

台风及暴雨对电网故障率的时空影响

吴勇军^{1,2}, 薛禹胜², 谢云云^{1,2}, 王昊昊², 段荣华³, 黄伟³

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094;

2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 3. 云南电力调度控制中心, 云南省昆明市 650011)

摘要:分析了台风及暴雨影响电力设备故障率的途径;指出停电防御系统为此应拓展采集的数据,包括宏观的天气预报信息及就地的气象数据;提出上述自然灾害中的电网故障率时空预警框架。根据气象信息,结合环境信息及地形地貌信息,预测台风及暴雨的时空演变趋势,并按地理特征修正,在线预报恶劣气象直接或通过山洪、滑坡和泥石流等次生灾害造成输电线路断线、倒塔、闪络等故障率的变化。通过自然灾害与电力系统稳定分析模块的接口,将在线安全分析由针对不变的预想故障集改进为跟踪灾害动态修正的预想故障集,使停电防御系统对台风及暴雨灾害具备一定的预警及决策支持能力。

关键词:停电防御;自然灾害;台风灾害;暴雨灾害;微地形;故障率;在线评估;安全预警

0 引言

中国是台风危害最严重的国家之一,每年登陆中国的热带气旋平均 9.09 个,其中 3.17 个达到台风等级^[1];从海洋吹来的西南风和东南风,水汽丰沛,极易产生暴雨天气。二者严重威胁着电网安全。2004 年台风“云娜”导致浙江电网 500 kV 及 110 kV 线路分别跳闸 10 次及 68 次,受损线路 3 342 km, 9 座 220 kV 变电所停电,主变压器跳闸 5 台次^[2]。2005 年,强台风“达维”造成海南大批 35 kV 及以下配电设备受损,大量 110 kV 及 220 kV 线路因永久性故障而开断,海南电网崩溃^[3]。2006 年,超强台风“桑美”造成温州电网 500 kV, 220 kV, 110 kV 共 27 回线路跳闸^[4]。2008 年,台风“黑格比”造成广东 110 kV 及以上线路大量跳闸,配电线路倒杆及断杆^[5]。1996 年,暴雨引发的特大洪水淹没柳州电网 5 座 110 kV 及 1 座 35 kV 变电站,损失 4 000 多万元。2003 年,暴雨造成上海浦东地区 31 条线路故障,影响到 20 多万用户^[6]。2012 年,南方大范围的强降雨影响广东电网 10 万用户,广西电网 8 个乡镇停电,云南电网 392 个台区停电^[7]。2012 年,北京特大暴雨导致 220 kV 和 110 kV 线路分别故障 1 起

和 3 起,而山洪等次生灾害影响房山区 6 000 户用电^[8]。

强台风及持续暴雨灾害的概率虽小^[9],但发生后却会造成群发性的断线与倒塔,甚至在其他阻塞的推波助澜下演化为电力灾难^[10-12],其风险不容忽视^[13]。日美等国按灾害概率来提高电网设计标准^[14],文献^[15-16]则提出以风险准则应对高风险小概率事件,即除了按动态投资与风险之和最小的原则针对性地提高一次系统的设计标准外,对于超过实际设计的灾难场景,可靠、有效的二次停电防御系统不可或缺。该文献从信息采集、风险分析和控制决策 3 个方面指出了已有停电防御系统在应对极端灾害时存在的不足。

当前的停电防御系统仅采集电力信息,按不变的设备故障率和固定的预想故障集来分析系统稳定性^[17-19]。华东电网及福建省电力公司分别建立了台风监视系统,结合地理信息系统(GIS)数据,查询大风圈范围内的场站与设备状态;一些省电力公司开始建立暴雨的监测与预警系统^[20]。这些独立的系统采用人为选定的预想故障集及离线制定的处置预案,缺乏自适应的应对能力。

文献^[21]给出了停电防御向自然灾害拓展的框架和实现思路,并建立了外部环境和电力系统安全稳定分析的接口,支持自然灾害早期预警和自适应决策。文献^[22]提出了自适应外部极端灾害的电网安全稳定防御系统的工程应用设计。

文献^[23]论述了微地形对送电线路的影响;文

收稿日期: 2015-11-10。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204);国家自然科学基金重点项目(61533010);中泰合作基金项目(5151101161);云南电网公司科技项目(YDTZ-F2014-105)。

献[24]根据观测资料研究了风向及地形高差对风速的影响;文献[25]考虑了山峰和山坡对迎坡风的影响,但没有涉及顺坡风及过渡带风;文献[26-28]分析了地形和海拔高度对降雨量的影响。

为了计及台风、暴雨及其次生灾害对线路故障率的影响,文献中有的采用统计数据^[29],但难以实现在线预警。也有文献建立故障率与气象要素的映射表达式,例如建立回归模型以反映洪涝灾害对电网设备的影响^[30],或将风速值与线路设计值的比值作为输入量,用指数函数来拟合线路故障率与台风风速间的关系^[31-32]。上述研究只反映了个别因素对特定故障(如断线故障率,而未考虑倒塔、风偏闪络等)的影响。

本文针对台风和暴雨灾害,提出一种较全面反映气象环境对电网故障率影响的时空预警框架,分别评估单个灾害下的断线、倒塔、风偏闪络等故障率,并整合不同类型故障对线路故障率的影响;最后对不同灾害下的线路故障率进行整合。根据台风的预报和监测信息,预测台风的时空演变趋势和风场分布,并按地理特征修正风速预报值。同时,基于降雨预报信息及就地的气象数据,结合地形地貌,修正降雨量的预报值。然后,与机理分析相结合,建立线路在台风和暴雨灾害下的不同类型故障的概率模型,在线实现时空预警。台风及暴雨共同作用对电力系统设施的影响将在后续文章介绍。

1 台风及暴雨对电力设备的影响

1.1 台风对电力设备的影响

台风通过风力直接或间接地引起短路或拉断导线而导致停电,且往往不能通过重合闸来恢复供电。

1)断线:垂直于导线的风荷载超过其相应的承载极限时造成断股或断线;大风刮起的导电体(或一般物体)可能引起短路(或击断线路)。

2)倒塔:杆塔及其连接导线的垂直风荷载超过杆塔最大承受能力时发生的横倾;杆塔沿线路走向的不平衡力引发的纵倾;塔基上拔或下沉。上述故障与杆塔的结构、强度、风力及地貌有关。杆塔倒塌会增加断线概率,而断线又将导致杆塔两侧张力不平衡。

3)风偏闪络:大档距或大弧垂导线在风向与导线轴向夹角大于 45° 时易产生较大风偏^[33],导致悬垂绝缘子串对杆塔构件或金具放电^[34],或使导线与周边物放电。风偏闪络易烧伤导线,增加断线概率;风偏跳闸后,重合成功率低,线路停运率大。

4)异物挂线:在工业区、树林和居民区较易发生薄膜、布条、气球、风筝等缠绕导线,增加风偏闪络概率,异物受潮后易致线路对地或相间短路。

1.2 暴雨致灾途径及其对电力设备的影响

1.2.1 暴雨引发次生灾害的机理

1)暴雨型滑坡的形成机理

据统计70%的滑坡由降雨引起^[35]。在降雨作用下,斜坡上的岩体和土体的受力平衡破坏,造成沿某个滑动面向下运动。

其基本因素包括:①地形坡度在 $10^\circ\sim 40^\circ$ 内,尤以 $20^\circ\sim 40^\circ$ 时最易发生滑坡^[36];②若坡体内有页岩、片岩等较松软的完整岩层,周边又为层面、节理、裂隙等易风化的结构,则抗剪度低,易发生滑坡;③植被既可能减缓滑坡,也可能加剧滑坡^[37],目前还难以在故障率模型中考虑。

其触发因素为:降雨增加了岩土含水量及岩土体容重,降低了岩土抗剪强度。

2)山洪形成机理

山洪是山区溪流中面积较小,快速、强大的地表径流现象。发生的基本条件是山区中相对高差大,河谷坡度陡峭的地形。当降水速率大于土壤入渗速率时,降雨形成地表径流,从坡面到沟道不断汇集,形成山洪。触发因素则是在前期降雨的基础上,又发生的连续降雨或短期集中降雨。

3)泥石流形成机理

泥石流是产生于沟谷或坡地的一种饱含泥、石、水的固、液两相流体。其中的水既是泥石流的重要组成部分,又是泥石流的激发条件和搬运介质。

其基本成因是山坡型或沟谷型的地形地貌。山坡型泥石流指在陡峭山坡上发育的单沟,汇流面积较小,故泥石流流量不大,但因坡陡、流速快、来势猛,往往几分钟内就可以造成巨大损失。沟谷型泥石流由多条支流汇入主沟而成,坡度往往达 $25^\circ\sim 50^\circ$ ^[38],沟床纵差大,一般分为形成区、流通区和堆积区三部分。形成区多为三面环山的开阔地形,易于水和碎物集中;流通区多为狭窄陡深的峡谷,大的高差使泥石流获取动能;堆积区则开阔平坦。

其触发因素为:①松散物质,包括破碎的地表岩石、滑坡形成的固体物质,及人类造成的水土流失;②短时强降雨和长时间连续降雨。

1.2.2 暴雨灾害对电力设备的影响

1)杆塔:主要是沟里、跨河及滑坡体上的杆塔及其基础,很容易受到暴雨的冲刷、长期的浸泡及整体的平移,而造成杆塔倾倒。

2)变电站:处于低洼地或城市内涝地段的变电站易遭受暴雨洪水和泥石流的冲击,致使设备运行异常,绝缘能力降低,二次回路或通信系统故障。

3)发电厂:水电站的水工建筑以及火电厂引水渠道、灰场灰坝、煤场等也极易受到暴雨影响。

2 台风及暴雨的预警防御

图 1 表示台风及暴雨的预警流程,包括如下几个阶段。

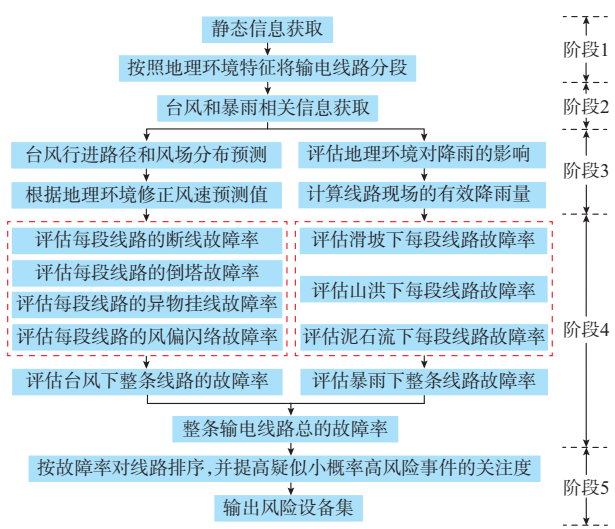


图 1 台风及暴雨灾害停电预警流程
Fig.1 Flow chart of blackout early warning for typhoons and rainstorms

- 1)获取电网设备背景、沿线地形地貌和地质等电网静态信息,并按照地理环境特征将输电线路分段^[39]。
- 2)获取来自气象中心、自动气象站等处,有关台风及暴雨的动态预报和监测信息。
- 3)台风风速及降雨量的时空预报。风速预报模块预测台风行进路径及风场时空分布,并按照输电线路的地理环境(或风速监测值)对预测结果进行修正。降雨量评估模块根据气象降雨预报信息,结合地理环境(或降雨量监测值)进行修正,预测未来时段线路地形的降雨量。有效降雨量模块基于降雨历史数据和预测值评估下一时段线路现场的有效降雨量。
- 4)台风及暴雨对电网故障率影响的评估。包括:①评估每段线路的断线故障率、倒塔故障率、异物挂线故障率和风偏闪络故障率,然后综合 4 种故障率,得到台风影响下整条线路的故障率;②评估每段线路在滑坡、山洪和泥石流条件下的故障率,然后综合 3 种故障率,得到暴雨下整条线路的故障率。由于还涉及其他自然灾害,故台风和暴雨复合灾害下的电网故障率评估将在后续文章一并介绍。
- 5)提高对小概率高风险事件的关注度,按照线路总故障率的大小调整预想故障表,并将后者提供给电力系统安全稳定分析软件的接口。

3 台风及暴雨灾害预警的信息基础^[21]

- 1)气象信息包括历史信息、实时监测和预报信息。有关台风的信息包括:台风中心(位置、气压)、台风路径(移向、移速)、台风强度(最大风力、十级风圈半径、七级风圈半径)。有关暴雨的信息包括:降雨强度、降雨量、降雨范围等。
- 2)地形地质信息包括:山坡、山峰和峡谷风道等地形的坡度、地貌、高程及植被等地形信息,以及地质构造及强度、岩土条件等地质信息。
- 3)电网设备信息包括:线路运行参数(线路名称、电压等级、投运时间)、杆塔信息(杆塔类型、经度、纬度、两侧档距、服役时间、杆塔基础状况)、绝缘子信息(绝缘子型号、片数、串数、布置形式)、设计参数(导线的设计应力、杆塔的设计荷载、安全系数),以及设备运行的健康信息(设备是否投运或受损)等。

4 输电线上的台风风速

4.1 台风路径预测

根据历史数据、实时数据及气象预报来预测台风走向、速率和最大风速的变化率,并估计下一时刻台风中心位置及最大风速。逐点外推其折线型路径,并按实际监测数据及时校正。

4.2 台风风场计算

台风风场某点的背景风速,即离地 10 m 高的风速 $\dot{V}$ 等于移动风速分量 $\dot{V}_d$ 和环流风速分量 $\dot{V}_r$ 的相量和:

$$\dot{V} = \dot{V}_d + \dot{V}_r \tag{1}$$

4.2.1 移动风速的计算

采用宫崎正卫模型^[40]计算 V_d :

$$V_d = V_0 e^{-\frac{\pi r}{10 R_{\max}}} \quad r \in [0, \infty) \tag{2}$$

式中: V_0 为台风中心移动风速; $R_{\max}$ 为最大风速半径; r 为台风风场中某点到台风中心的距离,可由两点经纬度坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和地球平均半径 R (取为 6 371 km) 求出,即

$$r = R \arccos(\sin y_1 \sin y_2 + \cos y_1 \cos y_2 \cos(x_1 - x_2)) \tag{3}$$

4.2.2 环流风速的计算

采用 Rankine 模型^[41]计算 V_r :

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} V_{\max} & r \in [0, R_{\max}] \\ \frac{R_{\max}}{r} V_{\max} & r \in (R_{\max}, \infty) \end{cases} \tag{4}$$

式中: $V_{\max}$ 为最大风速值。
 V_r 的风向与圆对称风场的逆时针切向方向之间存在一个内偏角,离台风中心越远,该值越大,一般近似取为 20° 。

4.3 按微地形修正风速

微地形用地形坡度、地势走向及高程差 3 个要素来描述山坡与山峰等局部复杂地形。按风向与杆塔点的微地形,可将杆塔承受的风分为 4 类,即迎风风、背坡风、顺坡风及过渡带风^[24]。顺坡风在正面遇到的地形阻力较小,可忽略风速的变化;迎风风被迫沿坡面上升,风速随高程的上升而变大;背坡风沿坡面下沉,风速随高程的下降而变小;过渡带风受到的影响介于顺坡风和迎风风之间。

4.3.1 山峰和山坡对迎风风的影响

对于较规则的山峰和山坡,如图 2 所示,山顶 B 处相对山麓 A 处的风速修正系数 k 为^[42]:

$$k = \sqrt{c} \left(2 - e^{-0.07\sqrt{\Delta h}} \right) \tag{5}$$

式中: c 为山坡倾角系数,当山坡倾角 $\varphi < 20^\circ$ 时, $c = 0.8$, $20^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$ 时, $c = 0.9$, $\varphi > 30^\circ$ 时, $c = 1.0$; Δh 为山顶与山麓间的高差。

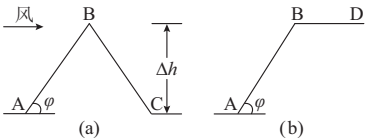


图 2 山峰和山坡示意图

Fig.2 Schematic diagram of mountain and hillside
取 A 处的修正系数 k_A 为 1.0,山峰 C(或山坡 D)处的修正系数 k_C (或 k_D)为 0.5(或 1.0),其他点处的修正系数可按线性插值确定。

4.3.2 山峰或山坡对过渡带风的影响

设 ψ 为过渡带风 V 在水平面内与地势走向的夹角,可将 V 在水平面内分解为顺坡风分量 V_a 及迎风风分量 V_t :

$$\begin{cases} V_t = V \sin \psi \\ V_a = V \cos \psi \end{cases} \tag{6}$$

显然,当 ψ 为 0° (或 90°)时,即为顺坡风(或迎风风)。 ψ 会影响 V_t 上升气流与水平面的夹角,即气流坡度 φ' ,使其往往大于山坡倾角 φ 。表 1 中数值是针对迎风风的气流坡度随山坡倾角及风速(8, 12, 16, 20, 28 m/s)的变化关系^[42],可用于实际计算。

气流越过山顶后,会在背风坡出现流动分离和涡旋,其气流坡度还无定论。

表 1 气流坡度与山坡倾角和风速的关系
Table 1 Relationship between airflow slope and hill slope & wind force

山坡倾角/ $(^\circ)$	不同风速下的气流坡度/ $(^\circ)$				
	8	12	16	20	28
5	5	5	5	5	5
8	8	14	18	27	35
10	10	14	25	32	41
12	12	8	25	32	42
15	15	14	28	34	48
20	29	21	32	35	48
25	24	28	34	44	52

4.3.3 其他地形

气流在峡谷口或山口受两侧山的绕流的影响而被压缩,导致风速增大。上述狭道效应的强弱与气流风向角有关^[43];当风向角为 0° (或 30°)时,谷内风速比入口风速增加 $30\% \sim 60\%$ (或 $20\% \sim 40\%$);当风向角大于 45° 时,狭道效应可忽略。

河岸、湖边等地形的风速修正系数为 1.00 $\sim$ 1.20^[44];而山间盆地、谷地等闭塞地形地物的风速修正系数取值 0.75 $\sim$ 0.85^[45];当线路两侧的树木平均高度超过杆塔的 $2/3$ 时,风速修正系数取值 0.68 $\sim$ 0.87^[46]。

5 输电走廊的降雨量

5.1 地理环境对降雨量的影响

山坡对降雨量的影响^[26-27]如下。

- 1)地形对降水的最大影响发生在气流垂直作用于迎风坡且地形坡度为 45° 左右时;若坡度从 45° 减小或增加,地形对降水的影响都会降低。气流与山坡地势走向夹角越大,地形对降水的增幅作用越大。
- 2)当地形坡度比较均一时,迎风坡降雨强度一般是先随高度的增加而增大。最大降水高度一般出现在相对高差的 $70\% \sim 80\%$;而当高度进一步增加时,降雨量反而减小。背风坡的降水强度总是随山体高度升高而增大。

3)若是孤山,水汽受阻时将沿山体四周绕流抬升,山体四周降水量随高程增加而增大。

4)其他地形对降水量的影响^[28]:气流与河谷、峡谷的夹角在 $0 \sim 50^\circ$ 范围内减小时,降水量增加,最大可达 4.0 倍;喇叭口地形开放度(即谷口与谷尾宽度之比)越大,降雨增幅越大,降水增幅为平地的 1.5 $\sim$ 2.6 倍,最高达 3.5 $\sim$ 4.0 倍。

5.2 影响次生灾害的有效降雨量

降雨可能触发山洪、滑坡和泥石流等次生灾害。由于每次降雨只有部分雨量通过入渗或径流改变坡体或地表的含水量,且其对次生灾害的影响随着时

间逐步衰减,故一般用有效降雨量 R_e 来反映降雨过程对岩土体或地表产生作用的雨量:

$$R_e = R_a + R_z + R_s \tag{7}$$

$$R_a = \sum_{i=1}^n \tau^i R_i \tag{8}$$

式中: R_a 为间接前期有效降雨量,对应于当天之前的降雨过程; R_z 为直接前期有效降雨量,对应于当天内已发生的降雨过程; R_s 为未来时段的预报雨量; τ 为衰减系数, $\tau \leq 1.0$; R_i 为过去的第 i 日一天内的降雨量。

6 台风及暴雨导致的输电线路故障率

6.1 台风导致的输电线路故障率

6.1.1 断线故障率

将导线视为铰链,并假设导线的荷载沿长度均匀分布,故采用斜抛物线计算相关参数。在水平风 v 作用下,忽略顺线路方向的风荷载,每档导线上垂直于导线方向的水平风荷载 W_1 为:

$$W_1 = 0.625 \alpha_1 \mu_1 N' L D v^2 \sin^2 \theta \times 10^{-3} \tag{9}$$

式中: α_1 为导线风压不均匀系数; μ_1 为导线体型系数; N' 为相导线分裂数; L 为导线在风荷载下的长度; D 为导线外径; θ 为风向与导线方向的夹角。

在平原地区或大尺度地形环境的研究中,一般只考虑 W_1 。但在山坡处则应考虑导线上的垂直风荷载 F_v 为:

$$F_v = 0.625 \alpha_1 \mu_1 N' L D v_v^2 \times 10^{-3} \tag{10}$$

式中: v_v 为垂直线路向上的风速。

输电线路的自重 G 为:

$$G = N' m_0 g L \tag{11}$$

式中: m_0 为单位长度导线的质量; g 为重力加速度。

在风作用下该档导线的总荷载 Q 及总比载 γ 分别为:

$$Q = \sqrt{(G - F_v)^2 + W_1^2} \tag{12}$$

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi L D^2} \tag{13}$$

由斜抛物线公式计算导线在风荷载下的长度 L 为:

$$L = \frac{l}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^3}{24 \sigma_0^2} \cos \beta \tag{14}$$

式中: l 为该档线路档距; β 为悬点间高差角; σ_0 为风荷载下导线的水平应力。

设该档导线在制造温度为 t_0 时的原始长度为 L_0 ,在风荷载下的导线长度为 L ,二者关系为^[47]:

$$L_0 = L \left[1 - \frac{\sigma_{av}}{E} - \alpha_t (t_m - t_0) \right] \tag{15}$$

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_0}{\cos \beta} + \frac{\gamma^2 l^2}{24 \sigma_0 \cos \beta} \tag{16}$$

式中: σ_{av} 为导线的平均应力; E 为导线的弹性模量; α_t 为导线的温度膨胀系数; t_m 为风荷载下的温度。

根据无风和风荷载状态下导线原始长度相等的原则,可求得风荷载状态下导线的水平应力 σ_0 。

对连续档中的导线,忽略绝缘子的偏移对悬点间高差角的影响。导线最低点到较高杆塔的水平距离为:

$$l_m = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma} \sin \beta \tag{17}$$

该档导线最大应力 σ_m 为较高杆塔导线悬挂点所受应力:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_0^2 + \frac{\gamma^2 l_m^2}{\cos^2 \beta}} \tag{18}$$

采用指数函数拟合输电线路风荷载过载断线故障率 P_1 与导线最大应力 σ_m 间的关系^[48]:

$$P_1 = \begin{cases} K_1 e^{\frac{\sigma_m}{T_1}} & \sigma_m < \mu_1 \sigma_1 \\ 0.01 & \sigma_m \geq \mu_1 \sigma_1 \end{cases} \tag{19}$$

式中: $\mu_1 \sigma_1$ 为导线所能承受的极限应力,其中 σ_1 为导线的设计应力, μ_1 为导线安全系数; K_1 和 T_1 为与线路参数相关的常数。

6.1.2 倒塔故障率

折杆或倒塔的主要原因有:①杆塔顺线路方向两侧的不平衡力;②杆塔风荷载超过杆塔的承受能力。

杆塔所受的不平衡力 ΔF 可以根据杆塔两侧的导线水平应力 σ_{10} 及 σ_{20} 求得:

$$\Delta F = \frac{\pi N D^2}{4} \sqrt{\sigma_{10}^2 \sigma_{20}^2 - 2 \sigma_{10} \sigma_{20} \cos \Phi_z} \tag{20}$$

式中: Φ_z 为转角塔两侧输电线路的夹角,对直线塔 $\Phi_z = 0$; N 为杆塔上的导线数量。

杆塔在水平方向受到的风总荷载 W_t 包括垂直于线路方向的风荷载 W_{t1} 和顺线路方向的风荷载 W_{t2} ^[49]:

$$W_t = \sqrt{(\Delta F \pm W_{t2})^2 + W_{t1}^2} \tag{21}$$

式中:当 ΔF 与 W_{t2} 方向一致时,取“+”,否则取“-”。

$$W_{t1} = 0.625 k_t k_c A_c v^2 \sin^2 \theta \tag{22}$$

$$W_{t2} = \frac{k_t - 1}{k_t} k_z W_{t1} \tag{23}$$

式中: k_t 为风振系数; k_c 为杆塔风荷载体型系数; A_c 为杆塔挡风面积; k_z 的取值为 1.00~1.05。

倒塔故障率 P_t :

$$P_t = \begin{cases} K_2 e^{\frac{W_t}{T_2}} & W_t < \mu_t H_t \\ 0.01 & W_t \geq \mu_t H_t \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\mu_t H_t$ 为杆塔所能承受的极限荷载,其中 H_t 为杆塔的设计荷载, μ_t 为杆塔安全系数; K_2 和 T_2 为与线路参数相关的常数^[48]。

6.1.3 异物挂线故障率

采用影响异物挂线的因素为输入量,建立相关故障率的模糊数学模型。这些因素包括:①线路所处风速 v ,取其归一化值 v' (基准值根据每段线路的实际环境选取);②风向与导线走向的夹角 θ ;③导线密集系数 $\alpha_d = N/3$;④线路档距系数 $\alpha_1 = 1/400$;⑤线路周边环境 α_s ,以空旷环境为基准,根据线路走廊附近工业区、居民区、树木、交叉线路等情况取系数为 $1.0 \sim 2.0$ 。

将上述因素综合为两个参数,即易挂环境参数 E_f 及易挂线路参数 L_p 。

$$E_f = \alpha_s v' \sin \theta \quad (25)$$

其隶属函数如图 3 所示,其模糊分割数为 7,即 Y_{NBY} (E_f 极小)、 Y_{NMY} (E_f 很小)、 Y_{NSY} (E_f 小)、 Y_{OY} (E_f 中等)、 Y_{PSY} (E_f 大)、 Y_{PMY} (E_f 很大)及 Y_{PBY} (E_f 极大)。

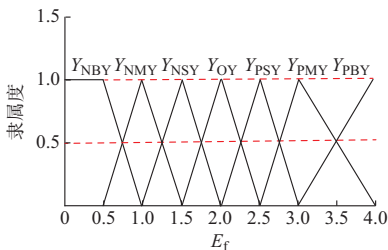


图 3 E_f 的隶属函数
Fig.3 Membership function of E_f

$$L_p = \alpha_d \alpha_1 \quad (26)$$

其隶属函数如图 4 所示,其模糊分割数为 5,即 H_{NBH} (L_p 很小)、 H_{NSH} (L_p 小)、 H_{OH} (L_p 中等)、 H_{PSH} (L_p 大)及 H_{PBH} (L_p 很大)。

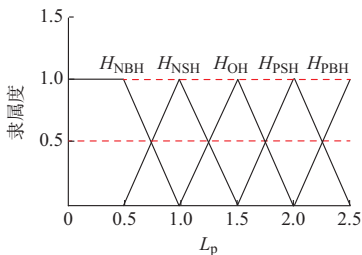


图 4 L_p 的隶属函数
Fig.4 Membership function of L_p

组合得到 35 条模糊推理规则,如表 2 所示。通过 Mamdani 推理的最小-最大-重心法去模糊化得

到异物挂线故障率 P_y ,下文模糊模型去模糊化都采用该方法。

表 2 异物挂线故障率的模糊规则表
Table 2 Fuzzy rules of transmission line fault probability by foreign bodies

变量	$P_y/10^{-6}$				
	H_{NBH}	H_{NSH}	H_{OH}	H_{PSH}	H_{PBH}
Y_{NBY}	1	1	1	1	10
Y_{NMY}	1	1	10	10	10
Y_{NSY}	1	10	100	100	100
Y_{OY}	10	10	100	500	500
Y_{PSY}	10	100	500	1 000	1 000
Y_{PMY}	10	500	1 000	1 000	5 000
Y_{PBY}	500	1 000	5 000	5 000	10 000

6.1.4 风偏闪络故障率

将绝缘子串视为刚性直杆,不会弯曲。在平原地区或大尺度地形环境的研究中,一般只考虑水平风荷载引起的风偏;但在山坡等微地形处,应计及垂直风速分量的影响。按静力学计算悬垂绝缘子串的风偏角 η ^[50]:

$$\eta = \arctan \left(\frac{(0.5F_j + W_H) \cos \varphi'}{(0.5G_j + W_V - (0.5F_j + W_H) \sin \varphi')} \right) \quad (27)$$

$$F_j = 0.625 n_1 n_2 A v^2 \quad (28)$$

$$W_H = N' l_H W_0 \quad (29)$$

$$W_V = N' l_V G_0 + N' (q_{10} T_{10} + q_{20} T_{20}) \quad (30)$$

式中: l_H 和 l_V 分别为水平档距和垂直档距; W_H 为垂直于导线走向的水平风荷载; W_V 为导线垂直荷载; G_0 和 W_0 分别为单位长度导线自重力和风荷载; G_j 和 F_j 分别为绝缘子串重力及其风荷载; n_1 为一相导线的绝缘子串数; n_2 为每串绝缘子片数; A 为每片绝缘子的受风面积,单裙绝缘子取 0.03 m^2 ,双裙绝缘子取 0.04 m^2 ; q_{10} 和 q_{20} 为杆塔两侧高差系数; T_{10} 和 T_{20} 为杆塔两侧导线的水平张力。

根据风偏角及塔型,可得导线对塔身的距离 L_s 。绝缘子风偏闪络故障率 P_f 为:

$$P_f = \begin{cases} K_3 e^{\frac{L_a - L_s}{T_3}} & L_s > L_a \\ 0.01 & L_s \leq L_a \end{cases} \quad (31)$$

式中: L_a 为线路允许的最小风偏距离; K_3 和 T_3 为与线路参数相关的常数^[48]。

6.1.5 线路在台风中的总故障率

设线路 i 的档 j 的断线故障率 $P_{ij,l}$ 、倒塔故障率 $P_{ij,t}$ 、异物挂线故障率 $P_{ij,y}$ 和风偏闪络故障率 $P_{ij,f}$ 。在一定条件下,各档间以及档内不同类型故障间相互独立^[21]。第 j 档的故障率为:

$$P_{t,ij} = 1 - (1 - P_{ij,l})(1 - P_{ij,t}) \cdot (1 - P_{ij,y})(1 - P_{ij,f}) \quad (32)$$

线路 i 的故障率为:

$$P_{t,i} = 1 - \prod_{j=1}^z (1 - P_{t,ij}) \quad (33)$$

式中: z 为线路档数。

6.2 暴雨导致的输电线路故障率

6.2.1 滑坡引发的线路故障率

基于滑坡机理分析,杆塔滑坡灾害影响的主要因素有^[51]:①有效降雨量 R_e 的归一化值 R_e' (基准值根据每段线路实际环境选取);②地形坡度系数 S_1 ,坡度在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时取为 1.0,坡度大于 40° 时调高系数取 1.0~1.5,坡度小于 20° 时取 0.5~1.0;③地形高度系数 S_2 ,高度为 50~100 m 时取为 1.0,大于 100 m 时取 1.0~1.3,小于 50 m 时取 0.8~1.0;④坡面形态系数 S_3 ,以直线型坡面为基准,凸型坡面时取 1.0~1.5,凹型坡面时取 0.5~1.0;⑤地质系数 α_g ,以杆塔所处地带无断层和褶皱的岩层为基准,根据断层和岩层结构恶化情况取为 0.5~1.0;⑥水文条件系数 α_h ,以地表基本无径流,地下水埋藏很深时为基准,根据地表径流和地下水埋藏深度条件的变化,取为 1.0~2.0;⑦疲劳系数 α_f ,即线路投运时长与设计寿命周期的比值;⑧杆塔相对灾害体的位置系数 α_p ,在灾害影响范围外为基准,否则取为 1.0~2.0;⑨杆塔基岩安全系数 α_b ,以基岩完整且无风化为基准,其他情况取为 0.5~1.0。

将上述因素综合为两个系数,即滑坡强度系数 E_s 及杆塔易损系数 λ_t :

$$E_s = \frac{S_1 S_2 S_3 \alpha_h}{\alpha_g} R_e' \quad (34)$$

$$\lambda_t = \frac{\alpha_f \alpha_p}{\alpha_b} \quad (35)$$

其隶属度函数见附录 A 图 A1 及图 A2。据此建立的 49 条独立的模糊规则见附录 A 表 A1,通过去模糊化可得到滑坡引发的线路故障率。

6.2.2 山洪引发的线路故障率

山洪灾害影响杆塔安全的主要因素有^[52-53]:①沟道分布系数 α_c ;②沟道堵塞系数 α_k ,以沟道通直为基准,按其弯曲程度和沟道流通情况取 1.0~2.0;③地形坡度系数 S_1' ,以坡度在 $25^\circ \sim 50^\circ$ 为基准,坡度大于 50° 时取为 1.0~1.5,坡度小于 25° 时取为 0.7~1.0;④其他因素与滑坡因素中的有效降雨量、地形高度系数、水文条件系数、疲劳系数、杆塔相对灾害体的位置系数及杆塔基岩安全系数相同。

将上述因素综合为两个系数,即山洪强度系数 E_m 及杆塔易损系数 λ_t 。

$$E_m = \alpha_c \alpha_k \alpha_h S_1' S_2 R_e' \quad (36)$$

其模糊隶属度函数见附录 A 图 A3。而 λ_t 则与式(35)相同。附录 A 表 A2 给出了这两个参数组成的 35 条模糊规则,通过去模糊化可得到山洪引发的

线路故障率。

6.2.3 泥石流引发的线路故障率

泥石流影响杆塔灾害的主要因素^[52]除了山洪的致灾因素外,还有松散固体物质的稳定系数 K_d ^[54]。

$$K_d = \frac{[(\rho_{sat} g H + \rho_m g d) \cos \varphi - \rho_m g d \sin \varphi + \rho g H \tan \varphi + \left((\rho_s - \rho) g H + \rho g d \right) \tan \chi + b]}{(\rho_{sat} g H + \rho_m g d) \sin \varphi} \rightarrow \quad (37)$$

式中: χ 为松散物质的内摩擦角, b 为内聚力,二者取值可参考线路设计手册^[55]; ρ_{sat} 为饱水后松散固体物质的密度; ρ_m 为含沙水流的密度; ρ_s 为固体松散物质密度; ρ 为水密度; H 为饱和松散固体物质厚度; d 为坡面出口处的径流深度,其计算表达式^[56]如式(38)所示。

$$d = 86.4 (\lambda_h N_0 L_0 I)^{0.6} J^{-0.3} \quad (38)$$

式中: λ_h 为坡面汇流系数^[57],表示降雨量转化为地表径流的比例; N_0 为山坡的滞留系数,取值 0.2~0.3; L_0 为坡顶到坡面出口处的距离; I 为降雨强度; J 为山坡的平均坡降,即 $\tan \varphi$ 。

将上述因素综合为两个系数,即泥石流强度系数 E_d 及杆塔易损系数 λ_t 。

$$E_d = \frac{\alpha_c \alpha_k \alpha_h S_1' S_2}{K_d} R_e' \quad (39)$$

其模糊隶属度函数见附录 A 图 A4。而 λ_t 则与式(35)相同。附录 A 表 A3 给出了这两个参数组成的 49 条模糊规则,通过去模糊化可得到泥石流引发的线路故障率。

6.2.4 线路在暴雨中的总故障率

设线路 i 的档 j 的山洪、滑坡和泥石流灾害下的故障率分别为 $P_{ij,mf}$, $P_{ij,ls}$, $P_{ij,df}$ 。假设各档内及档间不同类型故障相互独立。第 j 档的故障率为:

$$P_{R,ij} = 1 - (1 - P_{ij,mf})(1 - P_{ij,ls})(1 - P_{ij,df}) \quad (40)$$

线路 i 的故障率为:

$$P_{R,i} = 1 - \prod_{j=1}^z (1 - P_{R,ij}) \quad (41)$$

6.3 台风及暴雨共同作用下的线路故障率计算

复合灾害下的电网故障率评估将在后续文章详细介绍。

7 仿真算例

现行的架空输电线路设计规范(GB 50545—2010)规定:110~330 kV 线路的设计风速不低于 23.5 m/s;500~750 kV 线路的设计风速不低于 27 m/s。因此,本文假定 220 kV 及 500 kV 线路最大设计风速分别为 25 m/s 及 30 m/s,安全系数设

为 2.5。

以江西省赣州地区线路参数比较完整的 22 条 220 kV 和 6 条 500 kV 输电线为例。导线型号分别为 2×LGJ240/30 和 4×LGJ400/50;绝缘子串型为单悬垂串型,片数分别为 14 片和 28 片。仿真中, K_1 和 K_2 的取值均为 10^{-6} , K_3 的取值为 0.01, T_1 , T_2 , T_3 的取值分别为 $\mu_1\sigma_1/\ln 10^4$, $\mu_1H_t/\ln 10^4$, $L_a/\ln 10^5$,前期有效降雨量为 30.0 mm。

7.1 台风和暴雨参数

表 3 给出了台风及暴雨登陆江西赣州后相邻 3 个场景的相关信息,时间间隔为 1 h,降雨覆盖范围和台风风场范围一致。

表 3 不同场景下的台风和暴雨参数
Table 3 Parameters of typhoon and rainstorm under three scenarios

场景	台风和暴雨参数				
	台风中心位置	最大风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	十级风圈 半径/km	七级风圈 半径/km	降雨量/ mm
1	(115.1°E,25.5°N)	35.0	250	400	15.0
2	(115.0°E,25.8°N)	30.0	150	350	15.0
3	(114.9°E,26.0°N)	20.0	0	250	10.0

7.2 线路走廊风速和降雨量的计算

以场景 3 下 220 kV 厂龙 I 线为例来说明线路走廊的地理环境对风速和降雨量的影响。假定山地的高程为 200 m,坡度为 20°;丘陵的高程为 100 m,坡度为 10°。由附录 B 表 B1 给出的仿真结果可知:气流经过山地和丘陵等微地形时,风力增强,降雨量增加,线路故障率增大。说明在计算线路故障率时,计及微地形影响的重要性。

7.3 线路故障率仿真结果

28 条线路在 3 种场景下由台风和暴雨引发的故障率如附录 B 表 B2 所示。可知:①输电线路的长度、距台风中心的距离以及走向的不同,使得同一时段内不同线路的故障率不同;②随着台风中心位置由场景 1 向场景 3 移动,其最大风速逐渐减小,台风风场强度减弱,使得线路故障率逐渐减小;但由于台风风场的对称性以及线路与风速夹角的改变,使得部分线路故障率并不呈现单调减小,如厂龙 I、II 线和白漂线;③场景 1、场景 2 和场景 3 的降雨量分别为 15,15,10 mm,随着降雨时间的持续,有效降雨量增加,所有线路的故障率都不断增大。

8 结语

为有效防御台风及暴雨引发大范围停电,除了必须跟踪气象数据及轨迹外,还应该掌握输电走廊的地形、地质及植被等非电气量数据、电气设备的位置及走向。基于自然灾害动力学规律,预报各设备

受灾场景及其故障率的时空演变,按各潜在故障关注度的大小排序;修改传统的在线安全分析功能采用的不变的预想故障表,并作为与电网安全稳定分析的信息接口。由于被优先关注的总是当时风险最大的那些潜在故障,故防御系统对台风及暴雨灾害有一定的自适应能力。需要进一步考虑综合利用气象卫星、就地布置的自动气象站、多普勒雷达等信息,并不断改进算法。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 胡亚敏,宋丽莉,刘爱君,等.近 58 年登陆我国热带气旋的气候特征分析[J].中山大学学报(自然科学版),2008,47(5):115-121.
HU Yamin, SONG Lili, LIU Aijun, et al. Analysis of the climatic features of landfall tropical cyclones in China during the past 58 years[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(5): 115-121.
[2] 张勇.输电线路风灾防御的现状与对策[J].华东电力,2006,34(3):28-31.
ZHANG Yong. Status quo of wind hazard prevention for transmission lines and countermeasures[J]. East China Electric Power, 2006, 34(3): 28-31.
[3] 唐斯庆,张弥,李建设,等.海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J].电力系统自动化,2006,30(1):1-7.
TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th—cause and recommendation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-7.
[4] 吴明祥,包建强,叶叶,等.超强台风“桑美”引起温州电网输电线路事故的分析[J].电力建设,2007,28(9):39-41.
WU Mingxiang, BAO Jianqiang, YE Yin, et al. Transmission line accident analysis of Wenzhou grid caused by super typhoon “SAOMAI”[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(9): 39-41.
[5] 彭向阳,黄志伟,戴志伟.配电线路台风受损原因及风灾防御措施分析[J].南方电网技术,2010,4(1):99-102.
PENG Xiangyang, HUANG Zhiwei, DAI Zhiwei. Analysis on the cause of distribution line’s damage during typhoon and counteract measures[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 99-102.
[6] 韩昌.上海常见气象灾害及电力系统安全应对策略[J].上海电力,2008(5):440-442.
HAN Chang. Countermeasure strategy of common meteorological disasters in Shanghai and electric power safety [J]. Shanghai Electric Power, 2008(5): 440-442.
[7] 南方电网全力抢修粤桂滇受暴雨影响电力设施[EB/OL]. [2012-06-26]. <http://www.sasac.gov.cn/n1180/n1226/n2410/n314409/14618311.html>.
[8] 北京遭遇 61 年不遇特大暴雨[EB/OL]. [2012-07-23]. http://www.indaa.com.cn/pl2011/hottopics2012/bjdybydyg/201207/t20120723_1092515.html.
[9] 严明良,王锰,于波,等.基于模糊聚类分型的数值产品暴雨预报

释用方法[J].气象科学,2008,28(5):581-585.

YAN Mingliang, WANG Meng, YU Bo, et al. A heavy rainfall forecast method based on fuzzy cluster typing by using application and interpretation of NWP [J]. Scientia Meteorological Sinica, 2008, 28(5): 581-585.

[10] XUE Y S, XIAO S J. Generalized congestion of power systems: insights from the massive blackouts in India[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(2): 91-100.

[11] XUE Y S, CAI B, JAMES G, et al. Primary energy congestion of power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 2(1): 39-49.

[12] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.

XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.

[13] 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 Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.

[14] BROWN R E. Changing infrastructure requirements for major weather events[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA: 3p.

[15] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统构思:(一)新的挑战与反思[J].电力系统自动化,2008,32(9):1-6.

XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part one new challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.

[16] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统构思:(二)任务与展望[J].电力系统自动化,2008,32(10):1-5.

XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part two tasks and prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.

[17] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.

XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part one from isolated defense lines to coordinated defending [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.

[18] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.

XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part two reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.

[19] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J].电力系统自动化,2006,30(3):1-10.

XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part three optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.

[20] 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.

WANG Haohao, LUO Jianyu, XU Taishan, 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.

[21] 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):1-9.

XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 1-9.

[22] 王昊昊,徐泰山,李碧君,等.自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统的应用设计[J].电力系统自动化,2014,38(9):143-151.DOI:10.7500/AEPS20131121006.

WANG Haohao, XU Taishan, LI Bijun, et al. Design of coordinated prevention system in self-adapting natural environment for safety and stability of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 143-151. DOI: 10.7500/AEPS20131121006.

[23] 王守礼.微地形微气象对送电线路的影响[M].北京:中国电力出版社,1994.

[24] 陈启新.地形高差对风速影响的探讨[J].山西水利科技,2002(1):10-12.

CHEN Qixin. Discussing into influence of topographic height difference on wind velocity [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2002(1): 10-12.

[25] 包博,程彻刚,熊小伏,等.一种计及微地形修正的输电线台风风险预警方法[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.

[26] 傅抱璞.地形和海拔高度对降水的影响[J].地理学报,1992,47(4):302-314.

FU Baopu. The effects of topography and elevation on precipitation[J]. Acta Geographica Sinica, 1992, 47(4): 302-314.

[27] 廖菲,洪延超,郑国光.地形对降水的影响研究概述[J].气象科技,2007,35(3):309-316.

LIAO Fei, HONG Yanchao, ZHENG Guoguang. Review of orographic influences on surface precipitation [J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(3): 309-316.

[28] 陈明,傅抱璞,于强.山区地形对暴雨的影响[J].地理学报,1995,50(3):256-263.

CHEN Ming, FU Baopu, YU Qiang. Influence of topography on storm rainfall[J]. Acta Geographica Sinica, 1995, 50(3): 256-263.

[29] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather: modeling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 115-120.

- [30] 王兆坤.洪涝灾害下电力损失及停电经济影响的综合评估研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [31] 姚恺丰,于继来,徐泰山,等.热带气旋引发电网群发性故障的动态事故集生成方法[J].电网技术,2014,38(6):1593-1599.
YAO Kaifeng, YU Jilai, XU Taishan, et al. A method to generate dynamic accident set for power grid clustered faults caused by tropical cyclone[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1593-1599.
- [32] 邵振国,林智敏,林韩,等.在线安全预警中的预想事故生成[J].电力系统自动化,2008,32(7):15-18.
SHAO Zhenguo, LIN Zhimin, LIN Han, et al. Online determination of predictive contingency in security forewarning analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 15-18.
- [33] 赵文元,杨保东.输电线路风偏故障的预防和抑制[J].电力学报,2004,19(1):59-61.
ZHAO Wenyuan, YANG Baodong. Defending and controlling wind lean of transmission line[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19(1): 59-61.
- [34] 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.
- [35] 张珍,李世海,马力.重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3187-3191.
ZHANG Zhen, LI Shihai, MA Li. Probability analysis of relationship between landslide and rainfall in Chongqing area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3187-3191.
- [36] 盛晓杰.基于边坡危险性区划的降雨型滑坡预报预警方法研究及应用[D].重庆:重庆大学,2011.
- [37] 魏丽,单九生,朱星球.植被覆盖对暴雨型滑坡影响的初步分析[J].气象与减灾研究,2006,29(1):29-33.
WEI Li, SHAN Jiusheng, ZHU Xingqiu. Preliminary analysis of the impact of forest cover on landslide triggered by torrential rainfall [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2006, 29(1): 29-33.
- [38] 唐邦兴,吴积善.山地自然灾害(以泥石流为主)及其防治[J].地理学报,1990,45(2):202-209.
TANG Bangxing, WU Jishan. Mountain natural hazards dominated (mainly debris flow) and their prevention[J]. Acta Geographica Sinica, 1990, 45(2): 202-209.
- [39] WU Y J, XUE Y S, WANG H H, et al. Extension of power system early-warning defense schemes by integrating typhoon information[C]// 2nd International Conference on Sustainable Power Generation and Supply on SUPERGEN, September 8-9, 2012, Hangzhou, China; 7p.
- [40] MIYAZAKI M, UNEO T, UNOKI S. Theoretical investigations of typhoon surges along the Japanese coast (II) [J]. Oceanographical Magazine, 1962, 13(2): 103-118.
- [41] 陈孔沫.一种新的台风风场分布模式[J].海洋科学,1990(3):1-5.
CHEN Kongmo. A new model of typhoon wind field distribution[J]. Marine Sciences, 1990(3): 1-5.
- [42] 朱瑞兆.风压计算的研究[M].北京:科学出版社,1976.
- [43] 韩卫恒,刘俊勇,张建明,等.冰冻灾害下计入地形及冰厚影响的分时段电网可靠性分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(15):81-86.
HAN Weiheng, LIU Junyong, ZHANG Jianming, et al. Power system time-section reliability assessment analysis considering topography and icing under freezing disaster weather[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 81-86.
- [44] 中华人民共和国城乡建设环境保护部.建筑荷载规范:GBJ 9—87[S].1988.
- [45] 中华人民共和国建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2001 [S].2002.
- [46] 王守礼,李家垣.电力气候[M].北京:气象出版社,1994.
- [47] 黄新波,陈荣贵,王孝敬,等.输电线路在线监测与故障诊断[M].北京:中国电力出版社,2008:157-196.
- [48] 谢云云,薛禹胜,文福拴,等.冰灾对输电线路故障率影响的时空评估[J].电力系统自动化,2013,37(18):32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41.
- [49] 熊铁华,梁枢果,邹良浩.风荷载下输电铁塔的失效模式及其极限荷载[J].工程力学,2009,26(12):100-104.
XIONG Tiehua, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao. Dominant failure modes of a transmission tower and its ultimate capacity under wind load[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 100-104.
- [50] 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]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会,2006年10月1日,南京市.
- [51] 殷坤龙.滑坡灾害预测预报[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [52] 王礼先,于志民.山洪及泥石流灾害预报[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [53] 张艳艳.滑坡灾害下输电塔易损性评估模型研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [54] 匡乐红.区域暴雨泥石流预测预报方法研究[D].湖南:中南大学,2006.
- [55] 国家电力公司东北电力设计院.电力工程高压送电线路设计手册[M].2版.北京:中国电力出版社,2011.
- [56] 林平一.小汇水面积暴雨径流计算法(增订本)[M].北京:水利电力出版社,1958:7-22.
- [57] 华东电力设计院.电力工程水文技术规程:DL/T 5084—1998 [S].1998.

吴勇军(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统外部灾害防御。E-mail: cqwuyongjun_@126.com

薛禹胜(1941—),男,通信作者,博士生导师,中国工程院院士,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

谢云云(1985—),男,讲师,主要研究方向:电力系统外部灾害防御。E-mail: yunyun-xie@163.com

(编辑 万志超)

(下转第 83 页 continued on page 83)

Space-time Impact of Typhoon and Rainstorm on Power Grid Fault Probability

WU Yongjun^{1,2}, XUE Yusheng², XIE Yunyun^{1,2}, WANG Haohao², DUAN Ronghua³, HUANG Wei³

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. Yunnan Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, China)

Abstract: The ways of electrical equipment fault probability influenced by typhoons and rainstorms are analyzed in detail. The scope of data acquisition of blackout defense system is expanded to macroscale meteorological forecast information as well as local meteorological data. A spatial-temporal early-warning method against these natural disasters is proposed. Firstly, according to the information of meteorology, environment, topography and geomorphology, the spatial-temporal evolution trends of typhoons and rainstorms can be predicted and modified. Then, the probability of faults such as broken lines, collapsed towers, flashover caused by adverse weather or derivative disasters such as landslide, debris flow and flood is forecasted on line. Through the module interface between natural disaster evaluation and power system stability analysis, the predictive fault set of online security analysis which was fixed can now be dynamically modified. Therefore, the blackout defense system against typhoon and rainstorm has definite ability of early warning and decision support.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228204), State Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 61533010), China-Thailand Cooperation Fund Project (No. 5151101161), and Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Company (No. YDTZ-F2014-105).

Key words: blackout defense; natural disaster; typhoon disaster; rainstorm disaster; micro topography; fault probability; online evaluation; security early warning