

基于角度均匀旋转法的输电线路概率不安全指标快速计算

刘怀东¹, 孟繁淞¹, 李青², 常安³, 冯伟⁴

(1. 天津大学电气工程及其自动化学院, 天津 300072; 2. 济南市电力公司, 山东 济南 250000;
3. 天津市电力公司, 天津 300072; 4. 辽宁省电力公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 概率不安全指标是基于动态安全域(Dynamic Security Region, DSR)的电力系统安全概率评估模型的核心。通过大量仿真,发现输电线路不同地点故障的 DSR 变化具有一定的规律性,据此提出了一种基于角度均匀旋转法的输电线路概率不安全指标的快速算法。该方法只需得到线路两 endpoints 故障时精确的 DSR,即可通过角度旋转快速推算该线路上任意地点故障时的 DSR,从而快速求得概率不安全指标。通过 WSCC4-11 系统验证,采用该方法计算速度显著提高,最大计算误差约为 1.96%,能够满足工程计算需要。

关键词: 电力系统; 角度均匀旋转法; 动态安全域; 概率不安全指标; 超平面

Rapid calculation of insecurity probabilistic index of power transmission line based on angle even rotation method

LIU Huai-dong¹, MENG Fan-song¹, LI Qing², CHANG An³, FENG Wei⁴

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Jinan Electric Power Company, Jinan 250000, China; 3. Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300072, China; 4. Electric Power Company of Liaoning Province, Shenyang 110000, China)

Abstract: Probability insecurity index is the core of probabilistic model of power system security assessment based on DSR. Through the numerical simulation experiment, to the same transmission line, we discover the change of DSR of different fault position has a certain regularity. According to that, the paper presents a rapid calculation to calculate insecurity probabilistic index based on method of angle even rotation. The method only needs the accurate DSR of the two end points, we can calculate the DSR of other locations on the same transmission line rapidly, and then we can get insecurity probabilistic index. Test on WSCC4-11 system shows the calculation speed increases significantly, the biggest error is about 1.96%, that can meet the needs of the engineering calculation.

Key words: power system; angle even rotation; dynamic security region; insecurity probabilistic index; hyper-plane

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0021-06

0 引言

由于现在电力系统的联网规模越来越大,互联区域间的传输功率也越来越大,负荷快速增长,这些都对输电系统产生巨大的压力,使其运行在安全极限附近,系统的安全稳定性问题严重^[1-2]。传统的电力系统确定型安全性分析方法考虑因素较少,对电力系统安全状况的估量不够精确^[3]。因此,需要新的、合理的、更能适应市场环境的安全性评估算法,在分析过程中将各种随机因素考虑进来。在这种客观要求下,不确定型安全性评估法^[4-7]应运而生。文献[4]提出了一种不确定型安全性评估法,即基于 DSR 的电力系统安全概率评估模型,该模型的

核心是概率不安全指标^[8],它考虑了负荷波动、故障类型、故障发生地点的随机分布和发生故障时系统接地电阻的概率分布对系统安全性的影响,且给出安全状态的定量评估。但求一条线路对系统概率不安全指标的贡献时,需要逐点求解沿线各处发生故时的 DSR,计算量很大,严重制约了该模型的实用性。

通过对输电线路不同故障点处 DSR 的大量仿真计算,发现了同一线路不同地点故障时的 DSR 间的角度变化规律,据此提出基于角度旋转法的输电线路概率不安全指标的快速算法,显著缩短了 DSR 的计算时间。

1 电力系统 DSR 和概率不安全指标

1.1 电力系统 DSR

在电力系统的安全分析中，“域”的概念和方法得到了长足发展和广泛应用^[9-12]。若在某一组给定的系统节点功率注入下，电力系统在经历了某种给定事故之后是暂态稳定的，则定义该组注入是动态安全的，而由这样一些注入组成的集合就定义为该给定事故所对应的 DSR。大量研究表明，DSR 的边界可用超平面来近似描述^[13-14]。

$$AY^T = \sum_{i=1}^n a_i y_i = a_0 \quad (1)$$

式中： $A=[a_1 a_2 \dots a_n]$ 是待求超平面方程的系数向量， $Y=[y_1 y_2 \dots y_n]$ 是临界有功功率注入向量； n 是注入节点的维数； a_0 是观测变量，通常取为 1。

1.2 输电系统概率不安全指标

概率不安全指标的计算公式为^[4,8,15]

$$I_{\text{ins}}(l) = \sum_{k=1}^4 \int_0^{x_0} f_x(k, x) \int_0^{+\infty} f_\tau(\tau) \int_0^{+\infty} f_r(r) \int_{y \in \Omega} f_y(y) dy dr d\tau dx \quad (2)$$

式中： y 为节点注入功率向量； Ω 为 DSR； l 为线路序号； x_0 为线路的长度； k 表示故障类型： $k=1、2、3、4$ 时，分别为单相接地短路，两相相间短路，两相接地短路，三相短路； $f_x(k, x)$ 为给定时间段内 k 类故障在地点 x 处的概率分布密度函数； $f_\tau(\tau)$ 为故障切除时间 τ 的概率分布密度函数； $f_r(r)$ 为故障接地电阻 r 的概率分布密度函数； $f_y(y)$ 为 y 的联合概率分布密度函数。

对于式(2)的概率不安全指标的计算，前三重关于故障地点、切除时间、接地电阻的积分计算，可以通过统计的方法得到其概率分布规律从而计算得到。其计算的重点和难点是对基于 DSR 得出的 $f_y(y)$ 的计算。为了达到一定的精度，对 $f_y(y)$ 的计算采用经典的拟合法^[10]，求解大量的临界注入点，其计算量和耗时是不可容忍的。为了使提出的输电系统概率不安全指标应用于实际，对式(2)的实用算法的研究就具有很重要的意义。

2 不同故障点 DSR 边界超平面间的特性

以图 1 所示系统中的线路 f 为例，以线路长度的 10%为间隔的各地依次发生三相短路事故后，采用拟合法计算各故障点对应的 DSR 超平面系数。以 Gen1 作为平衡机，过渡电阻 $r=10 \Omega$ 时，各故障地点的超平面系数曲线如图 2 所示。

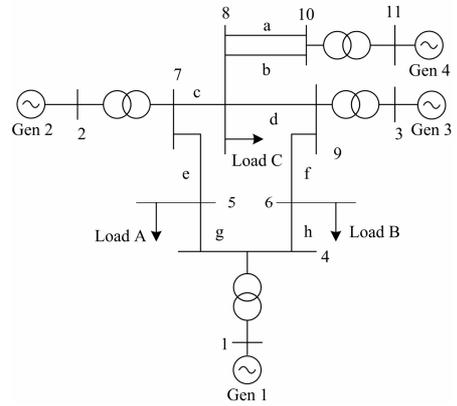


图 1 WSCC 4 机 11 节点系统图

Fig. 1 WSCC 4-generator 11-bus system

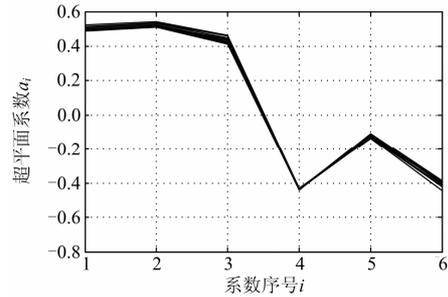


图 2 线路 f 超平面系数曲线

Fig. 2 Hyper-plane coefficients curve of line-f

以故障地点 $x=0\%$ 处的超平面为基准，求得超平面间的夹角，如表 1；图 3 为夹角原始曲线及其线性拟合曲线。式(3)为空间两平面间的夹角公式，其中 $a_i、b_i$ 为对应的两个 DSR 超平面的系数。

$$\cos \theta = \left| \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i^2}} \right| \quad (3)$$

表 1 线路 f 不同故障点 DSR 超平面间夹角

Table 1 Angles between DSR hyper-planes of line-f

$x/\%$	0	10	20	30	40	50
$\theta(^{\circ})$	0	1.196 0	1.448 0	2.386 0	2.823 5	3.416 1
$x/\%$	60	70	80	90	100	
$\theta(^{\circ})$	4.047 8	4.429 9	4.457 5	4.964 0	6.194 2	

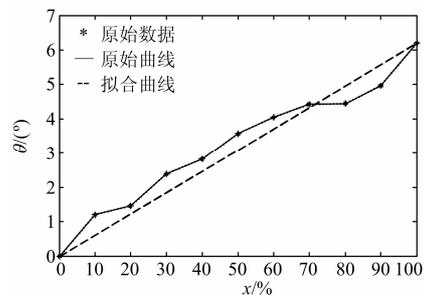


图 3 线路 f 不同故障地点对应的超平面夹角曲线

Fig. 3 Angle curve of different fault locations in line-f

再以图 1 所示系统中的线路 g 为例, 其他条件不变, 求得各故障地点的超平面系数曲线如图 4, 以故障地点 $x = 0\%$ 处的超平面为基准, 根据超平面间的夹角, 如表 2。图 5 为夹角原始曲线及其线性拟合曲线。

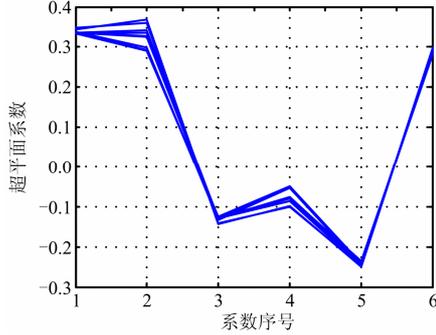


图 4 线路 g 超平面系数曲线

Fig. 4 Hyper-plane coefficients curve of line-g

表 2 线路 g 不同故障点 DSR 超平面间夹角

Table 2 Angles between DSR hyper-planes of line-g

$x/\%$	0	10	20	30	40
$\theta(^{\circ})$	0	0.340 9	7.529 1	8.628 8	9.947 1
$x/\%$	50	60	70	80	90
$\theta(^{\circ})$	10.429 1	10.980 2	11.605 0	12.318 7	12.537 8

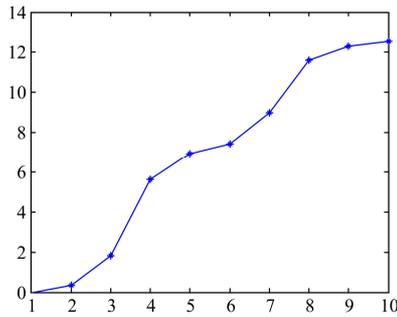


图 5 线路 g 不同故障地点对应的超平面夹角曲线

Fig. 5 Angle curve of different fault locations in line-g

通过对输电线路 f 以及线路 g 发生事故时其 DSR 边界超平面的仿真, 我们发现在过渡电阻和事故类型确定之后, 在输电线路各个不同的地点发生事故时, 这些 DSR 的边界超平面分布具有一定的规律:

规律一 输电线路不同地点之间的 DSR 边界超平面之间近似平行, 但仍然有一很小的空间夹角, 且最大不超过 10° 。

规律二 以线路首端发生事故时所对应的 DSR 边界超平面为参考平面, 沿着线路延伸的方向, 各个超平面与参考超平面之间的夹角按同一趋势近似

线性变化。

3 角度均匀旋转法

利用上述规律, 我们提出了一种快速计算 DSR 的算法——角度均匀旋转法。利用这种算法, 可以快速得到线路上各个不同地点发生事故时的 DSR, 算法的流程如下:

1) 计算线路两端母线发生事故时 DSR 的边界超平面 $A_1 Y^T = 1$, $A_2 Y^T = 1$, 其中 A_1 , A_2 分别采用拟合法计算所得的超平面系数矩阵, Y 为系统注入矩阵, 三者均为 $1 \times (n-1)$ 阶阵, n 为系统节点数。

2) 利用公式(3)计算线路首末端超平面间夹角 θ_0 。

3) 利用公式(4)计算发生故障地点的 DSR 边界超平面与首端超平面间夹角的近似值 θ

$$\theta = x \times \theta_0 \quad (4)$$

其中, x 为故障地点所处输电线路的相对位置。

4) 由于各个超平面的系数变化近似成线性关系, 所以取计算步长为 $step = (A_2 - A_1) / m$, 其中 m 的取值由计算精度确定。则估计超平面系数 $A_{x(k)}$ 的近似表达式为

$$A_{x(k)} = A_1 + k \times step \quad k=1 \cdots m-1 \quad (5)$$

5) 利用公式(3)和公式(5), 循环计算 A_1 和 $A_{x(k)}$ 以及 A_1 和 $A_{x(k+1)}$ 之间的夹角 θ_k 和 θ_{k+1} , 直至满足 $\theta_k \leq \theta$ 且 $\theta_{k+1} \geq \theta$ 。取 $A_{x(k)}$ 为所求的故障地点 DSR 边界超平面的系数。

6) 在超平面 $A_1 Y^T = 1$ 上取一点 M , 注入功率为 Y_M ($y_{m1}, y_{m2}, y_{m3}, y_{m4}, y_{m5}, y_{m6}$), 在超平面 $A_2 Y^T = 1$ 上取一点 N , 注入功率为 Y_N ($y_{n1}, y_{n2}, y_{n3}, y_{n4}, y_{n5}, y_{n6}$), 通过 MN 做连线 l , l 与平面 $A_{x(k)} Y^T = 1$ 交与点 K , 由公式(6)可求得 K 点的注入功率 $Y_{x(k)}$:

$$Y_{x(k)} = \frac{1}{(Y_N - Y_M) A_k^T} [(1 - Y_M A_k^T)(Y_N - Y_M)^T + Y_M^T A_k^T] \quad (6)$$

具体流程见图 6。

4 算例分析

下面将以图 1 WSCC4 机 11 节点系统线路 c 为例, 验证本文方法——角度均匀旋转法。取故障切除时间 $\tau = 120 \text{ ms}$, 故障电阻 $r = 0 \Omega$, 选取母线 7 为线路首端点, 以线路长度的 10% 为间隔的各地依次发生三相短路事故后。采用拟合法和角度均匀旋转法求得的线路 c 不同故障地点的 DSR 超平面系数见表 3, 对应的各故障点的超平面系数曲线如图 7、图 8 所示。

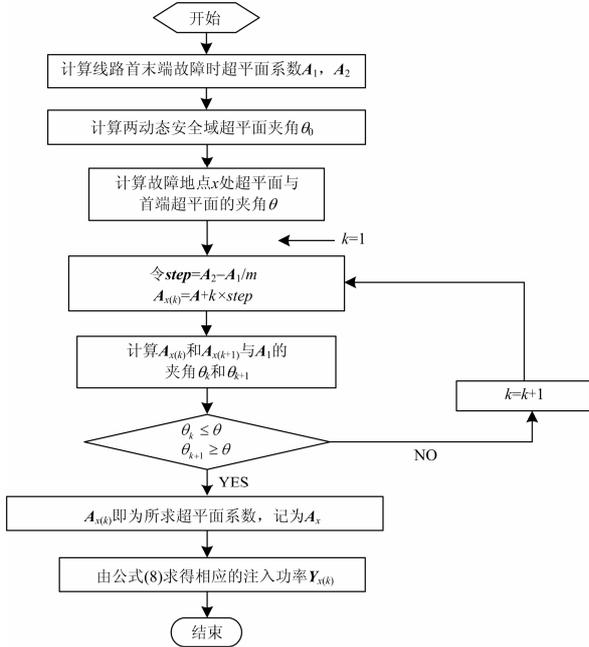


图 6 角度均匀旋转法流程图

Fig. 6 Flow sheet of even angle rotation method

表 3 拟合法及角度均匀旋转法分别求得的超平面系数比较
Table 3 DSR hyper-plane coefficients of two methods

x/%	拟合法	角度法	拟合法	角度法	拟合法	角度法
	a_1	a_1	a_2	a_2	a_3	a_3
0	0.5756	0.5756	-0.0625	-0.0625	0.4017	0.4017
10	0.5811	0.5814	-0.0653	-0.0612	0.4003	0.3977
20	0.5906	0.5873	-0.0631	-0.0598	0.4198	0.3896
30	0.6022	0.5932	-0.0624	-0.0584	0.3843	0.3829
40	0.6080	0.5992	-0.0621	-0.0571	0.3968	0.3772
50	0.6101	0.6053	-0.0593	-0.0557	0.3687	0.3715
60	0.6232	0.6116	-0.0587	-0.0542	0.3729	0.3654
70	0.6238	0.6179	-0.0584	-0.0528	0.3382	0.3603
80	0.6355	0.6243	-0.0573	-0.0513	0.3625	0.3525
90	0.6378	0.6307	-0.0552	-0.0498	0.3501	0.3468
100	0.6373	0.6373	-0.0483	-0.0483	0.3412	0.3412
x/%	a_4	a_4	a_5	a_5	a_6	a_6
0	0.0079	0.0079	-0.1028	-0.1028	-0.4212	-0.4212
10	0.0072	0.0083	-0.0885	-0.0998	-0.4390	-0.4279
20	0.0084	0.0088	-0.0931	-0.0967	-0.4138	-0.4346
30	0.0096	0.0092	-0.0922	-0.0935	-0.4047	-0.4415
40	0.0119	0.0097	-0.0815	-0.0904	-0.4296	-0.4484
50	0.0105	0.0102	-0.0769	-0.0871	-0.4546	-0.4555
60	0.0117	0.0106	-0.0664	-0.0839	-0.4509	-0.4627
70	0.0111	0.0111	-0.0765	-0.0805	-0.4772	-0.4699
80	0.0093	0.0116	-0.0935	-0.0772	-0.4821	-0.4772
90	0.0122	0.0121	-0.0704	-0.0738	-0.4909	-0.4847
100	0.0126	0.0126	-0.0703	-0.0703	-0.4923	-0.4923

因为采用本文方法计算 DSR 时, 只需用拟合法求得精确的线路 c 首末端的 DSR 超平面系数, 中间故障点的 DSR 超平面系数依据同一线路 DSR 超平面间角度关系求得, 其计算时间很短, 可忽略不计。采用拟合法和本文方法求解线路 c 不同故障点 DSR 超平面系数的计算时间如表 4 所示。

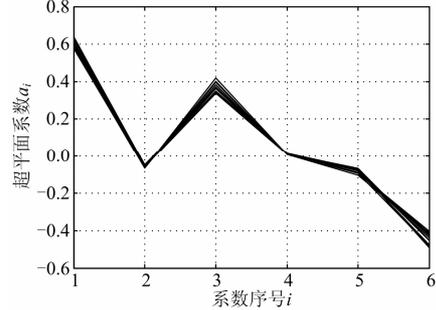


图 7 拟合法所得线路 c 超平面系数曲线

Fig. 7 Hyper-plane curve of Line-c by fitting method

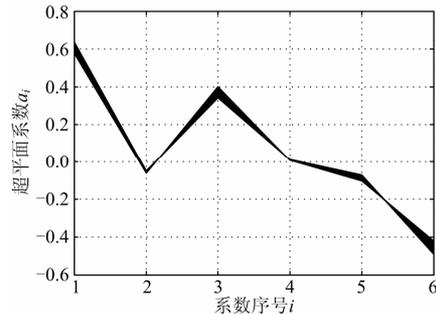


图 8 角度均匀旋转法所得线路 c 超平面系数曲线

Fig. 8 Hyper-plane curve of line-c by angle even rotation method

表 4 两种方法求解 DSR 超平面系数的计算时间
Table 4 Computing time of DSR hyper-plane coefficients by two methods

x/%	min					
	0	10	20	30	40	50
拟合法	18	21	21	23	22	24
本文方法	18	—	—	—	—	—
x/%	60	70	80	90	100	平均时间
拟合法	24	22	23	19	17	21.36
本文方法	—	—	—	—	17	3.18

注：“—”表示对应的时间忽略不计

为了校验角度均匀旋转法的计算精度, 随机选取两组系统基本运行点, 如表 5 所示。

应用上述两组系统基本运行点, 仍以线路 c 为例。以线路长度的 10% 为间隔各地依次发生三相故障, 利用公式(2), 分别采用拟合法和角均匀旋转法计算各地故障时系统的概率不安全指标 $I_{ins}(l)$, 计

算结果、计算时间分别见表 6、表 7。

表 5 4 机 11 节点系统的基本运行点

Table 5 Basic operation point of 4-11 system

NO.	MW					
	Gen2	Gen3	Load A	Load B	Load C	Gen4
1	156	108	132	150	114	120
2	177	182	192	232	206	196

表 6 线路 c 概率不安全指标的计算结果
Table 6 Results and errors of $I_{ins}(I)$ of line-c

x/%	运行点 No.1			运行点 No.2		
	拟合法	角度法	误差/%	拟合法	角度法	误差/%
0	0.4996	0.4996	0	0.6788	0.6788	0
10	0.4883	0.4981	1.96	0.6739	0.6771	0.47
20	0.4879	0.4953	1.47	0.6671	0.6735	0.94
30	0.4852	0.4916	1.28	0.6643	0.674	1.43
40	0.4807	0.4894	1.74	0.6604	0.6698	1.39
50	0.4801	0.4873	1.44	0.6583	0.6663	1.17
60	0.481	0.4853	0.86	0.6524	0.6638	1.68
70	0.4769	0.4844	1.51	0.6607	0.6607	0
80	0.4886	0.4839	0.94	0.6534	0.6592	0.85
90	0.4843	0.4831	0.24	0.6532	0.6569	0.55
100	0.4812	0.4812	0	0.6553	0.6553	0
综合平均误差/%			1.04	综合平均误差/%		0.78

表 7 概率不安全指标计算总时间

Table 7 Computing time of insecurity probability index

运行点	min		
	拟合法	角度均匀旋转法	比例关系/%
NO.1	251	37	14.74
NO.2	249	35	14.06

由此得出两种方法计算所得 $I_{ins}(I)$ 结果基本一致, 最大综合误差仅为 1.96%, 计算时间显著缩短, 仅为拟合法的 14.4%。由于角度均匀旋转法求取某故障点处的 DSR 超平面只需在确定方向上找出一个临界点, 而拟合法则至少需要找出 $2n$ 个临界点。因此, 系统规模越大, 注入维数越多, 角度均匀旋转法的计算速度优势越明显。

5 结论

在确定了故障类型和过渡电阻的分布后, 使用本文方法快速计算输电线路不同故障地点的 DSR, 进而迅速得到系统的概率不安全指标。通过 WSCC 4 机 11 节点系统算例验证, 基于角度均匀旋转的概率不安全指标算法的计算量较小, 与传统算法相比, 计算时间仅为传统算法的 14.4%, 而且精度较高,

最大综合误差仅有 1.96%, 说明该方法用于概率不安全指标的计算是可行的。这种方法可以快速准确的评估电力系统的安全状况, 对系统不确定型安全性分析具有重要意义。其较快的计算速度和较高的计算精确度, 使其在安全性分析中具有很高的使用价值。

参考文献

- [1] 梁丁相, 陈曦. 基于模糊综合评判理论的电力信息系统安全风险评估模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 61-64.
LIANG Ding-xiang, CHEN Xi. Safety assessment model of electric power information system based on fuzzing synthetical theory and its application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 61-64.
- [2] 陈静, 李华强, 郑武, 等. 基于全局模糊指标的电力系统在线安全评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 93-98.
CHEN Jing, LI Hua-qiang, ZHENG Wu, et al. Power system on-line security assessment based on global fuzzy index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 93-98.
- [3] 毛安家, 何金. 一种基于可信性理论的电网安全性综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 80-87.
MAO An-jia, HE Jin. An approach of power grid security comprehensive assessment based on credibility theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 80-87.
- [4] 刘怀东, 石世峰. 基于动态安全域的电力系统安全概率评估模型[J]. 中国电力, 2012, 45(5): 1-5.
LIU Huai-dong, SHI Shi-feng. Probabilistic model of power system security assessment based on security region[J]. Electric Power, 2012, 45(5): 1-5.
- [5] 唐晓玲, 李丕意, 潘佩芳. 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 Xiao-ling, LI Pi-yi, PAN Fei-fang. Transient risk assessment based on probabilistic insecurity index[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 45-49.
- [6] 鲁宗相, 郭永基. 发输电系统概率安全性评估基本框

- 架的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 19-22.
- LU Zong-xiang, GUO Yong-ji. Study on basic framework of probabilistic security evaluation of composite generation and transmission systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 19-22.
- [7] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20-25.
- DING Ming, LI Sheng-hu, WU Hong-bin. Integrated evaluation of power system adequacy and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 20-25.
- [8] 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(6): 34-36.
- ZHANG Jian, LIU Huai-dong. The study of power system dynamic security measure considering the probability of line fault position and transition resistance[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2003, 15(6): 34-36.
- [9] 刘怀东, 张江红, 刘沛龙, 等. 基于改进解析法的小范围动态安全域搜索方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 29-33.
- LIU Huai-dong, ZHANG Jiang-hong, LIU Pei-long, et al. Small-range search based on improved analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 29-33.
- [10] 余贻鑫, 栾文鹏. 利用拟合技术决定实用电力系统动态安全域[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(增刊 1): 22-28.
- YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. A fitting technology for determining practical dynamic security regions of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(S1): 22-28.
- [11] 余贻鑫. 安全域的方法学及实用性结果[J]. 天津大学学报, 2003, 36(5): 525-528.
- YU Yi-xin. Methodology of security region and practical results[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 525-528.
- [12] 薛安成, 梅生伟, 卢强, 等. 基于网络约化模型的电力系统动态安全域近似[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 18-23, 44.
- XUE An-cheng, MEI Sheng-wei, LU Qiang, et al. Approximations for the dynamic security region of network-reduction power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 18-23, 44.
- [13] 曾沅, 余贻鑫, 贾宏杰, 等. 基于有功功率小扰动分析的动态安全域求解[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 5-9, 31.
- ZENG Yuan, YU Yi-xin, JIA Hong-jie, et al. Computation of dynamic security region based on active power perturbation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 5-9, 31.
- [14] 曾沅. 电力系统实用动态安全域的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- ZENG Yuan. The study of PDSR of power system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [15] 王东涛, 余贻鑫, 付川. 基于实用动态安全域的输电系统概率动态安全评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(7): 29-33.
- WANG Dong-tao, YU Yi-xin, FU Chuan. Practical dynamic security region based probabilistic dynamic security assessment of power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(7): 29-33.

收稿日期: 2013-11-13; 修回日期: 2013-12-29

作者简介:

刘怀东(1963-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力市场和电力系统安全性和稳定性;

孟繁淞(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全性和稳定性及局部放电监测。E-mail: mfs19900917@126.com