

DOI: 10.7667/PSPC151257

基于期望损失指标的电力系统故障筛选和排序

刘怀东¹, 陈 彧¹, 崔晓君², 王 迪¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;
2. 国网江苏省电力公司检修公司徐州分部, 江苏 徐州 221000)

摘要: 为了避免在故障筛选与排序中只考虑故障的严重程度, 提出了一种新的故障筛选和排序的方法。它是以动态安全域的求解为基础, 以故障的期望损失作为筛选和排序的指标, 同时考虑故障发生时电力系统的经济性与随机性两个方面, 更符合实际情况。首先, 根据经验故障集, 用小范围解析法计算电力系统发生故障时的动态安全域, 从而求解发生故障时的改进的概率不安全指标和期望损失, 根据故障在故障集中的比例筛选出期望损失比较大的故障线路, 将其放入筛选集中。然后, 根据误差比例控制曲线, 控制计算动态安全域的精度, 重新计算筛选集中电力系统发生故障时的动态安全域、期望损失和它们所占的比例, 依据此比例进行排序。通过 IEEE10 机 39 节点系统算例验证了该方法能够快速、全面、准确地实现故障的筛选与排序。

关键词: 电力系统; 动态安全域; 故障筛选; 故障排序; 小范围解析法; 期望损失; 概率不安全指标

Contingency screening and ranking based on dynamic security region of the power system

LIU Huaidong¹, CHEN Yu¹, CUI Xiaojun², WANG Di¹

(1. State Key Laboratory of Smart Grid (Tianjin University), Tianjin 300072, China;
2. State Grid Xuzhou Power Supply Maintenance Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: In order to avoid only considering the severity of the fault in the screening and ranking, a new contingency screening and ranking method is proposed. It is based on the calculation of the dynamic security region and expected shortfall is the indicator of contingency screening and ranking. It takes account into the economy and randomness of the power system when fault occurs, so it accords to the actual situation. First, according to experience fault sets, we can calculate dynamic security region of power system by analytic method of small range when the fault occurs, then calculate the improved probabilistic insecurity index and expected shortfall. According to the proportion in the fault sets, we can screen fault line that the expected shortfall is relatively large, then put these fault lines into screening sets. Then, according to the curve that ratio is controlled by error, we can control the accuracy of the calculation of dynamic security region and recalculate dynamic security region of power system, expected shortfall and the proportion when the fault occurs. We can have fault ranking according to the proportion. Case studies on New England 10-machine 39-bus system show that the proposed method can realize the contingency screening and ranking quickly, fully and accurately.

Key words: power system; dynamic security region; contingency screening; contingency ranking; analytic method of small range; expected shortfall; probabilistic insecurity index

0 引言

随着我国电需求量的不断增加, 电网的结构和规模不断提高, 电力系统的安全性和经济性受到挑战, 对电力系统的故障监测和控制提出了更高的要求。以北美的“8.14”^[1-3]大停电为代表的停电事故表明, 电力系统的安全性问题仍旧是电力系统需要高度重视的问题。因此, 对其进行合理的暂态稳定

评估, 将有助于提升电力系统的安全性。作为暂态稳定评估的一个重要方面, 故障筛选与排序对系统安全发挥着不可替代的作用。

故障筛选和排序的指标^[4-7]很多, 诸如状态指标、裕度指标等, 但在故障筛选与排序的应用中, 这些指标均存在一定的局限性, 即这些指标仅可反应故障的严重程度^[8], 而忽略了故障发生的概率和所引起的经济损失, 而用期望损失作为故障筛选和

排序的指标正好弥补了这两种指标的不足。

本文基于动态安全域(DSR)量化分析, 以故障期望损失为核心, 计算概率不安全指标和故障损失成本, 并由此提出了一种新的故障筛选和排序的方法。为符合工程实际, 该方法同时考虑故障发生概率和故障发生后果的严重性, 并采用小范围解析法计算动态安全域, 通过误差比例控制曲线, 即控制小范围解析法中计算得出的两个超平面的误差, 使计算的速度和精度得到了优化, 充分利用了动态安全域离线计算、在线应用的特点; 在计算概率不安全指标方面采用改进的概率不安全指标, 充分考虑了天气等因素的影响, 使计算结果更准确。

1 电力系统动态安全域

1.1 动态安全域(DSR)

所谓动态安全^[9], 即指对于给定持续时间的事件, 将事故清除时刻的节点注入功率作为自变量在一定范围内波动时, 系统仍保持暂态稳定; 否则, 系统失稳。动态安全域的表达式为

$$\Omega_d(i, j, \tau) = \{y | x_c(y) \in A(y), y_{\min} < y < y_{\max}\} \quad (1)$$

式中: Ω_d 表示动态安全域, i 对应事故前的网络拓扑, j 对应事故后的网络拓扑, τ 为给定事故的持续时间; $x_c(y)$ 为事故清除时刻系统的状态; y_{\max} 、 y_{\min} 分别为节点注入空间中节点注入功率的限值。

电力系统的动态安全域的求解方法^[10-11]有拟合法、解析法、改进解析法、小范围改进解析法等, 其方法特点如表 1 所示。综合考虑求解临界点精度和速度的要求, 本文采用了小范围解析法求解动态安全域。此方法较改进解析法求解速度更快, 精度也有所提高。

表 1 DSR 求解方法比较表

Table 1 Table of comparison on DSR solution	
方法名称	方法特点
拟合法	求解精度高, 但计算速度比较慢
解析法	计算速度快, 但求解精度低, 受临界点的选取的影响
改进解析法	是拟合法和解析法的折中方法
小范围解析法	在改进解析法的基础上对超平面的求解精度的进一步优化

小范围解析法的临界点搜索过程如图 1 所示。求解过程如下所述: ①采用实用解析法确定初始超平面; ②确定运行点到超平面的垂足, 并在其连线方向上搜索临界点; ③采用实用解析法得到新的超平面; ④求得运行点到两个超平面的视在距离的差值, 并以其差值是否小于某一误差限来确定是否终

止搜索; ⑤最后求得的超平面即为采用小范围解析法得到的超平面。

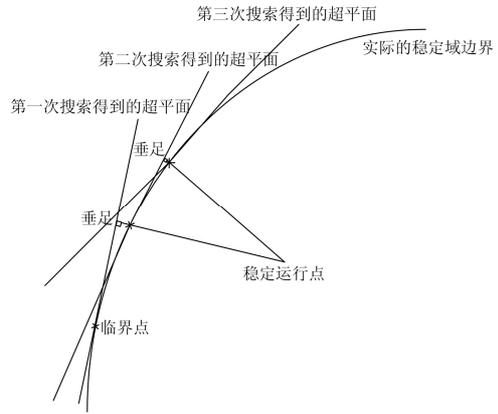


图 1 小范围解析法的临界点搜索示意图

Fig. 1 Schematic searching of critical point of analytic method of small range

1.2 电力系统概率不安全指标

1.2.1 电力系统概率不安全指标

文献[12]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。该模型仅考虑了有关故障的因素, 并未考虑天气条件、故障类型、线路参数等因素的影响, 在工程运用中具有一定的局限性。现以输电线路为例, 定义改进的线路概率不安全指标 $P_{insec}(l_i)$ 为

$$P_{insec}(l_i) = Pr_w(l_i) \alpha_k \cdot \sum_{w=0}^1 \beta_w \int_0^{x_0(l_i)} f_x(x) \int_0^{+\infty} f_r(r) \int_0^{+\infty} f_\tau(\tau) \int_{y \in \Omega} f_y(y) dy d\tau dr dx \quad (2)$$

式中: i 为线路编号; w 为天气条件, 若 $w=0$ 则表示正常天气, $w=1$ 为恶劣天气; $Pr_w(l_i)$ 为线路 l_i 在天气类型为 w 时的故障率函数; k 表示故障类型, 其中重点考虑四种故障类型, $k=1$ 表示单相接地短路故障, $k=2$ 表示两相相间短路故障, $k=3$ 表示两相接地短路故障, $k=4$ 表示三相短路故障; α_k 为故障类型为 k 的故障所占的比例; β_w 为天气类型为 w 时所占的比例; x 为故障发生地点与输电线路 l_i 始端的距离, $x_0(l_i)$ 为输电线路 l_i 的长度; $f_x(x)$ 为 x 的离散概率密度函数; r 为故障电阻; $f_r(r)$ 为 r 的概率密度函数; τ 为故障切除时间; $f_\tau(\tau)$ 为 τ 的概率分布函数; $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为节点注入功率向量, n 为节点个数; Ω 为给定事故的动态安全域; $f_y(y)$ 为 y 的联合概率密度函数。综上, $P_{insec}(l_i)$ 为计及天气条件、故障类型、线路参数的线路概率不

安全评估指标。

1.2.2 影响电力系统暂态稳定性的随机因素概率模型

(1) 故障发生的概率模型

故障发生的概率^[13]可以用泊松分布来表示。文献[14]提出了在正常天气和恶劣天气条件下线路均不发生故障的概率,则线路发生故障的概率为

$$Pr_w(i) = 1 - e^{-\lambda_w(w)t} \quad (3)$$

$$\lambda_w(w) = \begin{cases} \lambda_0 \frac{N+S}{N} (1-\beta_1) & w=0 \\ \lambda_0 \frac{N+S}{N} \beta_1 & w=1 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: λ_0 指线路 l_i 的平均故障率; N 指正常天气的持续时间; S 指恶劣天气的持续时间; β_1 指在恶劣天气的情况下发生故障的比例。

(2) 故障类型的概率模型

对电力系统暂态稳定性影响较大的故障类型为单相接地故障、两相接地故障、两相故障及三相故障,可以依据历史统计数据得到此四种类型故障发生的概率。

(3) 故障地点的概率模型

文献[15]提出了一种以离散分布和历史统计数据为基础的故障地点的概率模型,如果将线路分成 M 段,则在第 u 段发生故障的概率为

$$P_u = \frac{f_u}{\sum_{u=1}^M f_u} \quad (5)$$

式中, f_u 是在第 u 段中发生故障的次数。

(4) 故障电阻的概率模型

假设故障电阻 r 服从参数为 μ 和 σ 的对数正态分布,则其概率密度函数为

$$f_r(r) = \begin{cases} \frac{1}{r\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}} & r > 0 \\ 0 & r < 1 \end{cases} \quad (6)$$

(5) 故障切除时间的概率模型

假设继电保护动作时间和断路器跳闸时间之和服从 μ_τ 和 σ_τ 的正态分布,且不计故障的检测时间。则在故障切除时间 τ 的概率密度函数可表示为

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma_\tau \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - \mu_\tau)^2}{2\sigma_\tau^2}\right) \quad (7)$$

2 故障的期望损失

2.1 故障的损失成本

电力系统发生故障时的损失成本,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(8)所示。

$$C_m = \left[(C_{\text{new}} - C_{\text{old}}) \cdot P_{\text{lost}} + C_{\text{pen}} \cdot P_{\text{shed}} \right] \cdot h + C_{\text{ms}} + C_{\text{mc}} \quad (8)$$

式中: C_{ms} 指维修和启动成本; C_{mc} 是由初始故障可能导致的连锁故障而形成的大范围的系统失稳所引发的损失; 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; C_{pen} 为单位功率的负荷损失; P_{lost} 为停运机组应供应的电力; P_{shed} 为断电负荷量; τ 为故障的持续时间。

2.2 故障的期望损失

为了更加全面地描述发生故障时所产生的损失,将市场经济中的期望损失引入本文中。期望损失^[16-17](Expected Shortfall)由风险期望损失与机会期望损失组成。风险期望损失指由系统发生故障所引起的损失与发生该故障的概率的乘积;机会期望损失指由于系统发生故障后原本由其承担的交易可能需要由其他系统替代完成所造成的损失与出现这种情况的概率的乘积。因此故障的期望损失为

$$ES_i = \sum_j^m (C_{\text{msj}} + C_{\text{moj}} + C_{\text{mdj}}) \times P_{\text{insecj}} + \sum_{j=1}^m (P_{\text{opj}} + P_{\text{mcj}}) \quad (9)$$

式中, P_{opj} 为系统发生故障后其承担的功率由其他系统替代的概率,为了计算简便,令其与发生该故障的概率相同。所以故障的期望损失(即为损失成本与系统发生故障的概率的乘积)为

$$ES_i = \sum_{j=1}^m (P_{\text{insecj}} + P_{\text{mj}}) \quad (10)$$

式中: m 为故障类型; P_{insecj} 为系统发生 j 故障时的概率不安全指标; C_{mj} 表示系统发生 j 故障时的损失成本。

3 故障筛选和排序

以期望损失为指标的故障筛选和排序的基本步骤可表述如下:

(1) 根据经验形成初始故障集 $L(l_1, l_2, \dots, l_{n_f})$;

(2) 采用超平面间的视在距离的经验误差值作为搜索临界点终止的条件计算 l_1, l_2, \dots, l_{n_f} 在各种故障情况下的动态安全域及概率不安全指标,并计算它们对应的期望损失 $ES_1, ES_2, \dots, ES_{n_f}$ 。

(3) 计算各故障的期望损失在故障集的期望损

失总和中所占的比例 K_k 为

$$K_k = \frac{ES_k}{\sum_{i=1}^n ES_i} \quad (11)$$

取一定值 ξ , 如果 $K_k \geq \xi$, 则放入筛选集中;

如果 $K_k < \xi$, 则筛选出去。

(4) 根据误差控制曲线(横轴为所占比例 K , 纵轴为计算 DSR 的误差), 由比例 K 求出误差, 从而以此误差重新计算电力系统动态安全域和故障期望损失, 本文的误差控制曲线选用反比例函数。

(5) 假设通过筛选得到的筛选集为 $S(l_1, l_2, \dots, l_{n_m})$, 则计算各故障的期望损失, 根据期望损失值的大小进行排序, 即完成了故障的排序。

4 算例

以IEEE 10机39节点系统为例验证上述方法的有效性, 系统接线图如图2所示。

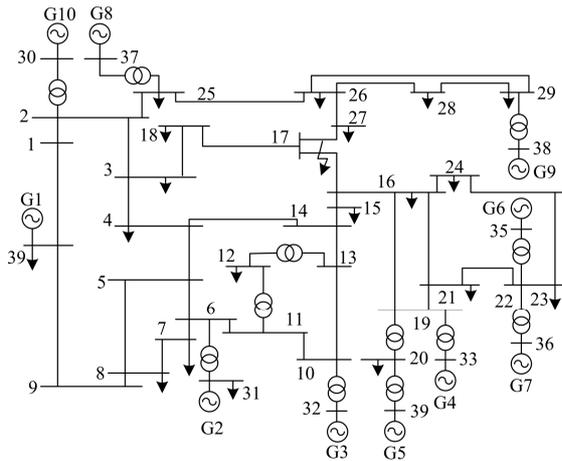


图2 新英格兰10机39节点系统图

Fig. 2 System diagram of new England 10 machines 39 nodes

本文以线路发生三相短路故障为例, ξ 取 0.001, 运行点的注入功率向量为: $y_s = (200, 400, 500, 250, 500, 400, 350, 700, 700, 900, 200, 300, 130, 350, 10, 200, 250, 50, 300, 150, 160, 100, 120, 100, 150, 100, 100, 10)$ 。

以线路8-9发生三相短路为例, 利用解析法、小范围解析法和拟合法求解动态安全域的系数, 它们的图像如图3所示。由图可以看出此三种方法的变化趋势相差不大, 它们的精度由高到低依次为拟合法、小范围解析法、解析法, 从而证明了小范围解析法的可行性。

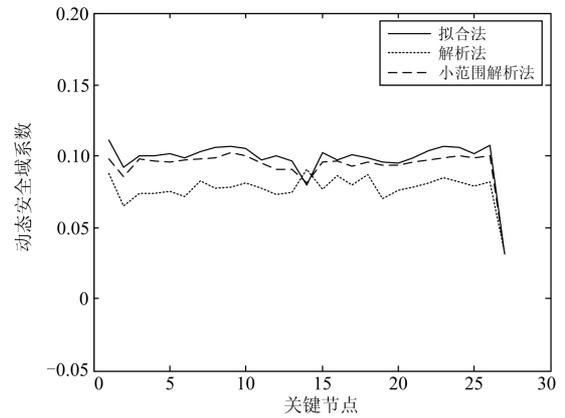


图3 三种方法比较图

Fig. 3 Chart comparison of three methods

按照步骤 2~3 得到故障筛选时的各数据, 如表 2 所示; 按照步骤 4~5 得到故障排序时的各数据。由表 2 故障筛选的数据对应表(“+”表示故障在故障筛选表中,“-”表示故障不在筛选表中), 可以看出线路 26-28、16-19、26-27、9-39、15-16、6-11、4-5、5-8、1-2、4-14、17-27、7-8、5-6、2-3、10-13、13-14、6-7 为被筛选出去的线路, 可以采用经验误差的小范围解析法计算动态安全域, 因而计算速度相对快, 而其余线路是筛选集中的线路, 必须采用高精度再次计算动态安全域, 以达到精确排序的目的, 从而实现对故障的安全控制。由于筛选出去的故障为非严重故障, 可以不采取安全控制措施, 而对于筛选集中的故障必须采取安全控制措施。由表中可以发现线路 26-29 的概率不安全指标值较小, 但它的损失成本比较大, 从而导致期望损失比较大, 因而归入筛选集中, 如果采用一般的故障筛选方法, 此故障线路很可能被归入非严重故障线路, 从而为系统的稳定性分析和控制提供了不精确信息, 从而引发了严重后果。因此本文所提出的方法能够较全面地反应线路的故障情况。表 3 所示为进行故障排序后的数据对应表。

表 2 故障筛选中的数据对应表

Table 2 Table of data of contingency screening

经验故障 线路	概率不安 全指标 ($\times 10^{-4}$)	期望损失/ 万元	在故障集 中所占的 比例/%	是否在 筛选表中
6-7	0.001 67	0.099 70	0.000 64	-
10-11	0.999 99	6.529 70	0.041 77	+
25-26	0.000 02	0.011 50	0.000 06	-
16-24	0.401 74	3.213 03	0.020 55	+
26-29	0.008 30	9.237 90	0.059 10	+
4-5	0.000 01	0.009 70	0.000 06	-
21-22	0.362 31	3.100 38	0.019 83	+

续表 2

经验故障 线路	概率不安 全指标 ($\times 10^{-4}$)	期望损失/ 万元	在故障集 中所占的 比例/%	是否在 筛选表中
3-4	0.000 01	0.050 50	0.000 32	-
7-8	0.000 01	0.009 60	0.000 06	-
14-15	0.661 47	3.481 90	0.022 27	+
3-18	0.000 01	0.020 60	0.000 13	-
16-21	0.740 02	4.097 66	0.026 21	+
1-2	0.000 01	0.008 80	0.000 06	-
26-28	0.007 39	0.307 70	0.001 97	+
16-19	0.000 01	0.017 90	0.000 11	-
22-23	0.088 65	4.256 40	0.027 23	+
2-25	0.000 01	0.010 70	0.000 06	-
1-39	0.926 98	5.158 70	0.033 00	+
26-27	0.000 01	0.020 80	0.000 13	-
9-39	0.147 11	1.088 49	0.006 96	+
10-13	0.000 49	0.014 20	0.000 09	-
6-11	0.000 01	0.010 30	0.000 6	-
17-18	0.000 10	0.011 70	0.000 07	-
28-29	0.711 64	81.659 1	0.522 40	+
5-8	0.000 09	0.005 90	0.000 04	-
23-24	0.911 57	8.221 15	0.052 60	+
4-14	0.000 22	0.018 20	0.000 12	-
17-27	0.000 01	0.008 70	0.000 06	-
16-17	0.684 22	4.164 62	0.026 64	+
5-6	0.000 02	0.011 30	0.000 06	-
2-3	0.884 72	7.309 38	0.046 76	+
15-16	0.913 61	6.319 42	0.040 43	+
13-14	0.000 01	0.001 05	0.000 07	-
8-9	1.000 00	7.820 30	0.050 03	+

表 3 故障排序中的数据对应表

Table 3 Table of data of contingency ranking

筛选表中的故障线路	概率不安全指标($\times 10^{-4}$)	期望损失/万元
28-19	0.706 28	90.968 77
23-24	0.916 60	8.266 24
8-9	1.000 00	7.820 30
9-39	0.999 63	7.396 44
2-3	0.818 42	6.761 63
15-16	0.922 07	6.377 94
10-11	0.859 00	5.609 06
1-39	0.934 85	5.202 49
14-15	0.874 17	4.601 53
16-17	0.739 22	4.499 39
16-21	0.735 51	4.072 69
16-24	0.380 36	3.042 04
21-22	0.334 89	2.976 25
26-29	0.008 88	0.988 34
22-23	0.088 80	0.426 36
26-28	0.007 85	0.032 68

5 结论

本文以动态安全域计算为基础, 将概率不安全指标与故障损失成本相结合, 提出了一种以故障的期望损失为指标的故障筛选和排序的方法。该方法充分考虑了发生故障的随机性以及后果严重性, 使故障筛选和排序更加合理和准确, 同时利用误差比例控制曲线合理地控制动态安全域的求解精度, 从而有侧重地控制系统动态安全域的求解, 使计算的快速性和准确性有所提高。通过 IEEE10 机 39 节点系统进行验证, 说明了该方法具有可行性, 能够比较全面地反映出故障的状况, 为电力系统故障的安全控制提供了有力的手段。

参考文献

- [1] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [2] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154.
SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 146-154.
- [3] 崔杨柳, 马宏忠, 王涛云, 等. 基于故障树理论的 GIS 故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 125-129, 135.
CUI Yangliu, MA Hongzhong, WANG Taoyun, et al. Fault analysis of GIS based on fault tree theory[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 125-129, 135.
- [4] 刘怀东, 马林, 王曦冉, 等. 基于概率不安全指标的实时故障筛选策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 16-21.
LIU Huaidong, MA Lin, WANG Xiran, et al. Strategies of real time contingency screening based on probabilistic insecurity index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 16-21.
- [5] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标评述[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
ZHOU Shuangxi, JIANG Yong, ZHU Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.
- [6] VAAHEDI E, FUCHS C, XU W, et al. Voltage stability contingency screening and ranking[J]. IEEE Transactions

- on Power Systems, 1999, 14(1): 256-265.
- [7] 党存禄, 张佳宾. 基于 WAMS 的电网故障检测新方法[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 1-7.
DANG Cunlu, ZHANG Jiabin. A novel method of grid fault diagnosis based on WAMS[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 1-7.
- [8] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明, 等. 一种用于电力系统静态稳定性分析的故障筛选与排序方法[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 62-67.
ZHAO Jinquan, JIANG Xiaodong, ZHANG Boming, et al. A contingency screening and ranking method for power system static stability analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 62-67.
- [9] 曾沅, 余贻鑫. 电力系统动态安全域的实用解法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 24-28.
ZENG Yuan, YU Yixin. A practical direct method for determining dynamic security regions of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 24-28.
- [10] 李海涛. 用于求解电力系统概率不安全指标的 DSR 小范围搜索方法[D]. 天津: 天津大学, 2008.
LI Haitao. Small range searching method of dynamic security region for calculating probabilistic insecurity index[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [11] 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 Huaidong, ZHANG Jianghong, LIU Peilong, et al. Small-range search of DSR based on improved analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 29-33.
- [12] 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 Huaidong. The study of power system dynamic security measure considering the probability of line fault position and transition resistance[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2003, 15(6): 34-36.
- [13] LI Wenyuan. Risk assessment of power system: models, method, and applications[M]. New York (NY, USA): John Wiley & Sons, 2005.
- [14] 吴旭, 张建华, 吴林伟, 等. 输电系统连锁故障的运行风险评估算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 74-82.
WU Xu, ZHANG Jianhua, WU Linwei, et al. Method of operational risk assessment on transmission system cascading failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 74-82.
- [15] 崔凯, 房大中, 钟德成. 电力系统暂态稳定性概率评估方法研究[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 45-49.
CUI Kai, FANG Dazhong, ZHONG Decheng. Study on probabilistic assessment method for power system transient stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 45-49.
- [16] 余鹏, 阎春宁, 陈志宏, 等. 评估风险的期望损失计算及应用研究[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(1): 100-104.
YU Peng, YAN Chuning, CHEN Zhihong, et al. Calculation and application of expected shortfall in estimation risk[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2004, 10(1): 100-104.
- [17] 王秀国, 王义东. 均值方差偏好和期望损失风险约束下的动态投资组合[J]. 数理统计与管理, 2012, 31(3): 455-463.
WANG Xiuguo, WANG Yidong. Dynamic portfolio selection with mean variance preferences and expected loss risk constraint[J]. Application of Statistics and Management, 2012, 31(3): 455-463.

收稿日期: 2015-07-21; 修回日期: 2016-05-08

作者简介:

刘怀东(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定性及电力市场等;

陈 彧(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性与安全性; E-mail: eiffel_5149@163.com

崔晓君(1990-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统稳定性与安全性。

(编辑 魏小丽)