

DOI: 10.7500/AEPS20130606012

# 电网雷击故障概率的时空在线预警

谢云云<sup>1,2</sup>, 薛禹胜<sup>2,3</sup>, 王昊昊<sup>2</sup>, 徐泰山<sup>2</sup>, 董朝阳<sup>4</sup>, 金学成<sup>5</sup>

(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 210003;

3. Centre for Intelligent Electricity Networks, The University of Newcastle, NSW 2308, 澳大利亚;

4. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, 澳大利亚;

5. 江西省电力公司, 江西省南昌市 330077)

**摘要:** 分析雷电的实时演化过程对电力设备故障概率的影响途径, 理清需要采集的信息, 提出电网的雷击故障概率时空变化的预警算法。先根据当前时段的雷电信息, 划分雷电分区; 再与上一时段的分区相关联, 并据此预报未来时段雷电概率在地域上的演变趋势。实现与电力系统安全稳定分析功能的一体化, 用时空分布的预报概率代替传统使用的年平均雷击故障率, 在线修改安全稳定分析软件模块中的预想故障表, 使概率大的潜在故障得到及时的详细分析。在停电防御系统的实际工程应用中加入了对雷暴灾害的自适应能力, 提高了预警水平。

**关键词:** 雷暴灾害; 故障概率; 预警; 在线应用; 停电防御智能化

## 0 引言

国内外的大停电事故提醒我们不能忽视外部自然灾害对电力系统的危害<sup>[1-5]</sup>。其中, 雷击是造成线路闪络的主要原因, 雷击跳闸一直处于各类故障的第一位。2003 年, 中国 66~500 kV 输电线路共跳闸 3 343 次, 其中因雷击引起 1 345 次, 占 40.23%<sup>[6]</sup>。2004 年, 国家电网公司所属 220~500 kV 输电线路共跳闸 1 253 次, 其中因雷击引起 410 次, 占 32.72%<sup>[7]</sup>。2005 年, 国家电网公司所属系统 110~500 kV 输电线路共跳闸 2 297 次, 其中因雷击引起 797 次, 占 34.69%<sup>[8]</sup>。2009 年 11 月的巴西大停电也是由线路雷击故障引起<sup>[9]</sup>。

由于一次系统的造价随着设计标准的提高而急剧增加, 单靠提高一次设备的设计标准来防御极端灾害是不现实的, 因此必须同时提升二次系统的技术水平<sup>[10]</sup>。现有停电防御系统防御对象是由单个故障引起的相继开断, 尚不能处理由极端外部环境造成的群发性故障<sup>[11]</sup>。为解决这个问题, 防御系统

必须引入气象与环境等信息, 分析相应的风险并及时预警; 必须将在线评估功能从针对固定的故障集提升到动态跟踪外部环境, 在线识别高风险的潜在故障<sup>[12]</sup>。因此, 雷击跳闸风险的时空分布的在线评估及正确预警对停电防御极为重要。

为此需要利用各种雷电监测手段, 并开发有效的信息提取及知识提炼算法, 包含雷击范围的预报, 以及各输电设备遭受雷击故障的概率评估。

一种常用的雷电监测手段是采用多个大气电场仪组网监测雷电数据, 反演大气电场强度和极性的分布, 进而预报雷击区域<sup>[13]</sup>。但由于大气电场往往受地面物体的影响而畸变, 且监测范围较小, 反演计算又不适用于多体雷暴的情况, 故一般作为其他预报手段的补充<sup>[14]</sup>。

多普勒气象雷达是气象数据的重要来源。它能反映云层特征的很多信息, 加以综合分析可以识别冰雹、降雨等多种天气特征, 被广泛应用于气象领域。文献<sup>[15]</sup>按其回波强度识别雷击区域, 对单体雷暴效果较好, 而对多体雷暴等情况则需要进一步研究。

文献<sup>[15]</sup>通过实测数据, 证实地闪前不一定有云闪。即使有云闪发生, 通过云闪来预报雷击也无足够的提前时间, 并不可行。

中国的雷电监测与定位网已覆盖大部分国土<sup>[16]</sup>, 能实时而精确地对落雷点定位, 并与电力调度自动化系统交互, 而大量应用于雷击点定位<sup>[17]</sup>、

收稿日期: 2013-06-06; 修回日期: 2013-06-26。

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大项目(91024028); 国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG003-2012); 国家电网公司科技项目(YS11002); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011136); ARC LP120100302; ARC DP120101345。

雷电参数统计<sup>[17]</sup>、防雷水平评估<sup>[18-19]</sup>、雷击事故鉴别<sup>[17]</sup>等。但是,在雷击预警方面的应用还在起步阶段。

设计手册给出的雷击跳闸率是根据历史数据统计而得到的平均值<sup>[20]</sup>,而采用雷电定位系统提供的历史数据可以提高雷击跳闸率的空间分布精度<sup>[21-22]</sup>。但它们都未能按雷暴的实际演变态势而自适应地调整雷击故障率。

本文根据雷电定位实时数据的时空演变,来预报雷电区域,并动态修正雷击故障概率的时空分布。首先根据当前时段的雷击信息,划分雷击分区;再与上一时段的分区信息相关联,预报未来时段可能遭受雷击的各分区范围,并动态评估各输电线路的雷击故障概率。如此逐个时段外推,在线实现雷击故障的预警。该方法已在停电防御系统的实际工程应用中取得很好效果。

## 1 雷击停电故障的预警

### 1.1 雷电对电力设备安全的影响

大气中的云团,在大气电场、温差起电效应和摩擦起电效应的共同作用下,底部带负电荷,并在地面感应出正电荷。当电荷累积到足够多时,云层与大地之间的“电容器”击穿,形成雷电<sup>[23]</sup>。高达几万安的雷电流对电力设备的破坏力巨大;线路过电压会造成绝缘子闪络而线路跳闸;在线路中传播的瞬间,高电压会威胁变电站一次及二次设备的安全。雷击跳闸可能造成相继故障,引发大停电<sup>[9]</sup>。

雷电过电压分为感应雷过电压及直击雷过电压两种。中国 6~35 kV 配电网一般无避雷线,且自身绝缘水平低,其过电压故障 90% 由感应雷造成。

高压输电线则以直击雷为跳闸的主因,电压越高,危害越大。直击雷分为反击和绕击两类。当雷电击中塔顶或避雷线时,雷电流在杆塔与避雷线的波阻抗和接地电阻上的压降使塔顶的暂态电位绝对值骤升;当绝缘子两端压差超过其耐受电压时,造成反击型闪络。当雷电流绕过避雷线直接击中导线时,造成绕击型闪络。

对于变电站,雷击会损坏变压器及开关等一次设备,并在电位分布不均匀的地网附近产生较高的感应电势,影响甚至损坏二次设备。

### 1.2 雷击故障的预警框架

图 1 表示雷电故障的预警流程,由 3 个阶段组成:①雷电分区的时空预报阶段,包括实时数据输入、识别、关联、外推预报等环节;②电力设备故障概率修正阶段;③与电力系统安全性分析软件交

互。数据预处理模块读入静态信息,对参数初始化,将监控区域网格化。实时数据输入模块读入雷电定位系统、多普勒天气雷达、卫星和大气电场仪等的实测数据。划分雷电区域模块则优化某时间断面上实际雷电区域的二维图形描述。关联模块则描述相邻时间断面的雷电区域的时空演化。外推预报模块依据具体的演化情况调用不同的外推算法来预报下一时间断面上的雷电区域。故障概率评估模块则估计各雷电区域内的电力设备发生故障的概率。风险设备集输出模块提供预想故障表,与电力系统安全性分析软件实现一体化。

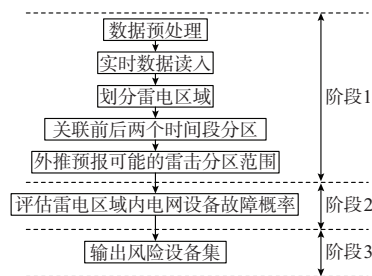


图 1 雷击停电预警系统框架

Fig.1 Framework of thunder-blackout forecast system

## 2 雷电移动态势的预报

### 2.1 数据准备

国网电力科学研究院研发的雷电定位测量系统,综合应用时差法和磁定向法,实现二维地闪定位,可实时提供雷击时间、雷击点、雷电峰值和回击强度等参数<sup>[17]</sup>。2006 年形成了覆盖全国电网和绝大部分国土面积的全国雷电监测网<sup>[24]</sup>。

将监控地域按经纬度方向划分成面积相等的方格,并以其中心点(下称格点)的坐标来标志。将雷电定位系统在一个时间段内测得的落雷点累计到对应的格点。方格的尺寸决定了落雷分区的粒度,并影响外推算法的有效性及其预报区域的准确性,下面取方格为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。

### 2.2 划分雷电分区

文献<sup>[25]</sup>用椭圆来描述雷电预报的各分区,并假设椭圆长轴倾角不变。这将显著增大各预报分区的无效面积。为了减少虚警,本文采用若干个圆与其外切线的集合来描述一个分区,并按其总面积最小来优化有关参数。为此,需要试探不同的格点阈值。将距离小于给定阈值的落雷点归为同一落雷密集区,再用若干个圆与其外切线来围圈每个落雷密集区。在不同的试探方案中选取总面积最小的划分方式,步骤如下(参见图 2)。

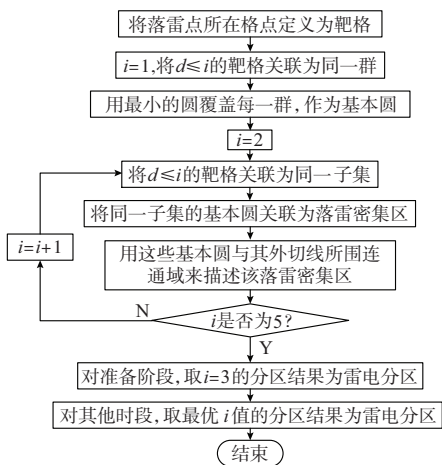


图2 雷电分区的划分流程  
Fig.2 Process of thunder area partition

步骤1: 将某时间断面  $K$  上有落雷点的格点定义为靶格。

步骤2: 准备阶段需要  $K=0$  及  $K=1$  的两个时段。将靶格中心点的经度差与纬度差的较大值 ( $d$ ) 等于 1 者关联为同一群, 分别用大小不同的最小的圆将各群覆盖为基本圆。再将  $d$  不大于 3 的各靶格归并为同一子集, 将中心点位于该子集中的基本圆归并为同一落雷密集区, 并用这些基本圆与其外切线所围连通域来描述该落雷密集区。其间不进行格点阈值  $i$  的优化。

步骤3: 从时段  $K=2$  开始, 对  $i$  值进行动态的优化。分别取格点阈值  $i$  为 2, 3, 4, 5 进行分区, 由于  $i$  取更大的值时, 分区效果太差, 故不予考虑。根据第  $K-2$  及  $K-1$  两个时段的密集区外推第  $K$  个时段的分区 (见 2.4 节), 并与  $K$  时段根据实际落雷数据划分的候选密集区相比较。根据 4.1 节给出的指标来评估  $i$  取不同值时的外推效果, 从中选取最优的  $i$  值。

### 2.3 相邻时段的分区关联

文献 [25] 采用了匈牙利算法 [26] (是 Kuhn-Munkres 算法 [26] 的特例), 通过搜索相邻时段的雷电分区之间的距离之和最小的解, 来识别未来时段的雷电分区。这些算法在下列情况可能出错: ① 新分区出现的同时, 老分区消失; ② 新分区出现的同时, 有老分区合并; ③ 老分区消失的同时, 近处有其他老分区分裂; ④ 老分区合并的同时, 近处有其他老分区分裂。此外, 当相继时间段所识别区域的数目不相等时, 上述匹配算法也可能出错。

为此, 本文改进其规则, 即若同一地区在相邻时段中的分区有重叠, 或距离小于云层在高空风速下可能移动的距离时, 则认为它们有继承关系。此外,

提出用时变关联阵  $A(t)$  表示雷电分区在相邻时段的关联性。其每行代表上一时段的一个分区; 每列代表下一时段的一个分区。矩阵元素为 1 (或为 0) 表示相应的两个分区之间有 (或无) 关联, 即下一时段的该分区继承 (或独立于) 上一时段的相应分区。若关联阵的某行元素均为 0, 则对应的分区消失; 若某列元素均为 0, 则对应的分区为新出现者。若某行仅有一个 1 元素, 则该相邻时段之间无分区的分裂; 若某行有多个 1 元素, 则上一分区分裂为相应的多个分区。如果某列有多个 1 元素, 反映上一分区的相应分区已合并为一个分区。图 3 给出识别相邻时段分区关联性的流程框图。

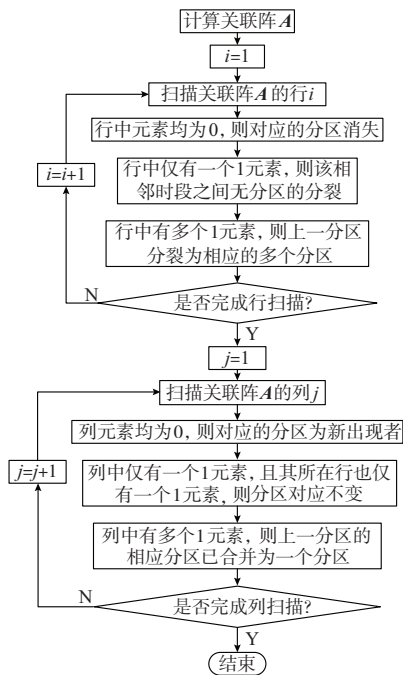


图3 相邻时段分区的关联性识别  
Fig.3 Identification of relevant thunder subareas in two adjacent time-intervals

### 2.4 外推预报可能的雷电分区范围

分区关联的上述新思路较好地反映了各雷电云团运动态势的不同。基于过去两个时段内的关联分区的信息外推, 大大减少了非关联信息的影响, 提高了基础信息的可信度, 使预报更加符合雷电演化的机理。

采用 Holt 双参数线性指数平滑法 [27] 预报未来一个时段内的各雷电分区:

$$\begin{cases} S_t = \alpha x_t + (1-\alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1} \\ x_{t+m} = S_t + b_t m \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $S_t$  为第  $t$  个时段的水平指数平滑值, 作为线性趋势预报模型的截距, 初始值  $S_0 = x_0$ ;  $b_t$  为第  $t$

个时段的趋势指数平滑值,作为线性趋势预报模型的斜率,初始值  $b_0 = 0$ ;  $\alpha$  和  $\beta$  为指数平滑系数,且  $0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1$ ;  $x_t$  为第  $t$  个时段的实测值;  $x_{t+m}$  为第  $t+m$  个时段的预报值。根据数据序列的波动,试算不同的  $\alpha$  与  $\beta$  值,从中取能使近几年预报值的相对误差绝对值或标准差最小的那组值。

不同的关联类型采用如下不同的预报策略,外推预报的算法流程见图 4。

1) 当分区不变时,直接用外推算法预报其演变结果。

2) 当分区  $i$  消失时,将其放入暂存区,若一定步长后仍无关联分区出现,则删除之。

3) 对新出现的分区,若在暂存区有其关联分区,则外推预报;否则,直接确认其为新生分区。

4) 当上一时段的分区  $i$  在下一时段分裂为  $i_1, i_2, \dots, i_n$  时,考虑到暂时性分裂现象的可能性,按两种可能性分别预报:①按分裂的趋势预报,将上一时段的分区  $i$  拆分成对应于分区  $j_1, j_2, \dots, j_n$  的  $i_1, i_2, \dots, i_n$ ,然后分别外推预报,并置其可信度  $C$  (若无历史数据可供统计,则可选 51%);②按实际并未分裂的趋势预报,按上一时段的分区  $i$ ,与下一时段的分区  $j$  (由  $j_1, j_2, \dots, j_n$  合并) 外推,预报未来时段的分区,并置其可信度为  $1-C$ 。

5) 当上一时段的分区  $i_1, i_2, \dots, i_n$  在下一时段合并为  $j$  时,也需按两种可能性分别预报:①按合并的趋势预报,将上一时段的分区  $i_1, i_2, \dots, i_n$  合并为分区  $i$ ,与分区  $j$  外推预报;②按实际并未合并的趋势预报,将分区  $j$  拆分成与分区  $i_1, i_2, \dots, i_n$  对应的  $j_1, j_2, \dots, j_n$ ,分别外推预报。

### 3 雷击引发的设备故障概率

#### 3.1 计算雷击跳闸率的方法<sup>[20]</sup>

对 110 kV 及以上的线路,由于绝缘水平比较高,一般不会引起感应过电压闪络。直击雷造成闪络一般发生在雷击杆塔及雷电绕击线路这 2 种情况。

雷击杆塔时,耐雷水平为:

$$I_1 = \frac{U_{50\%}}{(1-k)\beta R_{su} + \left(\frac{h_a}{h_t} - k\right) \frac{L_t}{2.6} + \left(1 - \frac{h_{gv}}{h_{av}} k_0\right) \frac{h_{av}}{2.6}} \quad (2)$$

式中:  $U_{50\%}$  为绝缘子串的 50% 冲击闪络电压;  $k$  为避雷线与输电线路间的耦合系数;  $k_0$  为导线与地线间的耦合系数;  $h_a, h_t, h_{av}, h_{gv}$  分别为横档高度、杆塔高度、导线平均高度及地线平均高度;  $\beta$  为分流系数;  $R_{su}$  为杆塔冲击接地电阻;  $L_t$  为杆塔等值电感。

雷电绕击线路时的耐雷水平为:

$$I_2 = \frac{U_{50\%}}{100} \quad (3)$$

雷电流超过耐雷水平的概率为:

$$\lg P = \frac{I}{-88} \quad (4)$$

式中:  $I$  为  $I_1$  或  $I_2$ 。

线路总的雷击跳闸率  $A$  为:

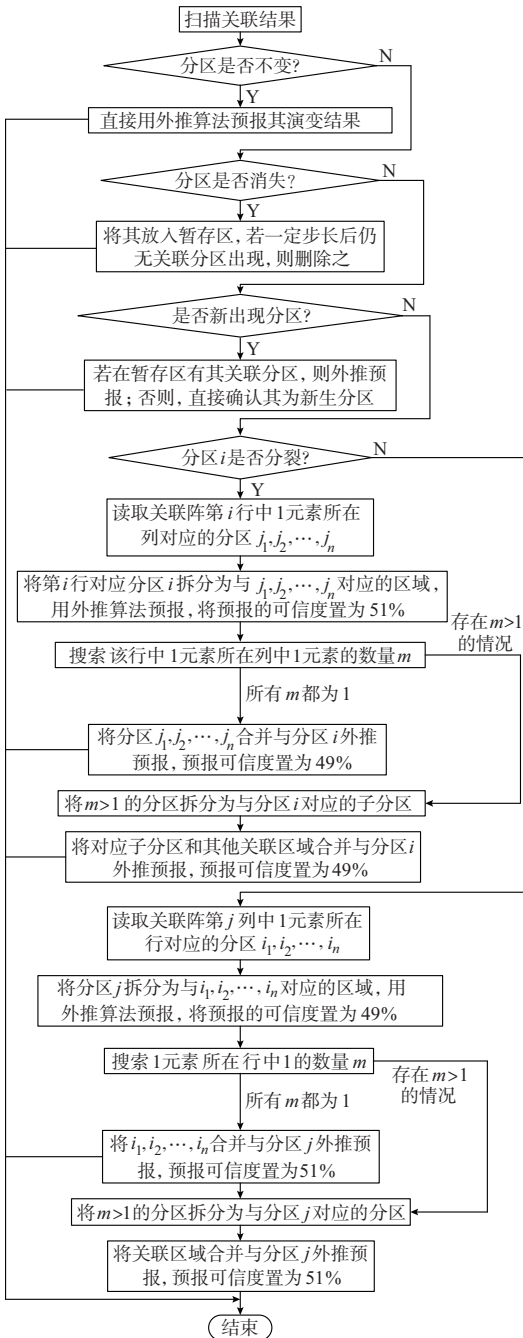


图 4 外推预报的算法流程

Fig.4 Flow chart of forecasting thunder subareas

$$\begin{cases} A = N\eta(gP_1 + P_aP_2) \\ N = 0.1d'\gamma(b + 4h_{av}) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $N$  为  $d'$  个雷电日 100 km 的线路雷击次数； $\eta$  为建弧率； $g$  为击杆率； $P_1$  为雷电流超过耐雷水平  $I_1$  的概率； $P_a$  为绕击率； $P_2$  为雷电流超过耐雷水平  $I_2$  的概率； $b$  为两根地线之间的距离； $d'$  为年雷暴日数； $\gamma$  为地面落雷密度。

指导线路防雷设计的上述近似公式，是根据模拟实验结果统计归纳而得，反映的是年平均雷击风险，而不能根据具体的雷暴信息自适应调整线路的雷击故障跳闸率。

### 3.2 改进的计算雷击跳闸率的方法

根据在线雷电预报和实际已落雷数，预报各雷击分区内的落雷密度；根据线路在不同雷击分区中的长度，可动态预估线路在未来时段中的雷击跳闸率为：

$$P = \sum_{i=1}^m \eta(gP_1 + P_aP_2) \frac{n_i(b + 4h_{av})l_i}{S_i} \quad (6)$$

式中： $m$  为分区数； $n_i/S_i$  为某雷击分区  $i$  内预报的落雷密度； $l_i$  为某线路处于该雷击分区  $i$  中的长度； $(b + 4h_{av})l_i$  为分区  $i$  中引雷面积，而  $n_i(b + 4h_{av}) \cdot l_i/S_i$  则为分区  $i$  中导线被雷击次数。

### 3.3 参与电力系统在线安全稳定分析

在线预报的雷击跳闸率随时空而变，停电防御系统的在线安全分析模块就可随之改变其予想故障表中的算例及顺序，根据雷击灾害的实际演化过程而自适应地调整关注重点。

## 4 雷暴灾害预警效果的评估

### 4.1 雷击故障预警效果的评估指标

为了提高输电线路雷击跳闸率估计的准确性，必须准确预报发生雷电的地域。天气预报效果的评估一般采用雷区面积检出率 (probability of detection, POD) 指标  $R_{POD}$  与雷区面积虚警率 (false-alarm ratio, FAR) 指标  $R_{FAR}$  将预报结果与实测结果关联评分<sup>[28]</sup>。

$$\begin{cases} R_{POD} = \frac{E \cap A}{A} \times 100\% \\ R_{FAR} = \frac{E \cap \bar{A}}{E} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中： $E$  为预报区域的面积； $A$  为实际雷电区域的面积。理想的预警效果是  $R_{POD} = 100\%$ ， $R_{FAR} = 0$ 。

为了反映实际雷电区域内的雷电密度的差异，本文增加落雷数检出率 (lighting detection probability, LDP) 的指标  $R_{LDP}$ 。

$$R_{LDP} = \frac{\text{预报成功的落雷数}}{\text{实际雷电区域的落雷数}} \times 100\%$$

本文 2.3 节中就是按  $R_{POD} + R_{LDP} - R_{FAR}$  最大来优选格点阈值  $i$  的。当然，也可按关注重点加以不同的权重。

### 4.2 雷电预报实例

#### 4.2.1 算例 1

该算例采用 2009 年 7 月 21 日华东电网监测的雷电信息，每 15 min 预报一次雷电发生范围。采用雷电预报效果评估每一次预报效果，预报效果指标随时间变化的曲线如图 5 所示。从曲线变化中可以看出，在整个预报过程中，命中率能达到 60% 以上，虚警率低于 40%，命中落雷比例一般都在 70% 以上。

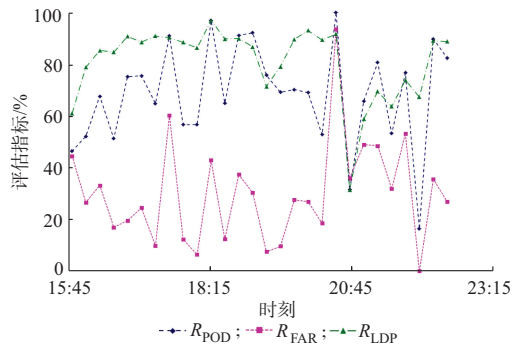


图 5 2009 年 7 月 21 日雷电预报结果的评估  
Fig.5 Result assessments of lightning forecast on July 21, 2009

#### 4.2.2 算例 2

该算例采用 2009 年 7 月 30 日华东电网监测的雷电信息，每 15 min 预报一次雷电发生范围。图 6 给出了该算例预报效果指标随时间变化的曲线。从曲线变化中可以看出，在整个预报过程中，命中率能达到 60% 以上，虚警率低于 40%，命中落雷比例一般都在 60% 以上。

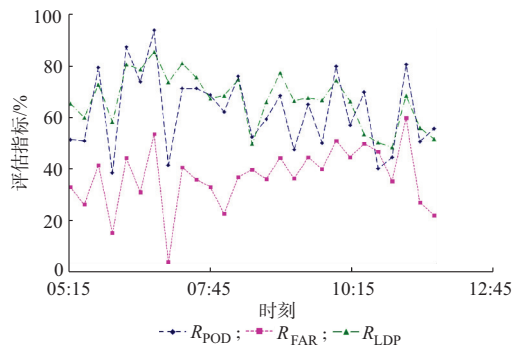


图 6 2009 年 7 月 30 日雷电预报结果的评估  
Fig.6 Result assessments of lightning forecast on July 30, 2009

### 4.3 江西电网雷击故障的预警防御

上述雷击故障预警功能在江西省电力公司率先获得工程应用。该电网有 309 条 220 kV 及以上线路,已为其中的 252 条线路的杆塔建立了详细模型。在 2011 年 7 月到 9 月期间发生的全部 28 次雷击跳闸事故中,由于没有杆塔信息而无法预报的有 8 次。

其余的 20 次事故中,正确预报了 18 次;未能预报的 2 次均发生在落雷次数和密度均较小的情况。预报的时间步长为 15 min,表 1 是雷击前关于跳闸线路的预报结果,包括实际跳闸线路对应的预报概率及其处于高概率排序中的位置。

表 1 江西电网雷击故障预报结果  
Table 1 Forecasting result of lighting fault in Jiangxi grid

故障发生时间	电压等级/kV	故障线路名称	预报结果	预报的故障概率	在概率排序中的位置
2011-07-09T18:10	220	信源 I 线	无杆塔信息		
2011-07-11T19:15	220	嘉金线	预报成功	0.020 738	4
2011-07-11T19:27	220	嘉金线	预报成功	0.020 738	4
2011-07-11T22:02	220	南目 II 线	无杆塔信息		
2011-07-12T00:06	220	永盘 I 线	无杆塔信息		
2011-07-15T18:12	220	燕金线	预报成功	0.012 420	1
2011-07-15T18:14	220	嘉金线	预报成功	0.007 933	5
2011-07-17T06:32	220	丰金线	预报成功	0.019 735	1
2011-07-29T21:13	220	渡埠线	预报成功	0.011 443	1
2011-08-03T14:45	220	金祥 II 线	无杆塔信息		
2011-08-05T17:33	220	赣龙 I 线	未能预报		
2011-08-08T17:19	220	赣坪线	无杆塔信息		
2011-08-08T22:18	220	白吉线	预报成功	0.012 916	21
2011-08-09T17:25	220	万虎 II 线	预报成功	0.038 737	4
2011-08-11T22:23	220	丰临线	无杆塔信息		
2011-08-12T16:05	500	永石 I 线	预报成功	0.007 549	6
2011-08-12T16:16	220	浔青 I 线	无杆塔信息		
2011-08-13T07:44	220	月梅线	预报成功	0.012 958	1
2011-08-13T08:21	220	洪鄱 I 线	无杆塔信息		
2011-08-13T09:06	220	钨铜线	预报成功	0.010 858	6
2011-08-13T23:51	500	鹰信 I 线	预报成功	0.005 316	2
2011-08-19T12:48	500	咸梦 II 回	预报成功	0.000 939	2
2011-08-22T17:03	220	柘青线	无杆塔信息		
2011-08-23T14:43	220	万燕线	预报成功	0.035 540	2
2011-08-23T15:35	220	赣龙 II 线	预报成功	0.006 433	12
2011-09-10T02:09	220	渡埠线	预报成功	0.001 416	17
2011-09-15T17:57	220	燕金线	预报成功	0.023 669	2
2011-09-16T22:19	220	燕金线	未能预报		

## 5 结论

为有效防御雷暴引发的大停电,需要将信息采集的范围由电力系统内部拓广到外部,包括宏观与微观的气象信息及地质信息。基于雷暴灾害的形成机理,利用雷击定位数据的动态变化,预报电网雷击故障的时空演变趋势。进而用在线的、时空分布的雷击概率模型代替离线的、固定不变的年均概率模型,参与电网安全稳定的在线仿真分析。由于预想故障表的内容被动态调整,使防御系统的在线安全预警功能具有对雷暴演化过程一定的自适应能力。相关软件已于 2011 年 3 月投入实际电网运行,有效提高了电网对雷暴灾害的防御水平。需要进一步提高预报的准确

率,特别是对于过去若干个预报时段内的落雷次数和密度均较小的场景下,外推预报的信息基础过于薄弱。可能的途径包括综合利用多普勒雷达、大气电场仪、卫星等信息,以及进一步改进算法。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 薛禹胜,费胜英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统的构思:(一)新的挑战与反思[J].电力系统自动化,2009,32(9):1-6.

- XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part I new challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 32(9): 1-6.
- [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 Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [4] 侯慧,尹项根,陈庆前,等.南方部分500 kV主网架2008年冰雪灾害中受损的分析与思考[J].电力系统自动化,2008,32(11):12-15.
- HOU Hui, YIN Xianggen, CHEN Qingqian, et al. Review on the wide area blackout of 500 kV main power grid in some areas of South China in 2008 snow disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 12-15.
- [5] 中国电力企业联合会.电力系统受低温雨雪冰冻灾害影响情况报告[EB/OL].[2008-03-20]. <http://www.ccc.org.cn/html/news/2008/3/20/20083201050307169.html>.
- [6] 国家电网公司生产运营部.2003年国家电网公司所属送电线路运行情况 & 事故统计分析[R].北京:全国电力系统送电专业运行工作网,2004.
- [7] 国家电网公司建设运行部.2004年国家电网公司所属220 kV及以上电压等级线路运行概况及故障统计分析[R].北京:全国电力系统送电专业运行工作网,2005.
- [8] 国家电网公司建设运行部.2005年国家电网公司架空输电线路专业工作总结[R].北京:全国电力系统送电专业运行工作网,2006.
- [9] 林伟芳,孙华东,汤涌,等.巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2010,34(7):1-5.
- LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [10] 薛禹胜,费胜英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统的构思:(二)任务与展望[J].电力系统自动化,2009,32(10):1-5.
- XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 32(10): 1-5.
- [11] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量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 II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
- [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 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): 18-26.
- [13] 孟青,吕伟涛,姚雯,等.地面电场资料在雷电预警技术中的应用[J].气象,2005,31(9):30-33.
- MENG Qing, LÜ Weitao, YAO Wen, et al. Application of detection data from electric field meter on ground to lightning warning technique[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(9): 30-33.
- [14] 杨波,邱实,高太长.大气电场仪联网数据一致性 & 预警方式的改进[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2007,8(4):400-403.
- YANG Bo, QIU Shi, GAO Taichang. Atmospheric electric field monitoring net's data coherence and amelioration for alarm mode[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(4): 400-403.
- [15] 王飞,张义军,赵均壮,等.雷达资料在孤立单体雷电预警中的初步应用[J].应用气象学报,2008,19(2):153-160.
- WANG Fei, ZHANG Yijun, ZHAO Junzhuang, et al. The preliminary application of radar data to the lightning warning of isolated storm cells [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(2): 153-160.
- [16] 陈家宏,张勤,冯万兴,等.中国电网雷电定位系统与雷电监测网[J].高电压技术,2008,34(3):425-431.
- CHEN Jiahong, ZHANG Qin, FENG Wanxing, et al. Lightning location system and lightning detection network of China power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 425-431.
- [17] 陈家宏,郑家松,冯万兴,等.雷电日统计方法[J].高电压技术,2006,32(11):115-118.
- CHEN Jiahong, ZHENG Jiasong, FENG Wanxing, et al. Statistical method of thunderstorm day [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 115-118.
- [18] 王剑,刘亚新,陈家宏,等.基于电网雷害分布的输电线路防雷配置方法[J].高电压技术,2008,34(10):2065-2069.
- WANG Jian, LIU Yaxin, CHEN Jiahong, et al. Lightning protection method for transmission lines based on power grid lightning hazard distribution [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2065-2069.
- [19] 陈家宏,王海涛,冯万兴,等.1 000 kV线路走廊的雷电参数及易闪线段分析[J].高电压技术,2006,32(12):45-48.
- CHEN Jiahong, WANG Haitao, FENG Wanxing, et al. Analysis of lightning parameters and weak sections for 1 000 kV UHV transmission line corridor[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 45-48.
- [20] 张殿生.电力工程高压送电线路设计手册[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [21] 黄伟超,何俊佳,陆佳政,等.实际雷电活动分布下的线路雷击跳闸率计算[J].高电压技术,2008,34(7):1368-1373.
- HUANG Weichao, HE Junjia, LU Jiazheng, et al. Calculation of lightning trip-out rate of transmission lines under real lightning stroke distribution [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1368-1373.
- [22] ALMEIDA A B S, LOUREIRO C, BARBOSA F P M, et al. Historical data analysis of lightning and its relation with the Portuguese transmission system outages[C]// IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania: 1-8.
- [23] 许绍祖.大气物理学基础[M].北京:气象出版社,1991.
- [24] 国网武汉高压研究院.国网雷电监测网络方案及相关技术研究[R].武汉:国网武汉高压研究院,2007.
- [25] MICHAEL D, GERRY W. TITAN: thunderstorm

identification, tracking, analysis, and now casting—a radar-based methodology [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10(6): 785-797.

- [26] 王海英,黄强,李传涛,等.图论算法及其 MATLAB 实现[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [27] 徐国祥.统计预测和决策[M].上海:上海财经大学出版社,2005.
- [28] BROWNLIE K A. Statistical theory and methodology in science and engineering [M]. 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1965.

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

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

王昊昊(1979—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: wanghaohao@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 孔丽蓓)

## Space-time Early-warning of Power Grid Fault Probability by Lightning

XIE Yunyun<sup>1,2</sup>, XUE Yusheng<sup>2,3</sup>, WANG Haohao<sup>2</sup>, XU Taishan<sup>2</sup>, DONG Zhaoyang<sup>4</sup>, JIN Xuecheng<sup>5</sup>

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

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China;

3. Centre for Intelligent Electricity Networks, The University of Newcastle, NSW 2308, Australia;

4. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australia;

5. Jiangxi Electric Power Corporation, Nanchang 330077, China)

**Abstract:** The impact of time-varying lightning on electrical equipment fault probability is analyzed. Based on the information to be acquired for preventing lightning disaster, a spatial-temporal variation forecast algorithm for power grid fault probability is presented. First, according to the lightning information of the current time interval, the lightning subareas are duly divided, which should be associated with the subareas in the preceding time interval. Then, according to the results, the trend of lightning fault probability in the next time interval is forecasted. The spatial-temporal distributed prediction probability is used to replace the traditional average annual lightning fault probability in the method which updates the envisioned fault table of the security stability analysis software online, enables the faults with greater probability to get detailed analysis in time and realizes the integration with power system security stability analysis function. The self-adaptive ability to deal with lightning disaster is added to actual projects of the blackout prevention system to improve the early-warning ability.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228204), the Major Program of National Natural Science Foundation of China (No. 91024028), State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG003-2012), State Grid Corporation of China (No. YS11002), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No. BK2011136), ARC LP120100302, and ARC DP120101345.

**Key words:** lightning disaster; fault probability; forecast; online application; blackout defense intelligence

## 配电网规划纲领性标准正式发布

近日,由国家电网公司发展部组织、中国电科院牵头编制的 Q/GDW 1738—2012《配电网规划设计技术导则》通过审查,作为公司配电网规划纲领性标准正式发布。据悉,在继承已有标准规范的基础上,《导则》细化了各类分区分配电网结构、设备选型、用户和电源接入、技术经济分析等技术要求;贯彻资产全寿命周期理念,并首次明确配电网规划计算、空间负荷预测等内容。此外,结合配电网发展面临的新形势,《导则》提出了配电网智能化、分布式电源接入的要求,以适应新能源接入和多元化用电需求。

【摘自中国电力设备网】