

# 考虑降雨修正的干字型耐张塔跳线风偏放电在线预警方法

熊小伏<sup>1</sup>, 翁世杰<sup>1</sup>, 王建<sup>1</sup>, 李哲<sup>2</sup>, 梁允<sup>2</sup>

(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. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 近年来, 输电线路屡次发生风偏放电事故, 已严重影响到电力系统的安全可靠运行。由于防风偏措施代价昂贵、实施困难等因素, 导致风偏放电事故难以避免。因此从运行角度出发提出一种基于气象信息的耐张塔风偏放电的在线预警方法。针对较常见、易发生风偏放电的干字型耐张塔, 结合精细化气象预报信息, 计算悬垂绝缘子串的风偏角, 然后通过引入杆塔的二维笛卡尔坐标系得到中相跳线以及边相跳线与杆塔最小间隙的解析计算式, 再与规程规定的允许最小间隙进行比较, 得到预警结果。考虑到降雨会使间隙放电电压降低, 引入降雨影响系数来修正规定的允许最小间隙以使预警更加准确。最后, 通过实例分析验证了该方法的可行性和精确性。

**关键词:** 风偏放电; 气象信息; 干字型耐张塔; 在线预警; 降雨

## An online early warning method for windage yaw discharge of jumper towards “JG” type strain tower considering corrected by rainfall

XIONG Xiaofu<sup>1</sup>, WENG Shijie<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>2</sup>, LIANG Yun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Electric Power Research Institute,

State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In recent years, accidents of windage yaw discharge occur on transmission lines frequently, and have seriously affected on security and reliability of the power system. Because the prevention measures of windage yaw are expensive and hard to implement and other factors, it is hard to avoid the accident of windage yaw discharge. An online early warning method based on meteorological information for windage yaw discharge of strain tower is proposed from the perspective of operation. This paper aims at the “JG” type strain tower which is common and prone to raise accident of windage yaw discharge. Making use of refined meteorological forecasting information, the windage yaw angle of suspension insulator string is calculated, and then the analytical equation to calculate minimum clearance from center-phase jumper and side-phase jumper to tower body is obtained through leading two dimensional Descartes coordinate system into tower model, and then the comparison with permissible minimum clearance is conducted to get warning results. Moreover, considering that the rain will reduce the discharge voltage of clearance, the influence coefficient of rainfall is introduced to revise the permissible minimum clearance to make the warning more accurate. Finally, the feasibility and accuracy of the proposed method are verified by instance analysis.

**Key words:** windage yaw discharge; meteorological information; “JG” type strain tower; online early warning; rainfall

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)05-0136-08

## 0 引言

在强风或飏线风的作用下, 绝缘子串向杆塔方向倾斜, 减小了导线与杆塔的空气间隙, 当距离不能满足绝缘强度要求时就会发生放电, 称为风偏放电<sup>[1]</sup>。输电线路风偏跳闸是影响电能安全

可靠供应的主要原因之一。由于风偏跳闸是在强风天气或微地形地区产生飏线风的条件下发生的, 风的持续时间往往超过重合闸动作时限, 使得重合闸动作时放电间隙仍然保持较小的距离; 同时, 重合闸动作时, 系统中将出现一定幅值的操作过电压, 导致间隙再次放电, 并且第2次放

电在较大的间隙就有可能发生。因此,与雷击等其他原因引起的跳闸相比,线路发生风偏跳闸时重合闸成功率较低,严重影响了供电可靠性。

经统计<sup>[2]</sup>,发生风偏跳闸的主要方式是线路对杆塔放电,其中主要塔型为耐张塔。虽然在输电线路使用杆塔中,耐张塔所占的比例仅为5%~20%,然而其对塔身的风偏闪络次数却很高。由此可见,解决好耐张塔的风偏放电问题就能从很大程度上减少输电线路风偏跳闸事故,有利于保障电网的安全可靠运行。

对于风偏放电,国内外的研究主要集中在风偏放电的分析上,解决了悬垂绝缘子串风偏角的计算问题,探讨了设计规范的不足及其改进方法,提出了风偏放电的治理措施,但缺少对线路风偏放电,尤其是耐张塔跳线风偏放电的预警研究。文献[3-4]介绍了用于计算悬垂绝缘子串风偏角的弦多边形法和刚体直杆法,刚体直杆法方法简单,但精度稍差,相较而言弦多边形法更加精确,但计算复杂。文献[5]采用图解法对220 kV猫头型直线塔风偏放电进行了分析计算,该方法较为复杂,适合人工进行事故原因分析,不适用于计算机自动分析。文献[6]提出一种直线塔悬垂绝缘子串的最大风偏角修正方法,并通过引入杆塔模型的笛卡尔坐标系得出了500 kV酒杯塔最小空气间隙的解析计算式。文献[7]对某110 kV干字型耐张塔跳线风偏放电过程进行了分析,但并未给出跳线与塔身间隙的具体计算方法。文献[8]给出了风偏状态下导线到建筑物的最小空气间隙计算式,并给出算例。文献[9-10]对耐张塔跳线风偏放电的原因进行了探讨分析,并给出了具体的治理措施:如采用延长金具加绝缘子的形式、新加工跳线支架形成跳线串独立双挂点、加装重锤或加装氟硅橡胶导线护套使跳线绝缘等。

从上述风偏治理措施来看,或要求改变杆塔构件结构,或要求加装绝缘子串和重锤,目前很难完全实现,而且仅依靠一次系统投资来抵御大风引起的风偏放电既不经济也不合理,还必须与二次系统的安全评估及预警理论体系和停电防御系统的优化相结合<sup>[11-15]</sup>。若能对线路风偏放电进行在线预警,则可为电网运行人员提供科学的决策依据,提前采取避险措施,从而降低甚至消除风偏跳闸对系统运行和供电可靠性的影响。

本文对最常用的干字型耐张塔结构进行了具体的分析,提出了一种利用气象信息对耐张塔跳线风偏放电情况进行预警的思路,并分别建立了干字型塔中相跳线和边相跳线对塔身风偏放电的在线预警模型。本方法可为电网运行调度人员提供科学的技术支撑,提前做好有针对性的预防控制措施以及紧急控制和校正控制预案,力求将大风灾害的影响减到最低。这对加强电网的分析和防御停电水平,保障输电线路大通道的安全稳定送电,提升电网适应日趋频繁的气象灾害的能力,都具有极其重要的意义。

## 1 风偏放电机理及在线预警系统

### 1.1 风偏放电机理分析

线路发生风偏跳闸的本质原因是在大气环境中出现的各种不利条件(如强风、降雨等),造成线路与杆塔间的空气间隙减小,当间隙的绝缘强度不能承受系统运行电压时就会发生击穿放电。

间隙的绝缘强度依据规定可以通过允许的最小间隙距离 $L$ 表示,而输电线路在风偏状态下至塔身的最小距离 $x$ 可以通过悬垂绝缘子串的风偏角 $\theta$ 及杆塔结构参数计算得到。

悬垂绝缘子串风偏角与其所受的侧向风速正相关,风速越大,风偏角越大,线路至塔身的最小距离 $x$ 也就越小。降雨强度对允许的最小间隙距离 $L$ 有影响,特别是在暴雨情况下,雨水在大风的引导下很可能形成与放电方向相同的雨线,而雨水的介电常数比空气的大很多(约为80:1),使得放电间隙中雨滴颗粒附近的电场增强,导致空气间隙放电电压降低。

可见,风偏放电主要与风速、降雨强度这两个气象参数有关,同时还与线路和杆塔的具体结构参数紧密相关。

### 1.2 风偏放电在线预警系统

风偏放电在线预警就是要根据杆塔结构、线路参数和预测风速等数据,计算出杆塔悬垂绝缘子串的风偏角 $\theta$ ,并进一步计算耐张塔跳线至塔身的最小间隙距离 $x$ ;再根据其与规程规定的允许最小间隙距离 $L$ 的关系,按由工程经验制定的表1进行预警等级判断。若出现预警,则发出报警信号并给出相应的预警信息。

由于杆塔形式各异,更有特殊杆塔存在,因此本文仅针对最常见的、较易发生风偏的干字型耐张塔跳线对塔身风偏放电进行预警。对于其他类型杆塔,采用同样的原理,进行单独计算即可。

表 1 预警等级判定表

$x$ 与 $L$ 关系	预警等级
$x < 0.9L$	I 级预警
$0.9L \leq x < L$	II 级预警
$L \leq x < 1.1L$	III 级预警
$1.1L \leq x$	安全

风偏放电在线预警系统的流程原理图如图 1 所示。

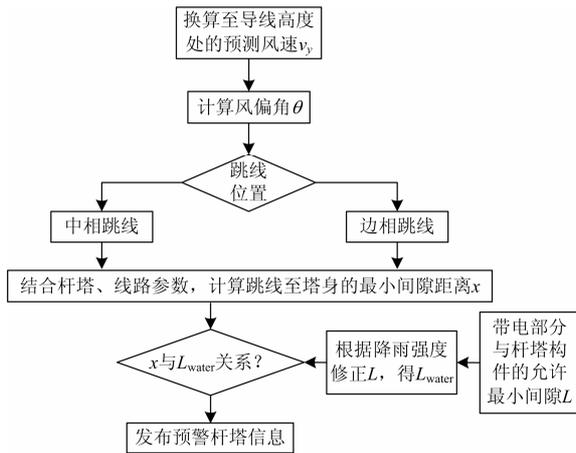


图 1 风偏放电在线预警系统流程图

Fig. 1 Flow diagram of online early warning system of wind yaw discharge

预警的特征指标为: 杆塔结构参数, 绝缘子串参数, 导线参数, 预测风速和预测降雨强度。

预警的计算指标为: 耐张塔跳线悬垂绝缘子串的风偏角  $\theta$ , 跳线风偏下至塔身的最小距离  $x$ 。

预警的结果指标为: 安全、III 级预警(一般)、II 级预警(严重)和 I 级预警(特别严重)。

## 2 耐张塔跳线风偏放电在线预警模型

### 2.1 悬垂绝缘子串风偏角计算

为便于计算,工程上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体直杆模型<sup>[3-6,16]</sup>,则绝缘子串风偏角  $\theta$  的计算公式为

$$\theta = \arctan \frac{P_j/2 + S \cdot g_4 \cdot l_h}{W_j/2 + S \cdot g_1 \cdot l_v + W_z} \quad (1)$$

式中:  $P_j$  为绝缘子串水平风荷载(N);  $S$  为导线截

面积( $\text{mm}^2$ );  $g_1$  为导线自重比载 $[\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)]$ ;  $g_4$  为导线风比载 $[\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)]$ ;  $W_j$  为绝缘子串总重量(N);  $W_z$  为重锤重量(N);  $l_h$  为水平档距(m);  $l_v$  为垂直档距(m)。  $P_j$  和  $g_4$  的计算需要用到垂直于导线方向的预测风速值,可采用气象局提供的每间隔 3 h 的短期天气预报(0~24 h)中的预测风速  $v_y$  和预测风向角  $\varphi$ , 按如下分析进行计算:

1) 当线路走向角  $\gamma$ (线路走向与竖直线的夹角,按顺时针计;  $\gamma \in [0, 180^\circ]$ )为锐角、风向角  $\varphi$ (风吹来的方向,按顺时针计,以  $0^\circ$  表示北,  $90^\circ$  为东,  $180^\circ$  为南,  $270^\circ$  为西;  $\varphi \in [0, 360^\circ]$ )相对变化时,垂直于线路走向的风速分量  $v_{y\perp}$  的计算分析如图 2 所示。由图 2 易知,此时应用式(2)计算  $v_{y\perp}$ 。

$$v_{y\perp} = v_y \cdot |\sin(\varphi - \gamma)| \quad (2)$$

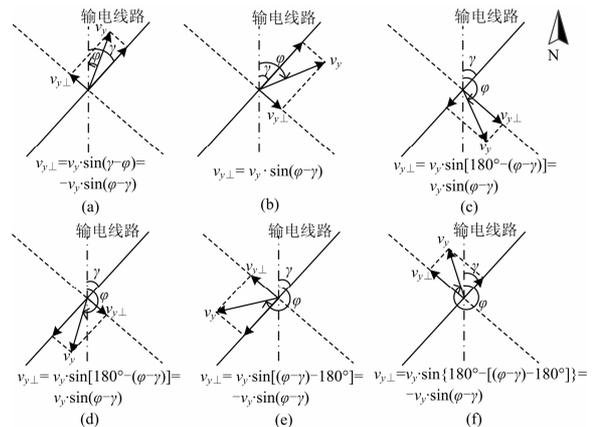


图 2 垂直于线路走向的风速分量计算图

Fig. 2 Calculation of wind speed component in the vertical direction of transmission line

2) 当线路走向角  $\gamma$  为钝角、风向角  $\varphi$  相对变化时,垂直于线路走向的风速分量可同理进行分析。经计算,此时仍可用式(2)计算  $v_{y\perp}$ 。

此外,气象局提供的预测风速是离地 10 m 高的风速值,因而还需按式(3)换算至导线高度处的预测风速  $v_{y\perp}^H$ , 再进行预警计算<sup>[17]</sup>。

$$v_{y\perp}^H = v_{y\perp} \cdot \left(\frac{H}{10}\right)^\mu \quad (3)$$

式中:  $v_{y\perp}$  为按式(2)计算的垂直于线路走向的离地 10 m 高的预测风速分量;  $H$  为导线高度(m);  $\mu$  为地面粗糙度指数,按照海上、乡村、城市和大城市中心 4 类的地面粗糙度指数分别为 0.12、0.15、0.22 和 0.30。

综上, 在计算绝缘子串风偏角时, 首先需按式(2)和式(3)对气象局提供的预测风速进行处理, 以得到较精确的风偏角值, 之后再行其他相关计算。

## 2.2 风偏状态下跳线至塔身最小间距

风偏放电预警模型的关键问题在于如何根据风偏角以及杆塔、绝缘子串结构等参数计算最小间隙  $x$ 。目前工程上常采用作图法进行简要计算, 但作图法较为繁琐, 不适合计算机进行程序化处理。本文在作图法的基础上, 分别针对干字型耐张塔中相跳线和边相跳线, 通过建立杆塔和跳线与待求间隙之间的几何关系, 推导出了对应的最小距离  $x$  的解析计算式。

耐张塔风偏放电主要表现为干字型塔跳线在大风时对塔身放电, 尤其是干字型塔中相引线多采用如图 3 所示的单跳串瓷绝缘子加跳线托架悬挂(俗称扁担线夹), 使跳线远离塔身。由于托架与杆塔仅靠单点连接, 稳定性较差: 当受侧向风作用时, 托架在向塔身偏移的同时, 围绕跳串挂点产生了一个转动惯量, 引起托架前后旋转。当两侧跳线弧垂较大的情况下, 由于线条张力小, 难以抑制该变化趋势, 导致跳线对耐张串挂点附近间隙不够, 从而发生闪络放电<sup>[18-19]</sup>。

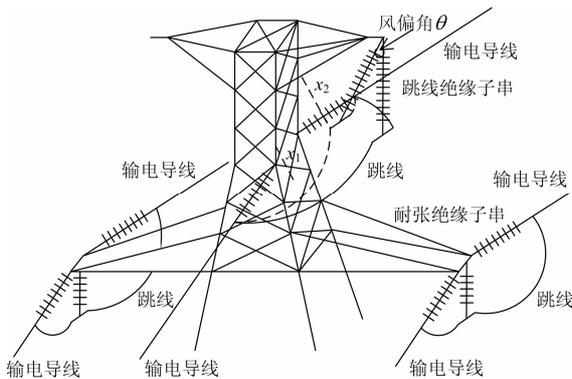


图 3 常见干字型耐张塔示意图

Fig. 3 Diagram of common "JG" type strain tower

### 2.2.1 干字型塔中相跳线

中相跳线的风偏角  $\theta$  按照式(1)计算, 只需注意规范规定: 对跳线而言, 风压不均匀系数  $\alpha$  宜取 1.0<sup>[20]</sup>。统计历史风偏跳闸信息发现, 干字型耐张塔中相跳线对杆塔风偏放电形式有两种: 对塔身放电, 如图 3 中  $x_1$ ; 对塔头横担放电, 如

图 3 中  $x_2$ 。

1) 风偏状态下中相跳线对铁塔塔身的最小间隙  $x_1$ : 图 4 所示为图 3 干字型塔的中相跳线档俯视图。为便于计算, 假设

① 忽略跳线支撑管的长度;

② 跳线始终处在其与支撑管连接点和耐张串连接点所在的垂直平面内;

③ 忽略铁塔塔头倾角。

图中各参数物理意义如表 2 所示。

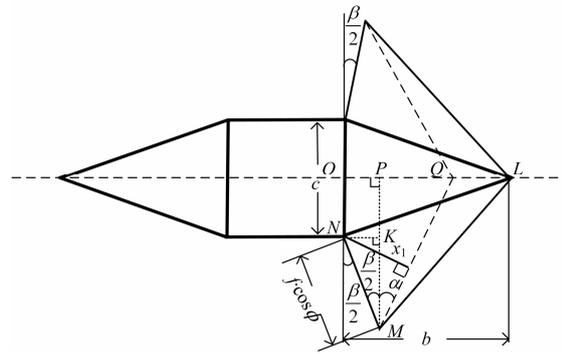


图 4 干字型塔中相跳线档俯视图

Fig. 4 Top view of center-phase jumper of strain tower

表 2 干字型塔中相跳线风偏预警所需参数表(1)

Table 2 Parameters needed for center-phase jumper of strain tower(1)

符号	物理意义
$a$ (未画出)	跳线悬垂绝缘子串长度(包括连接金具)/m
$b$	横担长度/m
$c$	中相导线挂线处塔身断面宽度/m
$d$	跳线直径/m
$f$	耐张绝缘子串长度/m
$\beta$	杆塔转角/(°)
$\phi$	耐张绝缘子串倾角/(°)

过  $M$  作  $OL$  的垂线交之于点  $P$ , 过  $N$  作  $MP$  的垂线交之于点  $K$ , 则干字型铁塔中相跳线对塔身的最小间隙  $x_1$  的计算公式为

$$x_1 = f \cdot \cos\phi \cdot \sin \left[ \arctan \frac{b - (a+d)/2 \cdot \sin\theta - f \cdot \cos\phi \cdot \sin(\beta/2) + \beta}{f \cdot \cos\phi \cdot \cos(\beta/2) + c/2} \right] \cdot \frac{d}{2} \quad (4)$$

值得注意的是, 如图 5 所示: 一方面, 上述计算忽略了跳线支撑管的长度, 因此实际的  $x'_1$  应比计算所得的  $x_1$  略大些; 另一方面, 上述计算中假设了跳线始终处在支撑管连接点与耐张绝缘子串连接点所在的垂直平面内, 而实际上侧

向大风吹跳线时有可能会使跳线偏离该平面形成小弧垂从而更加靠近杆塔, 若将此考虑进去, 则实际的  $x_1''$  应比计算所得的  $x_1$  略小些; 所以, 两方面因素的大部分影响将相互抵消, 使之对计算结果的最终影响很小。再一方面, 由于铁塔塔头倾角很小, 且考虑其的计算公式太复杂, 因此将其忽略。综上, 可以认为本文对计算  $x_1$  的假设不仅简化了公式, 而且所得结果精度仍较高, 适用于干字型塔风偏放电的在线预警。

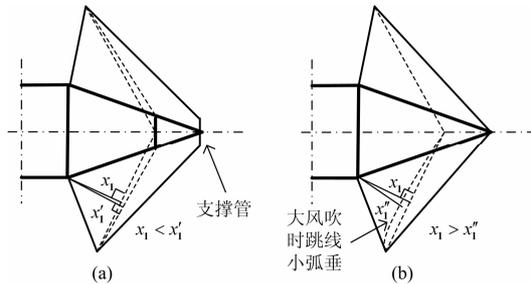


图5 考虑跳线支撑管(a)以及风吹跳线出现小弧垂(b)时说明图

Fig. 5 Illustration diagram for situation of (a) take bracket into account, (b) small sag of jumper under wind

2) 风偏状态下中相跳线对塔头横担最小间隙  $x_2$ : 图6为图3干字型塔的中相跳线档正视图。

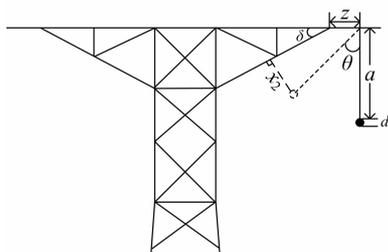


图6 干字型塔中相跳线档正视图

Fig. 6 Front view of center-phase jumper of strain tower

图6中各新增参数的物理意义见表3。

表3 干字型塔中相跳线风偏预警所需参数表(2)

Table 3 Parameters needed for center-phase jumper of strain tower (2)

符号	物理意义
$z$	中相横担支出长度/m
$\delta$	中相横担钢材倾角/(°)

由图中各物理量的几何关系, 易得干字型铁塔中相跳线至横担的最小间隙  $x_2$  的计算公式为

$$x_2 = z \cdot \sin \delta + (a + d/2) \cdot \sin(90^\circ - \theta - \delta) - d/2 \quad (5)$$

显然, 干字型铁塔中相跳线与杆塔的最小间

隙距离  $x$  为上述  $x_1$  和  $x_2$  间最小者, 即

$$x = \min\{x_1, x_2\} \quad (6)$$

### 2.2.2 干字型塔边相跳线

图7所示为干字型铁塔边相跳线档正视图, 图中参数  $\gamma$  表示杆塔主材与横担夹角(°), 其余各参数物理意义同表2。根据该图即可求出  $x$ :

$$x_1 = [(b - (a + d/2) \cdot \sin \theta) \cdot \tan \gamma - (a + d/2) \cdot \cos \theta] \cdot \cos \gamma - d/2 \quad (7)$$

$$x_2 = (a + d/2) \cdot \cos \theta - d/2 \quad (8)$$

$$x = \min\{x_1, x_2\} \quad (9)$$

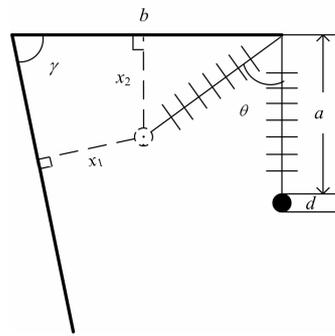


图7 干字型塔边相跳线档正视图

Fig. 7 Front view of side-phase jumper of strain tower

### 2.3 带电部分与杆塔间的允许最小间距

根据我国设计规范规定<sup>[20]</sup>, 不同工频标称电压下带电部分与杆塔构件的允许最小间隙  $L$  如表4所示。

表4 110~500 kV 带电部分与杆塔构件的最小间隙

Table 4 Minimum permissible clearance between live part and tower components of 110~500 kV

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

注: 500 kV 空气间隙栏, 左侧数据适合于海拔高度不超过 500 m 地区; 右侧是用于超过 500 m 但不超过 1 000 m 的地区。

### 2.4 允许最小间距的降雨修正

如前所述, 降雨会使导线-杆塔空气间隙的放电电压明显降低, 也即同一等级电压下的允许最小间隙必须增加才能保证不至发生闪络放电。因此考虑引入降雨影响系数  $k$  来修正规定的允许最小间隙  $L$ :

$$L_{\text{water}} = k \cdot L \quad (10)$$

式中,  $k$  与降雨强度、雨水电阻率和雨水运动路径等有关。但有文献分析指出, 降雨强度对击穿

间隙的影响可达百分之十几, 而雨水电阻率、雨水运动路径的影响要小得多, 分别不超过百分之五和百分之二<sup>[21-22]</sup>。又由于雨水电阻率、雨水运动路径不便测量, 所以本文选取影响程度最大的降雨强度来进行修正。

根据不同降雨强度下气隙的击穿电压表<sup>[21-22]</sup>, 利用最小二乘法进行数据拟合(采用幂函数拟合公式)可得降雨强度分别为 0、2.4、4.8、9.6、14.4 ( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )时同一电压在不同降雨强度下可击穿间隙的临界长度及其增长比率(以 0 雨强时可击穿间隙为基准 1), 具体结果分别见表 5 和表 6。

表 5 同一电压在不同降雨强度下可击穿的间隙长度

电压/kV	降雨强度/( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )				
	0	2.4	4.8	9.6	14.4
110	0.242 1	0.263 0	0.281 7	0.301 6	0.311 2
220	0.584 7	0.639 7	0.669 0	0.697 0	0.710 9
330	0.979 5	1.075 9	1.109 5	1.137 8	1.152 6
500	1.661 8	1.833 0	1.863 3	1.880 1	1.891 1
拟合优度	0.999 7	0.989 7	0.990 6	0.990 0	0.990 8

表 6 同一电压在不同降雨强度下可击穿间隙的增长比

Table 6 Rates of gap length growth under different rainfall intensity with the same voltage

电压/kV	降雨强度/( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )				
	0	2.4	4.8	9.6	14.4
110	1	1.086 3	1.163 6	1.245 8	1.285 4
220	1	1.094 1	1.144 2	1.192 1	1.215 8
330	1	1.098 4	1.132 7	1.161 6	1.176 7
500	1	1.103 0	1.121 3	1.131 4	1.138 0

根据上表的增长比数据, 通过作图发现降雨强度对同一电压可击穿间隙临界长度的增长比(也即式(10)中的修正系数)的影响符合幂函数关系(如图 8 所示), 则修正系数  $k$  的计算公式为

$$k = p \cdot \delta_{\text{water}}^q \quad (11)$$

式中:  $\delta_{\text{water}}$  为降雨强度,  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $p$ 、 $q$  为与击穿电压有关的特征系数, 对表 6 采用最小二乘法进行数据拟合得到, 拟合曲线见图 8, 具体结果见表 7。

但值得注意的是, 目前气象预测内容中没有降雨强度的信息而只有降雨量或降雨等级信息, 它们的对应关系如表 8 所示<sup>[22]</sup>。

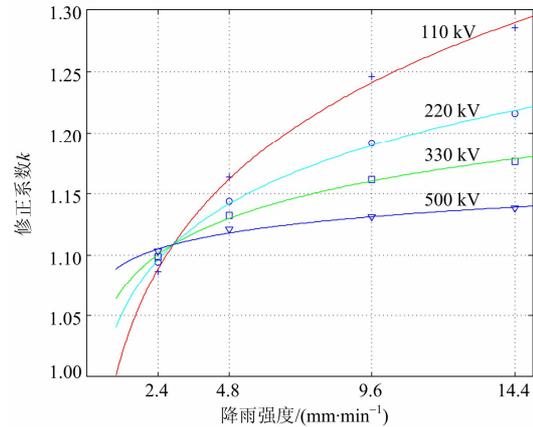


图 8 修正系数-降雨强度拟合曲线图

Fig. 8 Correction factor-rainfall intensity fitting curve

表 7 特征系数

电压/kV	$p$	$q$	拟合优度 $R^2$
110	1.001 3	0.094 9	0.998 2
220	1.040 5	0.059 2	0.997 5
330	1.063 9	0.038 4	0.995 5
500	1.088 6	0.017 1	0.977 9

表 8 降雨等级、降雨量以及降雨强度之间的对应关系

Table 8 Corresponding relationships between rainfall pattern, rainfall capacity and rainfall intensity

降雨等级	日降雨量/mm	12 h 降雨量/mm	6 h 降雨量/mm	降雨强度/( $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
大雨	25.0~49.9	15.0~29.9	6.0~11.9	1.00~2.67
暴雨	50.0~99.9	30.0~69.9	12.0~24.9	2.68~4.24
大暴雨	100.0~249.9	70.0~139.9	25.0~59.9	4.25~6.25
特大暴雨	$\geq 250.0$	$\geq 140.0$	$\geq 60.0$	$\geq 6.26$

综上, 这里仅针对“大雨”及其以上级别的雨型进行修正: 由线路电压等级结合表 7 得到特征系数, 再由预测的降雨强度根据式(11)即可得到修正系数  $k$ , 然后用式(10)计算修正的允许最小间隙, 而预警等级的判定也应随之改变, 如表 9 所示。

表 9 修正的预警等级判定表

Table 9 Corrected decision table for early warning level

$x$ 与 $L$ 关系	预警等级
$x < 0.9L_{\text{water}}$	I 级预警
$0.9L_{\text{water}} \leq x < L_{\text{water}}$	II 级预警
$L_{\text{water}} \leq x < 1.1L_{\text{water}}$	III 级预警
$1.1L_{\text{water}} \leq x$	安全

### 3 实例分析

据统计, 2012 年广东沿海某供电局辖下 220 kV 输电线路风偏跳闸 18 次, 均为某 220 kV 线路, 其中 N60 塔 B 相(单回路中相)跳线于 2012 年 12 月 29~30 日引起风偏跳闸共 17 次。此处选取该 N60 塔(塔型为 GJ1-14.5)中相跳线以及历史气象数据信息进行风偏跳闸分析, 验证本文所提方法是科学、有效的。

表 10 N60 塔中相跳线悬垂绝缘子串风偏角计算表

Table 10 Calculation table for windage yaw angle of suspension insulator string of center phase jumper on tower N60

计算所需参数							计算结果					
跳线悬垂绝缘子串: FXBW4-220/100				跳线: JL/G1A-300/40			跳线档距		导线自重比载/ [N/(m·mm <sup>2</sup> )]	导线风比载/ [N/(m·mm <sup>2</sup> )]	绝缘子 串风荷 载/N	绝缘子 串风偏 角/(°)
受风面 积/m <sup>2</sup>	串 数	自重/N	重锤 重量/N	外径/ mm	截面积/ mm <sup>2</sup>	重量/ (kg·km <sup>-1</sup> )	水平档 距/m	垂直档 距/m				
<i>A</i>	<i>n</i>	<i>W<sub>j</sub></i>	<i>W<sub>z</sub></i>	<i>d</i>	<i>S</i>	<i>W<sub>0</sub></i>	<i>l<sub>h</sub></i>	<i>l<sub>v</sub></i>	<i>g<sub>1</sub></i>	<i>g<sub>4</sub></i>	<i>P<sub>j</sub></i>	<i>θ</i>
0.25	1	117.68	0	23.9	338.99	1 131.0	4.7	6.8	0.032 7	0.086 0	277.29	64.02

步骤 2): 根据式(4)~式(6)和表 11 计算风偏状态下中相跳线至杆塔的最小间隙距离  $x$ 。

表 11 N60 塔中相跳线至塔身最小间隙计算所用参数表  
Table 11 Parameter used for calculating the minimum clearance between center-phase jumper and tower N60

参数	<i>a</i> /m	<i>b</i> /m	<i>c</i> /m	<i>f</i> /m	<i>z</i> /m	$\beta$ /(°)	$\phi$ /(°)	$\delta$ /(°)
取值	2.24	4.3	1.4	2.24	0.8	10°21'	8°	23.20°

$$x_1 = f \cdot \cos\phi \cdot \sin \left[ \arctan \frac{b - (a+d/2) \cdot \sin\theta - f \cdot \cos\phi \cdot \sin(\beta/2)}{f \cdot \cos\phi \cdot \cos(\beta/2) + c/2} + \beta \right] \cdot \frac{d}{2} = 1.433 \quad (12)$$

$$x_2 = z \cdot \sin\delta + (a+d/2) \cdot \sin(90^\circ - \theta - \delta) - d/2 = 0.412 \quad (13)$$

$$x = \min\{x_1, x_2\} = x_2 = 0.412 < 0.495 = 0.9L \quad (14)$$

由计算可知, 当 N60 铁塔中相跳线及其悬垂绝缘子串所受风速为 42.54 m/s 时, 中相跳线至铁塔的间隙距离为 0.424 m, 远小于规定的 220 kV 安全距离, 为风偏放电 I 级预警, 表明极有可能发生风偏放电, 而事故结果也验证了该结论。

### 4 结语

(1) 本文针对较易发生风偏的干字型耐张塔跳线提出了一种风偏放电在线预警方法。本方法将大风对电力传输带来的重大影响与精细化天气预报信息相结合, 提高了预警结果的有效性, 同时也推进传统天气预报向天气影响预报及气象灾害预报延伸。

(2) 作为整个预警系统的核心, 本文在进行风

步骤 1): 根据杆塔、导线、绝缘子类型、风速和式(1)计算中相跳线悬垂绝缘子串风偏角  $\theta$ 。

距离此次风偏跳闸的 N60 塔最近的某气象站监测到离地 10 m 高的极大瞬时风速为 38.34 m/s, 其方向与线路走向近乎垂直, 出现时间为 2012 年 12 月 30 日 0:25, 无降雨。按式(3)折算至约 20 m 高的中相导线处的极大瞬时风速为 42.54 m/s, 即风速  $v_j$  为 42.54 m/s, 则风偏角的计算如表 10 所示。

偏校核时采用二维坐标系法比作图法简洁方便, 容易实现计算机的程序化处理。虽然预警计算所需参数较多, 但本文方法对同一类型的杆塔具有很好的通用性, 保证了整个风偏放电在线预警系统的良好运行。

(3) 考虑降雨对空气间隙闪络电压会造成一定程度的降低, 因此本文引入降雨影响系数  $k$  对规定的允许最小间隙  $L$  进行修正, 使预警判断更符合实际。由于目前尚无文献指出同一电压的可击穿间隙随降雨强度变化的关系式, 而现有文献的数据资料也较少, 本文通过两次数据拟合得出修正公式, 虽每次拟合优度都很高, 但根据拟合公式计算数据点外的信息时必然会引入误差。因此下一步的工作是针对同一电压研究其可击穿间隙与降雨强度之间的关系式, 使修正公式更加精确。

### 参考文献

- [1] 肖东坡. 500 kV 输电线路风偏故障分析及对策[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 99-102.  
XIAO Dongpo. Analysis and countermeasures for windage yaw fault of 500 kV transmission line[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 99-102.
- [2] 周魁, 康励, 张瑚, 等. 风偏校验的数值计算方法[J]. 电力勘测设计, 2012(2): 63-65.  
ZHOU Kui, KANG Li, ZHANG Hu, et al. Numerical evaluation method for checking wind drift[J]. Electric Power Survey & Design, 2012(2): 63-65.
- [3] 邵天晓. 对悬垂绝缘子串摇摆角和风荷载计算的讨论[J]. 电力建设, 1991, 12(4): 23-27, 32.
- [4] CLAPP A L. Calculation of horizontal displacement of

- conductors under wind loading toward buildings and other supporting structures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(2): 496-504.
- [5] 黄俊杰, 汪涛, 朱昌成. 220 kV 输电线路风偏跳闸的分析研究[J]. 湖北电力, 2012, 36(2): 65-67.  
HUANG Junjie, WANG Tao, ZHU Changcheng. Research on windage yaw trip of 220 kV transmission lines[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(2): 65-67.
- [6] 王声学, 吴广宁, 范建斌, 等. 500 kV 输电线路悬垂绝缘子串风偏闪络的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 65-69.  
WANG Shengxue, WU Guangyu, 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.
- [7] 刘有胜, 范佩伦. 110 kV 线路耐张塔跳线和引流线风偏放电分析[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 1): 227-228.  
LIU Yousheng, FAN Peilun. Analysis of windage yaw discharge occurred on jumping wire and pilot current wire on strain tower of 110 kV power line[J]. Power System Technology, 2007, 31(S1): 227-228.
- [8] ST CLAIR J G Clearance calculations of conductors to buildings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 979-984.
- [9] 鲁耀, 王美刚, 韩培君. 220 kV 耐张塔跳线风偏跳闸原因分析及预防措施[J]. 内蒙古电力技术, 2011, 29(2): 22-23.  
LU Yao, WANG Meigang, HAN Peijun. Cause analysis and its protective measure to line trips due to windage yaw of 220 kV strain tower[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2011, 29(2): 22-23.
- [10] 田靖, 唐雷. “干”字型耐张塔跳线风偏放电分析及防范措施[J]. 湖北电力, 2011, 35(6): 24-25.  
TIAN Jing, TANG Lei. Analysis of discharge between jumper and tension tower with “JG”-shape due to wind deviation and prevention measure[J]. Hubei Electric Power, 2011, 35(6): 24-25.
- [11] 王明, 叶青山, 王得道. 电力系统自然灾害应急系统评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 57-60, 81.  
WANG Ming, YE Qingshan, WANG Dedao. The development of natural disaster response capacity for power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 57-60, 81.
- [12] 卢锦玲, 朱永利. 基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 96-103.  
LU Jinling, ZHU Yongli. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.
- [13] 张继芬, 张世钦, 胡永洪. 福建电网气象信息预警系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 72-74.  
ZHANG Jifen, ZHANG Shiqin, HU Yonghong. Design of the meteorological forewarning system for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 72-74.
- [14] 何永秀, 朱荏, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评估研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 205-210.  
HE Yongxiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 205-210.
- [15] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 130-133, 150.  
ZHANG Liangdong, SHI Hui, ZHANG Yongjun. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 130-133, 150.
- [16] 袁海燕, 傅正财, 魏本刚, 等. 综合考虑风偏、地形和工作电压的特高压交流线路雷电绕击性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 148-153.  
YUAN Haiyan, FU Zhengcai, WEI Bengang, et al. Lightning shielding failure analysis of UHVAC transmission lines based on improved EGM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 148-153.
- [17] GB 50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [18] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [19] 金淼. 探讨 220 kV 单回干字型铁塔中相绕跳防风偏治理[J]. 大科技, 2012(7): 143-144.
- [20] 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.
- [21] 耿翠英, 陈守聚, 刘莘昱, 等. 降雨对空气间隙工频闪络电压影响的试验研究[J]. 高压电器, 2009, 45(1): 36-39.  
GENG Cuiying, CHEN Shouju, LIU Shenyu, et al. Experimental study of the raining effect on frequency breakdown voltage of air-gap[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(1): 36-39.
- [22] 耿翠英, 魏丹, 何熹. 浅谈降雨对工频闪络电压的影响[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 103-108.  
GENG Cuiying, WEI Dan, HE Xi. Raining effect on frequency breakdown voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 103-108.

收稿日期: 2014-05-14

作者简介:

熊小伏(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能电网、电力系统保护与控制相关研究; E-mail: cqxxf@vip.sina.com

翁世杰(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险预警; E-mail: cqwsj@foxmail.com

王建(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统风险预警。

(编辑 魏小丽)