

基于概率不安全指标的实时故障筛选策略

刘怀东¹, 马林¹, 王曦冉², 崔晓君¹, 吴贺¹

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310007)

摘要: 为了解决电力系统面临的故障筛选问题, 提出了一种改进的故障筛选策略。利用动态安全域的分析方法, 结合实用概率不安全指标作为对故障筛选排序的依据, 将致命性故障与非致命性故障分别建模, 以故障可能造成的损失作为目标函数进行排序。分析多种故障分类下系统面临的不同情况, 综合考虑全局概率分布, 通过权值控制反映系统安全性指标, 通过目标函数反映经济性指标, 采用离线计算在线应用的方式得到故障综合筛选情况。采用 IEEE10 机 39 节点系统算例进行验证性排序, 结果符合事实依据, 该方法鲁棒性好, 对实际故障隐患的处理指导性强。

关键词: 电力系统; 概率不安全指标; BP 神经网络; 损失模型; 故障筛选

Strategies of real time contingency screening based on probabilistic insecurity index

LIU Huaidong¹, MA Lin¹, WANG Xiran², CUI Xiaojun¹, WU He¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Zhejiang Electric Power Company Economic Research Institute, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In order to solve the problem of contingency screening that power system faces, an improved contingency screening strategy is proposed. This paper uses the analysis method of dynamic security domain, and practical probabilistic insecurity index is a basis for contingency screening and ranking. Building models depend on fatal contingency or not, then it takes the loss that may be caused by the failure as the objective function to rank. This method analyses different circumstances under a variety of fault classification that the system faces and considers the overall probability distribution, reflects system security by weight control and economy index by objective function. Then it uses the method of off-line calculation and online application to get the results of contingency screening. Tests on the New England 10-generator 39-bus test system show that the results accord with the factual basis, and it has good robustness and strong guidance for the processing of actual hidden faults.

Key words: power system; probabilistic insecurity index; BP neural network; loss model; contingency screening

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0016-06

0 引言

目前, 我国电网正处于快速发展阶段, 区域间联系更加紧密, 区域间功率传输量增加, 系统稳定程度有了极大的改善, 经济效益和安全效益显著。然而, 系统互联度提高同时使系统可能存在的故障及故障引起的暂态扰动过程更加复杂。北美 8·14 大停电事故^[1]等典型的复杂网络严重事故对现阶段的电网安全预防提出了严格的要求。因此, 建立合理的故障预想集并对集内故障进行程度排序, 用以监控、指导对于现实故障的控制手段具有重要意义^[2]。

针对筛选故障评价的暂态分析方法分确定性分

析和概率性分析^[3]。其中, 确定性主要以故障中最为严重, 对系统造成最大威胁的故障进行分析, 逻辑简单但在分析过程中忽略了系统运行时故障类型的复杂性和随机性, 其分析结果过于保守且缺乏直观性的比较, 以此为依据进行控制经济性较差。对比之下, 概率性分析方法综合考虑系统及其故障事件发生的不确定性, 在客观上更真实反映系统可能面临的运行状况。

快速、有效排序是暂态稳定评估故障筛选的重要特点, 同时故障的综合指标应包含故障发生的概率及其严重性后果。基于系统暂态计算的故障筛选的方法有多种, 例如数值仿真法^[4], 能量函数法^[5-6]、

神经网络(ANN)法^[7-8]、动态安全域评测法^[9]。传统的故障筛选中, 一般不考虑天气因素及非致命性故障, 然而恶劣天气条件下电网故障概率比平均故障概率水平要高^[10-11]。而就实际情况而言, 非致命故障如单相接地故障、大电阻故障等故障占到故障概率的绝大部分, 而故障后果严重的三相短路等故障发生概率相对较小。因此应建立合理模型综合讨论概率及严重性这两方面指标。

本文利用动态安全域的分析手段, 基于概率不安全指标模型, 提出了一种改进的故障筛选策略。该策略将致命性故障与非致命性故障分别建模, 改进了传统排序中只注重致命性故障的缺陷。计算上采用离线计算在线应用的方式保证实时计算能力, 同时综合天气因素进行进一步修正。策略中通过权值控制反映系统安全性指标, 通过目标函数反映经济性指标, 该方法能够真实地反映预想故障集中所有故障的概率及威胁性指标, 为系统的监测和故障控制提供实用前置信息^[12-13]。

1 电力系统概率不安全指标

1.1 动态安全域(DSR)

动态安全域 $\Omega(i, j, \tau)$ ^[4]是系统注入功率空间向量 \mathbf{y} 上的集合, 其中: i 为事故前网络结构, j 为事故后网络结构, τ 为给定事故的持续时间。只有当向量 \mathbf{y} 处于 Ω 内时, 系统保持暂态稳定, 反之系统失稳。

1.2 基于 DSR 的失稳度定义

通过实用动态安全域拟合法求取节点处母线出口三相短路时, A_i 为不同重合闸时刻的超平面系数向量, A_i 与现实功率向量 \mathbf{y}_{act} 相乘得动态安全测度 C_d , $C_d = \sum_{i=1}^n a_i \cdot y_{act_i}$ 。 $C_d > 1$ 时系统失稳, $C_d < 1$ 时系统稳定, 且 C_d 越小系统越稳定。该失稳度量化了系统功角稳定程度, 在故障筛选中, 一方面用以区分致命故障与一般故障, 一方面作为系统故障后造成线路及电机老化损耗系数依据。

1.3 电力系统概率不安全指标

文献[9]提出了一种电力系统概率不安全指标模型, 它表示的物理意义是电力系统发生故障时出现失稳的概率。现以输电线路为例, 则线路 l 的概率不安全指标为

$$P_{insec}(l) = a(k) \int_0^{x_0(l)} f_x(x) \int_0^{+\infty} f_r(r) \int_{t_{min}}^{t_{max}} f_\tau(\tau) \cdot M_{\Omega(l,k,r,x,\tau)}(\mathbf{y}) d\tau dr dx \quad (1)$$

式中: l 是线路编号; $P_{insec}(l)$ 是线路 l 的动态概率不

安全性指标; k 为故障类型, $k=1$ 表示单相对地短路故障, $k=2$ 表示两相相间短路故障, $k=3$ 表示两相对地短路故障, $k=4$ 表示三相短路故障; $\alpha(k)$ 为类型为 k 的故障所占的比例; x 是故障地点距线路始端的距离; $x_0(l)$ 是线路 l 的长度; $f_x(x)$ 是 x 的概率分布密度函数; r 是故障电阻; $f_r(r)$ 是 r 的概率分布密度函数; τ 是故障切除时间; $f_\tau(\tau)$ 是 τ 的概率分布函数; $\mathbf{y}=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ 为维数为 n 的节点注入功率向量; $M_{\Omega(l,k,r,x,\tau)}(\mathbf{y})$ 是特定事故的安全性测度。

2 天气因素对故障概率的修正

2.1 BP 神经网络算法

BP 神经算法的思想是通过建立多层的运算机制, 在第一层接受输入数据后, 经过 Activation Function 处理后得到输出结果作为下一层的输入值再进行计算, 直到最终层输出, 如图 1 所示。

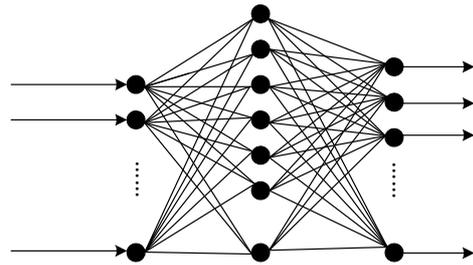


图 1 BP 神经网络逻辑示意图

Fig. 1 Logic schematic of BP neural network

当输出结果与预知结果不相符合时, 则反馈传递计算误差, 将误差迭代入上一层计算, 并依据误差调节步长及学习速率。整个过程经过多次训练及迭代后使终值误差对于各训练样本达到一定的精度后, 保存层与层间的计算矩阵作为计算公式。该方法较为适合于快速计算气候及天气造成影响, 可有效快速地对于天气所造成的故障概率的变化进行修正。

2.2 天气修正量训练样本的计算

文献[10-11]表明, 在下雪、刮风、下雨、雷暴等天气条件下, 电网故障概率比平均故障概率水平要高。依据 IEEE 在其标准 346 中将天气分为正常天气、恶劣天气、大灾难天气三类^[14]。由于大灾难天气出现的机会极小, 则天气的变化可以处理为这两种天气情况的随机过程。在某天气条件 W 出现时, 将该天气条件 W 按等级离散成不同严重程度 i , 依照统计数据可计算得该气候条件 W_i 情况下线路故障发生概率的增量为

$$\gamma_i = \frac{P_{W_i}}{\bar{P}} - 1 = \frac{T_{W_i}^{\text{err}} / T_{W_i}}{\bar{T}^{\text{err}} / T} - 1 \quad (2)$$

式中： γ_i 为线路或母线在某气候条件下 W_i 的故障比率增量； P_{W_i} 为线路或母线在恶劣天气下的平均故障率； \bar{P} 为线路或母线的平均故障率，在统计数据中，该概率由故障时间 \bar{T}^{err} 与总时间 T 的比值得到。

$$P'_{\text{insec}}(l) = P_{\text{insec}}(l) \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^n \gamma_i\right) \quad (3)$$

式中不同的天气影响下故障发生的概率及综合故障概率由统计数据取得，由于电网正处于高速发展阶段，实际可作为参考依据的统计数据不能满足网络训练需要，则通过式(3)推算取得基础训练样本。

3 单一故障概率下的严重程度模型

系统的概率故障，包括致命性故障及非致命性故障，在致命性故障发生时，系统暂态失稳，可能出现功角失稳后系统解列等情况，如不及时进行紧急控制等手段挽救系统将会造成巨大损失，所以致命性故障集是故障筛选排序的重要部分；由于现阶段电网已有良好的坚强性和稳定性，且主要发生的故障类型以单相接地故障等不会使系统失稳、解列的故障为主，所以非致命性故障在数量上和概率上占据故障主体。非致命性故障所引发的系统绝缘老化损耗、电机非正常运行损耗、连锁故障隐患威胁等隐性损耗或威胁也需在故障筛选或排序时计入考量。

3.1 致命性故障下损失成本

在致命性故障发生时，对于预想故障集来说，故障后系统动态安全测度 C_d 大于 1。文献[15]指出对于致命性故障，主要包括故障发生后为了避免系统完全失稳而采取的预防措施所产生的成本，及系统完全失稳时所引发的损失，如式(4)所示。

$$I_m^c = I_{ms} + I_{mo} + I_{md} \quad (4)$$

式中： I_{ms} 指维修和启动成本，主要包括关机成本、维修成本和启动成本； I_{mo} 指发电机会成本，由式(5)表示； I_{md} 指负荷损失成本，由式(6)表示。

$$I_{mo} = (C_{\text{new}} - C_{\text{old}}) \cdot h \cdot P_{\text{lost}} \quad (5)$$

式中： C_{new} 为故障期间的单位发电成本； C_{old} 为故障前的单位发电成本； h 为故障的持续时间； P_{lost} 为停运机组应供应的电力。

$$I_{md} = C_{\text{pen}} \cdot h \cdot P_{\text{shed}} \quad (6)$$

式中： C_{pen} 为单位功率的负荷损失； h 为持续时间； P_{shed} 为断电负荷量。

3.2 非致命性故障下损失成本

对于故障发生后，系统未产生失稳，而是功角及电压有所波动的情况 ($C_d < 1$)，主要考虑以下方面：电压下降引起的非线性成本损失，功角振动产生的电网绝缘老化损耗及电机老化折损，连锁故障威胁隐性成本。此时，系统损耗表达为

$$I_m^{\text{uc}} = I_{mV} + I_{ml} + I_{mc} \quad (7)$$

I_{mV} 为系统发生故障后由于电压下降所造成的负荷丢失或损失，系统电压并非维持不变，所以若故障轻微，电压下降不大时，此项损失几乎为 0。然而若故障造成了系统明显的电压波动，且电压低于裕度下限 ($0.95U$) 时，该项损失急剧增加。文献[16]给出低压时对系统影响严重程度模型如图 2 所示。

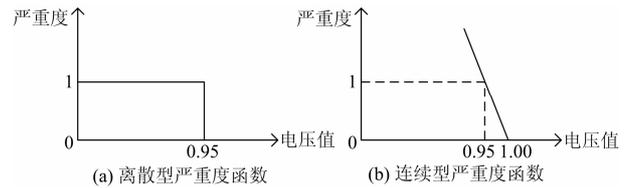


图 2 低压时对系统影响严重程度模型

Fig. 2 Model about the severity of the impact on the system when it is low pressure

I_{ml} 为故障中由于潜供电流或短路电流使线路和电机产生的绝缘老化折损，由线路参数和机电参数统计得出。

I_{mc} 为可能引发的连锁事件导致系统大面积失稳的损失，由连锁故障风险乘上连锁故障发生时可能产生的综合损失及黑启动代价得出。由于多级故障(系统不同位置先后故障)中第二次故障出现在第一次故障暂态振荡中(几秒至几十秒)的概率很小，可以认为是两个独立的暂态过程。计算时，计及第二次故障后的安全测度 C'_d ，并按致命及非致命区分该冲击对系统造成的损失威胁。

3.3 故障筛选综合策略模型

针对故障预想集，采用概率不安全指标计算单一故障发生概率并用 BP 算法结合实际天气进行修正，同时得到其安全测度 C_d ，当系统失稳时，采用式(18)表示该故障在该天气下的损失威胁。

$$S_k^f = P'_{\text{insec}}(l_k) \cdot I_{mk}^c \quad (8)$$

式中，当第 k 种故障发生在线路 l 上时综合指标 S_k^f 等于修正概率 $p'_{\text{insec}}(l_k)$ 与致命故障损失成本 I_{mk}^c 的乘积。

对于非致命故障， $C_d < 1$ ，此时动态安全测度直接反映了系统运行点距离安全边界的程度，可用做系数来表示该故障对系统的威胁度。某天气条件下损失威胁如式(9)。

$$S_{l_k}^{uf} = (P(l_k) - P'_{insec}(l_k)) \cdot I_{mk}^{uc} \cdot e^{C_d} \quad (9)$$

式中: $P(l_k)$ 为线路 l_k 发生故障的概率; I_{mk}^{uc} 为非致命故障时损耗及隐患成本; $C_d < 1$ 且其越大, 成本增加越剧烈。

故障的损失威胁为

$$S_{l_k} = S_{l_k}^f + S_{l_k}^{uf} \quad (10)$$

通过概率不安全指标进行故障筛选的步骤可描述如下:

1) 给出预想故障集 R 并使用动态安全域方法求出各故障下系统安全域系数及安全测度 C_d ;

2) 针对预想故障集 R 中每一条故障, 采用概率不安全指标计算其基础概率指标 $P_{insec}(l)$;

3) 针对预想故障集 R 中每一条故障, 求解该故障在造成系统失稳时引起的损失成本 I_m^c 及未造成系统失稳时引起的损失成本 I_m^{uc} ;

4) 通过统计数据获得受天气影响的概率样本群 A , 通过第 3 小节中近似法扩展样本群得 A' ;

5) 训练 BP 神经网络, 得到关联修正矩阵 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$;

6) 在实时应用中, 导入天气条件, 提取第 k 项故障, 通过关联矩阵 $X1$ 、 $X2$ 、 $X3$ 修正基础概率指标 $P_{insec}(l_k)$ 得实时应用指标 $P'_{insec}(l_k)$;

7) 采用本小节所提的综合计算策略, 对于不同注入功率情况下, 可能造成的故障致命性的不同代入不同的计算模式, 得到在现实特定天气状况下, 特定注入分布情况下的实际故障评估值 S_{l_k} , 检索故障集 R 中故障是否均处理完成, 若未完成则返回步骤 6) 计算, 若完成进入步骤 8);

8) 针对所有得出的故障分项评估值进行排序, 得到故障综合筛选表 Rs 。

上述步骤中, 步骤 1) 至步骤 5 为离线计算, 步骤 6) 至步骤 8) 为在线应用。由于动态安全域的计算及神经网络的训练不能符合在线计算的实时性要求, 所以采用离线计算, 在线应用的方式。在线应用部分的计算简单快速, 能符合一般工程上的需要。

4 算例

对 IEEE 10 机 39 节点系统进行分析, 其系统接线图如图 3 所示, 简化故障为每段线路仅发生一种故障。设系统所处天气条件为有风, 风速中等; 系统运行位置为负荷较重。

通过 3.3 节计算部分得各项预想故障基础概率指标, 修正概率指标, 裕度系数及综合威胁损失等各项参数如表 1 所示。

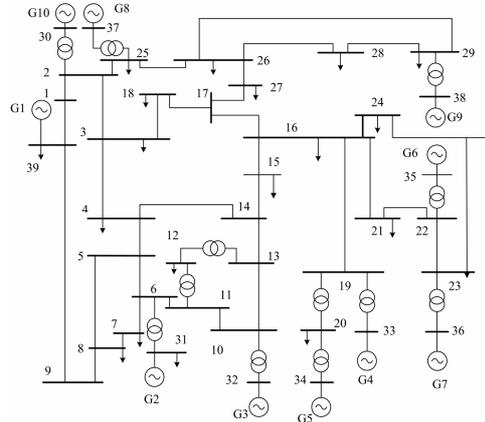


图 3 新英格兰 10 机 39 节点系统图

Fig. 3 System diagram of new England 10-machine 39-node

表 1 故障线路的各数据对应表

Table 1 List of each kind of data of fault line

故障线路	致命性	安全裕度 C_d	P_{insec} ($\times 10^{-4}$)	P'_{insec} ($\times 10^{-4}$)	损失威胁 S_{l_i} /万元
16-19	+	1.13	0.716 3	0.919 6	72.740 4
28-29	+	1.84	0.232 3	0.305 8	39.387 0
8-9	-	0.67	0.695 7	0.729	5.701 0
1-39	-	0.33	0.925 9	1.022 2	5.688 6
21-22	-	0.76	0.599 6	0.622 7	5.328 6
23-34	-	0.81	0.501 4	0.589	5.312 0
22-23	-	0.18	1.017 6	1.098 4	5.273 8
5-6	-	0.46	0.772 2	0.779 8	4.979 5
2-25	-	0.52	0.619 9	0.688 1	4.631 1
26-28	-	0.04	1.011 9	1.100 7	4.582 6
13-14	-	0.26	0.849 4	0.871 6	4.533 7
6-7	-	0.39	0.752 8	0.759 2	4.531 3
10-13	-	0.17	1.227 3	1.503 5	4.360 4
26-29	+	1.59	0.019 8	0.028 7	3.194 3
2-3	-	0.71	0.341 6	0.377	3.114 7
26-27	-	0.74	0.295 7	0.350 4	2.968 4
16-21	-	0.32	0.435 8	0.529 2	2.930 3
25-26	-	0.63	0.303 9	0.376 5	2.850 0
16-24	-	0.68	0.259 2	0.316 2	2.528 9
15-16	-	0.53	0.296 9	0.318	2.199 6
10-11	-	0.47	0.235 8	0.317 5	2.073 2
6-11	-	0.64	0.196 6	0.247 9	1.933 0
9-39	-	0.59	0.206 5	0.218 2	1.614 5
1-2	-	0.61	0.142 7	0.202 1	1.536 8
4-14	-	0.68	0.137 3	0.182 5	1.506 4
16-17	-	0.39	0.200 7	0.246 9	1.502 8
3-4	-	0.27	0.235 5	0.277 3	1.486 0
7-8	-	0.48	0.129 6	0.203 8	1.380 4
5-8	-	0.45	0.150 2	0.201	1.314 9
14-15	-	0.24	0.165 7	0.246 7	1.298 6
4-5	-	0.57	0.125 2	0.164 3	1.206 1
3-18	-	0.31	0.131 9	0.188 2	1.077 9
17-27	-	0.53	0.091 9	0.143 4	1.026 0
17-18	-	0.33	0.118 6	0.146 7	0.849 0

表 1 中, 故障致命性为“+”表示该故障下系统失稳, 从该表中看出, 在大风天气下修正故障概率高于原始故障概率, 充分反映了实际情况; 对照致命故障 26-29(三相短路)与非致命故障 10-13(单相接地), 虽然前者发生后产生结果明显恶劣于后者, 但是前者发生概率极低, 总体发生威胁性不大, 后者更易发生从而对系统产生影响; 对照线路 16-24 故障(两相短路故障)与 15-16 线路故障(两相短路故障), 虽然 16-24 故障概率低于 15-16 线路, 但是其发生故障后系统振荡更强烈, 且级联故障威胁更大, 在系统安全测度 C_d 代入后能综合描述系统故障隐性损失及不安全概率这两项指标。通过计算, 表 1 能够充分体现致命性故障与非致命性故障的量化区分, 非致命性故障情况下的隐性因素综合考虑, 符合现实计算、评估事实。

5 结论

本文分析了概率不安全指标的计算及修正, 提出了致命性故障及非致命性故障损失威胁的计算模型, 并提出了一种基于概率不安全指标的实时故障筛选策略。该策略采用离线计算、在线应用的基本计算形式保证了其实时性及可用性。同时, 考虑到不同天气因素对于故障发生概率的影响, 本文引入 BP 神经网络算法对概率指标进行修正。在损失威胁评价指标的计算中, 本文引入安全测度 C_d 作为区分故障致命性的依据, 并以此作为非致命性故障中评价指标的一个权值。本文采用 IEEE10 机 39 节点系统进行仿真, 仿真结果表明, 所提出的计算策略能充分反映天气影响, 能够均衡概率指标及故障严重性, 能有效体现综合评价致命性故障及非致命性故障, 符合事实依据鲁棒性强。

参考文献

- [1] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.
HU Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected north america power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6.
- [2] 徐泰山, 许剑冰, 鲍颜红, 等. 互联电网预防控制和紧急控制在线预决策系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 1-4, 36.
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 1-4, 36.
- [3] 赵霞, 周家启, 胡小正, 等. 暂态稳定性分析中的确定性方法和概率性方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 100-103.
ZHAO Xia, ZHOU Jiaqi, HU Xiaozheng, et al. Deterministic studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 100-103.
- [4] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] FOUAD A A, VITTAL V. Power system transient stability analysis using the transient energy function method[M]. Indiana: Prentice Hall, 1999.
- [6] 万秋兰, 单渊达. 对应用暂态能量函数法分析电力系统暂态稳定性的评价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 57-59.
WAN Qiulan, SHAN Yuanda. Evaluation of the transient energy function methods for power system transient stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 57-59.
- [7] 顾雪平, 曹绍杰, 张文勤. 人工神经网络和短时仿真结合的暂态安全评估事故筛选方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 16-19.
GU Xueping, CAO Shaojie, ZHANG Wenqin. Integration of anns and short-duration numerical simulation for contingency screening of transient security assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 16-19.
- [8] 王成山, 余旭阳. 基于能量函数的暂态稳定概率分析方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 5-9.
WANG Chengshan, YU Xuyang. Transient stability probability analysis method based on fitting curve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 5-9.
- [9] 张健, 刘怀东. 输电线路概率安全性测度研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(12): 34-36.
ZHANG Jian, LIU Huaidong. The study of power system dynamic security measure considering the probabiliy of line fault position and transition resistance[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(12): 34-36.
- [10] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather: modelling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 115-120.
- [11] BILLINTON R, WU Chenjian. Predictive Reliability Assessment of Distribution Systems Including Extreme Adverse Weather[C] // Proc of CCECE, Canadian: IEEE, 2001(5): 719-724.
- [12] 向丽萍, 王晓茹, 王晓红. 电力系统暂态稳定评估的

- 特征选取[J]. 继电器, 2008, 36(6): 26-31.
- XIANG Liping, WANG Xiaoru, WANG Xiaohong. Feature selection for transient stability evaluation in power system[J]. Relay, 2008, 36(6): 26-31.
- [13] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.
- LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.
- [14] FORREST D W, ALBRECHT P F, ALLAN R N, et al. Proposed terms for reporting and analyzing outages of electrical transmission and distribution facilities[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(2): 337-348.
- [15] 唐晓玲, 李丕意, 潘佩芳, 等. 基于概率不安全指标的暂态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 45-49.
- TANG Xiaoling, LI Peiyi, PAN Peifang, et al. Transient risk assessment based on probabilistic insecurity index[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 45-49.
- [16] 李蓉蓉, 张晔, 江全元, 等. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 18-23.
- LI Rongrong, ZHANG Ye, JIANG Quanyuan, et al. Risk assessment for cascading failures of complex power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 18-23.
-
- 收稿日期: 2014-11-04; 修回日期: 2015-01-23
- 作者简介:
- 刘怀东(1963-), 男, 副教授, 从事电力系统安全性与稳定性、电力市场研究;
- 马林(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全性与稳定性。E-mail: marine_6@163.com
- (编辑 姜新丽)