

DOI: 10.7667/PSPC151532

一种新的故障筛选和排序的方法

刘怀东¹, 崔晓君¹, 张翠平², 王海波³, 马林¹, 吴贺¹

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300301;
3. 国家电网天津市电力公司, 天津 300000)

摘要: 为了避免在故障筛选与排序中忽略严重故障而导致大停电的发生, 提出了一种比较精确的新的故障筛选和排序方法。以动态安全域的求解为基础, 在故障筛选时运用解析法求动态安全域, 进而求解失稳度。以故障的失稳度作为故障筛选的指标, 快速选出严重的故障, 形成故障筛选集。在故障排序时对于筛选集中的故障线路运用BP神经网络求解动态安全域, 从而求解概率不安全指标, 以故障的概率不安全指标作为故障排序的指标, 得到精确的故障排序。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, 同时通过IEEE4机11节点系统验证了BP神经网络求解动态安全域的可行性, 误差为0.0608, 满足要求。

关键词: 动态安全域; 故障筛选; 失稳度; 故障排序; BP神经网络; 概率不安全指标

A new method of contingency screening and ranking

LIU Huaidong¹, CUI Xiaojun¹, ZHANG Cuiping², WANG Haibo³, MA Lin¹, WU He¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300301, China;
3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300000, China)

Abstract: In order to avoid ignoring the serious faults in the screening and ranking which results in large-scale blackout of power grid, a new contingency screening and ranking method is proposed. It is based on solving the dynamic security domains, and can calculate dynamic security region of power system by analytic method to calculate the instability degrees. The instability degree of the fault is the indicator of contingency screening to quickly select the severe faults to form contingency screening set. Dynamic security region of power system can be calculated by BP neural network in contingency ranking to get probabilistic insecurity index. The probabilistic insecurity index of the faults is the indicator of contingency ranking to accurately rank. 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. Meanwhile, case studies on New England 4-machine 11-bus system show that the calculation of dynamic security region about BP neural network is feasible, the error is 0.0608, which can meet the requirements.

Key words: dynamic security region; contingency screening; instability degrees; contingency ranking; BP neural network; probabilistic insecurity index

0 引言

随着经济的快速发展和人民用电量的日益增多, 跨区电网的不断形成, 电力系统的互联水平在不断的提高, 规模在不断的增大, 机组容量不断增加, 因此电力系统稳定性一旦遭到破坏, 将会导致巨大的灾难性后果和不可估量的经济损失。以北美的“8·14”^[1]大停电为代表的停电事故表明, 电力系统的安全性问题仍就是电力系统需要高度重视

的问题。电力系统的安全性中最重要的一方面就是暂态稳定评估, 而故障筛选和排序对暂态稳定评估有重要的意义。

故障筛选和排序的方法^[2-7]有很多种, 采用二次曲线拟合的方法进行的故障筛选和排序的精度受拟合点选择的影响; 以无功裕度作为指标的故障筛选和排序, 由于系统中每个负荷都需要计算所以效率比较低; 以负荷裕度作为指标的故障筛选和排序更好地量化了稳定距离但降低了排序的准确性。为了

能够快速筛选, 精确排序, 多阶段多指标的故障筛选和排序也渐渐被提出。基于此, 本文提出了一种新的故障筛选和排序的方法。

本文通过研究动态安全域, 提出了一种关于动态安全域的故障筛选和排序的方法。对故障筛选和排序采用不同的思路进行, 即在故障筛选中主要利用动态安全域的快速计算从而实现粗略快速的筛选, 在故障排序阶段通过动态安全域的 BP 神经网络法实现快速的排序, 最后通过综合排序将失稳度和概率不安全指标结合起来实现精确排序。

1 电力系统动态安全域

1.1 动态安全域(DSR)

动态安全域 $\Omega(i, j, \tau)^{[8-9]}$ 是系统注入功率空间向量 y 上的集合 $A(y)$, 对于给定的持续时间的事故, 当事故前系统节点注入向量位于该集合内时, 事故后系统暂态不失稳。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: 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; $x_c(y)$ 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上、下限值。

设两超平面 m 、 k , 超平面系数分别为 $(a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mn})$ 、 $(a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn})$, 定义两超平面之间误差如式(2)所示。

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

式中: y_{si} 为运行点 S 的注入功率; err 为 m 、 k 两超平面的误差。

1.2 电力系统的失稳度

失稳度 $(M_{\text{ins}})^{[10]}$ 定义为基于系统故障后可能引起暂态失稳的程度, 大于 0 时系统失稳解列, 造成停电, 小于 0 时系统维持稳定。失稳度的计算公式如式(3)所示。

$$M_{\text{ins}} = \sum_i^n a_i y_i - 1 \quad (3)$$

1.3 电力系统概率不安全指标

文献[11]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在所研究的时间段内由于发生故障导致系统失去稳定性的期望次数。仅考虑了有关故障的因素, 未考虑天气条件等因素对其的影响, 现以输电线路为例, 则改进的线路 l 的概率不安全指标为

$$P_{\text{insecr}}(l) = Pr_w(l_i) \alpha_k * \sum_{w=0}^1 \beta_w \int_0^{x_0(l_i)} f_x(x) \int_0^{+\infty} f_r(r) \int_0^{+\infty} f_\tau(\tau) \int_{y \in \Omega} f_y(y) dx dr d\tau dy \quad (4)$$

式中: i 为线路编号; w 为天气条件, $w=0$ 为正常天气, $w=1$ 为恶劣天气; β_w 为天气类型为 w 时所占的比例; $Pr_w(l_i)$ 为线路 l_i 在天气类型为 w 时的故障率函数; $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为节点注入功率向量; n 为节点个数; k 表示故障类型, 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 是故障类型为 k 的故障所占的比例; 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; 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; τ 为故障切除时间; $f_\tau(\tau)$ 为 τ 的概率分布函数。

1.4 BP 神经网络

BP 神经网络^[12-16]是一种多层前馈神经网络, 它具有信号前向传递, 误差反向传递的特点。在前向传递的过程中, 输入信号从输入层经隐含层逐层处理, 最后到达输出层。如果输出层的输出与期望输出的差不满足要求, 则进行反向传播, 根据预测误差调整网络的权值和阈值, 从而使 BP 神经网络预测输出值不断接近期望输出值。

BP 神经网络的网络拓扑结构如图 1 所示, 则输出的表达式如式(5)所示。在式(5)中, a 、 b 分别是输入层、隐含层元素的个数, f_1 、 f_2 分别为隐含层传递函数、输出层传递函数, 传递函数通常有 S 型的对数函数 logsig , S 型的正切函数 tansig , 纯线性函数 purelin 3 种。 w_{ib} 、 u_{ia} 分别为输入层与隐含层之间、隐含层与输出层之间的权值, θ_{i1} 、 θ_{i2} 分别为输入层与隐含层之间、隐含层与输出层之间的阈值。

$$y_i = f_2 \left[\sum_{a=1}^m u_{ia} f_1 \left(\sum_{b=1}^n w_{ib} x_b + \theta_{i1} \right) + \theta_{i2} \right] \quad (5)$$

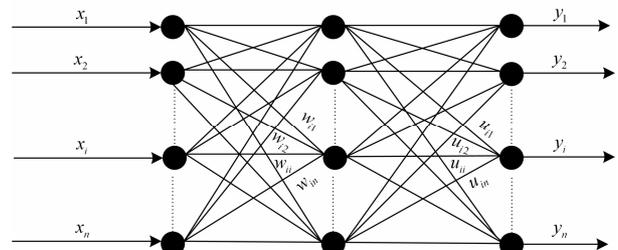


图 1 BP 神经网络的网络拓扑结构

Fig. 1 Network topology of BP neural network

动态安全域的求解方法主要有拟合法、解析法,拟合法计算精度高,但是其计算时间过长,不能实现在线计算;解析法的计算速度很快,但计算精度不高;为了实现动态安全域计算的在线计算和在线应用,本文提出了基于BP神经网络的动态安全域的求解方法。该方法把故障接地电阻、故障类型、故障地点距线路始端的距离、故障切除时间等作为神经网络的输入,把动态安全域的系数作为神经网络的输出,用拟合法计算动态安全域作为样本的获取方式。

现以IEEE4机11节点系统(如图2)为例验证BP神经网络求动态安全域的正确性,选用了500个训练样本,然后选取了50个检验样本进行检验。设系统运行点S的注入功率向量为 $y=[1.175\ 1.12\ 0.70\ 1.10\ 1.265\ 1.10]$ (基准功率为100 MW)。误差图像如图3所示,由表1可以发现由BP神经网络求解的系数与拟合法求解的结果对比,误差最大为0.0608,满足要求。

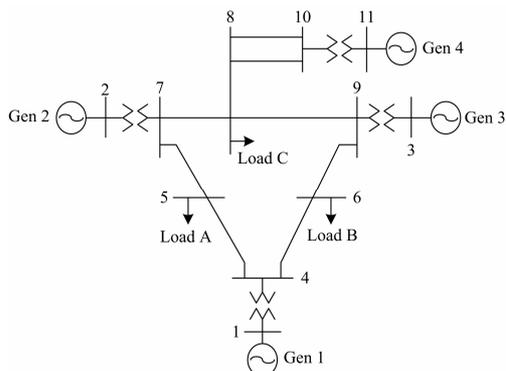


图2 新英格兰4机11节点系统图

Fig. 2 System diagram of New England 4 machines 11 nodes

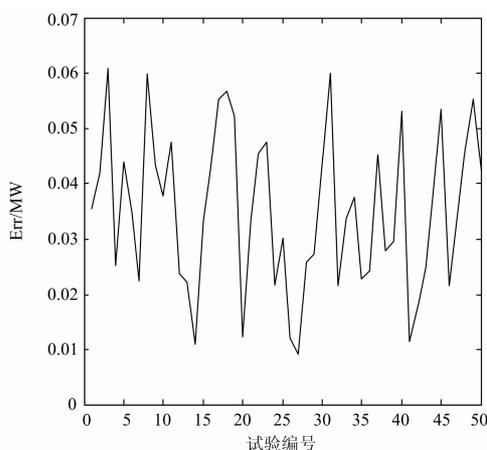


图3 BP神经网络求解动态安全域误差图

Fig. 3 Error graph of the calculation of dynamic security region about BP neural network

表1 BP神经网络法与拟合法的比较情况

Table 1 Comparison of BP neural network method and fitting method

| 方法 | BP神经网络法 | 拟合法 | |
|---------------------|---------|----------|----------|
| 关键节点对应的动态安全域的超平面的系数 | Bus11 | 0.446 6 | 0.470 7 |
| | Bus2 | 0.398 8 | 0.405 5 |
| | Bus3 | 0.013 4 | -0.041 4 |
| | Bus5 | -0.108 0 | -0.103 1 |
| | Bus6 | 0.018 7 | 0.003 6 |
| | Bus8 | -0.350 7 | -0.380 6 |
| 时间/s | 11.8 | 1 692 | |

当线路8-9发生三相短路故障,故障处距线路始端20%的距离,故障切除时间为0.1 s,故障接地电阻为1.8 Ω 时,利用拟合法和BP神经网络法求解动态安全域的数据如表1所示,系数对比图如图4所示。利用神经网络法计算动态安全域一次计算大约需要12 s,计算速度快,可以实现在线计算,但训练的时间较长,用拟合法计算动态安全域精度高,但耗时比较长,一般为半个小时左右,只能离线计算。

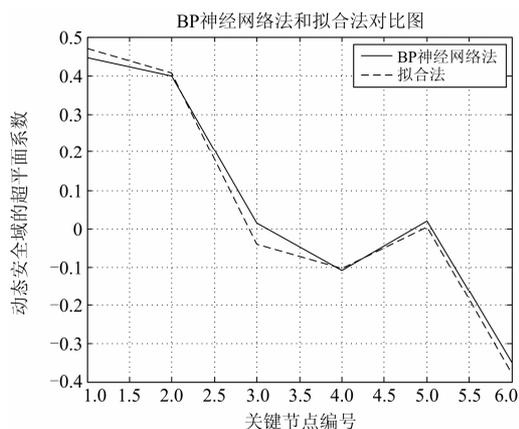


图4 BP神经网络法与拟合法的对比图

Fig. 4 Comparison chart of BP neural network method and fitting method

2 故障筛选和排序模型

在电力系统分析中要求快速筛选出严重的故障,精确地对严重故障排序。本文所提出的电力系统故障筛选与排序模型包括三个模块,即数据输入、故障筛选和排序、输出结果。故障筛选和排序的流程如图5所示。

(1) 数据输入模块

在数据输入模块中以故障接地电阻、故障类型、故障地点距线路始端的距离、故障切除时间等作为模块的输入。

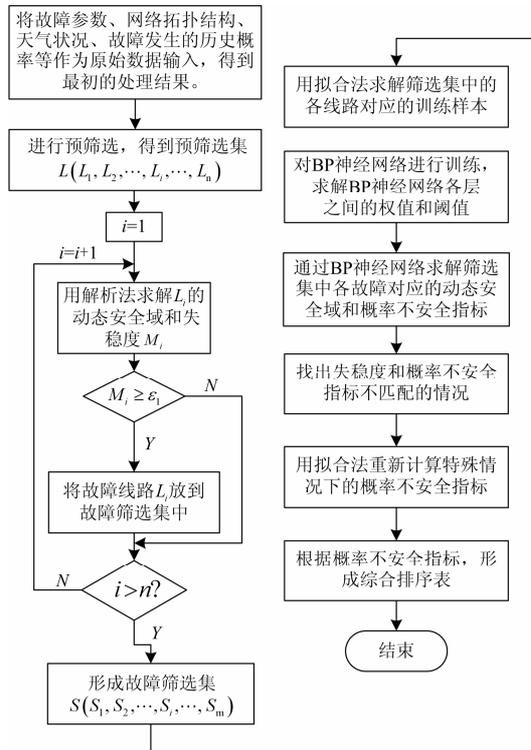


图 5 故障筛选和排序的流程图

Fig. 5 Flowchart of contingency screening and ranking

(2) 筛选与排序模型

筛选与排序模块分为预筛选、初筛选、初排序和综合排序四个部分，这四个部分功能不同，所依据的凭证也不相同，而且它们所得结果的精度也不相同。这四个模块的关系可以说是层层递进的，前一计算过程的结果是后边要计算过程的数据输入，通过预筛选、初筛选、初排序、综合排序四个计算过程的计算，最后得到电力系统故障的排序结果。

a. 预筛选

预筛选部分所完成的是对初始故障集通过一些经验性的数据进行整理、排除。这些经验性的数据都是借鉴专家对系统运行情况所提出来的，以及一些收集整理的数据。一些经验数据，比如容易发生故障的季节、天气，故障通常发生的地点、某地点通常发生的故障类型等信息。根据这些经验数据对电力系统故障进行初步筛选，将筛选后的结果放在预筛选集中。

b. 初筛选

首先，通过解析法对预筛选集 $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ 中的故障线路求解动态安全域系数和失稳度 M_{ins} ；然后，根据失稳度 M_{ins} 与给定阈值 ϵ_1 的关系进行故障的筛选。如果 M_{ins} 大于 ϵ_1 ，则为严重故障，将此故障线路入筛选集中；反之将故障线路筛出去。

c. 初排序

首先，对于故障筛选集中的各故障线路，采用拟合法进行训练样本的获取，并通过样本训练获得 BP 神经网络各层之间的阈值和权值；其次，利用 BP 神经网络法求解筛选表中各故障线路的动态安全域和概率不安全指标；最后，通过指标概率不安全指标对筛选表中的故障线路进行排序，形成排序表。

d. 综合排序

初排序后，如果发现有的线路出现特殊情况，如失稳度过大，而概率不安全指标过小或者失稳度过小，但概率不安全指标过大，则采用综合排序，利用拟合法精确计算动态安全域超平面系数后，综合计算线路的概率不安全指标，结合各种随机因素综合排序。

(3) 输出结果模型

在输出结果模块，将筛选集中的故障线路号进行输出，同时将筛选集中的故障线路的排列序号进行输出。

3 算例

现以接线图如图 6 所示的 IEEE 10 机 39 节点系统为例验证上述方法的有效性。本文以线路发生三相短路故障为例， ϵ_1 取 0.3，运行点的注入功率向量为： $y_s=(200, 400, 500, 250, 500, 400, 350, 700, 700, 900, 200, 300, 130, 350, 10, 200, 250, 50, 300, 150, 160, 100, 120, 100, 150, 100, 100, 10)$ ，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、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。

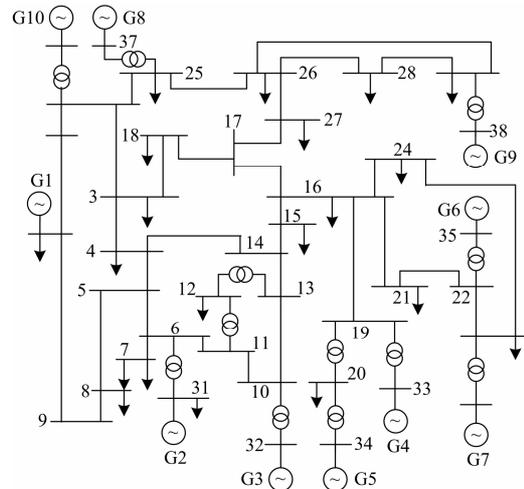


图 6 新英格兰 10 机 39 节点系统图

Fig. 6 System diagram of New England 10 machines 39 nodes

故障的筛选和排序表如表 2 所示。在表 2 中, + 表示在故障筛选集中, - 表示不在故障筛选集中。

表 2 故障筛选和排序表

Table 2 Table of contingency screening and ranking

| 经验故障线路 | 失稳度 M_{ins} | 是否在筛选表中 | 概率不安全指标($\times 10^{-4}$) | 在排序表中的序号 |
|--------|---------------|---------|-----------------------------|----------|
| 26-28 | -0.323 4 | - | — | — |
| 22-23 | -0.290 6 | + | 0.113 196 | ⑤ |
| 2-25 | -0.349 2 | - | — | — |
| 25-26 | -1.332 8 | - | — | — |
| 16-24 | -0.132 2 | + | 0.003 865 | ⑨ |
| 26-27 | -0.396 6 | - | — | — |
| 26-29 | -0.316 6 | - | — | — |
| 8-9 | 4.372 9 | + | 0.015 113 | ⑧ |
| 21-22 | -0.100 8 | + | 0.704 215 | ② |
| 2-3 | -4.737 8 | - | — | — |
| 28-29 | -0.196 6 | + | 0.585 784 | ③ |
| 10-13 | -0.334 5 | - | — | — |
| 13-14 | -0.627 0 | - | — | — |
| 6-7 | -0.373 4 | - | — | — |
| 3-4 | -0.153 6 | + | 0.062 748 | ⑥ |
| 9-39 | -2.392 2 | - | — | — |
| 15-16 | -1.167 7 | - | — | — |
| 1-39 | 0.084 7 | - | — | — |
| 10-11 | 1.030 2 | + | 0.000 127 | ⑩ |
| 6-11 | -1.108 9 | - | — | — |
| 17-18 | -0.703 4 | - | — | — |
| 16-17 | -0.216 2 | + | 0.000 042 | ⑪ |
| 14-15 | -0.108 2 | + | 0.000 006 | ⑫ |
| 4-5 | -0.338 6 | - | — | — |
| 3-18 | -0.152 7 | + | 0.999 999 | ① |
| 5-8 | -0.411 7 | - | — | — |
| 17-27 | -1.653 5 | - | — | — |
| 16-21 | -0.245 9 | + | 0.022 117 | ⑦ |
| 7-8 | -0.345 4 | - | — | — |
| 23-24 | -0.185 5 | + | 0.299 777 | ④ |
| 5-6 | -0.422 0 | - | — | — |
| 4-14 | -0.423 6 | - | — | — |

通过解析法计算的动态安全域的系数和失稳度如表 2 所示。由此表可以筛出去线路 25-26、2-3、9-39、15-16、1-39、6-11、17-27、4-14、26-28、2-25、26-27、26-29、10-13、13-14、6-7、17-18、4-5、5-8、7-8、5-6。其中故障线路 22-23、8-9、28-29、10-11、14-15 的失稳度和概率不安全指标不匹配, 故采用拟合法重新计算动态安全域, 使故障排序更加准确。

通过计算概率不安全指标, 根据该指标对筛选集中的故障线路进行排序, 如表 2 所示。在筛选集中, 线路 8-9 的失稳度为 4.372, 线路 3-18 的失稳

度为-0.1527, 从而线路 8-9 发生故障产生的后果要比线路 3-18 发生故障产生的后果严重, 但是经过精确计算发现, 线路 3-18 的概率不安全指标要高于线路 8-9 的概率不安全指标, 从而线路 3-18 发生的故障产生的后果要比线路 8-9 发生的故障产生的后果严重。所以采用解析法计算只能大略选出严重故障, 但可以快速选出严重故障, 由于 BP 神经网络求解动态安全域与拟合法相比较的误差满足要求, 故在排序时采用 BP 神经网络法求出动态安全域的系数和概率不安全指标, 可以实现精确排序。

4 结论

本文以动态安全域计算为基础, 提出了基于 BP 神经网络求解动态安全域的方法; 以概率不安全指标和失稳度为指标, 提出了一种新的故障筛选和排序模型。该模型的核心就是实现快速筛选、精确快速排序的特点。在筛选中, 用解析法求解动态安全域, 节省了计算的时间, 但由于解析法求解的精度不高, 只能实现了粗略但快速地筛选; 在排序中, 用 BP 神经网络求解动态安全域, 由于 BP 神经网络训练时间很长但训练后的计算时间较短, 大大缩短了故障排序的时间, 计算的概率不安全指标综合考虑了故障发生的各种随机因素, 从而可以实现故障的精确而快速的排序。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。

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] 张勇军, 蔡广林, 邱文锋, 等. 基于最优乘子潮流估计的故障筛选与排序[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 123-128.
ZHANG Yongjun, CAI Guanglin, QIU Wenfeng, et al. Contingency screening and ranking based on optimal multiplier power flow evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 123-128.
- [3] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 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. A contingency screening and ranking method for power system static stability analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 62-67.

- [4] 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.
- [5] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 考虑支路故障情况下的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 20-25.
JIANG Wei, WANG Chengshan, YU Yixin, et al. Static voltage stability analysis considering branch outage contingency[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 20-25.
- [6] SWARUP K S, SUDHAKAR G. Neural network approach to contingency screening and ranking in power systems[J]. Neurocomputing, 2006, 70(1/3): 105-118.
- [7] YORINO N, LI H Q, HARADA S, et al. A method of voltage stability evaluation for branch and generator outage contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 252-259.
- [8] 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.
- [9] 肖峻, 苏步芸, 贡晓旭, 等. 基于馈线互联关系的配电网安全域模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 36-44.
XIAO Jun, SU Buyun, GONG Xiaoxu, et al. Model of distribution system security region based on interconnections of feeders[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 36-44.
- [10] 王曦冉, 章敏捷, 邓敏, 等. 基于动态安全域的最优时间紧急控制策略算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 71-77.
WANG Xiran, ZHANG Minjie, DENG Min, et al. Optimal emergency control strategy algorithm of ideal time based on dynamic security region[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 71-77.
- [11] 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.
- [12] 马草原, 孙富华, 朱蓓蓓, 等. 神经网络算法的改进及其在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 142-148.
MA Caoyuan, SUN Fuhua, ZHU Beibei, et al. Study on algorithm improvement of BP neural networks and its application in active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 142-148.
- [13] 李泽文, 易志鹏, 杨毅, 等. 基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 77-83.
LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 77-83.
- [14] REN Chao, AN Ning, WANG Jianzhou, et al. Optimal parameters selection for BP neural network based on particle swarm optimization: a case study of wind speed forecasting[J]. Knowledge-based Systems, 2014, 56: 226-239.
- [15] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.
- [16] SUN Zhichao, WANG Xiaoqun, ZHANG Jue, et al. Prediction and control of equiaxed α in near- β forging of TA15 Ti-alloy based on BP neural network: for purpose of tri-modal microstructure[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 591: 18-25.

收稿日期: 2015-08-30; 修回日期: 2015-12-11

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;

崔晓君(1990-), 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: cxj_0822@tju.edu.cn

(编辑 张爱琴)