

基于分层区间数可能度排序的不确定静态安全分析

鲁广明¹, 谢昶¹, 吕颖¹, 严剑峰¹, 毛学魁²,
丁涛³, 孙宏斌⁴, 李方兴⁵

- (1. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192;
2. 国网北京市电力公司海淀供电公司, 北京市 海淀区 100195;
3. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西省 西安市 710049;
4. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
5. 美国田纳西大学 电气工程与计算机科学系, 田纳西州 诺克斯维尔 37996)

Static Security Analysis With Uncertainty Using Hierarchical Probability Degree Ordering of Interval Numbers

LU Guangming¹, XIE Chang¹, LÜ Ying¹, YAN Jianfeng¹, MAO Xuekui²,
DING Tao³, SUN Hongbin⁴, LI Fangxing⁵

- (1. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China;
2. State Grid Beijing Haidian Electric Power Supply Company, Haidian District, Beijing 100195, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
4. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
5. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Tennessee, Knoxville, TN 37996, USA)

ABSTRACT: Static security analysis is regarded as the basis of preventive control, giving severity ordering of $N-1$ contingencies. Especially, when large amount of renewable resources integrated into power grid, power flow distribution is uncertain. Therefore, static security analysis with uncertainty should be considered. Firstly, the contingency set is classified into three hierarchies according to assigned weight. Then, probability degree ordering method based on interval numbers and active performance index based complementary judgment matrix are proposed to search ordering weighted vector for each hierarchical contingency set. In order to guarantee consistency of complementary judgment matrix, least squares model is modeled to give severity ordering. Taking IEEE-9 bus system for example, detailed implementation of security analysis method is presented, and comparison with Monte Carlo simulation verifies effectiveness of the proposed method. Finally, testing results of multiple large systems show rapidity of the method for static security analysis.

KEY WORDS: security analysis; interval numbers; hierarchical probability degree ordering; judgment matrix; uncertainty

摘要: 电力系统静态安全分析作为预防控制的基础, 对系统进行 $N-1$ 事故分析, 得到其严重性进行排序。当间歇性能源接入电网后, 网络中的潮流分布随之呈现一定的不确定性, 为此需考虑不确定情况下的静态安全分析。首先根据区间有功行为指标将故障集分为3层, 并采用区间数可能度比较法对每层的故障集分别构造区间指标集的互补判断矩阵, 为保证判断矩阵的一致性, 建立了以修正量最小的最小二乘模型, 从而得到各个分层的区间指标排序向量。根据分层的权重和各个分层排序向量的大小, 得到总故障集的安全性排序。以IEEE 9节点为例, 详细说明了安全分析方法的求解过程, 并采用蒙特卡罗随机模拟方法与之对比, 结果表明了所提方法的有效性。最后, 多个系统的时间复杂度测试结果体现了安全分析的快速性。

关键词: 安全分析; 区间数; 分层可能度排序; 判断矩阵; 不确定性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0031

0 引言

静态安全分析是指在预想事故发生后, 根据其电压越限或者传输功率过载程度进行排序, 找到严重事故集, 为后续预防控制提供帮助^[1]。传统的静态安全分析主要关注节点注入为确定量的情况下, 如何协调计算精度和速度^[2-5]。对于大规模电

基金项目: 国家电网公司科技项目(XT71-16-019)。

This Work was Supported by Science and Technology Foundation of SGCC(XT71-16-019).

力系统,速度通常是第一位的,而直流法能够快速得到近似的潮流分布。特别是当间歇性能源接入电网后,其节点注入功率以及潮流分布均为随机量,即使采用交流潮流也很难保证精确性,因此精确性可以有一定的牺牲,但快速性是必须保证的。

另一方面,研究不确定能源接入下的静态安全分析方法,首先需要研究不确定潮流的计算方法,并以此为基础,分析每个事故的严重程度。而不确定潮流的计算方法很多,如概率潮流、模糊潮流、随机潮流和区间潮流等^[6-13]。区间潮流相对其他方法能够快速得到系统潮流分布,与安全分析的快速性要求吻合,文献[14]因此提出了一种基于区间直流潮流的不确定安全分析方法,得到了较为满意的结果,但所建立的可信度函数与参数选择有关,不同参数选择会得到不同的排序结果,因此本文利用区间数排序理论来研究静态安全分析。

对于区间数排序理论是决策理论的重要方面,在经济、管理和军事等各个领域的决策中获得了极大的成功^[15-18]。区间数排序理论涉及2个方面的内容:第1是区间数之间的比较方法,第2是区间数排序方法。区间数实际上是一种特殊的模糊数,其比较方法主要是基于可能度的思想,不同于实数比较,区间数之间的比较并不是得到确定的大小关系,而是根据区间数之间的位置关系给出比较结果的可能度^[15-16]。区间排序方法则是根据区间可能度比较结果构建备选集的互补判断矩阵,进而求得备选集的模糊权重向量,并获得排序结果^[17-18]。由于根据可能度排序法得到的互补判断矩阵有可能不满足一致性要求,文献[19-20]从不同角度提出了解决这一问题的方法。本文建立最小二乘修正优化模型,寻找满足一致性要求的排序向量,得到排序结果。

本文所提方法适用于间歇性能源并入电网后的不确定性静态安全分析,以区间直流潮流为基础,能够快速得到大规模系统安全性排序结果,有望实际工程中得到推广和应用。需要说明的是,本文的研究主要涉及不确定注入对传输系统的影响,因此采用直流潮流进行分析。事实上,本文基于优化的含约束区间潮流建模和求解方法可以扩展应用到交流潮流方程上。

1 基于区间直流潮流的不确定静态安全分析方法

1.1 区间直流潮流的数学模型

随机系统的安全分析首先根据区间直流潮流

快速得到系统的区间潮流分布。为此,将系统注入功率和网络参数均表示为区间数以表征系统的随机性,因此直流区间潮流的数学描述可以用式(1)表征^[10],其中 $\tilde{\mathbf{B}}$ 为网络的区间电纳矩阵; $\tilde{\mathbf{P}}$ 为节点注入的区间功率,包括负荷和发电机节点功率注入。

$$\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\boldsymbol{\theta}} = \tilde{\mathbf{P}} \quad (1)$$

由于平衡节点的电压相角已知,因此需采用降阶电纳矩阵求解直流区间潮流,如式(2)所示:

$$\tilde{\mathbf{B}}_{N \times N} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{N \times 1} = \tilde{\mathbf{P}}_{N \times 1} - \tilde{\mathbf{B}}_{N \times \text{ref}} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{\text{ref} \times 1} \quad (2)$$

式中: N 为PV和PQ节点所对应的节点编号集合,ref为平衡节点所对应的节点编号集合。令 $\mathbf{B} = \tilde{\mathbf{B}}_{N \times N}$, $\mathbf{P} = \tilde{\mathbf{P}}_{N \times 1} - \tilde{\mathbf{B}}_{N \times \text{ref}} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{\text{ref} \times 1}$ 和 $\boldsymbol{\theta} = \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{N \times 1}$,则区间直流潮流的数学形式可表示为

$$\mathbf{B}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{P} \quad (3)$$

进而可得到系统中支路潮流的分布,如(4)所示:

$$[P_{l-ij}] = \frac{[\theta_i] - [\theta_j]}{[X_{ij}]} \quad (4)$$

式中: $[\bullet]$ 为区间数的符号表达,如区间变量 x ,其上边界为 x^+ ,下边界为 x^- ,则可表达为 $[x] = [x^-, x^+]$ 。

l 为支路编号; i 和 j 分别为支路 l 首末两端节点编号; $[X_{ij}]$ 为支路的区间电抗,可从 $\tilde{\mathbf{B}}$ 获得; $[\theta_i]$ 和 $[\theta_j]$ 为支路 l 两端节点 i 和 j 的区间功率相角表达; $[P_{l-ij}]$ 为支路 l 的区间功率表达。

区间潮流的求解,前人已经做了大量的工作,相关求解方法也很多,如区间高斯消去法^[9],Kraw算子迭代法^[10]以及区间Hull方法^[11],本文采用了区间Hull方法^[11]进行区间潮流的求解,得到的结果也是用区间形式表示的,如式(4)所示,而静态安全分析则是针对多个 $N-1$ 事故的区间潮流计算结果,建立含有区间数的静态安全指标,但由于区间数之间无法直接进行大小比较,因此本文在分层区间静态安全指标的基础上,提出了基于区间可能度的比较和排序方法。

1.2 分层区间静态安全分析评价指标

传统确定性的安全性分析是根据系统 $N-1$ 事故集,计算线路潮流越限程度,然后根据有功行为评价指标^[21]进行大小排序,得到各个事故的安全性分析结果。然而,对于随机系统,网络中的参数(包括节点电压幅值和相角、支路传输功率、节点注入功率和网络结构参数)均为随机量,单个元件开断($N-1$)情况下形成的事故,其有功行为指标为区间形式,该指标体现了不确定情况下有功潮流整体越限的程度。由于单纯采用所有支路的载荷比累加求和,有可能导致越限故障被隐藏。为此,考虑将故

障类型分为3层：

- 第1层，区间直流潮流不收敛 Ω_{s1} ；
- 第2层，区间直流潮流收敛但出现越限 Ω_{s2} ；
- 第3层，区间潮流收敛且不越限 Ω_{s3} 。

对于第1层故障，由于潮流不收敛，直接判定事故最严重，第2层故障严重程度次之，第3层故障严重程度相对较小。因此，其权重排序为 $w_{s1} \gg w_{s2} \gg w_{s3}$ ，且每类中的事故个数分别为 k_1, k_2 和 k_3 。当潮流不收敛时，可令所有支路 $[[P_l]] = P_{l,max}$ 。

不同分层之间的故障可以直接通过权重进行比较，但对于相同分层内的故障，由于权重相同，需要通过区间有功行为指标进行比较，结合故障所处的分层，可得到对于故障 j 的综合评价指标：

$$[L_j] = w_s \sum_{l=1}^m c_l \frac{[[P_{l,j}]]}{P_{l,max}} \quad (5)$$

式中： s 为故障 j 对应的分层； w_s 为其分层权重； $P_{l,j}$ 和 $P_{l,max}$ 分别是支路 l 在故障 j 下的区间功率和功率限值； c_l 为支路的权重系数； m 为支路的条数。

然而，式(5)需要计算区间数的绝对值，引用文献[11]定义的2个区间运算 mag 和 mig ，区间数的绝对值可表示为式(6)–(8)，这里 $[[P_{l,j}]] = [P_{l,j}^-, P_{l,j}^+]$ 。需要说明的是，安全分析均以支路功率最严重情况进行分类，即根据 $\text{mag}([P_{l,j}])$ 判断是否越限。

$$\text{mag}([P_{l,j}]) = \max(|P_{l,j}^-|, |P_{l,j}^+|) \quad (6)$$

$$\text{mig}([P_{l,j}]) = \begin{cases} \min(|P_{l,j}^-|, |P_{l,j}^+|) & 0 \notin [P_{l,j}] \\ 0 & 0 \in [P_{l,j}] \end{cases} \quad (7)$$

$$|[P_{l,j}]| = [\text{mig}([P_{l,j}]), \text{mag}([P_{l,j}])] \quad (8)$$

1.3 基于区间可能度排序的静态安全分析

1.3.1 基于可能度的区间有功行为指标比较

传统确定性的安全分析可直接通过有功行为指标的大小进行排序；但不确定的安全分析，由于评价指标均为区间数，无法直接进行比较，因此首先引入基于可能度的区间有功行为指标进行比较。

设2个区间有功行为指标分别为 $[L_i] = [L_i^-, L_i^+]$ 和 $[L_j] = [L_j^-, L_j^+]$ ，直观上，它们在几何上的位置关系，如图1所示，排除端点重合的情况(这个情况可以看成其他位置关系的特例)，位置关系可分为3种，即

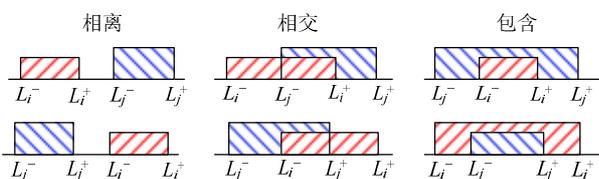


图1 区间数位置关系

Fig. 1 Relationship of two interval number

分离、相交和包含。因此需要寻找变换，将区间数映射成实数，然后利用实数进行大小比较，为此基于可能度的排序方法得到了广泛的应用^[15-16]。

基于可能度比较法的主要思路是根据区间数的位置关系，将区间数比较结果并不是给出大、小和相等的确定性结果，而是得到0到1之间的一个实数。其构造思路如图2所示，将两元区间数映射到二维空间，形成一个矩形区域，利用 $y \geq x$ 与矩形区域围成的面积占总面积的比例作为可能度函数。

$$\Gamma([L_i] \geq [L_j]) = \frac{\iint_{S'} dx dy}{(L_i^+ - L_i^-)(L_j^+ - L_j^-)}, \quad (9)$$

$$S' = \begin{cases} y \geq x \\ L_j^- \leq x \leq L_j^+ \\ L_i^- \leq y \leq L_i^+ \end{cases}$$

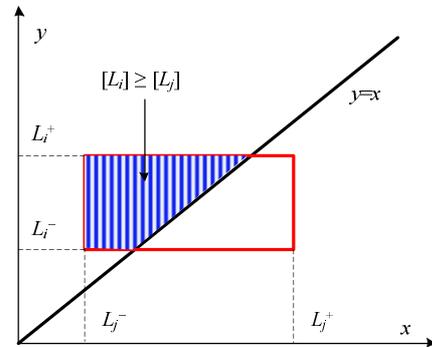


图2 可能度函数的构造思路

Fig. 2 Probability degree function formulation

1.3.2 区间有功行为指标一致性排序

对于系统 $N-1$ 故障安全分析，设共有 n 个事故，可以分别求取每个事故的区间指标，形成由 n 个区间指标组成的有序区间数集合 $L = \{[L_1], [L_2], \dots, [L_n]\} \in \mathbf{IR}^{n \times 1}$ 。而区间静态安全分析最终希望得到区间有功行为指标的排序结果，而区间有功行为指标的可能度比较法以可能度函数的形式给出了2个区间指标比较结果的程度，并未给出明确的大小关系。因此不能采用传统的直接排序方法，文中首先对区间指标集 L 中的区间指标进行两两比较，进而构造一个判断矩阵，根据这个判断矩阵的排序向量进行最终大小的排序。为此，定义几个矩阵：

1) 互补判断矩阵。设 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ，若满足对 $\forall 0 \leq i, j \leq n$ ，有 $0 \leq a_{ij} \leq 1$ ， $a_{ij} + a_{ji} = 1$ 和 $a_{ii} = 0.5$ 。

2) 一致判断矩阵。若 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 为互补判断矩阵，进而对 $\forall 0 \leq i, j, k \leq n$ ($i \neq j \neq k$) 满足 $a_{ij} a_{ik} a_{jk} = a_{ji} a_{ki} a_{kj}$ 。

根据式(9)定义的可能度比较函数，将区间指标按序(即与下标一一对应)进行两两比较，并令 $a_{ij} = \Gamma([L_i] \geq [L_j])$ ，形成区间指标的判断矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times n} =$

$\Gamma(L, \geq) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 。不难验证, 所形成的判断矩阵 A 一定为互补判断矩阵。

下面需要寻找向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 作为 L 的排序向量, 其分量的大小反映了对应区间数的权重大小, w_j 越大, 说明 $[L_j]$ 越重要, 即第 j 个故障最严重。其中 $0 \leq w_j \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。对于一致判断矩阵,

总存在唯一的排序向量与之对应, 而互补判断矩阵则对应的排序向量可能不唯一。这是因为互补判断矩阵 A 不一定是一致的, 即对于 3 个事件 x, y 和 z , 若 x 优于 y , y 优于 z , 但 z 不优于 x , 这说明 3 个事件不满足一致性, 其排序向量不一定唯一。这也是决策者不希望得到的结果, 因此尽可能保证排序结果的一致性是十分必要的。

将互补判断矩阵修正成一致判断矩阵的方法有很多^[19-20], 主要分为基于一致性定义排序法和有序加权平均法 2 类。本文则根据一致性定义, 通过最小二乘优化方法, 得到排序向量。

根据一致性的定义, 可知给定上述互补判断矩阵 A 和排序向量 w , 若排序向量满足式(10), 则 A 一定是一致的。因此建立最小二乘修正模型, 希望用最小的调节量使非一致互补判断矩阵成为一致, 得到的模型(M)如式(11)和式(12)所示, 求解该优化模型可得到互补判断矩阵 A 的排序向量 w 。此外, 不难发现, 当优化模型的目标值为 0 时, 说明 A 为一致判断矩阵。

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_i + w_j}, \quad \forall 1 \leq i, j \leq n \quad (10)$$

$$(M) \begin{cases} \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [a_{ij}(w_i + w_j) - w_i]^2 & (11) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1 & (12) \end{cases}$$

求解上述优化模型得到的排序向量 w , 可作为区间有功行为指标对应的权重值, 进而根据权重值的大小, 可以对有功区间行为指标进行排序。从模型(M)可以看出, 该优化模型的求解复杂性与故障集中元素的个数直接相关。由于文中采用了分层的思想, 因此可对各个分层的故障分别排序, 最终根据层的权重, 得到所有故障的排序结果。

其中第 1 类 Ω_{s1} 中事故潮流不收敛, 因此直接将其作为最严重情况, 不需要参与排序, 可直接设为最严重故障; 对第 2 类 Ω_{s2} 和第 3 类 Ω_{s3} 分别求各自的排序向量 w_1 和 w_2 , 由于 $w_{s1} \gg w_{s2} \gg w_{s3}$, 因此在层次上满足第 1 类中的事故权重整体大于第 2 类, 第 2 类中的事故整体大于第 3 类。每一类内

部的事故元素之间, 则根据排序向量确定其严重程度排序。这样, 将原来一个较大规模的优化问题, 化为 2 个小规模的优化问题, 能够快速得到事故集中事故的安全性排序, 为后续预防控制提供基础。具体的方法流程可见附录图 A1。

2 算例仿真分析

本文在 Matlab 中以文献[11]编制的 Hull 算法区间直流潮流为基础, 求取各个事故下的区间有功行为指标; 利用所提区间数可能度排序方法, 建立了互补判断矩阵的最小二乘问题, 采用 Cplex 内核求得排序向量, 进而得到各个事故进行排序结果(式(5)定义的区间支路功率安全评估指标用 L_a 表示)。

采用 IEEE 9 节点系统(共有 9 个节点和 9 条支路)进行仿真分析, 其中各个节点的注入功率(包括负荷和发电机)在 $\pm 10\%$ 内变化, 而网络参数变化范围为 1%, 首先根据文献[11]的 Hull 算法得到网络的潮流分布如表 1 所示。

节点编号	节点相角/rad	支路编号	支路功率/pu
1	[0, 0]	1-4	[0.106 9, 1.233 1]
2	[0.071 8, 0.270 2]	4-5	[0.038 3, 0.541 1]
3	[0.000 3, 0.176 3]	5-6	[-0.796 0, -0.424 6]
4	[-0.071 1, -0.006 1]	3-6	[0.764 9, 0.935 1]
5	[-0.120 8, -0.009 6]	6-7	[0.073 5, 0.405 8]
6	[-0.044 5, 0.121 5]	7-8	[-0.933 0, -0.587 6]
7	[-0.076 4, 0.105 1]	8-2	[-1.793 0, -1.466 9]
8	[-0.019 9, 0.158 1]	8-9	[0.651 8, 1.087 6]
9	[-0.129 9, -0.011 9]	9-4	[-0.692 0, -0.068 6]

进一步, 分别在网络确定和不确定情况下分析系统的安全性, 为简单说明, 假设每条线路功率传输极限为 2.5 pu, 且式(5)中每条线路的权重因子相同, 当然每条线路的传输极限和权重因子可根据实际情况进行修正, 得到的安全性排序结果如表 2 所示。可以看出, 当不确定性比较小($\pm 10\%$)时, 得到的排序结果与确定性的分析结果基本一致, 其中比较严重的故障均为 8-9, 7-8 和 5-6 开断, 不同的是仅有 3-6 和 9-4 开断故障的严重程度发生了变化, 在不确定情况下 9-4 开断的严重程度要高于 3-6 开断事故。增加节点功率注入的不确定性, 从原来的 $\pm 10\%$, 分别增加到 $\pm 20\%$, $\pm 30\%$ 和 $\pm 40\%$, 分别利用所提的方法对相同故障的安全性进行分析, 得到的结果如表 3 所示(R 代表排序)。结合表 2, 可以发现, 随着不确定性的增加, 相同事故集会有不同的排序结果, 例如对于开断 9-4 事故, 在不确定性较小时, 其排序指标 w 较小, 说明故障不严重, 但

当不确定性较大时，该事故升至第 2，说明严重程度变高；对于开断 8-2 事故则正好相反；而开断 1-4 和 8-9 事故的排序始终没有改变，这说明在各种情况下开断 8-9 相对其他故障总是最严重的，开断 1-4 的故障总是相对最安全的。

表 2 N-1 事故集安全性排序结果
Tab. 2 Security ordering of N-1 contingencies

事故集	确定性潮流		不确定性潮流		
	L_a	排序	$[L_a]$	w	排序
1-4	1.783 0	9	[1.001 1, 2.955 5]	0.013 7	9
4-5	2.560 0	6	[1.669 1, 3.500 9]	0.058 9	6
5-6	2.704 0	3	[2.018 3, 3.500 9]	0.083 8	3
3-6	2.589 9	5	[1.942 3, 3.274 4]	0.054 1	7
6-7	2.520 0	8	[1.841 1, 3.248 9]	0.046 5	8
7-8	2.944 0	2	[2.229 1, 3.672 9]	0.136 4	2
8-2	2.657 0	4	[2.160 6, 3.195 7]	0.061 0	4
8-9	3.488 0	1	[2.628 7, 4.347 3]	0.485 8	1
9-4	2.520 0	7	[1.557 9, 3.579 3]	0.059 8	5

表 3 不同不确定性情况下的 N-1 事故集安全性排序
Tab. 3 Security ordering of N-1 contingencies under different uncertainty probability

事故集	±20%不确定性		±30%不确定性		±100%不确定性	
	w	排序	w	排序	w	排序
1-4	0.060 8	9	0.092 5	6	0.124 0	3
4-5	0.097 9	5	0.111 0	5	0.105 3	5
5-6	0.113 5	3	0.113 1	4	0.092 1	7
3-6	0.073 1	8	0.071 1	9	0.098 1	6
6-7	0.077 1	7	0.087 0	7	0.084 3	8
7-8	0.136 8	2	0.124 7	3	0.107 0	4
8-2	0.077 8	6	0.073 1	8	0.054 8	9
8-9	0.257 7	1	0.200 2	1	0.205 3	1
9-4	0.105 3	4	0.127 4	2	0.128 9	2

为验证排序的正确性，以节点注入不确定量 ±10% 为例，对每个断线事故中节点注入功率随机波动(共 9 个)，采用 5000 次蒙特卡洛随机模拟，每次随机模拟记录式(5)定义的指标，最终得到 45000 次的累积指标量，将其作为评价安全的指标，指标越大说明事故越严重。排序结果如图 3 所示，其结果和表 2 具有一致性，证明了方法的有效性。

其次，由于 IEEE 9 节点系统 N-1 事故后的潮流

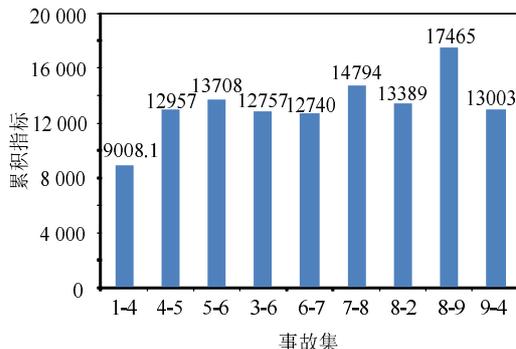


图 3 蒙特卡洛随机模拟排序结果

Fig. 3 Security ordering using Monte Carlo simulation

均收敛，并且没有出现潮流越限的情况。因而采用 IEEE 118 节点系统进行测试，其中节点注入的不确定性为 20%，网络参数的不确定性仍为 1%。式(5)定义的指标根据潮流分布结果的 3 种情况进行分层，以潮流收敛情况为例，此时存在越限和不越限的 2 种情况。

根据图 4 的仿真结果可以看出，某个故障下，可能仅有某少数支路越限，而其他支路未越限，若直接采用累加指标，有可能得到的结果比无越限情况的指标要小，出现“故障隐藏”现象。为此采用分层的思想，得到的结果可将 2 种情况完全分离，使越限故障的指标始终大于不越限故障指标。进而，采用所提方法对 N-1 故障集进行排序，结果如图 5 所示。可以看到，排序结果拥有 3 个层次，潮流不收敛严重程度最大，越限故障次之，最后为不越限故障，层次之间不会出现交错，并且在整体上均按照所提出的可能度排序方法得到故障严重程度的排序。

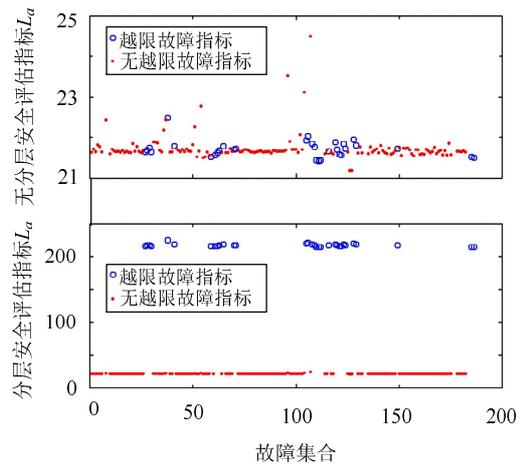


图 4 指标分层与无分层的比较

Fig. 4 Comparison of index L_a with/without hierarchies

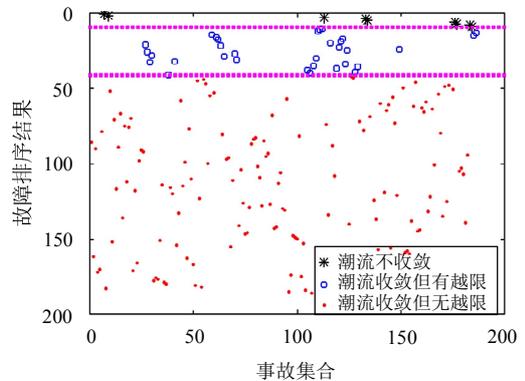


图 5 N-1 故障集的指标分层结果

Fig. 5 Results of hierarchical index for N-1 contingencies

最后，分别采用 IEEE 9、IEEE 30、IEEE 57、IEEE 118 和 IEEE 300 节点系统，考虑节点注入不确定量为 ±10%，扫描每条线路开断为一个事故，形

成故障集,用本文安全分析方法的计算速度进行测试。从附录图 A1 的算法流程可以看出,本文方法主要分为故障集生成、互补判断矩阵建立和排序向量求取,其计算时间分别为 t_C 、 t_M 和 t_V ,总的计算时间 t_T 为三者之和,表 4 的结果表明故障集形成和互补判断矩阵建立占用了大部分计算时间,而一致最小二乘的排序向量求解所用时间不足 1 s。

表 4 不同测试系统计算时间
Tab. 4 Computation time on different tested system s

测试系统	t_C	t_M	t_V	t_T
IEEE-9	0.019 6	0.004 5	0.038 1	0.062 2
IEEE-30	0.090 0	0.105 9	0.044 9	0.240 8
IEEE-57	0.220 8	0.384 5	0.058 3	0.663 6
IEEE-118	1.509 0	2.050 3	0.149 4	3.708 7
IEEE-300	14.473 0	9.787 8	0.495 3	24.756 1

3 结论

本文采用区间方法对含有不确定功率注入的电网进行安全分析,通过 $N-1$ 事故分析,建立区间有功行为指标,并提出了一种区间数之间的可能度比较方法,进而构造了区间指标集的互补判断矩阵。为保证所构建互补判断矩阵的一致性,又提出了以修正互补判断矩阵元素最小化为目标的最小二乘优化技术,从而得到了区间指标集的排序向量。根据排序向量的大小可对指标集进行排序,得到了每种事故严重度的排序结果。采用 IEEE 9 节点系统详细描述的文中所提方法的求解过程,可以得到,随着不确定量的增加,事故严重程度的排序结果有可能随之发生变化。其次,蒙特卡洛随机模拟得到的安全性排序结果与本文所提方法能够得到一致的结果,证明了本文方法的有效性。最后,采用多个大节点系统对本文方法的时间复杂度进行测试,结果表明所提的方法能够快速对故障严重程度进行排序,有望在实际电网中推广和应用。

致谢

本文的研究工作获得了清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室开放基金(SKLD16KZ01)的资助,谨此致谢!

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/volum/current.shtml>)。

参考文献

[1] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
[2] 严剑峰,于之虹,田芳,等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34): 87-94.
Yan Jianfeng, Yu Zhihong, Tian Fang, et al. Dynamic security assessment and early warning system of power system

[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-94(in Chinese).
[3] Scott B, Alsac O, Lvarado F L A. Analysis and computational improvement in preference index ranking algorithm for network [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1985, 7(3): 154-160.
[4] Brandwajn V. Contingency ranking based on severity indices in dynamic security analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 4980-986.
[5] 丁平,李亚楼,徐得超,等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31): 77-82.
Ding Ping, Li Yalou, Xu Dechao, et al. Improved algorithm of fast static security analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 77-82(in Chinese).
[6] Lee J, Kim J H, Joo S K. Stochastic method for the operation of a power system with wind generators and superconducting magnetic energy storages(SMESs)[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(2): 2144-2148.
[7] Villanueva D, Pazos J L, Feijoo A. Probability load flow including wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1659-1667.
[8] 丁涛,崔翰韬,顾伟,等. 基于区间和仿射运算的不确定潮流算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(13): 51-55.
Ding Tao, Cui Haotao, Gu Wei, et al. Uncertain power flow based on interval and affine arithmetic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 51-55(in Chinese).
[9] 王守相,武志峰,王成山. 计及不确定性的电力系统直流潮流的区间算法[J]. 电力系统自动化,2007,31(5): 18-22.
Wang Shouxiang, Wu Zhifeng, Wang Chengshan. Interval algorithm of DC power flow considering uncertainty in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 18-22(in Chinese).
[10] 郑志杰,王守相,赵龙,等. 基于Krawczyk算法的直流潮流区间算法[J]. 电力系统自动化,2012,36(20): 50-53.
Zheng Zhijie, Wang Shouxiang, Zhao Long, et al. An interval algorithm for DC power flow calculations based on Krawczyk algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 50-53(in Chinese).
[11] 丁涛,郭庆来,柏瑞,等. 采用带预处理的区间Hull算法求解区间直流潮流[J]. 电力系统自动化,2014,38(3): 130-136.
Ding Tao, Guo Qinglai, Bo Rui, et al. An interval method for DC power flow using interval Hull algorithm with preconditioning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 130-136(in Chinese).
[12] 徐辉,焦扬,蒲雷,等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. 电网技术,2017,41(11): 3590-3597.
Xu Hui, Jiao Yang, Pu Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590-3597(in Chinese).
[13] 汪超群,韦化,吴思缘. 计及风电不确定性的随机安全约束机组组合[J]. 电网技术,2017,41(5): 1419-1427.
Wang Chaoqun, Wei Hua, Wu Siyuan. Stochastic-security-constrained unit commitment considering uncertainty of wind power[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1419-1427(in Chinese).
[14] 王守相,赵玮,王成山,等. 计及不确定性的预想事故自动选择区间方法[J]. 电力系统自动化,2007,31(20): 27-32.
Wang Shouxiang, Zhao Wei, Wang Chengshan, et al. Automatic

- contingency selection based on interval method considering uncertainty of generation and load condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 27-32(in Chinese).
- [15] 徐泽水, 达庆利. 区间数排序的可能度法及其应用[J]. 系统工程学报, 2003, 18(1): 67-70.
- Xu Zeshui, Da Qingli. Possibility degree method for ranking interval numbers and its application[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(1): 67-70 (in Chinese).
- [16] 张全, 樊治平, 潘德惠. 不确定性多属性决策中区间数的一种排序方法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 5(5): 129-133.
- Zhang Quan, Fan Zhiping, Pan Dehui. A ranking approach for interval numbers in uncertain multiple attribute decision making problems [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1999, 5(5): 129-133(in Chinese).
- [17] Tanino T. Fuzzy preference ordering in group decision making [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1984(12): 4117-131.
- [18] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵的一种排序方法[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(1): 47-50.
- Xu Zeshui. A method for priorities of triangular fuzzy number complementary judgment matrices[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(1): 47-50(in Chinese).
- [19] 冯向前, 魏翠萍, 胡钢, 等. 区间数判断矩阵的一致性研究[J]. 控制与决策, 2008, 23(2): 182-186.
- Feng Xiangqian, Wei Cuiping, Hu Gang, et al. Consistency of interval judgment matrix[J]. Control and Decision, 2008, 23(2): 182-186(in Chinese).
- [20] 周礼刚, 陈华友. 两类区间数判断矩阵的一致性研究[J]. 运筹与管理, 2005, 14(4): 47-51.
- Zhou Ligang, Chen Huayou. Research on consistency of two interval judgment matrices[J]. Operation and Management, 2005, 14(4): 47-51(in Chinese).
- [21] 陈刚, 田志平. 基于 FIS 和 RBFN 的预想事故自动选择[J]. 电力系统自动化学报, 2011, 23(5): 80-85.
- Chen Gang, Tian Zhiping. Automatic contingency selection based on fuzzy inference system and radial basis function network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(5): 80-85(in Chinese).



鲁广明

收稿日期: 2018-01-03。

作者简介:

鲁广明(1978), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统在线安全分析、电力市场现货交易校核、电网运行趋势分析, E-mail: lugm@epri.sgcc.com.cn;

丁涛(1986), 男, 通信作者, 副教授, 研究方向为新能源电力系统经济运行与优化调度、能源互联网优化运行和微网经济运行与弹性分析, E-mail: tding15@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

本文方法的算法流程图如下：

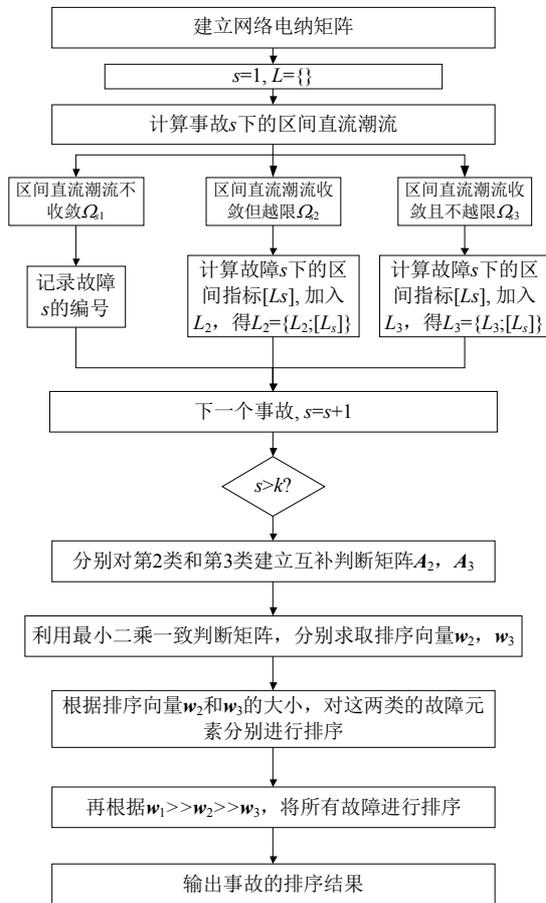


图 A1 区间安全性分析流程

Fig. A1 Flow chart of interval security analysis