

DOI: 10.7667/PSPC162052

基于小范围动态安全域的故障筛选与排序

姜英涵¹, 刘怀东¹, 姜润峰², 崔晓君³, 冯志强¹

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 国家电网公司东北分部太平湾发电厂, 辽宁 丹东 118000; 3. 国家电网江苏省电力公司检修公司, 江苏 徐州 221000)

摘要: 事故筛选排序是电力系统概率安全分析中尤为重要的组成部分。为了使电力系统的安全评估能够实时监测和在线应用, 提出了一种兼顾准确性和实时性的新故障筛选排序模型。为同时满足精度与速度的要求, 采用改进的小范围解析法求得相对于概率不安全指标精度敏感的小范围动态安全域。采用稳定判据将故障分类, 各类故障采用不同策略并行排序。致命性故障按照概率不安全指标排序后, 立即输出。一般性故障, 定义了基于小范围安全域的最易失稳距离, 优化了故障损失威胁模型, 按照失稳距离初步筛选, 再按损失威胁进行排序。该故障筛选与排序模型针对每个故障只需计算一次动态安全域, 对致命性故障排序一次, 对一般性故障筛选和排序各一次。IEEE10机39节点系统仿真结果表明, 该模型可以迅速可靠地完成故障筛选与排序, 对系统运行方案具有较强指导性。
关键词: 小范围动态安全域; 改进小范围解析法; 失稳距离; 故障筛选; 概率不安全指标; 损失威胁; 故障排序

Contingency screening and ranking based on small-range dynamic security region

JIANG Yinghan¹, LIU Huaidong¹, JIANG Runfeng², CUI Xiaojun³, FENG Zhiqiang¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Taipingwan Power Plant of Northeast Branch, State Grid Corporation of China, Dandong 118000, China;
3. Maintenance Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Contingency screening and ranking is an important component of probabilistic security assessment of power system. In order to make the security assessment be monitored real-time and applied online, a new model of contingency screening and ranking considering both accuracy and real time is proposed. To meet the requirements of both accuracy and speed, the model uses improved small-range analytic method to calculate small-range dynamic security region which is sensitive relative to the accuracy of probabilistic insecurity index. The stability criterion is used to classify the faults, and various faults are ranked using different strategies. Fatal faults are ranked according to probabilistic insecurity index, and then output immediately. For general faults, it defines the most easily instability distance based on small-range dynamic security region, optimizes fault loss threat model, preliminarily screens the faults according to instability distance, and then ranks them based on loss threat. The new proposed model calculates each fault's dynamic security region once, ranks fatal faults once, and screens and ranks general faults once. Simulation on IEEE 10-generator 39-bus system shows that the new model can make contingency screen and rank quickly and reliably, and the results have strong guidance for operation schemes of power system.

This work is supported by Science and Technology Project of Northeast Branch of State Grid Corporation of China (No. DBDW2016-002).

Key words: small-range dynamic security region; improved analytic method of small range; instability distance; contingency screening; probabilistic insecurity index; loss threat; contingency ranking

0 引言

随着电力工业的蓬勃发展, 电力系统大规模联网运行, 各互联区域间功率传输频繁, 且部分线路

输送容量已接近极限, 加之近年来电力大系统由于安全稳定破坏而导致大停电事故的不断出现, 使得电力系统迫切需要更强有力的方法来实现其在线实时安全监视、防御与控制^[1]。为满足当下需求, 基于动态安全域的概率安全性评估方法^[2-4]得以提出, 该方法综合考虑了电力系统各方面不确定性因素, 满足现代电力系统经济性与安全性并重的要求。

基金项目: 国家电网公司东北分部重点科技项目 (DBDW2016-002)

作为评估模型中非常重要的模块之一,故障筛选与排序对电力系统的安全稳定发展具有重要意义。

基于动态安全域的故障筛选与排序^[4-7]大多属于多阶段多指标的方法,这种方法将故障筛选和排序划为几个阶段,各阶段按照不同精度和方法求解动态安全域,并用多个指标描述故障,而其中最基本的概率不安全指标只对距离运行点较近的小范围动态安全域敏感,用大范围方法求得的动态安全域系数来计算该指标则会带来明显误差。文献[7]提出的期望损失能够作为评价故障经济性的指标,但没有考虑不同故障下损失模型的不同。以上方法各有优势,但不免存在计算量大或不够准确等问题,不便于实时在线应用。

综合分析,本文提出:以系统最易失稳的小范围动态安全域为计算基础,并改进其求解方法,整个故障筛选与排序过程只基于一套动态安全域系数,避免了多次计算的繁琐和不同计算标准下的指标不匹配,同时保证概率不安全指标的准确性;采用稳定判据区分致命性故障与一般性故障,两类故障同时进行排序;前者按照失稳概率快速排序后,立即输出给运行人员,后者按失稳距离筛选,再按故障对系统的威胁水平排序,依据需要输出。该方法实用、高效,对实际生产运行指导性强。

1 电力系统动态安全域

动态安全域(又叫 DSR),是事故前系统功率注入空间上的集合,当且仅当事故前系统 i 的注入向量 \mathbf{y} 位于该集合内时,系统经受持续时间为 τ 的给定事故,事故后系统 j 不致失去暂态稳定。动态安全域 $\Omega_d(i, j, \tau)$ 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: $x_c(y)$ 为事故清除瞬间系统状态; $A(y)$ 为事故后系统稳定域; y_{\max} 、 y_{\min} 分别表示注入功率的上、下限。

1.1 电力系统概率不安全指标

文献[8]提出了一种电力系统概率不安全指标模型。该模型计及了负荷、发电机节点的不确定性,计及了预想事故类型、发生地点、切除时间的随机分布和发生故障时系统接地电阻的概率分布,结合动态安全域,对系统的不安全水平给出概率性的量化评价。以输电线路为例,线路 l 的概率不安全指标为

$$I_{\text{sec}}(l) = \sum_{k=1}^4 \alpha(k) \int_0^{x_0(l)} f_x(x) \int_0^{+\infty} f_r(r) M_{\Omega(l,k,x,r,\tau)}(y) dr dx \quad (2)$$

式中: k 表示故障类型, $k=1$ 为单相对地短路故障, $k=2$ 为两相间短路故障, $k=3$ 为两相对地短路故障, $k=4$ 为三相短路故障; α_k 是类型为 k 的故障所占比例; x 为故障地点距线路始端距离; $x_0(l)$ 为线路 l 的长度; $f_x(x)$ 为 x 的概率分布密度函数; r 为故障电阻; $f_r(r)$ 为 r 的概率分布密度函数; $\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为节点注入功率向量, n 为注入节点数; τ 为故障切除时间; $\Omega(l, k, x, r, \tau)$ 为既定事故的动态安全域(以下简称 Ω); $M_{\Omega}(\mathbf{y})$ 为既定事故的安全性测度。

概率不安全测度 $M_{\Omega}(\mathbf{y})$ 表示发生给定故障后,注入功率落入 Ω 外的概率。假设节点注入符合正态分布且各节点注入两两相互独立^[9],则 $M_{\Omega}(\mathbf{y})$ 可以近似用正态分布来表示。

$$M_{\Omega}(\mathbf{y}) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3)$$

$$z = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i - 1 \right) / \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \sigma_i^2} \quad (4)$$

式中: α_i 为动态安全域系数; μ_i 为功率注入的期望值,负荷节点的注入期望由短期负荷预测得到,发电机节点的注入期望由经济调度确定; σ_i^2 为功率注入的均方差,由数据统计得到。

1.2 小范围动态安全域的有效性

电力系统实用动态安全域边界由有限个对应于不同失稳模态的子表面组成^[2,10-11],而多失稳模态往往只出现于系统运行点严重偏离正常值的极少数情况下。本文只考虑大多数情况,即动态安全域边界由一个一次函数解析表示。所谓小范围动态安全域(又叫小范围 DSR),由距离基本运行点较近的临界点组成。根据概率不安全指标 I_{sec} 随着节点注入功率的正态分布而呈现快速衰减和加速衰减的特性,指标仅对距离运行点最近处的 DSR 边界敏感,对远处边界不敏感。同时,大量仿真结果表明,大范围搜索方法得到的 DSR 边界用于计算 I_{sec} 时,经常会产生较大误差。大范围与小范围 DSR 的有效性在二维平面上的定性比较如图 1 所示,HP1 和 HP2 分别是由拟合法和解析法求得的大范围 DSR。

由图 1 可知:小范围超平面 HP3 与运行点最容易失稳方向的真实 DSR 边界近似相切,与概率不安全指标的正态分布特性相契合,由其得到的指标 I_{sec} 很准确也很稳定;与之相比,多点拟合法求得的超平面 HP1 使得 I_{sec} 值偏小,单点解析法求得的超平面 HP2 因搜索到不同的临界点其角度会有变化,使得 I_{sec} 值受临界点影响很大,因此大范围方法求得的 DSR 会使概率不安全指标数值不稳定,误差难以控制。

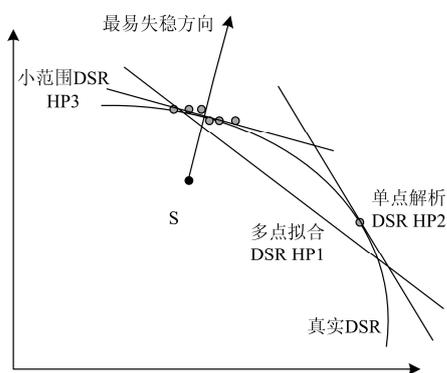


图 1 大范围与小范围 DSR 定性比较图

Fig. 1 Qualitative comparison of DSR between small range and large range

1.3 改进的小范围解析法

电力系统小范围动态安全域求解方法^[12-14]主要有小范围拟合法和小范围解析法。前者采用 Hadamard 正交表指导选点, 保证了选点均匀, 但也产生了大量不必要的选点, 造成资源浪费。文献[12]所提小范围改进解析法先在运行点到超平面垂足方向上搜索临界点, 迭代求解超平面 HP_0 , 然后在 HP_0 估算的搜索范围内扩展搜索几个临界点, 最后用这几个临界点得到超平面系数。这种在垂足方向上搜索临界点的方式会造成临界点过于密集, 最终可能只局限于某个离运行点较远的极小区域, 无法真正意义上修正超平面, 由此得到的超平面 HP_0 很可能不理想, 因而影响最终结果的准确度。

基于文献[12]的方法, 本文在临界点搜索方式和超平面修正方面加以改进(以下简称改进法): 改进法以运行点到垂足方向为基准, 在一定角度范围内产生一个随机方向, 在该方向上搜索临界点; 每搜索一个新临界点, 便和原来的临界点共同修正一次超平面。改进法的搜索方向是在垂足方向附近随机产生的, 避免了临界点过于集中, 而且每次修正超平面都利用新、旧临界点的信息, 这样可以减少临界点搜索次数, 同时加快超平面的收敛速度。

定义两超平面之间的误差为

$$err = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(a_{mi} - a_{ki}) y_{si}]^2} \quad (5)$$

式中: n 为关键节点数; α_m 、 α_k 为 m 、 k 两超平面系数; y_{si} 为基本运行节点功率注入。

改进法的实现步骤如下。

步骤 1: 从原点向基本运行点做射线, 在该射线方向上搜索临界点并储存, 用解析法求出超平面 HP_1 ;

步骤 2: 以基本运行点到超平面的垂线为中心,

在 $\pm 30^\circ$ 范围内产生的随机方向上搜索新临界点, 并储存;

步骤 3: 对所搜集的临界点应用改进解析法修正得到新超平面;

步骤 4: 判断两个超平面间的误差是否小于给定值 ε ; 若是则停止计算, 若不是则返回步骤 2。

现以 IEEE4 机 11 节点系统(如图 2)为例验证改进法的有效性。设系统运行点 S 的注入功率向量为 $y_s = [117.5 \ 112 \ 70 \ 110 \ 126.5 \ 110]$ (注入功率单位为 MW), 线路 7-5 首端发生三相金属性短路故障, 故障清除时间 $\tau = 0.12 \text{ s}$, 误差给定值 $\varepsilon = 0.1$ 。以小范围拟合法作为检验基准, 小范围拟合法、小范围解析法和改进法的计算结果如表 1 所示(α 代表动态安全域边界系数), 动态安全域系数对比如图 3 所示。

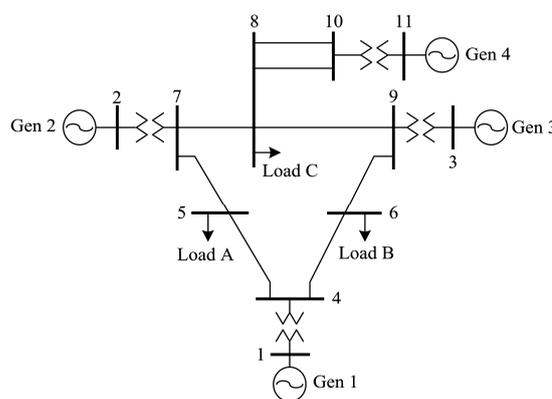


图 2 IEEE4 机 11 节点系统图

Fig. 2 IEEE 4-generator 11-bus system

由表 1 和图 3 可以发现: 改进法得到的动态安全域系数与基准系数值更接近, 因而能够修正概率不安全测度, 比小范围解析法提高了准确度, 并且计算时间也只有小范围拟合法的 1/60。因此, 改进法具有快速性, 其求得的小范围动态安全域可信度高, 可以适应在线动态安全分析。

表 1 三种方法计算结果比较表

Table 1 Comparison of results by three methods			
方法	小范围拟合法	小范围解析法	改进法
α_{G4}	0.3944	0.3074	0.3748
α_{G2}	0.4591	0.3471	0.4254
α_{G3}	0.3347	0.3258	0.3361
α_{LA}	-0.0643	0.0964	-0.0197
α_{LB}	0.0187	0.1141	0.0722
α_{LC}	-0.2211	-0.3016	-0.1965
计算时间/s	1574	19.7	26.2
概率不安全测度	0.1496	0.1059	0.1302

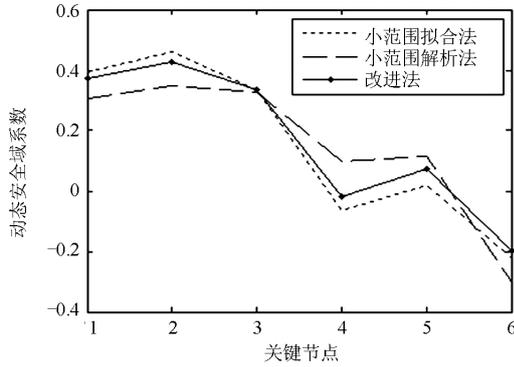


图3 三种方法求解的DSR边界系数比较

Fig. 3 Comparison of DSR boundary coefficients by three methods

1.4 基于DSR的稳定判据

本文定义使系统失稳或处于临界状态的故障为致命性故障，使系统稳定的故障为一般性故障，并用稳定判据来划分故障类别，如式(6)。

$$J = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_{si} - 1 \quad (6)$$

理论而言，该判据以零为阈值， $J > 0$ 时系统失稳， $J < 0$ 时系统稳定， $J = 0$ 时系统处于临界状态。然而在实际计算中，临界注入功率代入式(6)时，判据变量不为精确的零值，而是与零值有 10^{-2} 量级不等的数值差。因此在本文中，为避免致命性故障的漏识别，取保守阈值-0.1(最大数值差-0.09的近似值)，认为 $J \geq -0.1$ 的故障为致命性故障，反之为一一般性故障。

1.5 基于小范围DSR的失稳距离定义

基于小范围DSR，本文定义失稳距离 d_s 为基本运行点和它最易溢出的DSR边界的距离，并用失稳距离对一般性故障进行筛选，计算公式如式(7)。失稳距离反映了一般性故障造成系统失稳的趋势情况， d_s 值越小，表明故障发生后系统越趋于失稳。

$$d_s = \frac{\left| \sum_{i=1}^n \alpha_i y_{si} - 1 \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \sigma_i^2}} \quad (7)$$

2 故障的损失威胁

2.1 故障的损失成本

本文将所计及的电力系统故障后的损失成本分为两类：系统完全失稳成本和系统可能失稳成本。

文献[15]指出，系统完全失稳成本主要包括故障发生后全系统失稳所引发的损失，以及为避免全

系统失稳而采取的紧急控制措施成本，如式(8)。

$$C_L = C_{Ls} + C_{Lo} + C_{Ld} + C_{Lc} \quad (8)$$

式中： C_L 为系统完全失稳成本； C_{Ls} 为维修和启动成本； C_{Lo} 为发电机会成本； C_{Ld} 为负荷损失成本； C_{Lc} 为连锁事故导致系统大面积失稳后，该地区主要用户的损失估值。

系统可能失稳成本基于系统尚未失稳的前提下，主要考虑由于电压下降所引发的负荷丢失、系统元件非正常运行、设备绝缘老化和连锁停运风险等隐性损失，如式(9)。

$$C_{UL} = C_{ULv} + C_{ULm} + C_{Lc} \quad (9)$$

式中： C_{UL} 为系统可能失稳成本； C_{ULv} 为故障后由于电压下降所造成的负荷损失； C_{ULm} 为由故障过电流造成的线路和电机的绝缘老化折损。

2.2 故障的损失威胁

综合考虑电力系统的安全性、经济性及不确定性，本文引入一个风险指标来量化一般性故障对电力系统造成的损失威胁。该指标计及了失稳距离的影响，针对故障可能发生的概率以及故障发生后对系统造成的损失，评价故障对系统的威胁水平。某故障的风险指标如式(10)。

$$D_{ins}(j) = P(j) \left\{ [1 - I_{sec}(j)] C_{ULj} d_{sj} + \frac{I_{sec}(j) C_{Lj}}{d_{sj}} \right\} \quad (10)$$

式中： $P(j)$ 为电力系统发生 j 故障的概率； $I_{sec}(j)$ 为发生 j 故障的概率不安全指标； d_{sj} 为 j 故障下系统的失稳距离； C_{ULj} 、 C_{Lj} 为系统发生 j 故障的可能失稳成本和完全失稳成本。

3 故障筛选与排序模型

本文故障筛选与排序模型利用的是系统运行点最容易溢出的小范围动态安全域，该计算基础具有唯一性，改进的求解方法也保证了计算基础的可信性和高效性，因而无需如大范围方法一般递进精度多次计算，也避免了不同计算基础下各种指标不匹配问题。

同时，评估结果应能迅速准确地呈现给运行人员，因而故障筛选与排序模型须力求精简实用。致命性故障需要运行人员立即处理，因此按照最基本的概率不安全指标排序，第一时间输出，并置于事故终选集首位；一般性故障集对系统运行方式的改善和远期规划有重要指导意义，考虑到一般性故障的复杂性，需要根据更综合的指标考量。两类故障排序同时进行。基于小范围动态安全域的故障筛选与排序基本步骤可描述如下：

(1) 根据经验数据、历史数据和专家意见等对某

电力系统的故障进行初步筛选, 得到预筛选集。

(2) 采用改进法求解在当前系统运行条件下预筛选集中故障对应的小范围动态安全域系数, 并用稳定判据将故障分类。

(3) 致命性故障类, 计算其概率不安全指标, 并存入初选集 A 中, 进行步骤(5)。

(4) 一般性故障类, 计算其失稳距离 d_s , 若 d_s 小于设定阈值 ξ , 计算故障的概率不安全指标, 并与失稳距离一同存入初选集 B 中, 进行步骤(5)。

(5) 判断预筛选集中的故障是否检索完毕, 若完毕则同时进行步骤(6)和步骤(7), 若未完成则返回步骤(2)。

(6) 初选集 A 按照概率不安全指标排序, 形成致命性故障集, 直接输出。第一时间呈现当前运行方式下电力系统中的薄弱环节, 以便运行人员及时采取相应的预防和紧急控制措施。

(7) 初选集 B 是一般性故障中较严重的故障, 计算其中各故障的损失成本和风险指标 D_{ins} , 按照 D_{ins} 排序形成一般性故障集。

(8) 致命性故障集与一般性故障集合并形成事故终选集, 致命性故障类输出概率不安全指标, 一般性故障类输出风险指标。

4 算例分析

IEEE10 机 39 节点系统的结构图如图 4 所示, 以该系统为例验证本文方法的有效性。为便于比较, 取系统的基本运行点 $y_s=(200, 400, 500, 250, 500, 400, 350, 700, 700, 900, 200, 300, 130, 350, 10, 200, 250, 50, 300, 150, 160, 100, 120, 100, 150, 100, 100, 10)$ (单位为 MW), 经验故障线路为 4-14、26-28、22-23、2-25、25-26、16-24、26-27、26-29、8-9、21-22、2-3、28-29、10-13、13-14、6-7、

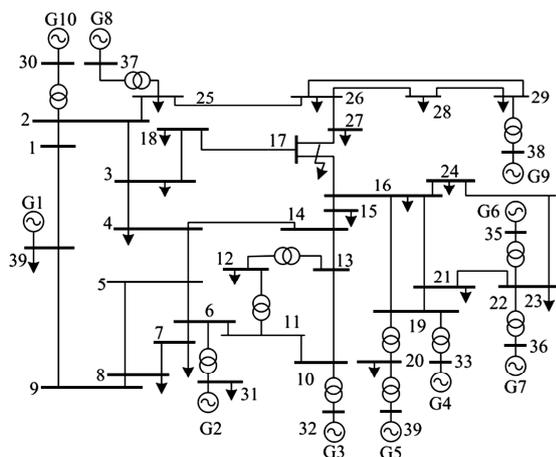


图 4 IEEE10 机 39 节点系统图

Fig. 4 IEEE 10-generator 39-bus system

3-4、9-39、15-16、1-39、10-11、6-11、17-18、16-17、14-15、4-5、3-18、5-8、17-17、16-21、7-8、23-24、5-6。不考虑天气因素影响, 故障清除时间均为 $\tau=0.1$ s, 超平面误差给定值 $\varepsilon=0.1$, 失稳距离设定阈值 $\xi=0.8$ 。

故障筛选与排序过程的部分中间数据如表 2 和表 3 所示。表 2 是由稳定判据筛选出的致命性故障, 经过排序后直接输出。表 3 是由失稳距离筛选出的较严重的一般性故障, 将故障按照失稳距离排序, 可以看出概率不安全指标与失稳距离具有某种相关性, 当 d_s 下降到某一值时, I_{sec} 数十倍减小, 即随着失稳趋势的减弱, 系统的不安全水平也随之降低。经过多次试验, 发现采用失稳距离来筛选一般性故障是有效的, 与概率不安全指标相比其计算更简单, 节省时间。

表 2 未排序的致命性故障初选集 A

Table 2 Collection A of unordered fatal faults

致命性故障线路	稳定判据变量 J	概率不安全指标 $I_{sec}(\times 10^{-4})$
8-9	4.4602	0.989 89
1-39	0.0858	0.990 56
10-11	1.1092	0.796 41
21-22	-0.0998	0.306 75
14-15	-0.1000	0.781 53

表 3 按失稳距离排序的一般性故障初选集 B

Table 3 Collection B of general faults ranked according to instability distance

一般性故障线路	失稳距离 d_s	概率不安全指标 $I_{sec}(\times 10^{-4})$
16-17	0.2086	0.623 19
23-24	0.2372	0.870 42
15-16	0.2752	0.913 61
2-3	0.3940	0.884 72
16-21	0.4029	0.729 97
9-39	0.4127	0.796 03
3-4	0.4435	0.517 92
28-29	0.4862	0.671 59
16-24	0.5416	0.371 21
22-23	0.7044	0.089 46
26-29	0.7458	0.008 30
26-28	0.7699	0.005 73
26-27	0.7846	0.000 01

IEEE10 机 39 节点系统故障筛选排序的最终结果如表 4 所示, 输出概率不安全指标的是致命性故障, 其余为一般性故障。致命性故障属于系统最关键的薄弱环节, 如线路 8-9 和 1-39 若发生故障系统失稳的可能性近乎为 1, 必须立即处理, 因此本文对筛选出的致命性故障采取简单办法排序后立即输出。一般性故障虽然不会对系统造成致命性打击,

但其给系统带来的潜在损失不容小觑,如线路 28-29 发生故障对系统的威胁水平很高,需要加强检修和维护并采取预防措施。事故终选集呈现的是当前系统运行方式的评估结果,能够增加运行人员对所处境遇的了解,指导运行人员提前做好应急方案,合理规划系统运行方式,从而增强电网的安全性,预防大停电的发生。

表 4 事故终选集

Table 4 Final collection of the contingency

故障线路	概率不安全指标 $I_{sec}(\times 10^{-4})$	风险指标 D_{ms}
1-39	0.990 56	—
8-9	0.989 89	—
10-11	0.796 41	—
14-15	0.781 53	—
21-22	0.306 75	—
28-29	—	587 960.63
16-24	—	54 062.05
26-28	—	38 500.04
9-39	—	38 220.43
23-24	—	35 573.92
22-23	—	31 111.68
2-3	—	30 122.73
16-21	—	22 086.64
16-17	—	20 719.54
15-16	—	19 287.70
26-29	—	10 937.57
3-4	—	426.56
26-27	—	90.65

5 结论

在分析了传统故障筛选与排序方法的基础上,本文从一个全新的角度入手,以系统最易失稳的小范围动态安全域为计算基础,根据故障特性的不同,采用不同策略筛选排序。小范围动态安全域本身及其改进后的计算方法使得计算基础在速度和精度上具有双重保证;在排序中,两类故障采用不同标准并行排序,大大提高了效率;小范围失稳距离、概率不安全指标和风险指标等的综合利用,全面考虑了电力系统安全性、随机性和经济性。IEEE10 机 39 节点系统仿真结果表明,本文方法简单高效,能够迅速和准确地完成故障筛选与排序,对实际的故障隐患指导性强。

参考文献

[1] 余贻鑫. 电力系统安全域方法研究述评[J]. 天津大学学报, 2008, 41(6): 635-646.

YU Yixin. Review of study on methodology of security regions of power system[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(6): 635-646.

[2] 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 Yixin. Methodology of security region and practical results[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(5): 525-528.

[3] LIU Yanli, YU Yixin. Probabilistic steady-state and dynamic security assessment of power transmission system[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(5): 1198-1207.

[4] 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 Dongtao, YU Yixin, 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.

[5] 刘怀东, 崔晓君, 张翠平, 等. 一种新的故障筛选和排序的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 75-80.

LIU Huaidong, CUI Xiaojun, ZHANG Cuiping, et al. A new method of contingency screening and ranking[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 75-80.

[6] 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.

[7] 刘怀东, 陈彧, 崔晓君, 等. 基于期望损失指标的电力系统故障筛选和排序[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 8-13.

LIU Huaidong, CHEN Yu, CUI Xiaojun, et al. Contingency screening and ranking based on dynamic security region of the power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 8-13.

[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 Huaidong. 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] 高天亮. 基于动态安全域的电力系统安全概率评估模型[D]. 天津: 天津大学, 2006.

- GAO Tianliang. A probabilistic power system dynamic security assessment model based on dynamic security region[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [10] ZENG Yuan, YU Yixin, WANG Hongmei, et al. Prediction of instability separation modes and its application in practical dynamic security region[J]. Transactions of Tianjin University, 2007, 13(3): 157-162.
- [11] 胡永强, 陈长胜, 赵书强, 等. 一种多频振荡场景下的失稳模式划分方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 19-25.
- HU Yongqiang, CHEN Changsheng, ZHAO Shuqiang, et al. Classification of unstable modes under multi-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 19-25.
- [12] 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.
- [13] 常安. 解析法与拟合法相结合的小范围 DSR 快速搜索方法[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- CHANG An. Small range rapid search method of DSR based on the combination of analytical method and fitting methods[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [14] 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.
- [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 Piyi, PAN Peifang, et al. Transient risk assessment based on probabilistic insecurity index[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 45-49.

收稿日期: 2016-12-14; 修回日期: 2017-06-19

作者简介:

姜英涵(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全性和稳定性; E-mail: yhjiang@tju.edu.cn

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稳定。

(编辑 葛艳娜)