

DOI: 10.7667/PSPC160022

电力微气象风偏灾害监测预警技术及系统实现

李震宇¹, 武国亮¹, 王志利¹, 尹晖², 周晓庆², 张晓鸣², 龚芳馨³

(1. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030000; 2. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079;
3. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 风偏灾害是影响输电线路安全运行的主要因素之一, 风偏灾害监测预警系统对线路安全运行至关重要。通过计算悬垂绝缘子串风偏角和绝缘子串底部至杆塔的最小空气间隙距离, 提出了基于最小空气间隙距离的风偏灾害预警方法。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, 使预警更加准确。最后, 通过C#编程搭建了风偏灾害预测预警系统平台, 并通过实例数据验证了系统的可行性和有效性。

关键词: 微气象; 风偏灾害; 监测预警; 输电线路; C#; 系统软件

Windage yaw disaster monitoring and early warning technology based on power micrometeorological and system implementation

LI Zhenyu¹, WU Guoliang¹, WANG Zhili¹, YIN Hui², ZHOU Xiaoqing², ZHANG Xiaoming², GONG Fangxin³

(1. Shanxi Electric Power Corporation, Taiyuan 030000, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Windage yaw disaster is one of the main factors affecting the safe operation of transmission lines, and the monitoring and forewarning system of the windage yaw disaster plays an important role in the safe operation of transmission lines. This paper proposes forewarning method of windage yaw disaster based on the minimum air clearance distance, after calculating the windage yaw angle of suspension insulator string and the minimum air clearance distance from the bottom of insulator string to tower body. Considering the influence of micrometeorological factors of windage yaw, four different mathematical models are proposed to predict the windage yaw angle, thus the forewarning is more accurate. Finally, the system platform for windage yaw disaster forecasting and forewarning system is established by C#, and the feasibility and validity of the system are verified by examples.

Key words: micrometeorological; windage yaw disaster; monitoring and early warning; transmission line; C#; software of system

0 引言

我国输电线路覆盖面积广、输送距离长, 线路途经地区地形复杂, 气象变化显著, 微气象特点突出^[1-2]。由于线路沿线的山谷、风口、河流、采空区等特殊地形区的微气象状况, 导致线路存在覆冰、风偏、舞动、污闪、雷击等事故隐患^[3]。电力微气象灾害已成为电网系统稳定的严重威胁。

风偏是指架空输电线受风力的作用偏离其垂直位置的现象, 包括跳线风偏、相间风偏和绝缘子串

风偏, 跳线风偏是指转角塔跳线受到大风影响, 使跳线与转角塔的距离缩短, 形成跳线放电; 相间风偏是指强风条件下, 导线之间的电气距离缩短, 使不同相导线间放电; 绝缘子串风偏是指在风力作用下, 绝缘子串相对于杆塔发生倾斜, 使绝缘子串底端悬挂的导线与杆塔间的空气间隙距离变小而发生放电。其中, 绝缘子串风偏是造成风偏跳闸事故的主要因素, 其直接原因是悬垂绝缘子串的风偏角过大, 使绝缘子串下端带电体与杆塔之间的空气间隙减小, 当此间隙的电气强度不能承受系统运行电压时就会发生放电现象。

风偏闪络事故是电网正常运行的重大安全隐患, 且线路因风偏闪络跳闸后重合闸不易成功, 严

重影响了电力系统的安全稳定运行，给电力系统造成了巨大的经济损失^[4-6]。根据山西省 2007~2011 年输电线路跳闸的故障统计，220 kV 及以上输电线路总跳闸次数为 300 余次，其中线路因为风偏故障跳闸次数多达 30 余次，约占线路总跳闸次数的 10%，其中 2010 年我国北方出现强风和沙尘暴天气，局部瞬时风力达到 11 级以上，受此影响，山西电网 220 kV 及以上输电线路发生风偏跳闸多达 20 余次。因此，全面分析电网风偏故障的原因、特点及形成机理，研究线路设计参数取值、微地形及气象条件对风偏跳闸的影响，对提高电网的安全运行和线路杆塔设计水平具有重要的工程实际意义和技术经济效益。

由于某些构造特征(如微地形)所引起的小范围气象要素(温度、湿度、风速风向、气压、雨雪量等)的改变，不至于使大尺度过程(平流、锋面)所决定的天气气候特征发生较大变化，气象部门不能对这些狭小地带的气候情况及时监测和播报，但这些微气象信息对电网安全运行具有重要作用，因此，开展电力微气象深入研究，建设电网微气象灾害监测预警系统对维护电网运行安全至关重要。

1 线路风偏故障的成因分析^[6-10]

1.1 气象因素

恶劣气象条件是风偏放电的最直接原因，对风偏的影响主要表现在以下两个方面。

(1) 风速风向的影响

对于风偏闪络的发生，风速大小起主导作用，风速的大小直接影响风力对输电线路作用力的大小，风速越大，越易使输电线路发生倾斜，绝缘子串的风偏角越大，当风向是沿着导线—杆塔方向时，绝缘间隙距离会减小，更易发生风偏闪络，当线路附近的气象站测得风速超过最大设计风速，风攻角超过 45° 时，风偏跳闸极易发生。根据各地气象部门资料和现场查询，2009 年末 2010 年初山西省出现了大风降温、降雨雪突发性异常气象情况，发生风偏故障的区域均出现了少有的强风，瞬时风速可大于 30 m/s。因此，突发恶劣气象情况中的强风是线路跳闸的直接原因，通过对其他线路故障点的风偏验算也印证了这一点。

(2) 气压、气温、湿度的影响

空气间隙绝缘强度受气压、气温、湿度的影响，若空气间隙绝缘强度减小，则更易发生风偏闪络。例如，夏季大风时常常伴有暴雨，雨水在强风的作用下，可能沿着放电路径方向成线状分布，使得空气间隙的工频耐受电压进一步降低，从而增加了风偏闪络事故发生的可能。

1.2 微地形和微气象因素

杆塔所处的地理位置也是风偏跳闸的重要影响因素。当输电杆塔位于峡谷交汇处、具有狭管效应的漏斗形底附近、山顶突出上行风位置等典型的微地形、微气象区域时，由于受近地面地貌等因素的影响，使输电线路周围的微气象要素(风速、风向、气压、温度、湿度等)改变，这种改变虽然不会使天气气候特征发生较大改变，但会瞬间改变小区域内的风速、风向，致使风力明显增大，导致绝缘子串的风偏角增大，大大提高了风偏跳闸发生的机率。通过对山西电网风偏跳闸情况进行统计分析可知，山西电网风偏跳闸主要集中在吕梁、阳泉、长治山区、忻州盘道梁、庙岭梁山区等地形复杂区域，以忻州地区风偏跳闸最为突出。

1.3 线路本体设计因素

输电线路抵御强风的能力不足是造成风偏放电的内在原因。部分线路建造年代早，线路各种参数的设计裕度小，特别是在易于产生强风的某些微地形区，由于差异化设计不到位导致输电线路抵御强风的能力不足。

2 风偏灾害预警预测技术

2.1 基于最小空气间隙的风偏预警模型

我国电力行业中普遍采用刚性静力学模型(刚性直棒法)^[9-11]进行风偏角计算，考虑的风向一般为水平吹向导线，如果风向与水平面有夹角 β 时，则需要对相应的模型进行修正^[12]。风向 β 的竖直分量向下时，风偏角减小，危险性降低；因此只考虑风向 β 的竖直分量向上时的情况，此时缘子串的受力分析如图 1 所示。

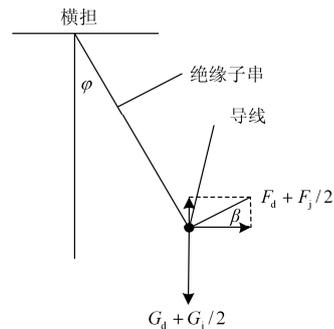


图 1 绝缘子串和导线受力分析图

Fig. 1 Force diagram of insulator string and conductor

此时的风偏角为^[12]

$$\tan \varphi = \frac{(F_d + F_j / 2) \cos \beta}{G_d + G_j / 2 - (F_d + F_j / 2) \sin \beta}$$

$$\text{即 } \varphi = \arctan\left(\frac{(F_d + F_j/2)\cos\beta}{G_d + G_j/2 - (F_d + F_j/2)\sin\beta}\right) \quad (1)$$

式中: $F_d = \alpha K_h \mu_{sc} S W_0 \sin^2 \theta$ 为垂直于导线方向的水平风荷载, N; $F_j = 9.80665 A v^2 / 16$ 为绝缘子串风荷载, N; G_d 为导线垂直荷载, N; G_j 为绝缘子串重力, N; α 为风压不均匀系数; K_h 为风压高度变化系数; μ_{sc} 为导线体型系数; S 为导线受风面积(线长×直径), m^2 ; W_0 为基准风压, kN/m^2 ; θ 为风向与导线轴向的夹角, ($^\circ$); A 为绝缘子串受风面积, m^2 ; v 为导线上的风速, m/s 。

风偏时绝缘子串和导线向杆塔倾斜, 如图 2 所示为风偏时最小空气间隙模型。此时, 最小空气间隙计算公式为^[13]

$$d = \frac{|(m+n-l\sin\varphi)\tan\eta - l\cos\varphi - n\tan\eta|}{\sqrt{1+\tan^2\eta}} \quad (2)$$

式中: η 是横担和杆塔主材之间的夹角; φ 是绝缘子串的风偏角, ($^\circ$); d 是导线与杆塔主材的最小空气间隙距离; l 是绝缘子串的总长度; m 是横担长度; n 是悬挂点到杆塔垂直中心线的距离, m 。

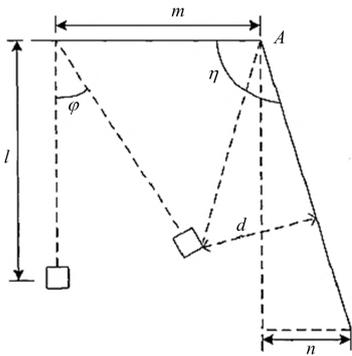


图 2 最小空气间隙示意图
Fig. 2 Minimum air gap schematic

在获得悬垂绝缘子串的相关参数和给定杆塔上导线的型号, 利用式(1), 通过编程即可计算出相应的风偏角的大小, 由计算得到的风偏角值, 再根据实际塔头的尺寸, 根据式(2)可以计算出不同塔型在不同风偏角下的最小空气间隙距离, 即计算出特定塔型在实际外界气象条件下的间隙距离。综合电力微气象要素等影响, 并根据电气强度判断是否会发生风偏故障。如表 1 为根据计算的最小空气间隙距离 d 和《规范》^[14] 允许的最小间隙距离 L 设置的风偏三级预警机制。

不同工频标称电压下带电部分与杆塔构件间的允许最小间隙距离 L 如表 2 所示。

表 1 风偏的三级预警机制

d 与 L 关系	预警等级
$d < 0.9L$	1 级(红色)预警
$0.9L \leq d < L$	2 级(橙色)预警
$L \leq d < 1.1L$	3 级(黄色)预警
$1.1L \leq d$	不预警

表 2 不同电压下的最小间隙距离^[14]

标称电压/kV	110	220	330	500
工频电压下的最小间隙 L/m	0.25	0.55	0.90	1.20 1.30

2.2 基于微气象因子的风偏角预测模型

随着网络通信、电子传感、信号处理等技术的发展, 输电线路灾害在线监测系统成为输电工程安全运营的有力保障^[15-19]。风偏在线监测系统可以实时监测绝缘子串的风偏角, 也可以监测输电线路周围环境的气象参数。因此, 根据输电线路微气象监测系统所采集到的气象要素如温度、湿度、风速、风向、气压等影响因素, 就可以建立风偏角与其影响因素的因果关系模型。

2.2.1 线性回归模型

研究一个变量与一个或多个因子之间相关关系的最基本方法是线性回归分析模型, 设 $Y = \{y(1), y(2), \dots, y(n)\}$ 为风偏角数据序列, $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 为影响风偏角的气象要素数据序列, m 表示气象要素的数量, n 表示在线监测装置实时监测风偏角以及气象因子的数据长度。则风偏角与其影响要素的回归分析模型为

$$y(k) = a_1 x_1(k) + a_2 x_2(k) + \dots + a_m x_m(k) + b \quad (3)$$

式中: m 表示影响要素数量; a_1, a_2, \dots, a_m 表示各要素的影响系数; b 称为截距。

当 $k = 1, 2, \dots, n$ 时, 模型式(3)用矩阵表示为

$$L = Ba \quad (4)$$

式中:

$$L = [y(1), y(2), \dots, y(n)]^T; \quad a = [a_1, a_2, \dots, a_m, b]^T;$$

$$B = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_m(1) & 1 \\ x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_m(2) & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ x_1(n) & x_2(n) & \dots & x_m(n) & 1 \end{bmatrix}$$

由最小二乘原理可求得 a 的估值 $\hat{a} =$

$$[\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m, \hat{b}]^T \text{ 为}$$

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (5)$$

将求得的模型参数代入式(3), 得到线性回归方程的预测式为

$$\hat{y}(k) = \hat{a}_1 x_1(k) + \hat{a}_2 x_2(k) + \cdots + \hat{a}_m x_m(k) + \hat{b} \quad (6)$$

2.2.2 GM(1, N)模型

考虑风偏角与影响因子可能存在的非线性关系, 采用 GM(1, N)模型建立风偏角与影响因子之间的关系。根据灰色系统理论^[20-21], 设 $Y^{(0)} = \{y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(n)\}$ 为风偏角数据序列; $X_i^{(0)} = \{x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), \dots, x_i^{(0)}(n)\}$ ($i=1, 2, \dots, m$) 为气象要素序列。记 $X_i^{(1)} = \{x_i^{(1)}(1), x_i^{(1)}(2), \dots, x_i^{(1)}(n)\}$ 和 $Y^{(1)} = \{y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n)\}$ 分别为 $X_i^{(0)}$ 和 $Y^{(0)}$ 的一次累加生成序列, 其中, $x_i^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x_i^{(0)}(j)$, $y^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k y^{(0)}(j)$, $k=1, 2, \dots, n$ 。

则风偏角与其影响要素的 GM(1, N)模型^[20-21]为

$$y^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b_1 x_1^{(1)}(k) + b_2 x_2^{(1)}(k) + \cdots + b_m x_m^{(1)}(k) \quad (7)$$

其中: $z^{(1)}(k) = (y^{(1)}(k) + y^{(1)}(k-1))/2$; $k=2, 3, \dots, n$ 。

当 $k=2, 3, \dots, n$ 时, 可采用最小二乘法求得模型参数 $\hat{a} = [\hat{a}, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_m]^T$ 为

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (8)$$

式中:

$$L = \begin{bmatrix} y^{(1)}(2) \\ y^{(1)}(3) \\ \vdots \\ y^{(1)}(n) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & x_1^{(1)}(2) & \cdots & x_m^{(1)}(2) \\ -z^{(1)}(3) & x_1^{(1)}(3) & \cdots & x_m^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & x_1^{(1)}(n) & \cdots & x_m^{(1)}(n) \end{bmatrix}。$$

在求得模型参数值后, 进一步求得一次累加序列的近似时间相应式^[20-21]为

$$\hat{y}^{(1)}(k) = (y^{(1)}(1) - \frac{1}{\hat{a}} \sum_{i=1}^m \hat{b}_i x_i^{(1)}(k)) e^{-\hat{a}(k-1)} + \frac{1}{\hat{a}} \sum_{i=1}^m \hat{b}_i x_i^{(1)}(k) \quad (9)$$

对 $\hat{y}^{(1)}(k)$ 作一次累减还原处理, 得到原始序列的预测式为

$$\hat{y}^{(0)}(k) = \begin{cases} \hat{y}^{(1)}(k) - \hat{y}^{(1)}(k-1) & k > 1 \\ y^{(0)}(k) & k = 1 \end{cases} \quad (10)$$

2.2.3 GM(0, N)模型

GM(0, N)模型与一般的多元线性回归模型类似, 区别在于一般的多元线性回归建模是以原始数据序列为基础进行建模, 而 GM(0, N)则是以原始数据的一阶累加生成序列为基础进行建模。其模型式为

$$y^{(1)}(k) = b_1 x_1^{(1)}(k) + b_2 x_2^{(1)}(k) + \cdots + b_m x_m^{(1)}(k) + a \quad (11)$$

式中, 各参数和变量的定义与 2.2.2 节相同。

参数 $\hat{a} = [\hat{a}, \hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_m]^T$ 的解与式(3)相似, 在此直接给出模型的预测式:

$$\hat{y}^{(0)}(k) = \begin{cases} \hat{y}^{(1)}(k) - \hat{y}^{(1)}(k-1) & k > 1 \\ y^{(0)}(1) & k = 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\hat{y}^{(1)}(k) = \hat{b}_1 x_1^{(1)}(k) + \hat{b}_2 x_2^{(1)}(k) + \cdots + \hat{b}_m x_m^{(1)}(k) + \hat{a}$ 。

2.3 基于在线监测风偏角的预测模型

根据灰色理论基础^[16-17], 设风偏角原始序列为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, 其中 $x^{(0)}(k) \geq 0$, $k=1, 2, \dots, n$; 称 $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$ 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加生成序列, 其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$, $k=1, 2, \dots, n$; 称 $Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列, 其中 $z^{(1)}(k) = (x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1))/2$, $k=2, 3, \dots, n$ 。则 GM(1,1)模型的微分方程^[20-21]为

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (13)$$

为方便求解模型参数, GM(1,1)模型的均值形式为^[20-21]

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (14)$$

当 $k=2, 3, \dots, n$ 时, 用最小二乘法求得参数

$$\hat{a} = [\hat{a}, \hat{b}]^T$$

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (15)$$

式中: $L = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$;

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & -z^{(1)}(3) & \cdots & -z^{(1)}(n) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}。$$

将求得的参数 \hat{a}, \hat{b} 代入式(13), 求得序列 $X^{(1)}$ 的预测方程为

$$\hat{x}^{(1)}(k) = (x^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}}) e^{-\hat{a}(k-1)} + \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \quad (16)$$

对 $\hat{x}^{(1)}(k)$ 作累减生成, 得还原式

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \begin{cases} (1 - e^{-\hat{a}})(x^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}}) e^{-\hat{a}(k-1)} & k > 1 \\ x^{(0)}(1) & k = 1 \end{cases} \quad (17)$$

式(16)为风偏角 GM(1,1)模型的预测式。

在获取风偏角和微气象数据后, 选取合适的预测模型对风偏角进行预测, 得到风偏角的预测值后, 按照式(2)求得最小空气间隙距离, 依据表 1 中最小空气间隙距离 d 和《规范》允许的最小间隙距离 L 之间的关系确定风偏灾害预警等级, 从而达到对风

偏灾害预测预警的目的。

3 系统软件平台及功能介绍

3.1 平台搭建

利用 C#搭建的系统平台如图 3 所示。平台界面主要为菜单栏, 包括风偏数据计算功能、风偏数据分析功能和程序退出功能。



图 3 风偏灾害监测预警系统平台

Fig. 3 Windage yaw disaster monitoring and warning system platform

3.2 风偏数据计算功能

风偏角的计算采用刚性静力学模型的修正模型计算, 计算中所需要的基本数据和各项参数(影响因素), 分别采用读取 Access 数据库和 Windows Form 窗体输入的方式获取。计算后的风偏角数据将会保存至风偏角数据库中, 以便对风偏角数据的分析。获取基本数据和相关参数的程序界面分别如图 4、图 5 所示。

风偏数据计算界面如图 6 所示。界面菜单包括获取数据、设置、计算处理、保存数据和退出五个子菜单命令。获取数据菜单主要实现数据的获取(如图 4); 设置菜单主要实现各种参数设置, 包括参数



图 4 获取数据界面

Fig. 4 Interface of getting data



图 5 设置参数界面

Fig. 5 Interface set parameter

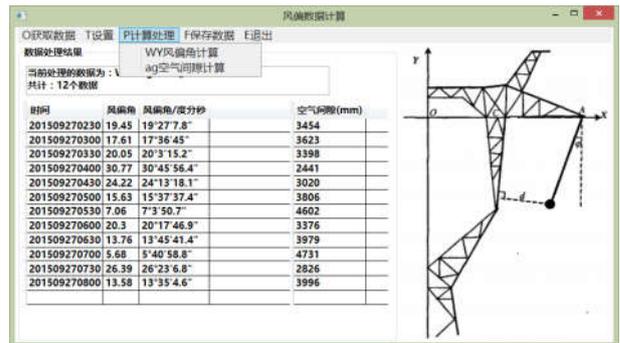


图 6 风偏数据计算结果

Fig. 6 Results of data calculated

设置和精度设置(如图 5); 计算处理菜单主要实现了风偏角的计算和最小空气间隙的计算功能, 其计算结果将显示在界面的数据显示栏中(如图 6)。

3.3 风偏数据分析

风偏数据分析界面如图 7 所示, 主要包括数据的建模和预测。图 7 给出了 GM(0, N)模型对风偏角与相关影响因素(风向、风速、相对湿度、气压、温度)建模分析和预测的结果。



图 7 数据分析

Fig. 7 Data analysis

4 结语

本文在分析风偏灾害影响因素的基础上, 以微

气象数据为基础资料，建立了电力微气象风偏灾害监测与预警技术，并利用 C#编程语言开发了电力微气象灾害监测与预警系统软件。电力微气象灾害监测与预警系统既能够通过获取的电力微气象要素数据求解悬垂绝缘子串的风偏角和最小空气间隙距离，还可以根据风偏在线监测系统采集的风偏角数据和微气象数据进行数据分析，能够根据已获取数据的不同，选择不同预警模型对数据分析，以达到对风偏灾害的预测预警。

参考文献

[1] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施 [J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.
 HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3491-3499.

[2] 包博, 程韧俐, 熊小伏, 等. 一种计及微地形修正的输电线路台风风险预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 79-86.
 BAO Bo, CHENG Renli, XIONG Xiaofu, et al. A typhoon risk early warning method for power transmission line considering micro-terrain correction[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 79-86.

[3] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.
 HU Yi. Analysis on operation faults of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 1-8.

[4] 刘小会, 严波, 林雪松, 等. 500 kV 超高压输电线路风偏数值模拟研究[J]. 工程力学, 2009, 36(1): 244-249.
 LIU Xiaohui, YAN Bo, LIN Xuesong, et al. Numerical simulation of windage yaw of 500 kV UHV transmission lines[J]. Engineering Mechanics, 2009, 36(1): 244-249.

[5] 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, 73.
 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, 73.

[6] 孙宝强, 侯镭, 孟晓波, 等. 不同风速下导线风偏动力响应分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2808-2813.
 SUN Baoqiang, HOU Lei, MENG Xiaobo, et al. Characteristics analysis of conductors diaplacement under different wind speeds[J]. High Voltage Engineering,

2010, 36(11): 2808-2813.

[7] 邵瑰玮, 耿翠英, 胡毅. 国内外输电线路风偏设计参数比较与分析 [J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 3106-3110.
 SHAO Guiwei, GENG Cuiying, HU Yi. Analysis on the parameters of windage yaw design in the world[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 3106-3110.

[8] 胡毅. 500 kV 输电线路风偏跳闸的分析研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 9-10.
 HU Yi. Study on trip caused by windage yaw of 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 9-10.

[9] 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. Study on windage yaw discharge of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 19-21.

[10] 王声学, 吴广宁, 范建斌, 等. 500 kV 输电线路悬垂绝缘子串风偏角闪络的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 65-69.
 WANG Shengxue, WU Guangning, FAN Jianbin, et al. Study on flashover of suspension insulator string caused by windage yaw in 500 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 65-69.

[11] 李黎, 肖林海, 罗先国, 等. 特高压绝缘子串的风偏计算方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 2924-2932.
 LI Li, XIAO Linhai, LUO Xianguo, et al. Windage yaw calculation method of UHV insulator string[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2924-2932.

[12] 龙立宏, 胡毅, 李景禄, 等. 风向与水平面夹角对风偏计算影响的研究[C]. 2006.

[13] 张艳玲. 高压输电线路绝缘子串风偏计算模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.

[14] 中国电力企业联合会. GB 50545-2010 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
 China Electricity Council. GB 50545-2010 code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.

[15] 黄新波, 陶保震, 赵隆, 等. 采用无线电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.

- [16] 熊小伏, 翁世杰, 王建, 等. 考虑降雨修正的干子型耐张塔跳线风偏放电在线预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 136-143.
XIONG Xiaofu, WENG Shijie, WANG Jian, et al. An online early warning method for windage yaw discharge of jumper towards "JG" type strain tower considering corrected by rainfall[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 136-143.
- [17] 胡志坚, 李洪江, 文习山, 等. 基于差分GPS的输电线路舞动和风偏在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 120-124.
HU Zhijian, LI Hongjiang, WEN Xishan, et al. Online monitoring of transmission conductor wave and wind gallop based on differential GPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 120-124.
- [18] 黄宵宁, 许瑞, 许家浩. 南方山区线路覆冰在线监测数据特征分析与预测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 111-116.
HUANG Xiaoning, XU Rui, XU Jiahao. Analysis of the characteristics for on-line monitoring data and research of the forecast model of the line icing in southern mountain area[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 111-116.
- [19] 周伟才, 谭卫成. 高压架空输电线路视频在线监测系统研究[J]. 广东电力, 2011, 24(7): 41-44.
ZHOU Weicai, TAN Weicheng. Research on on-line video surveillance system of overhead HV transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(7): 41-44.
- [20] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [21] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

收稿日期: 2016-01-06; 修回日期: 2016-03-15

作者简介:

李震宇(1971-), 男, 本科, 高工, 主要从事输电线路运维检修管理研究; E-mail: lzy710312@sohu.com

尹晖(1962-), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事空间信息处理理论和方法研究。E-mail: hyin@sgg.whu.edu.cn

(编辑 姜新丽)