

DOI: 10.7667/PSPC160840

基于数值天气预报的输电线路风偏闪络预警方法

王海涛^{1,2}, 谷山强^{1,2}, 吴大伟^{1,2}, 卢恩泽^{1,2}, 郭钧天^{1,2}, 陶汉涛^{1,2}, 钟俊文^{2,3}

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074; 3. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 现有输电线路风偏预警一般是采用在线监测装置实现, 且没有对风偏后空气间隙的闪络风险进行有效评估, 导致工程上适用性不强、预警效果不理想等问题。利用传统的风偏研究成果, 提出了一种基于数值天气预报的输电线路风偏闪络预警方法。首先, 采用反距离加权的插值算法进行格点预报风速映射处理, 并依据风向与线路走向的夹角完成垂直于线路风速分量的计算。然后, 以典型的酒杯塔为例, 运用刚体直棒法计算线路与杆塔的最小空气间隙。最后, 对间隙击穿电压进行空气密度、湿度、降水量的修正, 得到预报天气条件下的闪络电压值, 并与系统运行电压进行对比完成风偏闪络预警。该方法可为安装在线装置困难而又处于强风区的重要输电线路提供一种可行、有效的风偏闪络风险管控手段, 对电网防风减灾工作具有重要的实用意义。

关键词: 数值天气预报; 反距离加权插值; 风偏闪络; 预警

Method for windage yaw flashover warning of transmission lines based on numerical weather prediction

WANG Haitao^{1,2}, GU Shanqiang^{1,2}, WU Dawei^{1,2}, LU Enze^{1,2}, GUO Juntian^{1,2}, TAO Hantao^{1,2}, ZHONG Junwen^{2,3}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
2. Wuhan NARI Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;
3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: Current windage yaw warning methods of transmission lines are generally implemented by on-line monitoring devices, and these methods rarely involve effective evaluation on flashover risk of the air gap between line and tower after windage yaw, which leads to weak applicability and unsatisfactory warning effect in engineering. This paper takes the traditional windage yaw research achievements into account, and proposes a method for windage yaw flashover warning of transmission lines based on numerical weather prediction. Firstly, wind speed predicted in grid is mapped into the tower by using inverse distance weighted interpolation algorithm. Wind speed vertical to line is calculated by using the angle between wind direction and line trend. Then, cup type tower is taken to solve the minimum air gap by rigid rod method as an example. Finally, the flashover voltage of the minimum air gap under standard atmospheric conditions is amended by air density, humidity and rainfall to obtain the flashover voltage under the forecast weather conditions, which is utilized to realize windage yaw flashover warning by compared with the system operating voltage. This method provides a viable and effective risk control measure for windage yaw flashover on transmission lines which are in strong wind area but the on-line monitoring devices are difficult to install on, and it has the vital practical significance on power grid disaster prevention and mitigation caused by windage yaw.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Real-time Evaluation and Warning of Electrical Reliability for UHV Transmission Line Based on Meteorological Parameters).

Key words: numerical weather prediction; inverse distance weighted interpolation; windage yaw flashover; warning

0 引言

对于未采取防风偏措施的输电线路, 在大风的

作用下绝缘子串或跳线向杆塔方向倾斜, 减小了导线与杆塔之间的空气间隙, 当间隙的绝缘强度不足以承受系统运行电压时将会发生风偏闪络^[1]。风偏闪络是造成输电线路跳闸的主要因素^[2]。据统计, 2007—2010年国家电网辖区高压以及超高压输电线路因风偏分别发生跳闸 157、93、79、174 次, 涉及北京、

基金项目: 国家电网公司总部科技指南项目“基于气象参数的特高压输电线路电气可靠性实时评估与预警”

河南、安徽、浙江等多家省市电力公司^[3]。由于风的持续时间往往超过重合闸动作时限,使得线路风偏闪络跳闸后重合闸成功率较低^[4],严重影响电网的安全稳定运行和供电可靠性。

对于输电线路风偏的研究,目前主要集中在绝缘子串最大风偏角的计算上。从静力平衡的角度出发,求解风偏角的方法可分为刚体直棒法和弦多边形法两种,后者虽结果准确但过程繁琐,为计算方便常采用刚体直棒法。在此基础上,王声学等对采用静态平衡模型计算风偏角存在的不足进行了分析,给出了一种最大风偏角的修正方法^[5];罗先国利用 Fluent 软件对多分裂导线的气动力特性进行了研究,得到了用于特高压八分裂导线风荷载计算的体型修正系数^[6];郑佳艳等采用有限元法计算动态风作用下绝缘子串的风偏,提出了考虑动力效应的风荷载调整系数^[7-8]。以上研究只是完成了风偏角及其模型参数的计算,无法实现针对输电线路风偏闪络风险的预警。

鉴于此现状,本文采用数值天气预报数据,在传统风偏研究基础上提出了一种输电线路风偏闪络预警方法。该方法以易发生风偏的悬垂绝缘子串为对象,采用插值映射后的风速以及风向与线路走向的夹角完成绝缘子串最大风偏角的计算,并依据绝缘子串与塔头之间的几何关系,预测线路与杆塔之间的最小空气间隙;对间隙的击穿电压进行空气密度、湿度以及降水量的修正,计算输电线路在预报天气条件下的风偏闪络电压值;最后,将预测得到的风偏闪络电压与系统运行电压进行对比,输出风偏闪络风险预警等级。该方法可为安装在监测装置困难而又处于强风区的重要输电线路提供一种可行、有效的风偏闪络风险管控手段,对电网防风减灾工作具有重要的实用意义^[9-10]。

1 数值预报数据处理

为了实现输电线路风偏闪络预警,需对线路与杆塔之间的最小空气间隙进行有效预测。在线路结构参数给定的情况下,最小空气间隙只与绝缘子串的最大风偏角有关,而风偏角的大小取决于风速和风向。

气象部门可提供未来 72 h 风速、风向、气压、温度、湿度以及降水量六要素的格点预报数据,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 3 km×3 km。为保证预警准确度,本文采用未来 24 h 的预报数据作为输入数据,并对原始预报的风速进行插值处理以及计算风向与线路走向的夹角。

1.1 风速反距离加权插值

所采用的格点预报数据中,每一个网格代表着几何尺寸为 3 km×3 km 的地理区域。当某一个网格中存在数基杆塔时,从气象部门获取的格点预报风速值便不能直接地用于网格中线路绝缘子串或跳线的风偏计算。故需要将原始的格点预报风速插值映射到网格中每一基杆塔的位置,从而得到更加精细化风速值计算输电线路的风偏角。

反距离加权是一种基于相近相似原理的插值方法^[11],可利用杆塔与相邻预报格点间距离平方的倒数作为相应预报格点的权重进行风速加权平均,进而完成区域预报风速的映射处理,具体实施方案如下。

设杆塔 T 处的经纬度坐标为 (x_0, y_0) ,提取相邻格点 $P_i(x_i, y_i)$ 的预报风速值 v_i ,如图 1 所示。

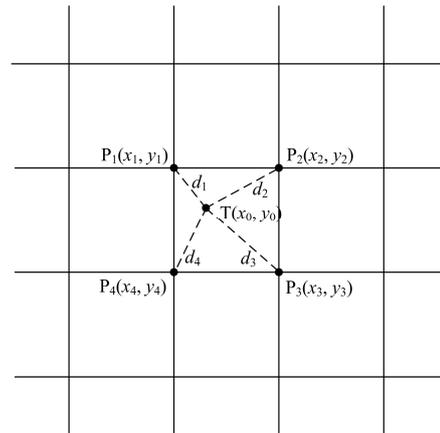


图 1 风速反距离加权插值

Fig. 1 Inverse distance weighted interpolation of wind speed

则杆塔 T 处利用反距离加权得到的预报风速为

$$v_T = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{v_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

式中, d_i 为待插值杆塔 $T(x_0, y_0)$ 与第 i 个相邻格点 $P_i(x_i, y_i)$ 之间的距离, km。

1.2 风向与线路走向夹角计算

风速大小一定,风向的不同不仅影响风偏角的大小,还会改变风偏的方向,对输电线路是否发生风偏闪络以及因风偏闪络发生跳闸的相线具有决定性作用。其中,风偏角的大小取决于垂直线路走向的风速分量,风偏的方向取决于风向与线路走向的相对位置,两者均与风向和线路走向之间的夹角 θ 有关。在计算过程中,规定风向(风吹来的方向)、线路走向(杆塔小号侧往大号侧方向)与正北方向的

夹角分别为风向角 β 和线路走向角 γ , 按顺时针计, 如图 2 所示。

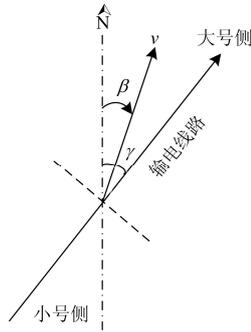


图 2 风向与线路走向夹角计算

Fig. 2 Calculation of the angle between wind direction and line trend

对于输电线路中任意两基相邻杆塔, 线路走向一定, 风向与线路走向之间的夹角 θ 为

$$\theta = \beta - \gamma \quad (2)$$

垂直于线路走向的风速分量 v_{\perp} 可用 θ 表示为

$$v_{\perp} = v |\sin \theta| = v |\sin(\beta - \gamma)| \quad (3)$$

以线路走向为参考, 绝缘子串风偏的方向随 θ 变化的情况如表 1 所示。

表 1 风偏方向与 θ 的关系

Table 1 Relationship between the windage yaw direction and θ

线路走向角 γ	绝缘子串风偏的方向		
	向右偏	向左偏	不发生风偏
$0^{\circ} \leq \gamma < 180^{\circ}$	$-\gamma \leq \theta < 0^{\circ}$	$0^{\circ} < \theta < 180^{\circ}$	$\theta = 0^{\circ}$
	$180^{\circ} < \theta < 360^{\circ} - \gamma$		$\theta = 180^{\circ}$
$180^{\circ} \leq \gamma < 360^{\circ}$	$-\gamma \leq \theta < -180^{\circ}$	$-180^{\circ} < \theta < 0^{\circ}$	$\theta = -180^{\circ}$
	$0^{\circ} < \theta < 360^{\circ} - \gamma$		$\theta = 0^{\circ}$

2 输电线路风偏计算

在风偏计算过程中, 采用处理后的风速与风向计算导线、绝缘子串及其金具的荷载^[12], 并依据静力平衡模型求解出绝缘子串的风偏角, 代入杆塔的尺寸数据, 得到线路与杆塔的最小空气间隙^[13-14]。

2.1 风偏角计算

采用刚体直棒法^[15]计算输电线路绝缘子的风偏角, 如图 3 所示。

风偏角 ϕ 的计算公式为^[16-17]

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}G_h + W_h}{\frac{1}{2}G_v + W_v} \right) \quad (4)$$

式中: W_h 、 W_v 分别是导线的水平荷载和垂直荷载; G_h 、 G_v 分别是绝缘子串及其金具的水平荷载和垂直荷载。

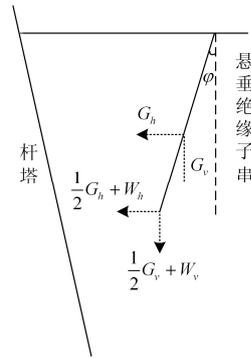


图 3 风偏角计算

Fig. 3 Calculation of the windage yaw angle

2.2 风偏最小空气间隙计算

以典型的酒杯塔为例, 建立二维坐标系计算风偏最小空气间隙, 如图 4 所示。

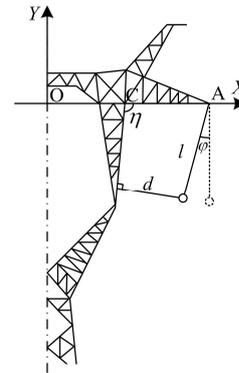


图 4 风偏最小空气间隙计算

Fig. 4 Calculation of the minimum air gap between line and tower after windage yaw

最小空气间隙 d 的计算公式为^[18]

$$d = \frac{|(f - (l + r)) \cdot \sin \phi \tan \eta - (l + r) \cdot \cos \phi - f_1 \tan \eta|}{\sqrt{1 + \tan^2 \eta}} - r \quad (5)$$

式中: η 为杆塔主材与横担夹角; l 为悬垂绝缘子串的长度; r 为导线分裂半径; ϕ 为悬垂绝缘子串风偏角; f 为悬挂点 A 到杆塔中心线(Y 轴)的距离; f_1 为 C 点到杆塔中心线(Y 轴)的距离。

3 输电线路风偏预警模型

3.1 风偏闪络电压预测

空气间隙的击穿电压不仅与间隙的距离有关, 还与间隙所处的气象条件有关^[19-20]。其中, 温度和气压对间隙击穿电压的综合影响可归结于空气密度的影响。为预测输电线路的风偏闪络电压, 分别采用空气密度、湿度和降水量对标准条件下空气间隙的 $U_{50\%}$ 进行修正计算。

3.1.1 空气密度的修正

空气间隙的击穿电压随空气密度的增大而升高。空气密度的修正因数 k_1 取决于相对空气密度 δ ，关系式为

$$k_1 = \delta^{m'} \quad (6)$$

式中： m' 为空气密度修正指数； δ 为相对空气密度，可由以下计算公式得到。

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \quad (7)$$

式中： $t_0=20^\circ\text{C}$ ； $p_0=101.3\text{ kPa}$ ； p 与 t 分别为计算时刻的气压与温度。

3.1.2 湿度的修正

湿度不仅会影响绝缘表面的电导，还会改变空间电场分布的均匀度，其对间隙击穿电压的修正因数可表示为

$$k_2 = k^w \quad (8)$$

式中： w 为湿度修正指数； $k=1+0.012(h/\delta-11)$ ， $1<h/\delta<15\text{ g/m}^3$ ， h 为绝对湿度。

3.1.3 降水量的修正

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，导致空气间隙击穿电压降低^[21]。降雨对击穿电压的影响程度与降雨强度、雨水电阻率和雨水运动路径等因素有关，常选取影响最大的降雨强度 δ_r 进行击穿电压的修正^[22]。不同雨强下气隙的击穿电压如表 2 所示。

表 2 不同雨强下气隙的击穿电压

Table 2 Breakdown voltage of air gap d with different rainfall intensities δ_r

间隙距离 d/m	无雨	降雨强度 $\delta_r(\text{mm}/\text{min})$			
		2.4	4.8	9.6	14.4
0.6	252.6	205.9	198.4	191.0	187.6
0.8	301.5	269.5	261.2	254.6	250.5
1.0	343.6	314.8	306.5	298.6	295.1
1.2	399.2	351.4	343.9	337.5	334.2

采用 Gauss 公式依次对不同雨强下的降雨强度修正系数 k_3 进行拟合，拟合系数及拟合曲线分别如表 3 和图 5 所示。 k_3 可表示为

$$k_3 = ae^{-\left(\frac{d-b}{c}\right)^2} \quad (9)$$

经过空气密度、湿度和降水量修正后，得到输电线路风偏闪络电压预测值 U_f 为

$$U_f = k_1 k_2 k_3 U_{50\%} \quad (10)$$

表 3 k_3 的 Gauss 拟合系数

Table 3 Gauss fitting coefficients of k_3

降雨强度 $\delta_r(\text{mm}/\text{min})$	a	b	c	拟合优度
2.4	0.917	0.9772	1.1	0.999
4.8	0.8927	0.9922	1.098	0.999
9.6	0.8722	1.006	1.079	0.997
14.4	0.8615	1.014	1.08	0.998

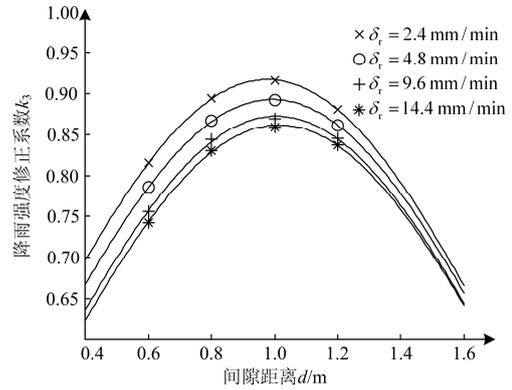


图 5 k_3 的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of k_3

3.2 风偏闪络预警等级划分

将预测的风偏闪络电压 U_f 与系统运行电压 U_{op} 进行对比，对预警等级划分如表 4 所示。

表 4 输电线路风偏闪络预警等级划分标准

Table 4 Classification standard for windage yaw flashover warning level of transmission lines

风险指标	$U_f \geq 1.06U_{op}$	$0.975U_{op} < U_f \leq 1.06U_{op}$	$0.887U_{op} < U_f \leq 0.975U_{op}$	$U_f \leq 0.887U_{op}$
风险等级	I 级 安全	II 级 黄	III 级 橙	IV 级 红

3.3 风偏闪络预警方法

本文提出的输电线路风偏闪络预警方法可分为以下 4 个步骤。

1) 基本参数输入：包括线路设计参数、线路地理信息以及数值天气预报数据。其中，线路设计参数包括杆塔尺寸、线路台账以及绝缘子串信息；线路地理信息包括杆塔所处地理位置、海拔高度及所属微地形；数值天气预报数据包括风速、风向、气压、温度、湿度和降水量。

2) 线路风偏计算：根据步骤 1) 中输入的基本参数，采用式(4)对整条线路逐基杆塔计算绝缘子串的最大风偏角，并代入式(5)求解导线与杆塔的最小空气间隙。

3) 闪络电压预测：将预报天气条件下的空气密度、湿度以及降水量代入式(6)一式(9)，对标准状态

下间隙的击穿电压进行修正, 预测线路的风偏闪络电压。

4) 预警信息输出: 将预测的风偏闪络电压与系统运行电压进行对比, 并对照表 4 中的预警等级划分标准输出分级预警信息。

具体的风偏预警流程如图 6 所示。

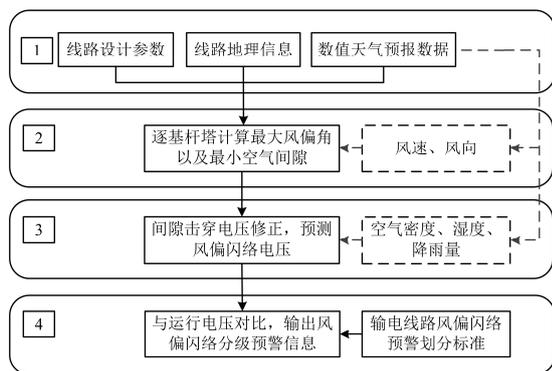


图 6 输电线路风偏闪络预警流程图

Fig. 6 Flow chart for windage yaw flashover warning of transmission lines

4 算例分析

2014 年 4 月 23 日 11:18 某地区辖下 750 kV 输电线路发生跳闸故障, 重合不成功。故障区段当天的天气情况为大风天气, 结合线路设计参数, 初步判定为绝缘子串风偏闪络引起的跳闸。由于故障杆塔处无微气象在线监测装置, 故采用本文提出的风偏闪络预警算法, 从气象部门获取该地区 4 月 23 日的历史格点预报数据, 通过预测风偏闪络电压来实现此次故障的重演。

步骤 1) 基本参数输入

从线路台账中提取故障杆塔 T 处的经纬度坐标, 并查找与之相邻的 4 个格点 P_1 至 P_4 , 计算反向距离加权系数分别为 0.11、0.09、0.17、0.63。从气象部门获取 4 月 23 日 P_1 至 P_4 处的预报风速, 插值计算 T 处的风速如图 7 所示。

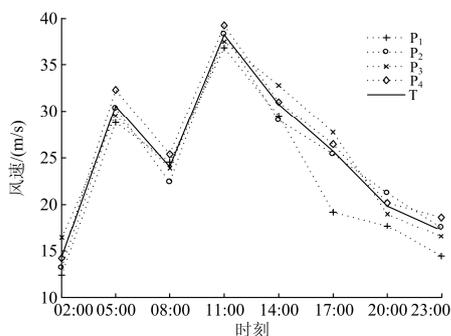


图 7 预报风速

Fig. 7 Forecast wind speed

T 处预报的风向为北风, 与线路夹角范围为 $75^\circ \sim 90^\circ$, 无降雨, 温度、湿度以及气压取 P_1 至 P_4 四个格点的平均值如表 5 所示。

表 5 预报温度、湿度及气压

Table 5 Forecast temperature, humidity and air pressure

时刻	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
温度($^\circ\text{C}$)	3.7	5.2	6.9	8.5	10.4	6.0	4.1	2.4
湿度/ (%RH)	61	58	53	41	38	34	31	28
气压(hpa)	917	906	912	904	907	902	910	913

步骤 2) 线路风偏计算

故障杆塔型号为 ZB131P, 呼高 40 m, 导线的型号为 LGJK-310/50, 边相串型为 I 串, 绝缘子串型号为 FXBW-750/210, 左右两边水平档距分别为 300 m, 540 m, 与左右两边杆塔的高度差分别为 5 m, 27 m。绘制风速与最小空气间隙的关系曲线, 如图 8 所示。

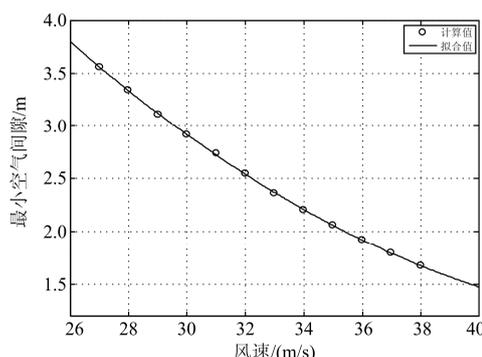


图 8 ZB131P 型杆塔最小空气间隙随风速变化的关系

Fig. 8 Relationship between wind speed and the minimum air gap of ZB131P

代入具体的预报风速, 即可得到杆塔 T 处不同时刻风偏最小空气间隙的预测值。

步骤 3) 闪络电压预测

对标准状态下不同间隙距离 50% 的空气击穿电压进行空气密度、湿度以及降水量修正, 预测风偏闪络电压 U_f , 如表 6 所示。

表 6 风偏闪络电压预测

Table 6 Prediction of windage yaw flashover voltage

时刻	2:00	5:00	8:00	11:00	14:00	17:00	20:00	23:00
d/m	5.88	2.59	4.07	1.54	2.57	3.64	4.82	5.32
$U_{50\%}/\text{kV}$	1756	1045	1433	515	1020	1382	1517	1648
k_1	0.98	0.95	0.96	0.96	0.94	0.95	0.97	0.96
k_2	0.97	0.93	0.96	0.95	0.93	0.92	0.94	0.94
k_3	1	1	1	1	1	1	1	1
U_f/kV	1669	923	1321	470	892	1208	1383	1487

步骤 4) 预警信息输出

系统运行电压 U_{op} 为 612 kV, 计算 U_f 与 U_{op} 的比值, 对照表 4 的预警等级划分标准, 预警信息如图 9 所示。

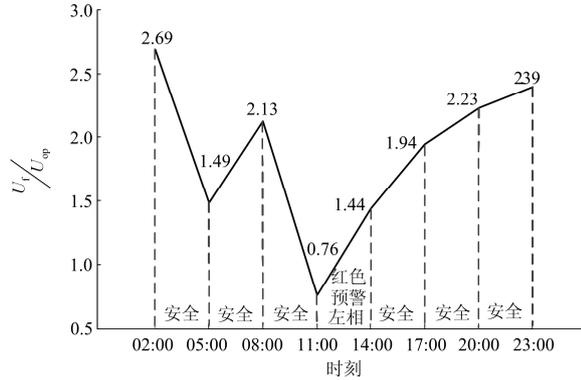


图 9 4月23日风偏闪络预警信息

Fig. 9 Windage yaw flashover warning information on April 23

呼高 40 m 的 ZB131P 型杆塔允许的风速值为 31.5 m/s, 而故障时刻的风速达到了 38.2 m/s, 极有可能发生风偏闪络。4月24日经登塔检查, 发现故障杆塔 B 相(左侧)均压环上有放电痕迹。

5 结论

本文提出了一种基于数值天气预报的输电线路风偏闪络预警方法, 可提前对关注线路的风偏闪络风险等级以及可能发生风偏闪络跳闸的相线进行预警。通过算例分析可知, 该方法可在 4月22日采用未来 24 h 的气象预报数据对 23 日的风偏闪络风险进行预警。预警结果显示 4月23日 11:00 将会发生风偏闪络故障, 预警等级为红色, 风偏发生在线路左相, 与实际的风偏故障情况相吻合, 验证了本方法的可行性与准确性。

在输电线路风偏计算中引入数值天气预报数据, 可不用依赖风偏在线监测装置即可完成风偏闪络风险评估, 并依据预报的气象数据提前进行风偏闪络预警。该方法的成功应用可为风偏在线监测匮乏的地区提供一种风偏闪络风险管控的手段, 也可为线路运维人员提前采取风偏规避措施以及制定风偏闪络故障应急预案提供决策依据, 进一步地提高输电线路风偏闪络风险的管控能力和精细化管理水平, 保障电网安全可靠运行。

随着计算机技术和气象探测技术的发展, 数值天气预报的应用也日益广泛。特别是近年来强对流天气的频繁发生, 导致气象预报服务受到众多行业的关注。本文提出的风偏闪络预警方法为数值天气预报在输电线路风偏预警中的初步尝试, 可实现关

注线路未来 24 h 风偏闪络风险的预警。后续将通过大量实际运行数据与预警结果的对比, 完成该预警方法预警准确率、误判率以及有效预警提前时间的统计, 实现该预警方法客观、全面的评价, 进而为基于预警信息的输电线路风偏事前处理提供辅助决策信息。

参考文献

- [1] 厉天威, 江已彦, 赵建华, 等. 南方电网沿海地区输电线路风灾事故分析[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 23-28.
LI Tianwei, JIANG Siyan, ZHAO Jianhua, et al. Wind accident analysis of southern grid coastal region transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 23-28.
- [2] 卢恩泽, 王海涛, 吴大伟, 等. 基于灾害类型与线路信息的电网重合闸成功率关联分析[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 28-34.
LU Enze, WANG Haitao, WU Dawei, et al. Correlation analysis of the reclosing success rate of power grid based on disaster type and line information[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 28-34.
- [3] 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 Xiangguo, et al. Windage yaw calculation method of UHV insulator strings[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 2924-2932.
- [4] 熊小伏, 翁世杰, 王建, 等. 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[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.
- [5] 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 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.
- [6] 罗先国. 特高压绝缘子串风偏研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
LUO Xiangguo. Study on windage of insulator strings in UHV[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [7] 郑佳艳, 严波, 刘小会, 等. 悬垂绝缘子串动态风偏响应的数值模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(12): 100-103.

- ZHENG Jiayan, YAN Bo, LIU Xiaohui, et al. Numerical simulation of suspension insulator string dynamic wind partial response[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(12): 100-103.
- [8] 赵渊, 魏亚楠, 范飞, 等. 计及微振磨损与风雨荷载的输电线可靠性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 19-25.
- ZHAO Yuan, WEI Yanan, FAN Fei, et al. Reliability modeling for transmission lines incorporating fretting under strong wind and rain loads[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 19-25.
- [9] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
- ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [10] 赵家庆, 唐胜, 丁宏恩, 等. 多主题电网设备综合智能告警技术方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 116-122.
- ZHAO Jiaqing, TANG Sheng, DING Hongen, et al. Multi-subject intelligent integrated alarm technology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 116-122.
- [11] 黄林宏. 风电场风速数值预报的修订方法探讨[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- HUANG Linhong. The research on revised methods of numerical weather prediction of wind velocity in wind farm[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012.
- [12] 杜澍春. 交流 750 kV 单回线路杆塔空气间隙的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 1-4.
- DU Shuchun. Research on air clearance of tower for AC 750 kV single circuit transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 1-4.
- [13] 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.
- [14] CHAY M T, ALBERMANI F, HAWES H. Wind load on transmission line structures simulated downburst[C]// First World Congress on Asset Management, July, 2006, Gold Coast, Australia.
- [15] ST CLAIR J G. Clearance calculations of conductors to buildings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 979-984.
- [16] 王声学. 特高压输电线路抗风偏闪络性能的计算研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- WANG Shengxue. Study on calculation of anti-windage yaw flashover performance for ultra high voltage transmission line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [17] 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(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(1): 227-228.
- [18] 张殿生. 电力工程高电压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 166-191.
- [19] 张耿斌, 罗新, 沈杨杨, 等. 大气条件对气隙放电电压的影响及神经网络在放电电压预测中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 564-571.
- ZHANG Gengbin, LUO Xin, SHEN Yangyang, et al. Effect of atmosphere condition on discharge characteristics of air gap and the application of neural network[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 564-571.
- [20] 牛海清, 庄小亮, 蚁泽沛, 等. 气隙击穿电压大幅降低的气象条件[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3343-3348.
- NIU Haiqing, ZHUANG Xiaoliang, YI Zepe, et al. Meteorological condition of dramatic decline of air gap breakdown voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3343-3348.
- [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] 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.

收稿日期: 2016-06-08; 修回日期: 2016-08-26

作者简介:

王海涛(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网雷电定位与监测技术的研究; E-mail: wanghaitao@sgepri.sgcc.com.cn

谷山强(1980—), 男, 博士(后), 高级工程师, 主要从事电网雷电监测预警与防护技术的研究; E-mail: gushanqiang@sgepri.sgcc.com.cn

吴大伟(1989—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要从事电网雷电监测与预警以及电力气象应用技术的研究。E-mail: wudawei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)