 月 20 日当天杆塔 N 10 的风偏放电故障概率结果,利用该文模型和未考虑降雨因素的传统模型计算的故障概率结果如图 6 所示,杆塔 N 10 在 18:00—19:00 时段内的风偏放电最为突出,其概率超过 80%,24 h 内杆塔风偏概率与风速变化趋势基本一

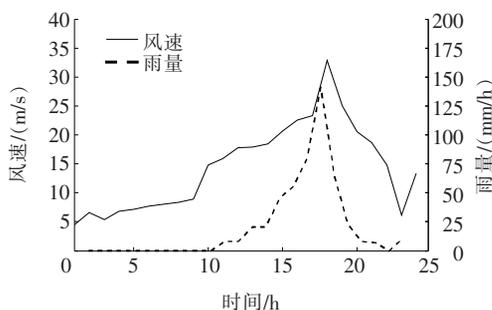


图 5 24 h 预报风速、雨量数据

Figure 5 24 h forecast wind speed and rainfall data

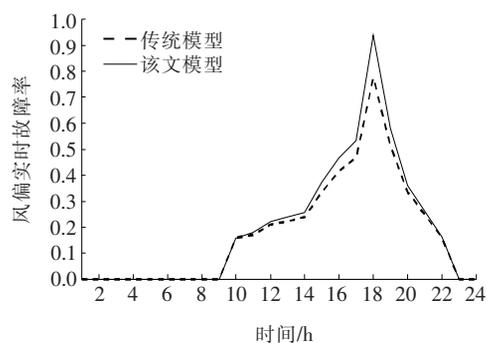


图 6 杆塔 N 10 预测故障概率随时间变化曲线

Figure 6 Prediction of failure probability of tower N 10 with time variation

致,和线路上实际故障情况(N 10 杆塔于 18:17 因风偏故障)相吻合。同时,由图 6 可明显看出,利用该文模型即考虑雨荷载时的故障概率相比较不考虑降雨因素的情况下故障概率更大。综上,该文所提方法可有效预测风雨天气下的风偏放电故障概率,具有可行性和准确性。

## 5 结语

针对现有风偏放电预警方法中因风向波动变化难以预测而直接采用最不利情况即风向与导线垂直,以及实际计算中较少考虑雨荷载对风偏的影响,造成计算结果偏离实际的问题,该文基于风速、风向、雨量的联合概率分布,建立了风雨荷载下输电线路风偏放电概率预测模型,得到结论如下。

1)近些年来,台风的强度也逐渐增大,降雨的强度也有逐渐增大的趋势。在风偏概率计算模型中,引入了降雨的环境要素,因此,可以及时的反映出由于环境变化引起的降雨量增大的趋势,预测结果也更接近实际情况。

2)采用 GEV 分布拟合极值风速分布、混合 von Mises 分布拟合风向分布、Gamma 分布拟合雨量分布,并采用适线法得到了影响风偏放电的参数风速、风向和雨量三维联合分布模型为  $\theta = -1.1974$  的 Frank Copula 函数。

3)基于风速、风向和雨量三维联合分布建立计算风偏放电故障概率预测模型,传统计算为了方便,

将风向定为与线路垂直,该文计算模型中采用实时预测风向,同时考虑风速风向相关性,计算结果更为精确。

4)与已有的风偏放电概率模型相比较,该文所提出风偏概率预测模型的计算结果更精确,该模型可为输电线路风偏故障率预测提供有价值的参考。

### 参考文献:

- [1] 张禹芳.我国 500 kV 输电线路风偏闪络分析[J]. 电网技术,2005,29(7):65-67.  
ZHANG Yufang. Analysis on flashover between tower and conducting wires in domestic 500 kV transmission lines caused by windage yaw[J]. Power System Technology,2005,29(7):65-67.
- [2] 龙立宏,胡毅,李景禄,等.输电线路风偏放电的影响因素研究[J]. 高电压技术,2006,32(4):19-21.  
LONG Lihong,HU Yi,LI Jinglu,et al. Research on the influencing factors of windage yaw in transmission lines [J]. High Voltage Engineering,2006,32(4): 19-21.
- [3] 王建.输电线路气象灾害风险分析与预警方法研[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [4] 黄新波,陶保震,赵隆,等.采用无线信号传输的输电线路导线风偏在线监测系统设计[J]. 高电压技术,2011,37(10):2350-2355.  
HUANG Xinbo,TAO Baozhen,ZHAO Long,et al. Design of transmission lines new wind deviation on-line monitoring system[J]. High Voltage Engineering,2011,37(10):2350-2355.
- [5] 康勇.基于 3G 网络的输电线路风偏在线监测系统[J]. 现代电子技术,2012,35(12):34-36.  
KANG Yong. 3G-based monitoring system for wind oscillation of high voltage transmission line[J]. Modern Electronic Technique,2012,35(12):34-36.
- [6] 曾勇斌,王星华,彭显刚,等.输电线路缺陷风险建模及其预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(10):91-98.  
ZENG Yongbin,WANG Xinghua,PENG Xiangang,et al. Research on risk modeling and forecasting method of transmission line defects[J]. Power System Protection and Control,2020,48(10):91-98.
- [7] 翁世杰.架空输电线路大风灾害预警方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [8] 陈强,王建,熊小伏,等.一种降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的监测与预警方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3):147-155.  
CHEN Qiang,WANG Jian,XIONG Xiaofu,et al. Monitoring and early warning method for transmission tower under rainfall-induced landslide disaster[J]. Power System Protection and Control,2020,48(3):147-155.
- [9] 唐斌,张胜峰,唐飞,等.输电线路冰害年故障率研究分析[J]. 电测与仪表,2020,57(17):29-33.  
TANG Bin,ZHANG Shengfeng,TANG Fei,et al. Research and analysis of annual fault rate of ice damage for transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(17):29-33.
- [10] 吴天京,代攀,闫晔,等.新一代智能输变电技术标准体系研究[J]. 供用电,2020,37(3):16-21.  
WU Tianjing,DAI Pan,YAN Ye,et al. Research on new generation technical standard system of smart transmission and transformation[J]. Distribution & Utilization,2020,37(3):16-21.
- [11] 路焕军.风振响应下塔—线体系的动力特性分析[J]. 电网与清洁能源,2020,36(11):39-44.  
LU Huanjun. Dynamic response analysis of tower-line system under wind-induced vibration[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(11):39-44.
- [12] GB 50545—2010.110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
- [13] FuXing,Li Hongnan,Li Gang,et al. Fragility analysis and estimation of collapse status for transmission tower subjected to wind and rain loads [J]. Structural Safety,2016,58:1-10.
- [14] 汤奕,徐香香,陈彬,等.降雨滑坡灾害对输电杆塔故障的时空强在线预警[J]. 中国电力,2020,53(1):56-65.  
TANG Yi,XU Xiangxiang,CHEN Bin,et al. Space-time-intensityonline early-warning of transmission tower faults by caused rainfall-induced landslides[J]. Electric Power,2020,53(1):56-65.
- [15] 吕中宾,白航,杨晓辉,等.某交流特高压线路风偏分析

- [J]. 高压电器, 2019, 55(1): 170-177.
- LV Zhongbin, BAI Hang, YANG Xiaohui, et al. Analysis of one UHVAC transmission line windage yaw[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 170-177.
- [16] 沈龙, 冯婷, 梁仕斌, 等. 输电线路绝缘子串偏角的光纤监测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 75-81.
- SHEN Long, FENG Ting, LIANG Shibing, et al. Research on the optical fiber monitoring for windage angle of transmission line insulator string[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 75-81.
- [17] 姚博, 全涌, 顾明, 等. 混合气候地区极值风速分析方法研究[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 86-92.
- YAO Bo, QUAN Yong, GU Ming, et al. Study on the analysis method of extreme wind speed in mixed climate areas[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5): 86-92.
- [18] 刘进, 肖宜, 李永龙, 等. 计及输电线路老化风险的电力系统快速预防控制模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 91-96+103.
- LIU Jin, XIAO Yi, LI Yonglong, et al. Fast preventive control model of power system considering risk of transmission line aging[J]. Smart Power, 2020, 48(12): 91-96+103.
- [19] Carta J A, Bueno C, Ramírez P. Statistical modelling of directional wind speeds using mixtures of von Mises distributions: Case study[J]. Energy Conversion & Management, 2008, 49(5): 897-907.
- [20] Erdem E, Shi J. Comparison of bivariate distribution construction approaches for analysing wind speed and direction data[J]. Wind Energy, 2011, 14(1): 27-41.
- [21] 段德默, 苗世洪, 霍雪松, 等. 基于动态 Copula 的风光联合出力建模及动态相关性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 35-42.
- DUAN Simo, MIAO Shihong, HUO Xuesong, et al. Modeling and dynamic correlation analysis of wind/solar power joint output based on dynamic Copula[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 35-42.
- [22] Li N, Liu X, Xie W, et al. The return period analysis of natural disasters with statistical modeling of bivariate joint probability distribution[J]. Risk Analysis, 2013, 33(1): 134.
- [23] Nelsen B. An introduction to copulas[M]. New York: Springer, 1999: 65-78.