

一种计及微地形修正的输电线台风风险预警方法

包博¹, 程韧俐¹, 熊小伏², 翁世杰², 王建²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 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)

摘要: 台风过境时, 较大的风力往往会引发风偏放电、断线、倒塔等事故, 是对沿海地区电网安全可靠运行威胁最大的自然灾害之一。由于台风灾害的高风险性, 建立台风预警体系能更经济有效的提升电网抵御台风灾害的能力。现有的电网台风风险预警方法直接使用气象局提供的区域性预测风速, 并未考虑具体线路所处的微地形环境对风速的影响, 易出现漏警以及虚警。因此, 提出一种计及微地形影响的输电线台风风险预警方法。该方法把预警区域按经纬度划分为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的网格, 将网格内的输电设备与网格微气象、微地形信息关联, 建立了输电线微地形条件下的风速修正系数计算方法, 可更准确地辨识遭受台风灾害影响的线路集并按风险等级进行预警。实例验证了方法的可行性和有效性。

关键词: 台风; 输电线路; 风险预警; 微地形修正

A typhoon risk early warning method for power transmission line considering micro-terrain correction

BAO Bo¹, CHENG Ren-li¹, XIONG Xiao-fu², WENG Shi-jie², WANG Jian²

(1. Shenzhen Power Grid Co. Ltd., Shenzhen 518000, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: When a typhoon transits a region, the accidents of line breakage and tower collapse often occur due to the large wind force, so it is one of the natural disasters which are the most threat to operational reliability of transmission lines in coastal areas. Because of the high risk of typhoon disaster, establishing a typhoon early warning system is more economical and efficient to enhance the ability of power grid to withstand typhoon disasters. The existing typhoon risk early warning method for power grid uses the regional forecasting wind speed provided by the meteorological agency directly, which does not take the influence of micro-terrain around specific line on the wind speed into account, thus the missed alarm and false alarm are easy to appear. Therefore, a typhoon risk early warning method for power transmission line considering micro-terrain correction is proposed in this paper. The warning area is divided into $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ grids by longitude and latitude in this method, and transmission equipment in each grid is associated with the microclimate information and micro-terrain information of the grid. The calculation method of correction factor of wind speed for transmission line under micro-terrain conditions is set up, in order to identify the set of lines that may suffer from typhoon disaster more accurately, and early warning is conducted according to risk level. The feasibility of this method is proved by an instance.

Key words: typhoon; transmission line; risk early warning; micro-terrain correction

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0079-08

0 引言

架空输电线路供电容量大, 且分布点多、面广, 长期暴露在户外, 较易受自然灾害影响^[1]。近年来, 随着社会用电需求的不断提高, 使得输电网高速建设发展, 规模不断扩大, 通过复杂地形及恶劣气候地区的输电线路也日益增多。尽管台风对电网造成的灾害发生概率小, 但台风破坏力大, 且其出现时间大多正值迎峰度夏期间, 输电线路多为高负荷运行^[2], 一旦发生断线倒塔事故, 不仅会给电力企

业造成重大损失, 而且直接影响国家的生产建设和人民的生活秩序, 堪称典型的小概率高风险事件^[3]。2008~2012年台风风暴潮(由热带气旋引起的风暴潮)造成的直接灾害损失统计信息^[4]见表1。

表1 2008~2012年台风灾害统计信息表

Table 1 Statistics of typhoon disaster from 2008 to 2012

年份	2008	2009	2010	2011	2012
沿海台风风暴潮次数	11	10	10	9	13
直接经济损失/亿元	192.01	78.03	65.58	47.06	126.29

当然，台风造成电网断线、倒塔的主要原因还是设计标准较低^[5]，如果能提高线路设计风速的标准，即可提高线路的可靠性。但是随着设计风速的提高，塔头尺寸、杆塔及基础等都要加强或加大，势必增加线路的本身投资。据测算，单回 220 kV 线路，若将最大设计风速由 25 m/s 提高为 28 m/s，线路的本身投资就将增加 10%^[6]。目前，单回平地 220 kV 线路本身投资在 50~70 万元/km^[7-8]，而截至 2010 年底我国沿海 11 省市（辽宁、河北、天津、山东、江苏、浙江、上海、福建、广东、广西和海南）220 kV 及以上输电线路回路长度已达 17 万公里^[9]。保守估计，将沿海 11 省市 220 kV 及以上线路的设计风速由 25 m/s 提高到 28 m/s 就需花费 10 亿元（本身投资以 60 万元/km 计）。显然，如果全网都大幅提高设计标准，其经济代价过高，而且一次系统的投资随设计标准的提高而迅速增长。所以，针对台风等小概率大范围的自然灾害，单单投资提高线路杆塔设计标准的机会成本已大于其所能减少的风险值，不满足经济原则，还需要与电网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^[10-12]。

就台风防御技术而言，现有的台风气象预警中有关台风强度和风雨的信息只是台风“整体”的状态及其预报信息，台风衍生灾害的预警体系尚未真正建立^[13]。对电网来说，台风预警信息并未与输电线路信息关联，因而部分电力公司运行人员只能凭经验分析台风预报信息与输电线路位置信息，若发现台风中心经过某些线路，则调整运行方式以减小事故风险。该方法主观性强，难以对输电线在台风作用下的风险水平进行评估。

目前少数电网公司已开始建立台风信息采集和监视系统，可结合 GIS 数据查询大风圈范围内的厂站、设备状态。但在进行输电线路台风风险判断时直接使用气象局的预测风速，并未考虑具体线路所在微地形对风速的影响^[14-16]。

因此，为反映微地形对输电线路所受风速的影响，同时预警可能遭受台风灾害的输电线路风险，本文提出了一种计及微地形修正的输电线路台风风险预警方法，可为电网运行调度人员制定防风措施、应急预案和事故快速恢复方案提供科学的技术支撑和信息化辅助决策平台，避免过度防范浪费资源以及防范不足出现事故；还可为研究台风对电网断线及倒塔的影响机理和台风-电网事故的关联关系分析和电网台风风险评估积累基础数据^[17]。这对提高输电线路的防灾减灾能力，降低线路的跳闸几率，保障电力系统的安全稳定运行，都具有极其重要的

意义。

1 输电线路台风风险预警系统架构

系统的基本思路是引入输电线路的 GIS 信息和地形信息，并与台风预报信息相关联，根据台风预测数据，通过计算比较含有线路杆塔的网格中心点至预测台风中心的距离 s 和该时刻台风十级风圈半径 R'_{10} 的大小确定危险网格，再根据预测风向以及基础信息调查表计算微地形风速修正系数 γ ，进而修正气象局提供的危险网格的预测风速 v_y 并作为网格内线路的预测风速，最后与对应的设计风速 v_0 进行比较，判定得出是否预警、预警的等级，以及预警时间段。预警系统的基本架构如图 1 所示，各项预警指标详见表 2。

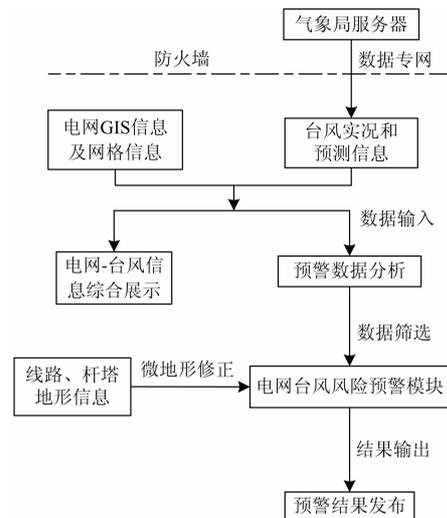


图 1 输电线路台风风险预警系统架构

Fig. 1 Architecture diagram of typhoon risk early warning system for transmission line

2 计及微地形修正的输电线路台风风险预警模型

台风导致电网断线、倒塔，其外因是自然界发生的强风和伴随的强降雨天气，以及周围环境如树木、微地形等；内因是输电线路设计抵御强风能力不足^[5,16]。事物的发展是内外因共同起作用的结果，本模型抓住内因的决定性作用，将设计风速作为评判输电线路台风风险的依据；同时重视外因对事物发展过程的影响，对气象局提供的线路预测风速进行微地形修正，最终比较修正的线路预测风速和对应的设计风速得到预警结果，实现科学准确的输电线路台风风险预警。

表 2 输电线台风风险预警指标
Table 2 Indexes of typhoon risk early warning for transmission line

预警	预测台风中心经纬度
特征	预测台风风圈半径
参数	预测风向
	预警区域线路、杆塔的基础信息
预警	预测 t 时刻后台风中心坐标及其十级风圈半径 R'_{10}
计算	预测 t 时刻后含线路的网格中心至台风中心的距离 s
指标	微地形修正系数 γ
	风速比 $\gamma v_y/v_0$
预警	I 级预警 (特别严重)
预警	II 级预警 (较严重)
结果	III 级预警 (严重)
指标	IV 级预警 (一般)
	无预警

2.1 网格定义

基于 GIS 地理信息系统, 将所在区域按经度、纬度划分为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的网格, 并将网格的坐标信息、网格内包含的线路杆塔信息以及基础信息表的调查结果录入系统数据库。

当台风越过海洋 24 h 警戒线时, 系统开始工作。气象台观测站提供实时的台风数据, 包括台风中心位置的经纬度坐标、中心风力、实测各风圈半径等台风相关信息, 该信息每隔 1 h 更新发布一次; 同时提供 24 h 和 48 h 台风预测路径及其 7 级、10 级风圈预测半径。该数据每隔 3 h 更新一次。

2.2 台风影响线路集

对 24 h 以及 48 h 的台风预测数据做如下处理, 确定该区域受台风影响较大的线路集以及相应的预警时间段(以 24 h 台风预测数据为例, 48 h 同理可得), 预警分析图见图 2。

(1) 根据台风实况信息 $O(x_0, y_0)$ 、 R_{10} 和 24 h 台风预测信息 $O_{24h}(x_{24h}, y_{24h})$ 、 R_{10}^{24h} 预测 t 时刻后(每间隔步长 t_0 , 即 $t=nt_0(n=1, 2, \dots, m; mt_0 \leq 24h)$)的台风中心位置 O_t 经纬度(x_t, y_t)。

将地球视为正球体, 则已知两点经纬度, 可按式(1)计算两点地表距离(东经、北纬为正, 西经、南纬为负)。

$$|OO_{24h}| = R \cdot \arccos[\sin y_0 \cdot \sin y_{24h} + \cos y_0 \cdot \cos y_{24h} \cdot \cos(x_{24h} - x_0)] \quad (1)$$

为计算台风中心移动速度, 气象局一般根据实况台风中心坐标和预测台风中心坐标计算两点距离再除以该预报时间间隔(目前为 24 h)求得, 即假设

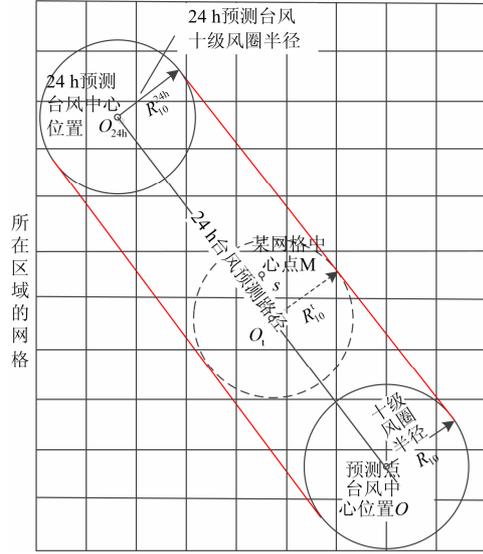


图 2 输电线台风风险预警分析图

Fig. 2 Analysis diagram of line breakage and tower collapse risk early warning for power grid under typhoon

台风在 24 h 内做匀速移动, 据此有

$$|OO_t| = \frac{|OO_{24h}|}{24h} \cdot t \quad (2)$$

则 t 时刻后台风中心经纬度由式(3)~式(5)计算。

$$y_t = y_0 + \frac{|OO_t|}{|OO_{24h}|} \cdot (y_{24h} - y_0) \quad (3)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\cos\left(\frac{|OO_t| \cdot 180^\circ}{\pi R}\right) + \cos y_0 \cdot \cos y_t - \cos(y_t - y_0)}{\cos y_0 \cdot \cos y_t} \right] \quad (4)$$

$$x_t = \begin{cases} x_0 + \theta & x_{24h} \geq x_0 \\ x_0 - \theta & x_{24h} < x_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, R 为地球半径, 暂取平均半径值 6 371 km, 但若知道某点对应的地球半径, 则直接使用该点地球半径, 可有效提高计算精度^[18]; 三角函数计算值和反三角函数返回值类型均默认为角度。

受制于气象预报水平, 目前还难以得到全部 t 时刻后的台风 10 级风圈半径, 因此考虑最坏情况, R'_{10} 由式(6)给出。

$$R'_{10} = \max\{R_{10}, R_{10}^{24h}\} \quad (6)$$

值得注意的是 t_0 可根据需要整定。实际工程中, 气象局还可提供全市范围内预报时段分别为 0~24 h (间隔 3 h、6 h、12 h 或 24 h)、24~48 h (间隔 6 h、12 h 或 24 h) 和 48 h~72 h (每间隔 12 h 或 24 h) 的各网格中心点的短期风速风向预报^[19]。一方面, 考虑到各市气象局技术水平存在差异, 它们的短期天气预报时间间隔不尽相同; 另一方面, 为了充分利用气象预报信息, 因此预警系统的时间间隔 t_0 可

按 0~24 h 和 24~48 h 分段取最小的预报时间间隔进行预警计算。

(2) 考虑规程规定 110 kV 及以上线路的基本设计风速必大于 23.5 m/s^[20], 因此模型选取十级风圈作为受台风影响较大的线路决策边界, 即判断包含线路的所有网格的网格中心点(x, y)到 t 时刻台风中心点 O_t(x_t, y_t) 的距离 s 与该时刻台风十级风圈半径 R_{t0} 间的大小关系: 若 s 大于 R_{t0}, 则认为网格内的线路受台风影响较小, 不至发生事故; 反之, 则认为该网格内的线路在 t 时刻后受台风影响较大, 有事故风险。即

$$\begin{cases} s > R_{t0} & \text{受台风影响较小, 无事故风险} \\ s \leq R_{t0} & \text{受台风影响较大, 有事故风险} \end{cases} \quad (7)$$

其中,

$$s = R \cdot \arccos[\sin y \cdot \sin y_t + \cos y \cdot \cos y_t \cdot \cos(x_t - x)] \quad (8)$$

综上所述可以确定 24 h 内受台风影响较大的线路段集合, 而同时也能根据以上计算估计其受影响的时间范围。

设系统在时刻 T 开始工作, 预警某网格在 nt₀ 后为风险网格, 预警等级为某一等级, 则考虑时间间隔 t₀ 裕度, 该网格内线路处于该级风险的时间段即为

$$[T + (n-1)t_0, T + nt_0] \quad (9)$$

经上述步骤确定受台风影响较大的网格及其受影响时间范围后, 再将气象局给出的网格中心点的预测风速作为其内线路杆塔的预测风速, 并与其对应的设计风速进行比较, 确定具体的输电线台风风险预警等级。

2.3 计及微地形影响的预测风速修正

值得注意的是, 气象局给出的网格中心点的预测风速仍是区域性的、较笼统, 并未考虑具体地形条件, 不能直接作为线路、杆塔预测风速值加以应用。因此, 本文考虑输电线路所处微地形的影响, 对气象局提供的有台风风险的网格预测风速 v_y (离地 10 m 高), 根据其内输电线路的具体情况进行微地形修正后作为线路的预测风速, 再与其对应的设计风速值 v₀ (离地 10 m 高) 进行比较, 即可得到更加准确的输电线台风风险预警等级。

2.3.1 理论分析

对于山区的线路杆塔, 其预测风速 v_y 还应考虑具体微地形条件的影响, 因此引入一修正系数 γ, 其值可参考《建筑结构荷载规范》的风压修正系数 η 选取^[21], 具体修正方法如下:

(1) 对于山峰和山坡, 见图 3, 修正系数可按下列规则采用。

①顶部 B 处的修正系数可按式(10)计算。

$$\eta_B = \left[1 + \kappa \cdot \tan \alpha \cdot \left(1 - \frac{z}{2.5H} \right) \right]^2 \quad (10)$$

式中: tan α 为山峰或山坡在迎风面一侧的坡度; 当 tan α 大于 0.3 时取 0.3; κ 为系数, 山峰取 2.2, 山坡取 1.4; H 为山顶或山坡全高(m); Z 为建筑物计算位置离建筑物地面的高度, 取为杆塔的呼称高(m); 当 z > 2.5 H 时, 取 z = 2.5 H。

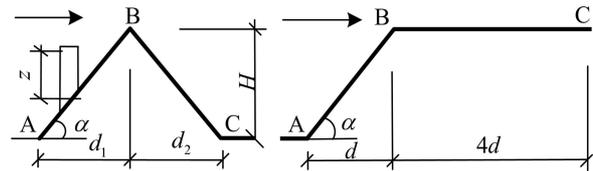


图 3 山峰和山坡示意图

Fig. 3 Diagram for peak and hillside

②其他部位的修正系数, 可按图 3 所示, 取 A 处的修正系数 η_A 均为 1, 山峰、山坡 C 处的修正系数 η_C 分别为 0.5 和 1, AB 和 BC 间的修正系数按 η 的线性插值确定。

(2) 对于山间盆地、谷地等闭塞地形, η 可在 0.75~0.85 选取。

(3) 对于与风向一致的谷口、山口, η 可在 1.20~1.50 选取。

值得注意的是, 在《建筑结构荷载规范》中该修正值是针对风压进行的修正, 而风压又与风速的平方成正比, 所以对风速的修正系数 γ 应为

$$\gamma = \sqrt{\eta} \quad (11)$$

2.3.2 工程简化

虽然理论上可按上述方法将地形对预测风速的影响进行修正, 但通过观察可以发现其所需数据量较大, 不便于在线计算及工程应用。因此考虑选取典型的地形地貌, 进行工程上的简化。

(1) H、tan α 的简化: 一般送电线路所经过的山区, 相对附近平坦地的高度不是很大, 因此将相对地面高度 h 在 50~100 m 的山归为 I 类, 此类多为平原地区、低台地地区的山, H 取为 75 m, tan α 取为 0.1; 将相对地面高度 h 在 100~200 m 的山归为 II 类, 此类多为高台地地区、丘陵地区的山, H 取为 150 m, tan α 取为 0.2; 最后将相对地面高度 h 在 200 m 以上的山归为 III 类, 此类多为山地地区的山, H 取为 350 m, tan α 取为 0.3。简化后, 顶部 B 处的修正系数 η_B 仅是杆塔呼称高的函数, 具体见表 3。

表 3 顶部修正系数 η_B 简化计算表

Table 3 Table for simplified correction factor of top part

		山峰/山坡		
山 形 参 数	H/m	50~100	100~200	>200
	H/m	75	150	300
	$\tan\alpha$	0.1	0.2	0.3
	κ	山峰取 2.2, 山坡取 1.4;		
	z/m	杆塔呼称高		
η_B	山峰			
	山坡	$\eta_B=f(z)$		

(2) 杆塔位置的简化: 考虑到实际测绘的困难以及计算所需的精确度, 可以按照图 4 所示进行简化分类, 则修正系数 γ 的计算可更进一步由表 4 给出。

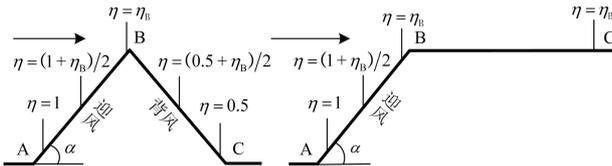


图 4 杆塔位置简化示意图

Fig. 4 Diagram for simplified location of tower

表 4 微地形修正系数 γ 简化计算表

Table 4 Simplified calculation table for correction factor of

系数	山区				盆地	其他
	坡向	山脚	山腰	山顶/坡顶		
η	迎风	$\eta=1$	$\eta=(1+\eta_B)/2$	$\eta=\eta_B$	0.8	1
	背风	$\eta=0.5$	$\eta=(0.5+\eta_B)/2$	$\eta=\eta_B$		
γ	$\gamma=\sqrt{\eta}$					

2.3.3 迎风、背风的判断

迎风和背风可根据大风风向及山上杆塔相对山顶的位置来简便判断。例如, 图 5 为某山峰的等高线示意图, 其中“SD”代表山顶; “GT”代表杆塔所在位置, 则在基础信息调查表中可以记录为杆塔相对山顶的位置为南方, 即“S”(与 16 方位风向对应)。图 6 为陆地记录风向常用的 16 方位图。

显然, 若此时大风风向为“E(东风)”、“ESE(东南偏东风)”、“SE(东南风)”、“SSE(东南偏南风)”、“S(南风)”、“SSW(西南偏南风)”、“SW(西南风)”、“WSW(西南偏西风)”、“W(西风)”等 9 个方向时, 则可认为此时杆塔所在为山的迎风坡; 反之则可认为此时杆塔所在为山的背风坡。若杆塔相对山顶为

其余位置时, 可将风向 16 方位按照如图 6 所示的方法编码, “北” — “1”, 顺时针增大直至“北西北” — “16”, 则判断迎风、背风的具体数学表达式为

$$d' = |\text{风向码号} - \text{杆塔相对山顶位置码号}| \quad (12)$$

$$d = \begin{cases} d' & d' \leq 8 \\ 16 - d' & d' > 8 \end{cases} \quad (13)$$

$$d = \begin{cases} 0 \sim 4 & \text{杆塔位于山的迎风坡上} \\ 5 \sim 8 & \text{杆塔位于山的背风坡上} \end{cases} \quad (14)$$

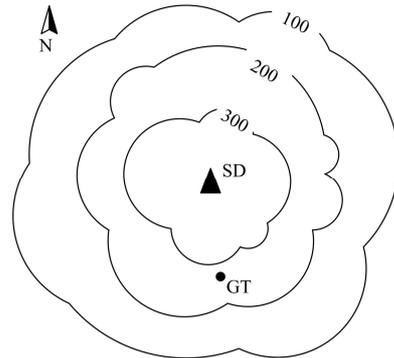
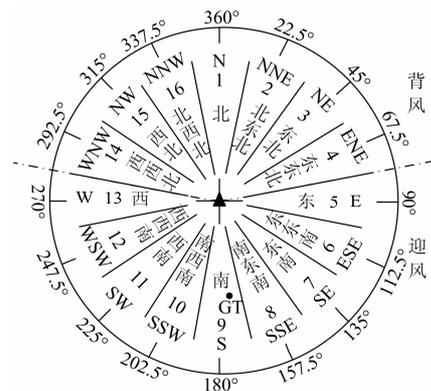


图 5 杆塔相对山峰位置示意图

Fig. 5 Diagram for simplified location of tower



注: 风向是指风吹来的方向, 如北风是指风由北吹向南。

图 6 风向 16 方位图

Fig. 6 Diagram for simplified location of tower

经过上述建模简化后, 可以很方便地根据预测风向得出山中杆塔是处于迎风还是背风面, 进而计算出微地形风速修正系数 γ 。但在这之前需先对预警区域杆塔进行调查(重点针对处于微地形区域内的杆塔), 完成如表 5 所示的基础信息表。

为便于调查和计算, 且考虑到一般线路的档距不超过 1 km, 因此本文仅针对杆塔进行上述调查和修正计算, 得到微地形修正系数, 而后将杆塔所在网格内的线路预测风速也乘以该修正系数再进行预警等级判定。

表 5 微地形修正系数基础信息表

Table 5 Basic information table for correction factor of micro-terrain

杆塔呼称高		杆塔所在地形地貌		
		山峰 A/山坡 B	盆地	其他
		山的高度 $h_1 \sim h_3$		
X	$h_1.50 \leq h \leq 100$	$h_2.100 \leq h \leq 200$	$h_3.h > 200$	
X	杆塔相对山顶位置 $f_1 \sim f_6$			
X	$f_1.N$	$f_2.NNE$	$f_6.NNW$
	杆塔在山中位置 $w_1 \sim w_3$			
	$w_1.顶部$	$w_2.腰部$	$w_3.脚部$	

2.4 预警判定及等级划分

综上，根据微地形修正的各危险线路段的预测风速 γv_y 与该段线路的设计风速 v_0 的比值，即可确定 t 时刻受台风影响线路段的预警等级。为与电网企业规定的四级台风预警信号（分别为蓝、黄、橙、红）对应，本文根据经验提出更加细化的输电线四级台风风险预警等级，各等级门槛值划分见表 6。由于人工划分预警等级具有较强的主观性，为此可在一定的数据积累前提下对比分析预警和实际故障信息，再进行校正修改。

将预警结果存入数据库，若所在区域存在高风险线路杆塔，则将该输电线路的相关信息显示在台风预警列表页，并给出相应的预警等级，同时系统发出预警提示音。

表 6 微地形修正的预警等级表

Table 6 Rank table of early warning corrected by micro-terrain

风速范围	预警等级
$\gamma v_y / v_0 \geq 1.2$	I 级预警
$1.1 < \gamma v_y / v_0 < 1.2$	II 级预警
$1.0 \leq \gamma v_y / v_0 \leq 1.1$	III 级预警
$0.9 < \gamma v_y / v_0 < 1.0$	IV 级预警

2.5 台风风险预警信息发布

台风风险预警信息以表格数据显示时包含的信息如表 7 所示。

输电线台风风险预警信息既能以表格数据显示，也能以基于 GIS 背景地图、辅以预警等级和图标说明的可视化效果图展示。表格数据形式更加具体方便，而效果图展示更加直观形象，两种形式相互结合能满足广大用户的需求。

表 7 输电线台风风险预警信息发布示意图表

Table 7 Example of releasing information of typhoon risk early warning system for transmission line

预警编号	预警时间	台风名	强度	预警线路名称	预警时间段	预警等级
20130922-01	2013.09.22 02:00	玉兔 (US AGI)	超强台风	XX 区 XX 号线 XX 段	09.22.23:00~09.22.02:00	IV 级

3 应用举例

本文以深圳电网为例，使用本文所提电网台风风险预警方法，对编号为 201319 的台风“天兔 (USAGI)”的预警过程进行说明。深圳市气象局可提供全市范围内各网格中心点的每间隔 3 h 的短期 (0~24 h) 风速风向预报，因此本文时间间隔 t_0 取为 3 h。

预警时刻为 2013 年 9 月 22 日 2:00 时，台风的实况信息为 $O(118.9^\circ E, 21.4^\circ N)$ 、 $R_{10}=150$ km 和 24 h 台风预测信息 $O_{24h}(114.5^\circ E, 22.9^\circ N)$ 、 $R_{10}^{24h}=80$ km；深圳市盐田区内某一含有线路和杆塔 (110 kV 梧沙 II 线 2 支路，架空导线型号：LGJX-400/50) 的编号为 1804 的网格中心点 M 坐标为 $(114.298^\circ E, 22.595^\circ N)$ ，其内一杆塔的呼称高为 18 m，基础信息为 A—h2f15w2，其内含线路杆塔的离地 10 m 高设计风速为 $v_0=33$ m/s。则其台风风险预警流程如下：

(1) 由式(1)~式(6)计算预测 3 h、6 h、9 h、12 h、15 h、18 h 和 21 h 后的台风移动距离 $|OO_t|$ ，以及其中心经纬度 (x_t, y_t) 和十级风圈半径 R'_{10} 。

(2) 由式(7)、式(8)计算网格中心点与台风中心距离 s ，由计算结果可知，该网格在预测 18 h、21 h、24 h 后为危险网格，而危险时间段可由式(9)得出，分别为 $[09.22.17:00, 09.22.20:00]$ ， $[09.22.20:00, 09.22.23:00]$ ， $[09.22.23:00, 09.23.02:00]$ 。

(3) 根据记录的杆塔基础信息 A—h2f7w2 和式(10)~式(14)，再结合表 3、表 4 计算微地形影响下的风速修正系数 γ 。

1) 计算山峰顶部处的修正系数 η_B ，由 A-“山峰”和 h2-“h: 100~200(m)”，根据表 3 和式(10)即得： $\eta_B = [1 + 2.2 \times 0.2 \times (1 - 18 / (2.5 \times 150))]^2 = 2.013$ 。

2) 判断是迎风坡或背风坡，由 f7-“杆塔位于山顶点的东南向”和预测风向码号根据式(12)~(14)确定是迎风坡还是背风坡，以预测风向-南东南为例有： $d' = |8 - 7| = 1 \leq 8$ ， $d = 1 \in (0, 4)$ ，可知杆塔处在

迎风坡上, 其他情况以此类推。

3) 计算风压修正系数 η , 由 w2-“杆塔位于山腰部处”和表 4 得

$$\eta = (1 + \eta_B) / 2 = (1 + 2.013) / 2 = 1.506$$

4) 计算风速微地形修正系数 γ , 根据 η 和 γ 的关系得:

$$\gamma = \sqrt{\eta} = \sqrt{1.506} \approx 1.227$$

(4) 根据表 6, 由修正的线路杆塔预测风速和其设计风速的比值判定台风风险预警等级:

$$\gamma v_y^{18h} / v_0 = (1.227 \times 16.6) / 33 = 0.617 < 0.9, \text{ 无预警};$$

$$\gamma v_y^{21h} / v_0 = (1.227 \times 20.5) / 33 = 0.762 < 0.9, \text{ 无预警};$$

$$\gamma v_y^{23h} / v_0 = (1.227 \times 25.1) / 33 = 0.933 \in [0.9, 1.0], \text{ IV 级预警}.$$

上述各步具体计算结果见表 8。在计算出现台风风险预警后, 系统将发布如表 7 所示的预警信息, 电网人员可及早的做出有针对性的优化预防控制措施和紧急控制、校正控制预案, 缩小停电范围, 更大程度上的加强电网的分析和防御停电能力, 保证电力系统的安全稳定运行。

表 8 输电线台风风险预警计算表
Table 8 Computation sheet of typhoon risk early warning for transmission line

时间	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h	24 h
$ OO $ /km	60.355	120.710	181.064	241.419	301.774	362.129	422.484	482.839
纬度 y_t	21.588°N	21.775°N	21.962°N	22.150°N	22.338°N	22.525°N	22.712°N	22.9°N
经度 x_t	118.353°E	117.804°E	117.255°E	116.706°E	116.156°E	115.604°E	115.052°E	114.5°E
R_{10}^t /km				150				50
S/km	432.609	372.314	312.287	252.496	193.045	134.333	78.459	39.740
v_y^t / (m/s)	1.4	3.3	5.5	7.8	13.5	16.6	20.5	25.1
风向 (码号)	南东南 (8)	东南 (7)	南东南 (8)	东南 (7)	东南 (7)	东东南 (6)	东风 (5)	东北风 (3)
微地形修正系数 γ			—			1.227	1.227	1.227
v_0 / (m/s)					33			
预警等级				无				IV 级
预警时间段								09.22.23:00-09.23.02:00

4 结语

近年来, 随着人民生活水平的飞速提高, 社会对供电可靠性的要求也越来越高, 而台风作为沿海地区最常见的自然灾害, 对电网安全构成重大威胁。因此, 本文提出了一种计及微地形影响后更为准确的输电线台风风险预警方法。结合气象部门实时发布的台风预测信息, 定量评估台风对电力系统设备的影响程度, 及时发布风险预警信息, 有助于调度人员制定应急预案及快速复电措施, 预控电网台风风险。

在确定预测风速时, 输电线路所在微地形的影响不容忽视。本方法在进行输电线台风风险预警判定的过程中考虑了具体微地形对预测风速的影响, 按照不同地形条件风压修正系数计算规定的合理简化和建模, 提出了计算微地形影响下预测风速修正系数的计算方法。

分析表明, 由于台风影响范围广, 台风袭击时难以依赖人工计算来判断其对电网的影响程度, 因此建立融合电网设备信息和自然环境信息的一体化、可视化预警平台, 实现气象灾害预警的自动处

理是必然的技术出路, 这将为调度、运行人员提供更科学的分析结果和决策支持, 从而更好地应对台风等自然灾害。

参考文献

- [1] 张立栋, 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 Liang-dong, SHI Hui, ZHANG Yong-jun. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 130-133, 150.
- [2] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
SONG Xiao-zhe, WANG Zhen, GAN De-qiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [3] 薛禹胜, 肖世杰. 综合防御高风险的小概率事件——对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-11.
XUE Yu-sheng, XIAO Shi-jie. Comprehensive defending

- high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [4] 国家海洋局: 2008-2012 年中国海洋灾害公报[R/OL]. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/zaihai>.
- [5] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131.
XIE Qiang, LI Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131.
- [6] 韩东明. 浅析河北南部电网存在的主要问题及对策[J]. 河北电力技术, 2003, 22(3): 1-4.
HAN Dong-ming. A brief analysis on major problems existed in southern Hebei power network and their countermeasures[J]. Hebei Electric Power, 2003, 22(3): 1-4.
- [7] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用造价 220 kV 输电线路分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [8] 南方电网公司 220 kV 线路工程典型造价[DB/OL]. [2011-12-22]. <http://www.csgstd.com/biz/document!doView.action?model.id=11413>.
- [9] 2011 中国行业年度报告系列之电力[R]. 中国经济信息网, 2012: 50-51.
- [10] 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 Qing-shan, WANG De-dao. The development of natural disaster response capacity for power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 57-60, 81.
- [11] 张恒旭, 刘玉田. 极端冰雪灾害对电力系统运行影响的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 52-58.
ZHANG Heng-xu, LIU Yu-tian. Comprehensive assessment of extreme ice disaster affecting power system operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 52-58.
- [12] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 18-26.
XUE Yu-sheng, WU Yong-jun, XIE Yun-yun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [13] 端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 4-9.
DUAN Yi-hong, CHEN Lian-shou, XU Ying-long, et al. The status and suggestions of the improvement in the typhoon observation, forecasting and warning systems in China[J]. Engineering Science, 2012, 14(9): 4-9.
- [14] 王昊昊, 罗建裕, 徐泰山, 等. 中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 5-10, 118.
WANG Hao-hao, LUO Jian-yu, XU Tai-shan, et al. Questionnaire survey and analysis of natural disaster defense techniques of power grids in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 5-10, 118.
- [15] 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 Ji-fen, ZHANG Shi-qin, HU Yong-hong. Design of the meteorological forewarning system for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 72-74.
- [16] 郑旭, 赵文斌, 肖嵘, 等. 华东电网 500 kV 输电线路气象环境风险预警研究与应用[J]. 华东电力, 2010, 38(8): 1220-1225.
ZHENG Xu, ZHAO Wen-bin, XIAO Rong, et al. Investigation and application of meteorological environmental risk early-warning for 500 kV transmission lines in East China grid[J]. East China Electric Power, 2010, 38(8): 1220-1225.
- [17] 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 Yong-xiu, 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.
- [18] 卫宇. 考虑地球曲率情况下两点距离问题的求解[J]. 航空兵器, 2008(3): 7-12.
WEI Yu. Solution of distance between two points considering curvature of the earth[J]. Aero Weaponry, 2008(3): 7-12.
- [19] GB/T 21984—2008 短期天气预报[S].
- [20] GB 50545—2010 110~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
- [21] GB50009—2012 建筑结构荷载规范[S].

收稿日期: 2013-10-20; 修回日期: 2013-12-12

作者简介:

包博(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网调度工作; E-mail: hunter0104@126.com

程轲俐(1972-), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事电网调度管理工作;

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: cqquxf@vip.sina.com