

# 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策

方丽华<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 方嵩<sup>1</sup>, 王建<sup>2</sup>, 洪毅文<sup>1</sup>, 沈智健<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司中山供电局, 广东 中山 528400;

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:** 输电线路长期暴露于大气环境当中, 易受雷电、台风、暴雨等灾害性天气影响而发生故障, 故障原因不同电网的应对措施应有不同。研究了不同天气状况下输电线路故障的概率, 提出了依据统计分析结论, 在预报的气象状况下, 对存在故障风险的线路集, 对  $N-m$  故障风险进行评估, 并以此为依据选择电网运行方式以降低系统风险、提高系统抵御恶劣自然灾害的能力。通过对南方沿海某地区的灾害性天气的分布特征进行统计分析, 得到了灾害性天气在不同时间范围爆发的频度, 使用 RBTS 系统进行测试, 验证了该方法的可行性。

**关键词:** 气象灾害; 线路故障; 分布特征;  $N-m$  故障; 风险控制

## Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology

FANG Li-hua<sup>1</sup>, XIONG Xiao-fu<sup>2</sup>, FANG Song<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, HONG Yi-wen<sup>1</sup>, SHEN Zhi-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:** Transmission lines are long exposed to nature environment and are vulnerable to adverse weather conditions such as lightning, typhoon, rainstorm and so on. Different measures should be taken according to different fault causes. This paper studies the fault probability of transmission line under different weather conditions, and proposes to assess the  $N-m$  risk under forecasting weather condition for those high fault risk lines based on the analysis results, then chooses the operation mode to reduce the system risk and enhance the ability of defense the adverse nature disasters. Through statistical analysis of the distribution characteristics of adverse weather in a southern China area along the coast, getting the frequency and degree of adverse weather in different time, and through testing on RBTS, the feasibility of the proposed method is verified.

**Key words:** meteorological disaster; transmission line fault; distribution characteristic;  $N-m$  fault; risk control

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0113-07

## 0 引言

21 世纪以来, 随着全球变暖趋势的进一步加剧, 风暴、台风、雷暴、暴雨、热浪等极端气候事件频繁出现, 给社会经济和人类生活、生产造成了严重影响和损失<sup>[1-2]</sup>。电能的大容量、长距离输送, 主要依靠架空线路, 它们长期暴露于大气环境之中, 易受雷电、台风、暴雨、覆冰、山火等气象灾害的影响而导致故障<sup>[3]</sup>。

国内外对气象-故障的时空分布特征关联分析研究还很少。已有的文献对气象造成的电网故障机理做了简要分析, 得到了一些地区的灾害分布图<sup>[4]</sup>、防雷图<sup>[5]</sup>、覆冰监测图<sup>[6]</sup>等。文献[5]根据危险

雷电流区间和云南落雷情况, 绘制出云南电网雷害风险分布图; 文献[7]采用统计分析的方法研究了北京电网灾害的时空分布特征及其成因; 文献[8]利用河北省灾情直报数据资料, 统计分析大风灾情记录及大风灾害对河北电网设施损坏的时空分布特征; 文献[9]以我国南方某省 220~500 kV 输电线路因山火跳闸的统计数据为对象, 结合山火的行为特性, 分析了输电线路因火跳闸规律和控制保护策略; 文献[10]对近年浙江电网输电线路发生的冰灾、风灾及雷击跳闸事故情况进行了全面分析, 并提出对策和建议。

在我国南方沿海地区, 灾害性天气呈现出较为明显的时间分布特征, 在 4~9 月雷电、台风、暴雨

等灾害多发并发，造成电网故障也呈现明显的同步相关性特征。雷电和台风是电网故障的主要原因，电网跳闸事件对应的天气状况 53%为雷雨天气，17%为台风天气。该电网跳闸原因中雷击所占的比重为 52.63%，而台风期间有 65.52%是风偏放电，有 16.09%是外飘物、树枝等外力破坏。

在灾害性天气下，电网运行风险大。特别是重要送电通道，常常穿越同一输电走廊，地理气候环境相似，当某一条线路因雷电、台风等恶劣天气出现故障后，其他线路故障的概率很高，很可能发生  $N-m$  故障风险。对于  $N-m$  故障风险，国内外的研究主要集中在电网  $N-m$  连锁故障的研究，绝大多数考虑的电网连锁故障的发展模式为“初始故障切除后，电网因大量负荷转移而造成了继电保护相继动作而切除故障线路或元件”这种模式<sup>[11-14]</sup>。对于灾害性天气下短时间内同时发生  $N-m$  故障的研究还鲜有研究。

本文对南方沿海某地区的灾害性天气的分布特征规律进行统计分析，得到灾害性天气在不同时间范围爆发的频度；对该地区电网 2007~2013 年 9 月期间 110~500 kV 线路的跳闸事件，将电网故障与气象灾害进行关联分析，得到气象原因引起的电网故障分布特征；提出依据统计分析结论，在预报的气象状况下，对存在故障风险的线路集，进行  $N-2$  故障风险评估，为电网运行方式选择以降低系统风险、提高系统抵御恶劣自然灾害的能力提供参考。

## 1 电网故障气象关联特征分析

### 1.1 灾害性天气分布特征

灾害性天气的时空分布是指灾害性天气在不同时间、不同地域范围爆发的频次、程度等。以区为空间单位，以日为时间单位，统计不同灾害性天气在不同区域中一个月、一年内的发生的日数，用以反映该地区受气象灾害影响的频次和程度。

1) 雷电日数。雷电日数的统计按照雷电定位系统数据，分别统计一个月和一年中的地闪情况得到月雷电日数（一个月有地闪的天数， $d/m$ ）和年雷电日数（一年有地闪的天数， $d/a$ ）。

2) 雷击大地密度。雷击大地密度指一个地区所有网格落雷频次的平均值。可以用单个雷电日落雷密度（次/ $km^2$ /天）来衡量一个雷电日的落雷严重程度，也可以用年落雷密度（次/ $km^2$ /年）来衡量一个地区的平均落雷情况。

3) 年台风天数。年台风天数指一年中受台风影响的天数，凡是 7 级风圈范围内，均算作受台风影响，10 级风圈范围内算作严重影响。

4) 年暴雨天数。一年中日降雨量超过 50 mm 的天数。（此暴雨包括了气象学上的暴雨、大暴雨、特大暴雨，对应的指标是：12 h 降雨量超过 30.0 mm，或者 24 h 降雨量超过 50.0 mm。）

5) 年大风天数。一年中受大风影响的天数，即风速超过 17.2 m/s 的天数。（此大风包括了气象学上 8 级及以上的风，对应的风速为 17.2 m/s。）

6) 年高温天数。一年中最高气温超过 35℃ 的天数。（世界气象组织建议高温热浪的标准为：日最高气温高于 32℃，且持续 3 天以上。中国气象学上一般把日最高气温达到或超过 35℃ 时称为高温。）

对该地区的气象资料进行统计分析，得到该地区的主要灾害性天气分布特征为：每年的雷电日数约有 65 天，属于多雷区；雷电活动主要集中在 4~9 月，这 6 个月的雷电天数占全年的比例达到了 95%；每年影响当地的台风数量为 4~6 个，时间分布在 4~10 月，属于台风灾害频发的地区；年暴雨天数约为 7.18 天，主要集中在每年的 5~9 月；年高温天数约 13.64 天，主要集中在 6~9 月。

### 1.2 故障气象关联分布特征

对该地区电网 2007~2013 年 9 月期间 110~500 kV 线路的跳闸事件，按照跳闸原因、故障时间分布、跳闸时对应的天气状况分别进行统计分析。

#### 1.2.1 跳闸原因分析

电网跳闸原因所占比例如表 1 所示。从表中可见，雷击跳闸是输电线跳闸的最主要原因，占到总数的 52.63%；其次是外飘物引起的外力破坏，占到了 17.41%；风偏放电也是电网跳闸的一大原因，占到了 9.31%；暴雨天气下绝缘子雨闪占到了 1.62%。

表 1 跳闸原因所占比例

Table 1 Proportion of fault reason

跳闸原因	所占比例/%
雷击	52.63
外力破坏（外飘物、树枝等）	17.41
风偏放电	9.31
不明原因	7.83
外力破坏（施工作业）	7.15
站内故障	2.56
暴雨	1.89
其他	1.62

#### 1.2.2 故障的时间分布特征

图 1 显示了该地区电网跳闸事件的时间分布。从图中可见，跳闸事件主要发生在第二和第三季度（87%），尤其以第三季度的 7、8、9 月最多（54%）。这与当地的雷电天气时间分布（4~9 月）、暴雨天气

时间分布 (5~9 月)、台风天气时间分布 (4~10 月) 是一致的。

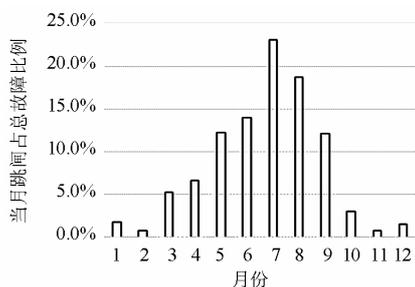


图 1 故障时间分布特征

Fig. 1 Temporal distribution characteristic of faults

### 1.2.3 跳闸时对应的天气状况

跳闸事件对应的天气状况如图 2 所示。从图中可见, 跳闸事件对应的天气状况, 53%为雷雨天气, 这与电网跳闸原因中雷击所占 52.63%的比重是相吻合的。其次的灾害性天气是台风, 台风天气占 17%, 进一步分析台风天气对应的跳闸事件, 有 65%是风偏放电, 有 16%是外飘物、树枝等外力破坏。由于沿海地区的输电线路和杆塔的设计风速普遍按照抵御 12 级台风的能力进行设计 (110 kV 和 220 kV 线路在 10 m 高程 33 m/s, 500 kV 线路在 20 m 高程 40 m/s), 因此台风天气下直接断线倒塔的事故很少发生。而台风天气下伴随大风、暴雨甚至强雷电活动, 台风造成的衍生灾害, 如风偏放电、外力破坏 (外飘物、树枝等)、雷击成为故障最主要的原因, 占到了 86%。

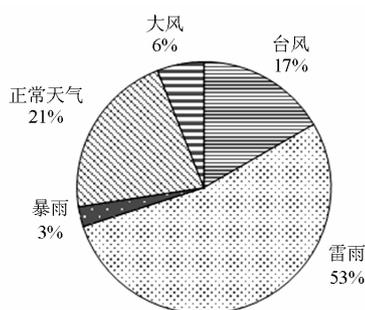


图 2 跳闸事件对应的天气状况

Fig. 2 Pie chart of weather condition when fault occur

图 3 是正常天气下跳闸原因比例图, 正常天气指非灾害性天气, 如晴、阴、多云、小雨、阵风、阵雨天气等, 这类“正常天气”下, 电网故障的原因主要是外力破坏, 如外飘物、施工作业等, 占到了 72%, 其次是站内故障导致跳闸。由于这类天气下线路跳闸后巡线也常常找不到故障原因, 因此有 8%的原因不能确定。

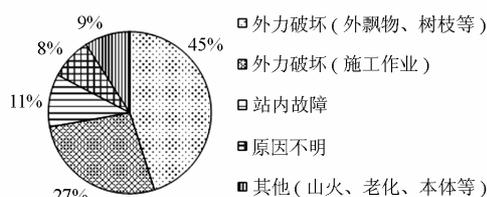


图 3 正常天气下跳闸原因比例图

Fig. 3 Pie chart of fault reason in normal weather condition

## 2 灾害性天气下线路 $N-m$ 风险分析

### 2.1 $N-m$ 故障

近年来, 全球发生的多起灾难性事故均造成了大面积停电, 引起人们对电网灾难性事故的高度关注<sup>[15-16]</sup>。灾难性事故受天气、环境、电网拓扑和运行方式等多种因素影响<sup>[16-18]</sup>。

所谓  $N-m$  故障是指电力系统中多个元件开断的“高阶”事件, 一般分为两类:

① 独立  $N-m$  故障: 这类故障主要指短时间内若干元件的同时开断, 其故障概率为  $P^m$ , 其中  $P$  为单独停运事件的概率,  $m$  是停运元件数目。

② 相关  $N-m$  故障: 这类故障主要指元件的相继开断, 更确切地说是一种  $N-1-1\cdots$  故障, 对于连锁故障来说其持续时间既可能较长也可能较短, 故障概率介于  $P^m$  和  $P$  之间。

在灾害性天气下, 电网运行风险大。特别是重要送电通道, 常常穿越同一输电走廊, 地理气候环境相似, 当某一条线路因雷电、台风等恶劣天气出现故障后, 其他线路故障的概率很高, 很可能发生  $N-m$  故障风险。

现代电力系统的故障持续时间大大缩短, 单一故障已难以对电网稳定构成较大的威胁。传统的  $N-1$  准则渐渐开始无法满足现代电网安全高效运行的要求, 研究电网的  $N-m$  故障风险具有非常重要的意义。

### 2.2 $N-2$ 故障抽样规则

进行风险评估最关键的环节是故障概率的确定, 一种可行的方法是通过建立的风险预警模型, 预测线路的故障风险概率。可以根据第 1 节所述的电网故障与气象的关联分布特征, 建立基于气象参数的电网故障概率模型, 在预报的天气状况下, 预测电网元件的故障概率, 并结合电网的运行状态, 进行  $N-m$  故障风险评估。然后针对存在故障风险的线路集进行  $N-2$  故障抽样, 即在风险线路集中同时停运两条线路, 以评估期望缺电概率、期望削减电力等风险指标。

在短时间内对预报天气状况下存在故障风险的输电线路集, 其风险等级越高, 故障概率越大, 评估风险时被抽中的概率应该更高, 可以通过故障概率权重的方式进行抽取, 即第  $i$  条线路被抽中的机率可以用  $i$  条线路预警等级对应的概率值与风险线路集中线路预警等级对应的概率值的总和之比, 如式 (1) 所示。

$$P_{i\text{抽中}} = \frac{P_i}{\sum P_i} \quad (1)$$

式中:  $P_{i\text{抽中}}$  表示第  $i$  线路被抽中的机率;  $P_i$  表示第  $i$  线路预警等级所对应的概率值。在确定预警等级时, 常将风险概率按  $p$  分位法进行划分, 即出现概率  $p$  对应某一等级。常采用各预警等级范围内的故障事件所占总故障事件的比例等于其先验概率来确定  $p$  分位法间断阈值, 先验概率常采用经验方式确定, 如概率超过 80% 的情况对应最高等级 I 级预警。反过来, 可以设定 I 级预警时, 概率  $P=80%$ ; II 级预警时, 概率  $P=60%$ ; III 级预警时, 概率  $P=40%$ 。

### 3 基于 $N-m$ 停运风险的系统风险控制策略

基于  $N-m$  停运风险的系统风险控制策略的基本思路是: 根据该电网所建的气象风险预警系统, 在预报天气状况下对存在故障风险的输电线路集, 进行  $N-2$  故障风险评估; 结合当前的天气状况和所处时间, 采取提前转移该线路负荷的风险预控措施, 确保在预报的气象作用下系统的失负荷水平最小或维持在可接受状态。

#### 3.1 提前转移负荷策略

由于输电线路跳闸多由瞬时性故障引起的, 因此输电线路广泛采用自动重合闸, 在线路被断开以后再进行一次合闸, 以提高电力系统的供电可靠性。自动重合闸成功率一般在 60%~90% 之间, 主要取决于瞬时性故障占总故障的比例。对南方沿海某地区电网 2007~2013 年 9 月期间 110~500 kV 线路的自动重合闸情况进行统计, 发现线路重合成功率为 74.96%, 加上强送成功的情况, 成功率达到 78.62%。在以雷击为主要跳闸原因的 5~9 月, 重合成功率超过了 66%, 而在灾害性天气很少的 11 月到次年 3 月, 重合闸成功率较低, 平均成功率不足 50%。雷击造成跳闸后, 重合成功率达到了 94.40%, 加上强送成功的情况, 成功的比例达到了 96.64%。因此, 可以大致认为瞬时性故障对停电的影响很小, 而需要转移的那部分负荷就是永久性故障造成的负荷损失。因此可以按不同月份瞬时性故障所占比例来确定转移以后保留的负荷, 即线路降额运行时传

输的功率, 如式 (2) 所示。

$$T_k = \alpha(t) T_{\text{normal}} \quad (2)$$

式中:  $T_k$  为线路降额运行时传输的功率;  $T_{\text{normal}}$  为线路正常运行时传输的功率;  $\alpha(t)$  表示第  $t$  月瞬时性故障比, 其定义为

$$\alpha(t) = \frac{N_{\text{suc}}(t)}{N_{\text{total}}(t)} \quad (3)$$

式中:  $N_{\text{suc}}(t)$  表示第  $t$  月重合成功次数;  $N_{\text{total}}(t)$  表示第  $t$  月总故障次数,  $t=1,2,\dots,12$ 。

瞬时性故障比逐月分布情况如图 4 所示。

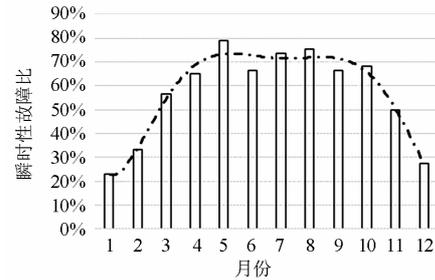


图 4 历史同期瞬时性故障比逐月分布图

Fig. 4 Distribution curve of temporary fault rate in each months

例如, 雷电天气下线路瞬时性故障比为 88.46%, 雷电天气下高风险线路可以降额运行到 85%~90%; 而在非雷电天气下, 线路瞬时性故障比在 23%~60%, 可在不同月份对高风险线路采取降额运行至 20%~60% 的措施。

#### 3.2 评估指标

在短期的灾害性天气下, 可以选取负荷削减的期望值  $EDNS$  作为风险指标, 用以衡量电网在相关约束下造成负荷削减的期望值, 即

$$\min \sum_{i \in ND} C_i(S) \quad (4)$$

约束条件为

$$T(S) = A(S)(PG - PD + C(S)) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in NG} PG_i + \sum_{i \in ND} C_i = \sum_{i \in ND} PD_i \quad (6)$$

$$PG_i^{\min} \leq PG_i \leq PG_i^{\max} \quad (7)$$

$$0 \leq C_i \leq PD_i \quad (8)$$

$$|T_k(s)| \leq T_k^{\max} \quad (9)$$

式中:  $C(S)$  表示停运状态  $S$  的削负荷量;  $T(S)$  是停运状态  $S$  的有功潮流矢量;  $A(s)$  是停运状态  $S$  的有功潮流和注入功率间的关系矩阵;  $PG$  和  $PD$  分别是发电机和负荷功率矢量;  $PG_i^{\min}$ ,  $PG_i^{\max}$ ,  $T_k^{\max}$  分别是  $PG_i$  和  $T_k(S)$  的限值;  $NG$ ,  $ND$  和  $L$  分别是系统发电母线、负荷母线以及支路集合。

$N-2$  故障风险评估流程如图 5 所示。

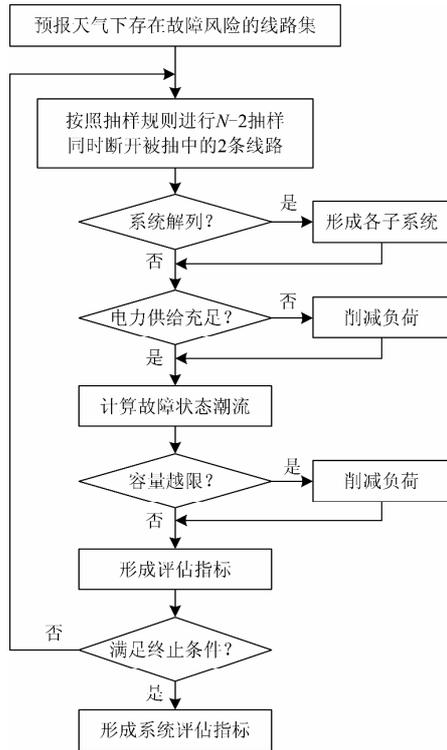


图 5  $N-2$  故障风险评估流程

Fig. 5 Flow chart of  $N-2$  risk evaluation

在评估过程中,潮流计算采用直流潮流模型,系统解列状态采用深度优先搜索算法进行判断,负荷削减模型采用最优削减模型。

#### 4 算例分析

如图 6 所示为 RBTS 可靠性标准测试系统<sup>[19]</sup>,图中线路上箭头代表了线路的实际功率流方向。现就以下三种情况对 RBTS 进行  $N-2$  故障可靠性评估。

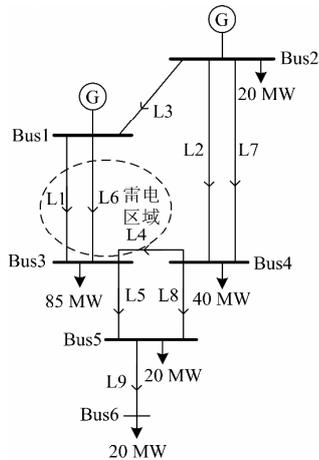


图 6 RBTS 单线图

Fig. 6 Single line diagram of RBTS

Case 1: 线路 L1、L4、L6 的不可用率取为原始系统的年均统计参数计算所得值,其余元件不可用率取为 0;

Case 2: 某次雷电过程中,线路 L1、L4、L6 处于雷电区域,相应的雷击预警等级分别为 I 级、II 级、I 级。则根据本文第 3 节思想,在  $N-2$  故障风险评估中线路 L1、L4、L6 的不可用率 ( $P_{i,故障}$ ) 分别为 4/11、3/11、4/11 (假设短时间内其余元件的不可用率均为 0);

Case 3: 采用本文所述方法进行风险控制,其基本步骤是:首先,考虑到线路 L1、L4、L6 的受端节点均为节点 3,因此转移部分节点 3 的重要负荷到其他母线上(转移时可按如下优先级进行参考,发电机母线节点、线路功率送端节点、远离风险线路节点的母线或采取最优负荷转移策略),本文采取将节点 3 的部分负荷转移到节点 1;其次,统计得历史上该月的瞬时性故障比为 80%,即将转移节点 3 的 20%负荷至节点 1,为  $85 \text{ MW} \times 0.2 = 17 \text{ MW}$ ;最后,计算处理之后系统的可靠性指标。

这三种情况下系统  $N-2$  故障的期望缺电概率 LOLP 和期望缺供电力 EDNS 如表 2 所示。

表 2 可靠性指标计算结果

Table 2 Results of reliability index

$N-2$ 故障评估	Case 1	Case 2	Case 3
LOLP	$2.91872 \times 10^{-6}$	0.09617	0.09617
EDNS/MW	$6.71306 \times 10^{-5}$	2.21187	0.57701

从表 2 可以看出,对比 Case 1 和 Case 2 可知,在短时雷电天气下,若仍然墨守成规的按年均值来判断系统的可靠性,将大大低估故障概率及其后果。对比 Case 2 和 Case 3 可见,按本文所述方法进行风险管控,虽然系统的失负荷概率未能得到改善,但是期望缺供电力有了很大的降低;因此,本文方法能有效地预控系统风险,显著地提高在有气象灾害预警时电网的供电可靠性。

#### 5 结语

本文统计分析了南方沿海某地区的灾害性天气分布特征,4~9 月为雷电、台风、暴雨等灾害性天气多发并发的时间段。对近 7 年的电网跳闸事件的时间分布、原因和对应的天气状况进行了详细的分析。电网故障与灾害性天气具有较强的时间相关性,造成电网跳闸的主要原因是雷击;台风天气下的衍生灾害,如风偏放电、外力破坏(外飘物、树枝等)成为电网故障最主要的原因。提出了根据该电网所建的气象风险预警系统,在预报天气状况下

对存在故障风险的输电线路集, 进行  $N-2$  故障风险评估; 结合当前的天气状况和所处时间, 采取提前转移该线路负荷的风险预控措施, 确保在预报的气象作用下系统的失负荷水平最小或维持在可接受状态。

### 参考文献

- [1] 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 苏盛, 陈金富, 段献忠. 全球暖化与电力系统的相互影响综述[J]. 电网技术, 2010, 30(2): 33-40.  
SU Sheng, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Interaction between global warming and electric power systems[J]. Power System Technology, 2010, 30(2): 33-40.
- [3] 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.
- [4] ENTRIKEN R, LORDAN R. Impacts of extreme events on transmission and distribution systems[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, 2012: 1-10.
- [5] 马御棠, 王磊, 马仪, 等. 云南电网雷害风险分布图的绘制与应用[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 76-81.  
MA Yu-tang, WANG Lei, MA Yi, et al. Drawing and application of lightning hazard map of Yunnan Power Grid[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 76-81.
- [6] 陆佳政, 张红先, 方针, 等. 湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 99-105.  
LU Jia-zheng, ZHANG Hong-xian, FANG Zhen, et al. Result and its analysis of ice disaster monitoring of Hunan power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 99-105.
- [7] 甘璐, 叶宽, 张德山, 等. 北京市电网灾害的时空分布特征及与气象因素的关系[J]. 气象, 2012, 38(3): 349-352.  
GAN Lu, YE Kuan, ZHANG De-shan, et al. Temporal-spatial distributive characteristics of power grid disasters and their relation with meteorological factors over Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(3): 349-352.
- [8] 付桂琴, 曹欣. 雷雨大风与河北电网灾害特征分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 353-357.  
FU Gui-qin, CAO Xin. The characteristic analysis of the thunderstorm GALE and electrical network disaster in Hebei[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(3): 353-357.
- [9] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 138-143, 148.  
WU Tian, RUAN Jiang-jun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 138-143, 148.
- [10] 王少华, 叶自强. 恶劣气候对浙江电网输电线路的影响[J]. 中国电力, 2011, 44(2): 19-22, 57.  
WANG Shao-hua, YE Zi-qiang. Influence of atrocious weather on transmission lines of Zhejiang Electric Power Grid[J]. Electric Power, 2011, 44(2): 19-22, 57.
- [11] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17.  
FU Rong, JIANG Guo-ping, WANG Bao-yun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.
- [12] 吴旭, 张建华, 邱威, 等. 基于  $N-k$  故障的地区电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 93-99.  
WU Xu, ZHANG Jian-hua, QIU Wei, et al. Vulnerability evaluation of district power grid based on  $N-k$  contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 93-99.
- [13] 刘友波, 胡斌, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(一)——相关理论方法与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 148-155.  
LIU You-bo, HU Bin, LIU Jun-yong, et al. Power system cascading failure analysis theories and application I - related theories and applications[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 148-155.
- [14] 刘友波, 胥威汀, 丁理杰, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(二)——关键特征与研究启示[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 146-155.

- LIU You-bo, XU Wei-ting, DING Li-jie, et al. Power system cascading failure analysis theories and application II-key features of real cascading failures and revelation aspects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 146-155.
- [15] 吴旭. 基于 N-k 故障的电力系统运行风险及脆弱性评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [16] 王英英, 罗毅, 涂光瑜, 等. 电力系统连锁故障的关联模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 204-209.
- WANG Ying-ying, LUO Yi, TU Guang-yu, et al. Correlation model of cascading failures in power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 204-209.
- [17] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.
- WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.
- [18] 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.
- [19] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
- 
- 收稿日期: 2013-12-04; 修回日期: 2014-03-05
- 作者简介:
- 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; E-mail: flh@csg.cn
- 熊小伏(1962-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事智能电网、电力系统保护与控制等相关研究;
- 方嵩(1977-), 男, 电气工程师, 从事电网分析计算、负荷预测、经济运行等相关工作。