

## 基于有效决策界的电网台风灾害预警方法

方嵩<sup>1</sup>, 方丽华<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 彭嵩<sup>1</sup>, 翁世杰<sup>2</sup>, 胡华铿<sup>1</sup>, 王建<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司中山供电局, 广东 中山 528400;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 台风灾害是引发电网事故的最为严重的自然因素之一。为了提升电网抵御台风的能力, 提出一种电网台风灾害实时预警方法, 可实现对电网台风灾害的量化短时临近预警。首先将预警区域按经纬度划分为  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  的网格并整理内含线路的网格集合  $\omega$ 。然后根据气象局提供的台风相关信息, 通过比较  $\omega$  内网格中心点到台风中心的距离与台风十级风圈大小得到有效决策界。进而确定风险线路集并计算风险线路的停运概率, 据此判断台风灾害预警等级。同时发布相应的预警信息, 为电网运行人员制定有针对性的稳控预案和防风灾调度策略提供依据和参考。

**关键词:** 电网; 台风灾害; 预警系统; 有效决策界; 停运概率

### A typhoon disaster early warning method for power grid based on effective decision boundary

FANG Song<sup>1</sup>, FANG Li-hua<sup>1</sup>, XIONG Xiao-fu<sup>2</sup>, PENG Song<sup>1</sup>, WENG Shi-jie<sup>2</sup>, HU Hua-keng<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>

(1. Zhongshan Power Supply Bureau, Zhongshan 528400, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Among the natural factors which can cause accidents to power grid, the typhoon disaster is one of the most serious. In order to enhance the ability of power grid to withstand typhoon disaster, a typhoon disaster early warning method for power grid is proposed, which can realize short-term early warning of typhoon disaster for power grid quantitatively. Firstly, the warning area is divided into  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  grids by longitude and latitude and the set of grids  $\omega$  which have transmission lines inside is sorted out. Then according to the typhoon information provided by the meteorological administration, the effective decision boundary is obtained through comparing the distance from the center of grid in set  $\omega$  to the center of typhoon with the wind radius of level ten. Thus the risk set of lines is determined using effective decision boundary, and the early warning level of typhoon disaster can be obtained by calculating the outage probability of risky lines. Meanwhile, the corresponding warning information should be released, providing basis and reference for the operating staff of power grid to work out the targeted control plan for grid stability and scheduling strategies of preventing typhoon disaster.

**Key words:** power grid; typhoon disaster; early warning system; effective decision boundary; outage probability

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0083-06

## 0 引言

电能已经成为现代化生产的主要动力, 电力行业作为关系到国计民生的基础性行业, 随着人们生活水平的不断提高, 已显示出举足轻重的作用<sup>[1-2]</sup>。输电线路作为电网的重要环节, 具有点多、面广、且长期暴露在野外的特点, 其安全稳定运行与气象环境密切相关。另外, 随着社会用电需求不断提高, 城乡一体化进度加快, 输配电网的规模也在迅速扩大, 台风等气

象因子对电网安全运行的影响日趋增大, 这将给电力运行部门带来极为严峻的挑战和考验<sup>[3-5]</sup>。

资料显示<sup>[6-7]</sup>, 目前仅福建省电力有限公司和华东电网调度中心建立了台风信息采集和监视系统, 实现了台风信息与电网信息的一体化、可视化展示; 部分电力公司运行人员结合台风预报信息和线路地理信息, 根据经验调整运行方式以减小台风对电网的影响。

在电网台风灾害研究方面的文献中, 文献[8]考

考虑台风天气对输电线路运行可靠性的影响，建立了定量评估电网暂态稳定风险的模型；文献[9]基于风险评价和信息扩散理论，提出了电网规划时评估自然灾害对电网影响的风险计算模型；文献[10-11]分别阐述了台风灾害对电力系统的损失预评估指标体系和计算方法，为电网的应急管理调度提供参考与辅助；文献[12]采集气象台台风数值预报信息，通过建立的大风统计诊断预报模型，获得较准确的预测风速，该文主要介绍了如何较准确的预测区域风速，缺少对预警模型的详细阐述；文献[13]描述了福建电网气象信息预警系统的功能要求、气象信息内容及其获取方式和系统软硬件配置，并未给出具体的预警模型；文献[14]介绍了华东电网输电线路气象环境风险预警系统，该系统将台风实况信息和预报信息接入广域监视与安全稳定防御系统，实现了台风信息与电网信息的融合展示，但其对台风时线路风险判断过程和预警等级划分较粗糙。

因此，掌握并充分利用详尽的气候气象信息，建立科学的电网台风灾害预警系统并推广应用势在必行<sup>[15]</sup>。本文基于气象学基本原理和电网风险评估技术，建立电网台风灾害预警系统，综合处理台风信息和输电线路的位置参数等相关数据，给出所在区域内输电线路的台风灾害分析和相应的预警等级。可警示电网运行人员受台风影响较大、有故障风险的线路、杆塔，同时为电网防灾调度提供科学的技术支撑，这对提高输电线路抵御台风灾害的能力，保障电力系统安全稳定运行都具有极其重要的意义。图1展示了系统的完整构架，图2所示为系统的主要功能模块，其中包括台风实况模块、台风预报模块、电网台风灾害预警模块和统计分析模块，系统将各功能模块有机地结合起来，实现科学的电网台风灾害预警。

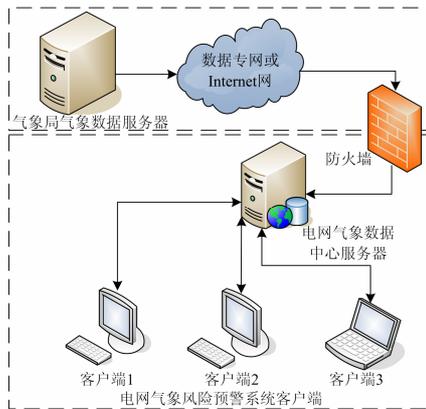


图1 电网台风灾害预警系统

Fig. 1 Typhoon disaster early warning system for power grid

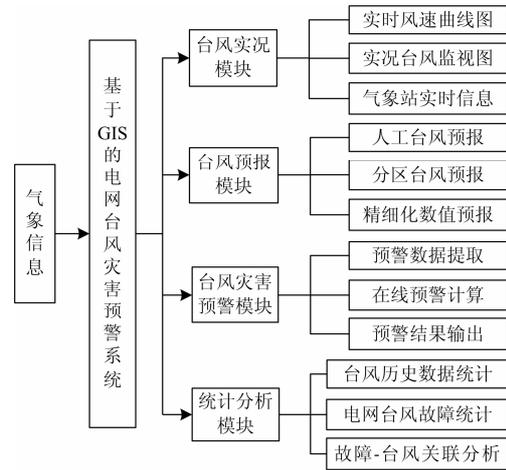


图2 系统功能分类简表

Fig. 2 Function list of the system

## 1 台风信息

气象局提供的台风信息主要有台风实况信息和预报信息。其中，台风实况信息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；台风预报信息包括24 h、48 h、72 h的台风预测路径、预测台风中心经纬度以及其7级和10级风圈预测半径<sup>[16-17]</sup>。

台风实况模块和台风预报模块均能以表格数据的形式进行直观展示，同时也具备基于GIS背景地图、辅以曲线图和弹出式文本框说明的可视化效果图显示功能。另外，两模块也提供了历史台风列表及其动态图形化查询展示功能。

## 2 电网台风灾害预警

### 2.1 有效决策界及其应用于电网台风灾害预警

对于两类问题 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ ，决策函数为 $h(x)$ ，决策将根据下述判决规则来进行<sup>[18]</sup>：

$$h(x) \begin{cases} > t & x \in \omega_1 \\ < t & x \in \omega_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $t$ 是一个与问题相关的常数，则决策界就是 $\{x | h(x)=t\}$ 。决策界是分类器在特征空间中所划分的不同类别空间领域的边界，即通常所说的分类面。如线性分类器的决策面是直线或者超平面，非线性分类器的决策面是曲线或者超曲面等。然而，大多数情况下，只决策界的某一部分才对分类识别有应用意义，即有效决策界，它实际上是由以某一确定概率包含 $\omega_1$ 及 $\omega_2$ 的两个最小区域所界定的决策界部分。

有效决策界应用于电网台风灾害预警的基本思

路是: 设预警区域内所有包含架空输电线路的网格中心点的经纬度坐标集合为  $\omega$ , 在某预警时刻, 该集合可分两类: 一类是受台风影响较小的网格  $\omega_1$ , 另一类即是受台风影响较大, 有事故风险的网格  $\omega_2$ 。考虑规程规定 110 kV 及以上线路的最大设计风速必大于 25 m/s<sup>[19]</sup>, 且十级风力的定义为  $v_{10} \geq 24.5$  m/s, 因此决策界可以设置为台风十级风圈, 而在空间上台风十级风圈所包围的圆形区域与  $\omega$  的重合部分即为该时刻受台风影响较大的线路网格, 重合边界即是划分风险网格的有效决策界。最后, 利用线路设计风速  $v_0$  以及气象局提供的危险网格中心点的预测风速  $v_t$ , 计算线路停运概率, 判定得出是否预警及相应的预警等级。

### 2.2 预警流程

系统预警的基本流程如图 3 所示。

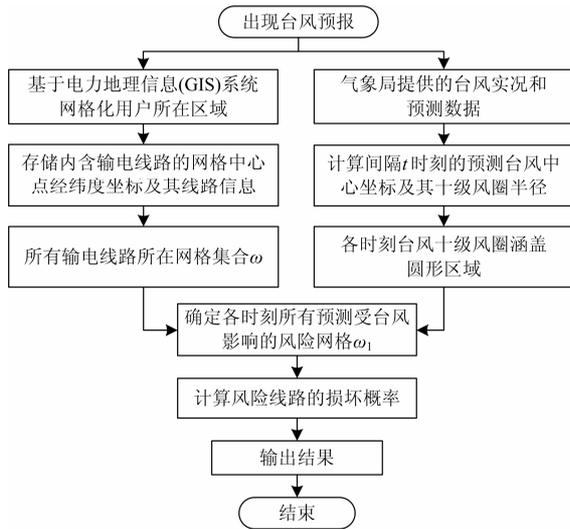


图 3 电网台风灾害预警流程图

Fig. 3 Flow diagram of typhoon disaster early warning for power grid

#### 2.2.1 启动条件

用户需将所在区域划分为  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  的网格, 并将网格中心的经纬度信息以及网格内包含的线路信息录入系统数据库。当台风越过海洋 24 h 警戒线时, 本系统开始工作。区域气象台实时传输最新的实况台风信息和预报台风信息。

#### 2.2.2 风险决策界确定

对 24 h、48 h 以及 72 h 的台风预测数据做如下处理, 确定该区域间隔  $t$  时刻后的风险线路集及其影响时间段。以 24 h 台风预测数据为例, 48 h、72 h 同理可得。  $t = nt_0$  ( $n=1, 2, \dots, m, mt_0 \leq 24$  h), 步长  $t_0$  可根据需要整定。

1) 根据  $O(x, y)$ 、 $R_{10}$ 、 $v$  和  $O_{24h}(x_{24h}, y_{24h})$ 、

$R_{10}^{24h}$ 、 $v_{24h}$  确定  $t$  时刻后 (每间隔步长为  $t_0$ ) 的台风中心位置  $O_t$  经纬度  $(x_t, y_t)$ , 并根据线性插值法确定  $t$  时刻的近似台风十级风圈半径  $R_{10}^t$ ,  $t = nt_0$  ( $n=1, 2, \dots, m, mt_0 \leq 24$  h):

$$\begin{cases} |OO_t| = \frac{|OO_{24h}|}{24h} t \\ y_t = y + \frac{|OO_t|}{|OO_{24h}|} (y_{24h} - y) \\ x_t = x + \frac{|OO_t|}{|OO_{24h}|} \cos(y_{24h}) (x_{24h} - x) \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{10}^t = R_{10} + \frac{|OO_t|}{|OO_{24h}|} (R_{10}^{24h} - R_{10}) \quad (3)$$

2) 如前所述, 某预测时刻台风十级风圈与  $\omega$  的重合部分即为该时刻受台风影响较大的线路, 可通过判断  $\omega$  中的网格中心点  $(x, y)$  到台风中心点  $O_t(x_t, y_t)$  的距离  $s(x, y)$  与  $R_{10}^t$  间的大小关系确定: 若  $s(x, y)$  大于  $R_{10}^t$ , 则认为网格内的线路杆塔受台风影响较小, 不至发生事故, 属于非风险线路集  $\omega_1$ ; 若  $s(x, y)$  小于等于  $R_{10}^t$ , 则认为该网格内的线路在  $t$  时刻后受台风影响较大, 有断线倒塔风险, 属于风险线路集  $\omega_2$ , 如图 4 所示。

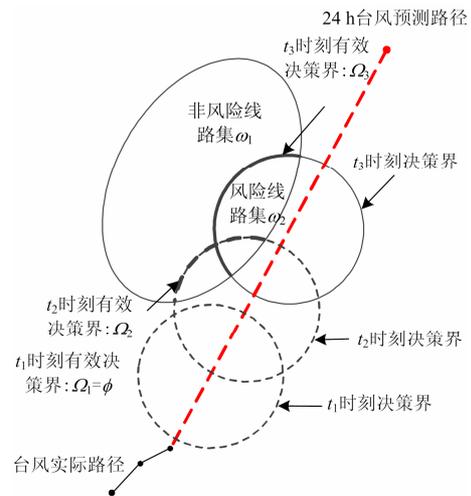


图 4 基于有效决策界的风险线路集确定

Fig. 4 Decision for risk set of lines based on effective decision boundary

显然, 文中所述有效决策界是动态变化的, 由集合  $\omega$  和  $t$  时刻台风中心位置以及  $t$  时刻台风十级风圈半径共同确定, 为  $\Omega = \{(x, y) \mid s(x, y) = R_{10}^t, (x, y) \in \omega\}$ 。其中, 距离  $s(x, y)$  可按式(4)计算。

$$s(x, y) = R \cdot \arccos[\sin y \cdot \sin y_t + \cos y \cdot \cos y_t \cdot \cos(x_t - x)] \quad (4)$$

式中,  $R$  表示地球平均半径, 为 6 371.004 km。

### 2.2.3 预警等级划分

经过以上处理后,即可根据供电局提供的风险网格中心点的预测风速作为其内风险线路段的预测风速  $v_y$ , 并与该线路的设计风速  $v_0$  进行比较, 确定各  $t$  时刻下对应线路段的预警等级。

值得注意的是, 每级输电线路的设计风速在确定时都留有一定裕度, 因而输电线路实际可承受风荷载的能力要高于设计标准, 但目前还没有相关的公式来衡量该超出程度。本文认为预测风速  $v_y$  小于设计风速  $v_0$  时, 线路停运概率  $\lambda(v_y)$  为 0; 考虑到沿海地区电网的 110 kV 和 220 kV 线路换算到离地 10 m 高时的设计风速普遍为 30 m/s, 其 1.5 倍已属 14 级台风, 在以往的报道中均有线路事故发生, 因此可认为预测风速  $v_y$  大于 1.5 倍的设计风速  $v_0$  时, 线路停运概率  $\lambda(v_y)$  为 1; 而当  $v_y$  介于  $v_0$  和  $1.5v_0$  之间时, 由于物件的承载极限在大变形时往往呈现指数增长规律, 线路停运概率可用指数函数模型近似表示。综上, 输电线路停运概率与线路预测风速的关系可用式(5)刻画, 利用线路停运概率划分的与气象上台风五级预警相对应的预警等级见表 1。

$$\lambda(v_y) = \begin{cases} 0 & v_y \leq v_0 \\ \exp\left(0.7645 \frac{v_y}{v_0}\right) - 2.1479 & v_0 < v_y < 1.5v_0 \\ 1 & v_y \geq 1.5v_0 \end{cases} \quad (5)$$

表 1 预警等级表

Table 1 Early warning level

停运概率	预警等级	描述
$80\% < \lambda(v_y) \leq 100\%$	I 级预警	特别严重
$60\% < \lambda(v_y) \leq 80\%$	II 级预警	较严重
$40\% < \lambda(v_y) \leq 60\%$	III 级预警	严重
$20\% < \lambda(v_y) \leq 40\%$	IV 级预警	一般
$0\% < \lambda(v_y) \leq 20\%$	V 级预警	较轻

### 2.2.4 台风灾害预警信息展示

将上述计算结果均存入数据库, 若所在区域存在 III 级及以上的高停运概率线路, 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, 如表 2 所示。和台风实况与预报展示一

表 2 电网台风灾害预警输出信息表

Table 2 Example of output information of typhoon disaster early warning for power grid

预警编号	台风名	预警线路名称	停运概率	预警时间段	预警等级
13081301	尤特 (UTOR)	XX 区	50%	14:00~15:00	III 级
		XX 线 XX 段	30%	15:00~16:30	IV 级

样, 台风灾害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, 而效果图展示则更加直观形象, 两种形式结合能满足广大用户的需求。

## 3 讨论

在引发电网事故的自然因素中, 台风灾害是最为严重的一种<sup>[20]</sup>。经验表明, 现有输电线路的设计强度较低, 不足以约束结构的扭转变形, 且设计过程未考虑位置相关因素, 因此需对强风地段的输电线路进行实地考察并特别设计。对某区域电网而言, 系统统计分析模块可以通过积累数据获得台风灾害和电网事故的历史分布特点, 确定台风天气下的电网故障多发区域, 以便开展具有针对性和科学性的防风改造和规划设计。同时, 对关键线路杆塔 (特别是多回路同塔架设的) 可加装基础在线监测装置, 通过装置和台风实时气象数据的结合分析, 进一步提高预警的准确性。

另外, 为研究电网在气象条件急剧变化和台风天气条件下, 各气象因子与电网运行状态的因果关系, 也可以通过统计分析的方法, 找到台风天气的时空分布特征与电网故障的时空分布特征, 明确气象条件造成电网运行状态变化的原因、条件、程度及发展规律, 为气象风险评估指标的建立提供一定的数据积累和理论基础。

## 4 结语

本文建立了电网台风灾害预警系统, 系统由数据专线接收气象局提供的台风实况、预报信息, 通过建立的基于有效决策界的电网台风灾害预警模型, 预测用户所在区域未来一至数日甚至数小时内受台风影响较大的风险线路集, 最后计算得到风险线路的停运概率, 并依此判断台风灾害预警等级并发布相应的预警信息。

本系统是融合了电网信息、地理信息和自然环境信息的一体化综合平台, 这一系统平台的建设和应用, 可根据电网运行的实际情况, 结合台风天气信息, 对电网运行方式及其调度提供分析、决策服务, 保障电网的安全运行。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 吴耀武, 娄素华, 余永泉, 等. 电力市场环境下载输电线路过载风险评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 198-203.  
WU Yao-wu, LOU Su-hua, YU Yong-quan, et al. Overload risk assessment of power transmission line under power electrical market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 198-203.
- [3] 李顺利. 架空输电线路运行维护中存在的问题及对策[J]. 中国电力教育, 2010(增刊 1): 600-601.  
LI Shun-li. Problems and countermeasures in operating and maintenance of overhead transmission lines[J]. China Electric Power Education, 2010(S1): 600-601.
- [4] 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 Jin-ling, ZHU Yong-li. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.
- [5] 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.
- [6] 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 techniques of power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 5-10, 118.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王慧民, 叶金玉, 林雅萍, 等. 面向预警的台风灾害预防评估指标体系探讨[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(1): 25-32.  
WANG Hui-min, YE Jin-yu, LIN Ya-ping, et al. On pre-evaluation indices of typhoon disaster: an early-warning perspective[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(1): 25-32.
- [11] 程正刚, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 基于脆弱性的电力应急体系灾害损失预评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 68-72.  
CHENG Zheng-gang, FANG Xin-yan, YU Guo-qin, et al. Vulnerability based disaster loss pre-evaluation of power emergency system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 68-72.
- [12] 熊军, 林韩, 王庆华, 等. 基于 GIS 的区域电网风灾预警模型研究[J]. 华东电力, 2011, 39(8): 1248-1252.  
XIONG Jun, LIN Han, WANG Qing-hua, et al. GIS-based model for regional power grid wind hazard precaution[J]. East China Electric Power, 2011, 39(8): 1248-1252.
- [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 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.
- [14] 郑旭, 赵文彬, 肖蝶, 等. 华东电网 500 kV 输电线路

- 气象环境风险预警研究及应用[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.
- [15] 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.
- [16] GB/T 21984-2008 短期天气预报[S].
- GB/T 21984-2008 short-range weather forecast[S].
- [17] 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.
- [18] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- SUN Ji-xiang. Modern pattern recognition[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [19] DL/T 5092—1999P 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- DL/T 5092—1999P technical code for designing 110~500 kV overhead transmission line[S].
- [20] 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 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.

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-01-15

作者简介:

方嵩(1977-), 男, 工程师, 从事电网分析计算、负荷预测、经济运行等相关工作; E-mail: fsong130@sina.com

方丽华(1963-), 女, 教授级高级工程师, 从事电网调度运行、生产技术管理等相关工作;

熊小伏(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与控制相关研究。