

DOI: 10.7667/PSPC180775

## 基于抽样盲数的线路 $N-1$ 静态安全评估

刘瑶<sup>1,2</sup>, 彭书涛<sup>2</sup>, 张志华<sup>2</sup>, 夏楠<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 为了研究负荷和新能源出力不确定性对线路静态安全分析结果的影响, 提出了一种基于抽样盲数的线路静态安全评估方法。首先介绍了将持续负荷曲线和新能源持续出力曲线抽象成为抽样盲数的抽样方法, 并将负荷抽样盲数和新能源出力抽样盲数的样本进行相互组合得到多个待分析场景。在此基础上, 分析每个场景下发生线路  $N-1$  时是否有其余线路或元件过载, 计算发生过载情况的场景概率之和便可得到所研究网络不满足  $N-1$  准则的概率。最后, 对这些存在不满足  $N-1$  准则风险的线路依据风险概率进行排序得到所研究电网薄弱环节。结合 7 节点交直流电网算例对所提出的方法进行了详细说明, 计算结果表明抽样盲数方法可用于线路  $N-1$  静态安全评估, 从而实现对电网的多维度评价。

**关键词:** 静态安全评估; 抽样盲数; 不确定性;  $N-1$  安全准则

### Static security assessment according to $N-1$ criterion for transmission lines based on sampled-blind-number

LIU Yao<sup>1,2</sup>, PENG Shutao<sup>2</sup>, ZHANG Zhihua<sup>2</sup>, XIA Nan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to research the static security assessment result for transmission lines considering the uncertainty of loads and Distributed Generations (DGs) output power, a Sampled-Blind-Number (SBN) based static security assessment for transmission lines is put forward. Firstly, the sampling method for the static security assessment is described, in which the SBNs of a load and the output power of a DG are calculated from the annual load duration curve and the annual output power duration curve, respectively. The scenarios for analysis are furnished from combining the corresponding SBNs of the loads and DGs output power. On this basis, whether the loading of the other transmission line or grid equipment under the  $N-1$  assessment is over its rated value is analyzed. The probability of being against the  $N-1$  criterion for grid is obtained as the summation of the probabilities of the scenarios which are with overloaded situations. Finally, the transmission lines with risk of being against  $N-1$  criterion are ranked by the probability of risk to find the vulnerable spots of grid. An example is given to explain the proposed approach and the simulation result shows SBN method is feasible for  $N-1$  static assessment and suitable for the multi-dimension evaluation for grid.

This work is supported by Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2017ZDCXL-GY-02-03).

**Key words:** static security assessment; sampled-blind-number (SBN); uncertainty;  $N-1$  criterion

## 0 引言

电网静态安全分析是电力系统安全分析的一个重要组成部分, 其实质是电力系统运行的稳态分析问题, 不涉及电力系统的动态过程。电网静态安全

分析可以进行事故预想, 从而校验某输电系统承受事故的能力, 对于及时发现电网缺陷并采取措施保障电网安全运行具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

$N-1$  安全校验是最常见的静态安全评估方法之一, 在操作过程中对各个元件因故障而断开的概率不予考虑, 以逐一断开某一个元件的方式设定场景, 校验系统在某种场景下是否可以保持稳定运行和正常供电, 且系统中其他元件不产生过负荷的现象,

基金项目: 陕西省重点研发计划项目资助 (2017ZDCXL-GY-02-03)

电压和频率都在允许范围内<sup>[5-7]</sup>。

已有大量成果使用了 N-1 校验方法, 对于提高电网安全稳定运行水平发挥了重要作用<sup>[8-11]</sup>, 但以上成果均基于确定的负荷和电源出力对电网进行评估, 而未考虑到实际场景中负荷和电源出力情况的不确定性。因此, 对于不满足 N-1 准则的电网和设备, 已有成果无法评估其风险程度; 对于满足 N-1 准则的电网和设备, 已有成果无法评估其安全裕度。

在考虑到不确定性的电网静态安全分析领域, 一些成果将负荷和新能源发电出力的数据等效为正态分布<sup>[12-17]</sup>, 利用 Gram-Charlier 级数展开来处理不确定数据, 对模型进行了简化。但是实际当中负荷和新能源出力却未必可以近似认为是正态分布。以上成果对于不确定性数据的处理利用了正态分布随机变量的线性组合仍然是正态分布的特点, 达到了简化计算的目的。但是, 静态安全分析中的电力系统具有明显的非线性, 因此正态分布的上述优越性无法得到体现。

另一些成果采用随机抽样的方法, 即蒙特卡洛法进行风险评估<sup>[18-20]</sup>, 此法处理数据量过大, 无法保证遍历所有可能的场景, 并且其每一个样本是等概率的, 无法反映该样本对应的场景出现的概率信息。

盲数是用来表达和处理具有多种不确定性的较复杂信息的数学工具, 没有仅适用于某一或某些概率分布模型的限制, 对盲数进行离散抽样后的抽样盲数便于进行数值计算分析, 且在研究不确定性传递中, 对于非线性系统仍然可行<sup>[21-22]</sup>。而且, 抽样盲数是一种基于一定目的性的抽样, 其目的性体现在抽取的每个场景都包含了该场景概率的信息, 无需大量样本就可以客观地反映出所研究对象的不确定性。

对抽样盲数法的研究趋于成熟, 此法已被成功应用于负荷预测<sup>[23]</sup>、煤矿瓦斯突出预测等领域<sup>[24]</sup>, 本文论述将其应用于线路 N-1 静态安全评估的方法。

## 1 抽样盲数

一个具有不确定性随机变量  $u$ ,  $p(u)$  为其概率密度函数, 如图 1 所示。

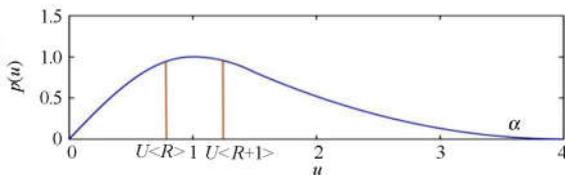


图 1  $u$  的概率密度函数

Fig. 1 Probability density function of  $u$

将随机变量  $u$  分成  $Q$  段区间, 其中第  $R$  段的范围为:  $[u_{<R>}, u_{<R+1>}]$ 。设  $u$  取值在第  $R$  段间的概率为  $P_R$ , 并且有

$$P_R = \int_{u_{<R>}}^{u_{<R+1>}} p(u) du \quad (1)$$

$u$  在第  $R$  段区间内的“值”  $U_R$  定义为

$$U_R = \frac{\int_{u_{<R>}}^{u_{<R+1>}} up(u) du}{P_R} \quad (2)$$

用区间的值表示的盲数为抽样盲数, 所分的段数  $Q$  称为该抽样盲数的阶数。

可以将一个抽样盲数表示为一个  $2 \times Q$  的矩阵, 对于随机变量  $u$ , 有

$$\tilde{u}^{<Q>}(U, P) = \begin{bmatrix} U_1^{<Q>} & U_2^{<Q>} & \dots & U_Q^{<Q>} \\ P_1^{<Q>} & P_2^{<Q>} & \dots & P_Q^{<Q>} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $(U_R^{<Q>}, P_R^{<Q>})$  为抽样盲数  $\tilde{u}^{<Q>}$  的第  $R$  个样本, 称  $U_R^{<Q>}$  为第  $R$  个样本的值,  $P_R^{<Q>}$  为  $u$  在第  $R$  段区间内取值的可能性, 称为第  $R$  个样本的概率, 样本序号  $R$  一般按照  $U_R$  从大到小的顺序排列。在  $(U, P)$  平面上抽样盲数各个样本的分布图称为该抽样盲数的谱图。

对于抽样盲数  $\tilde{u}^{<Q>}$ , 显然有

$$\sum_{R=1}^Q P_R^{<Q>} = 1 \quad (4)$$

下面, 以 1 年内评估、采用  $n$  阶盲数表示负荷或新能源出力为例, 说明抽样盲数的使用方法。

以  $T$  为间隔 ( $T > 1\% \times 365$ ), 以抽样后的下围面积与实际年持续负荷曲线或新能源持续出力曲线的下围面积的偏差最小为目标函数。进行下列迭代过程, 如图 2。

抽样时可采用最大值抽样、均值抽样和最小值抽样三种方式。其中: 最大值抽样即区间的值为该区间取值从大到小排序在前 1% 的值的平均值, 获得的抽样盲数称为极大盲数; 均值抽样为该区间平均值, 获得的抽样盲数称为平均盲数; 最小值抽样是区间的值为该区间取值从大到小排序在后 1% 的值的平均值, 获得的抽样盲数称为极小盲数。

在遍历所有抽样边界值所得到的全部抽样方案后, 比较各种抽样方案的目标函数, 取目标函数最小的为最终抽样方案。

最后, 根据 1 年持续负荷曲线/新能源持续出力预测曲线得到的  $n$  阶抽样盲数对应的  $n$  个区间分别为:  $[1, a_1)$ 、 $[a_1, a_2)$ 、 $[a_2, a_3)$ 、 $\dots$ 、 $[a_{n-1}, 365)$ 。

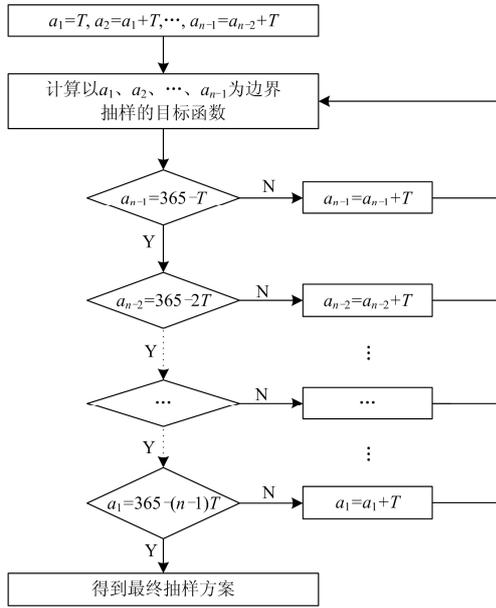


图 2 设定抽样区间边界的过程流程图

Fig. 2 Flow chart of sampling interval boundaries determining

## 2 线路 N-1 静态安全评估

采用抽样盲数反映网络中的所有负荷和新能源电源出力，根据持续负荷曲线和新能源电源持续出力曲线，分别将它们表示成 1 阶(确定)或 2~5 阶(不确定)抽样盲数，形成抽样样本。

将各个样本相互组合得到各种分析场景，作为线路 N-1 静态安全评估的输入。

对于每一种组合，将该组合对应的各个抽样盲数的区间值作为此场景下负荷和新能源出力的值，进行线路 N-1 校核。若任意一条线路开断后，剩余部分运行指标仍能满足给定要求而不出现过负荷、系统解列或线路过载等情况，则认为相应场景通过 N-1 校验；否则未通过 N-1 校验。该组合的区间概率为该组合对应的各个输入盲数区间概率的乘积，即条件概率。

遍历所有组合场景后，计算未通过 N-1 校验的场景概率之和  $P_N$ ，该概率作为不满足静态安全的概率，显然， $P_N$  越大则不满足 N-1 准则的可能性越高。

与传统的静态安全评估方法相比，基于抽样盲数的 N-1 线路静态安全评估方法可以考虑到高峰负荷和新能源出力在全年出现的概率情况，所得到的 N-1 分析结果能体现年度高峰负荷和新能源出力的概率，即在该概率水平下才会出现不满足 N-1 准则的情况，而在其余时段均能满足 N-1 准则。如果认为该网不满足 N-1 要求，就可安排资金进行改造；若考虑到实际当中极端情况出现的低概率性，立即安排改造便会造成一定的资金浪费。

因此，考虑负荷和新能源出力不确定性的 N-1 静态安全分析，可以设置一个可以接受的概率阈值  $P_{set}$ ，只有未通过 N-1 校验的概率高于此阈值时才考虑改造。

若线路满足 N-1 静态安全准则，给定风险概率的容忍阈值，将反映不确定性的各个抽样盲数的幅值等比例放大或缩小，直至风险概率达到容忍值，则可以此时放大的比例作为反映安全裕度的参数，该参数越大则安全裕度越大。

对于不满足 N-1 静态安全准则的设备，按风险概率从大到小的顺序将存在静态安全风险的设备遴选排列出来，它们就是所分析交直流混联电网的薄弱环节，其薄弱程度从大到小排列。对于满足 N-1 静态安全准则的设备，按安全裕度从小到大的顺序将各个设备排列出来，就反映出它们的薄弱程度排序。

综上所述，可以给出所分析交直流混联电网输电线路按薄弱程度的排序结果，为指导电网建设和改造提供依据。

上述分析过程可用流程图如图 3。

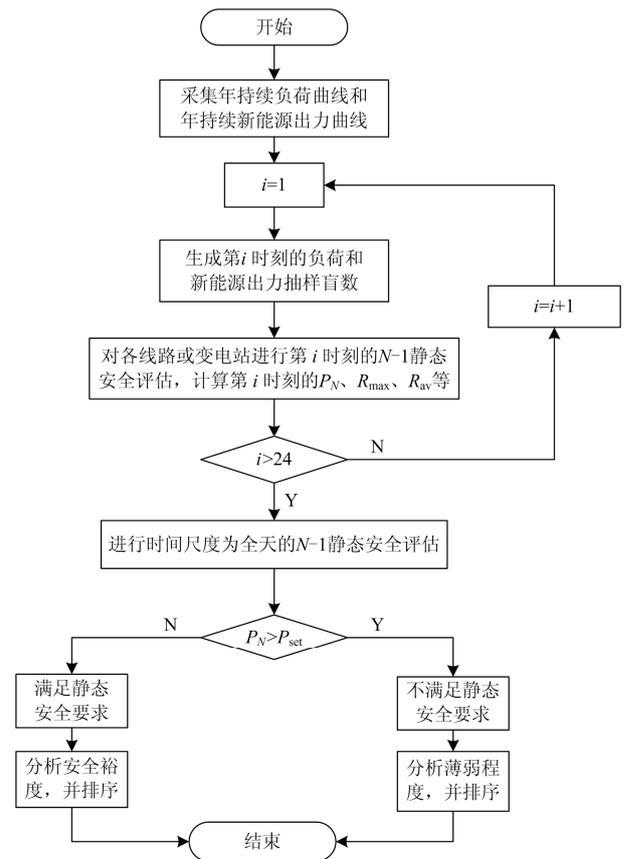


图 3 基于抽样盲数的 N-1 静态安全评估流程

Fig. 3 Flow chart of a SBN based N-1 static security assessment

### 3 算例

#### 3.1 算例描述

本节以 EPRI7 节点交直流系统为基础的算例来说明采用基于抽样盲数的 N-1 静态安全评估方法, 电网网架结构见图 4。

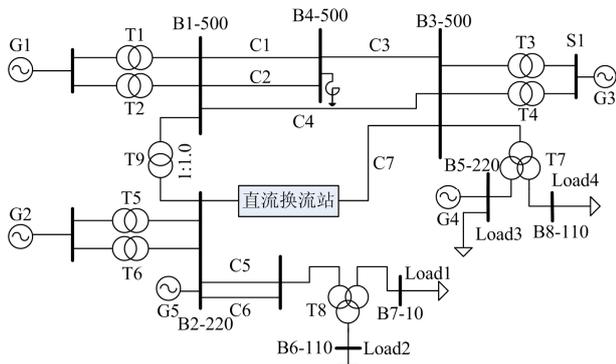


图 4 基于 EPRI 七节点的电网网架

Fig. 4 Grid architecture based on EPRI 7-node model

图 4 所示网络中共有 6 条交流输电线 C1—C6, 一条输送容量为 1 200 MW 的直流线路 C7 和两个等值降压变电站(分别为 500 kV 和 220 kV)。其中降压变电站采用了简化处理, 以一台主变进行等值模拟。机组出力 and 负荷情况如表 1 所示。

表 1 机组出力和负荷参数表

Table 1 Parameters of generator output and load

节点编号	发电机类型	发电机有功出力/MW
G1	固定火电	1 500
G2	固定火电	1 400
G3	平衡机组	—
G4	固定风电	20
G5	变动风电	13.45~53.30
节点编号	负荷类型及电压等级/kV	有功负荷/MW
Load1	10 kV 变动负荷	10.70~32.60
Load2	110 kV 变动负荷	88.70~220.33
Load3	220 kV 固定负荷	1 200
Load4	110 kV 固定负荷	600

如表 1 所示, 模型中三绕组变压器 T8 所在的 220 kV 变电站存在 3 个变量, 其中 1 个变量为并入变电站 110 kV 母线上的风力发电厂 G5 的出力值, 另外两个变量是 10 kV 负荷节点 Load1 和 110 kV 负荷节点 Load2 的负荷值。

基于所记录的上年度全年上午 10 时的 10 kV 负荷(Load1)和 110 kV 负荷(Load2)数据(持续负荷曲

线), 再根据基于电力弹性系数法进行的负荷发展趋势预测, 乘以系数 1.1 得到今年上午 10 时的负荷预测数据(预测持续负荷曲线)如图 5 所示, 可见其负荷值分别在 10.70~32.60 MW 和 88.70~220.336 MW。

另外, 图 6 为所记录的风力发电厂 G5 上年度全年上午 10 时的持续出力曲线, 可见其出力值在 13.45~53.30 MW。

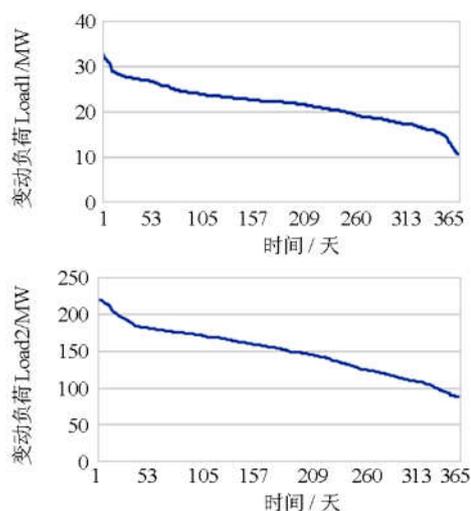


图 5 考察年上午 10 时 load1 和 load2 的年预测持续负荷曲线

Fig. 5 Forecasted annual load duration curve at 10 a.m. of load1 and load2

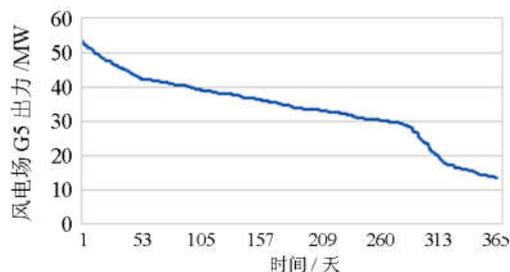


图 6 考察年上午 10 时风电场 G5 的年预测持续风电场出力曲线

Fig. 6 Forecasted annual output power duration curve of a wind farm at 10 a.m. of G5

根据年预测持续负荷曲线, 用 3 阶极大盲数(即该区间取值从大到小排序在前 1% 的值的平均值)作为区间的值来反映负荷的不确定性, 各区间概率为落入区间的点数(也即天数)/365。计算可得负荷 Load1 和 Load2 负荷盲数  $\check{L}_1^{<3>}$ 、 $\check{L}_2^{<3>}$  分别为

$$\check{L}_1^{<3>} = \begin{bmatrix} 32.50 & 26.25 & 18.25 \\ 0.08 & 0.69 & 0.23 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{L}_2^{<3>} = \begin{bmatrix} 219.96 & 178.50 & 124.27 \\ 0.11 & 0.58 & 0.31 \end{bmatrix}$$

根据风电场的年持续出力曲线,用4阶极小盲数(即该区间取值从大到小排序在后1%的值的平均值)反映风电场出力的不确定性,即各区间的取值采用概率占1%(即4d)的最小取值的均值,各区间概率为落入区间的点数(也即天数)/365。得到的风电场G5的出力盲数 $\tilde{F}^{<4>}$ 为

$$\tilde{F}^{<4>} = \begin{bmatrix} 50.03 & 36.77 & 22.72 & 13.65 \\ 0.14 & 0.45 & 0.23 & 0.18 \end{bmatrix}$$

### 3.2 算例结果

由于所研究系统中线路较多,本文选取500kV交流线路C3、C4和220kV交流线路C6进行具体分析,如表2所示。

表2 所研究线路参数表

Table 2 Parameters of the studied transmission lines

线路	电压等级/ kV	热稳极限/ MW	线路型号	可能引起所研究 线路过载的 故障线路编号
C3	500	1 526	LGJ-4×400	C4
C4	500	1 526	LGJ-4×400	C3
C6	220	230	LGJ-240	C5

经过PSASP软件的仿真分析,线路C3与线路C4具有完全对应的相关关系。断开线路C3只可能造成线路C4过载,而会引起线路C4过载的情况只可能是线路C3故障(将C3和C4交换位置,同样成立)。因此可以得到考察年上午10时,断开线路C3后的N-1静态安全评估结果。结果如表3和图7所示。

表3 10时线路C3开断后全网不满足静态N-1安全评估场景

Table 3 Unsafe scenarios of N-1 static security risk assessment of C3 cut-off situation at 10 a.m.

负荷 load1(L1 <sup>&lt;3&gt;</sup> )/MW		负荷 load2(L2 <sup>&lt;3&gt;</sup> )/MW		风电出力 G5(F2 <sup>&lt;4&gt;</sup> )/MW		线路 C4 载荷	场景		
幅值	概率	幅值	概率	幅值	概率		概率		
32.50	0.08	178.50	0.58	50.03	0.14	1 537.80	0.006 496		
				50.03	0.14	1 592.48	0.003 472		
		124.27	0.31	36.77	0.45	1 579.16	0.011 160		
				22.72	0.23	1 565.04	0.005 704		
26.25	0.69	178.50	0.58	13.65	0.18	1 555.92	0.004 464		
				50.03	0.14	1 544.12	0.056 028		
		124.27	0.31	36.77	0.45	1 539.77	0.180 090		
				50.03	0.14	1 598.78	0.029 946		
18.25	0.23	178.50	0.58	36.77	0.45	1 585.47	0.096 255		
				22.72	0.23	1 571.35	0.049 197		
		124.27	0.31	13.65	0.18	1 562.23	0.038 502		
				50.03	0.14	1 552.34	0.018 676		
50.03	0.45	36.77	0.45	1 539.00	0.060 030				
		50.03	0.14	1 606.83	0.009 982				
						50.03	0.45	1 593.52	0.032 085
不通过 N-1 校验概率 $P_N$							0.602 087		

注:因篇幅限制,满足N-1静态安全评估的场景未在表3中列出。

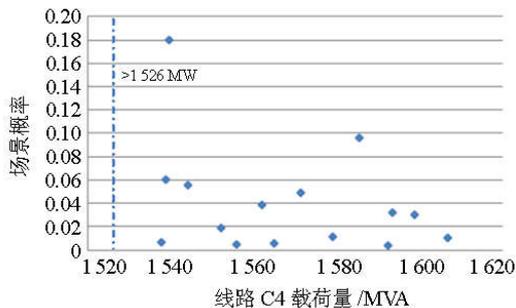


图7 考察年上午10时的线路C4载容量抽样盲数

Fig. 7 SBN of transmission line C4 load capacity at 10:00 a.m.

由图7和表3可知,考察年上午10时,断开线路C3后的36个组合场景中,在15个场景条件下线路C4载荷超过热稳极限1526MW,发生了过载情况,这些场景的概率和 $P_N$ 即为线路C3不通过线路N-1校验的概率,为0.602087。

同样,可得到C4不通过N-1校验的概率为0.0713,C6不通过N-1校验的概率为0.01727。将不通过N-1校验的概率按照从大到小排列可得到所研究网络在考察年上午10时的薄弱环节薄弱度排序为C3、C4、C6。

可按照相同方法得到考察年其他时间的N-1静态评估结果,列出如表4所示。

表4 考察年全年N-1静态安全评估结果

Table 4 Results of N-1 static security risk assessment of all day

线路编号	C4	C3	C6
不满足N-1时刻	10、11	10、11、18	10
不满足N-1概率	0.093 5	0.641 5	0.017 27
以全年为尺度评估不满足N-1概率	0.003 9	0.026 3	0.000 7

由表4,可得全年此电网的薄弱环节薄弱程度从大到小排序为C3、C4、C6。若设置可接受(即不需安排改造)的阈值为0.005,则在以全年为尺度的评估结果下,只有线路C3需要进行改造;若将阈值设置为0.003,则需要改造C4、C3两条线路。由于C6线路不满足N-1的概率极低,可暂不安排改造。根据所研究电网具体情况可以进行阈值的设置与调整,决定进行改造的线路或其他电网设备。

对于全部场景都满足N-1安全校验的线路,如C1(或C2),则排列在薄弱程度排序的末尾。

另外,经过仿真分析,当直流线路C7发生故障时,连接500 kV母线B1和220 kV母线B2的变压器T9一定过载,即不满足N-1校验的概率为1,可知直流线路C7在所研究网络中十分重要,其发生故障会造成较多交流线路出现问题,因此直流线路C7是影响电网安全的重要因素。在本系统中,变压器T9或直流线路C7为必须安排改造环节。

为了综合考虑,在直流线路等于或大于两条的系统中,可将直流线路按照影响范围排列,从而评估直流线路对整个交流系统的重要性。

### 3.3 算例分析

传统N-1静态安全分析方法采用最不利场景进行N-1准则校验,若不满足最不利场景则直接判定为不满足N-1要求。但在实际中最大负荷不是年度一直出现的,能平衡部分负荷的新能源机组出力也是变化的,因此传统的N-1静态分析方法有一定的局限性。

本文负荷抽样盲数和风电场抽样盲数的值分别采用区间1%最大值和最小值计算,更接近电网实际,结算结果也更符合实际。这样的分析结果既符合实际情况,又能有效减少不必要的改造升级工作。

## 4 结论

在静态安全分析中,采用具有多个优点的抽样盲数来反映负荷和新能源电源出力的不确定性,能够得出所研究系统不满足N-1静态安全准则的概率。对于存在不满足N-1准则风险的情形,可以得

出不满足N-1准则的程度,将存在风险的情形按照不满足N-1准则的概率从大到小进行排列,可得到所研究系统中薄弱环节的薄弱程度排序;对于全部满足N-1准则的情形,可以得出静态安全裕度,按照安全裕度大小排列,可得到所研究电网设备安全程度的排序。

因此基于抽样盲数方法的N-1静态安全评估结果,可以更加经济合理地安排线路或设备改造,避免了对发生概率极小的某一故障进行预防控制,为电网建设提供了帮助。而且抽样盲数方法适用于任意概率分布函数,能够进行非线性处理,适合于通过软件编程实现数值分析,计算易于实现。

### 参考文献

- [1] BALU N, BERTRAM T, BOSE A, et al. On line power system security analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(2): 262-282.
- [2] NAOTO Y, MUHAMMAD A, YUTAKA S, et al. Robust power system security assessment under uncertainties using bi-level optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 352-362.
- [3] 方勇杰,王胜明,徐泰山,等.基于流程组态的电力系统安全稳定分析并发计算[J].电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 92-98.  
FANG Yongjie, WANG Shengming, XU Taishan, et al. Concurrent computing architecture for power system security stability analysis based on process configuration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 92-98.
- [4] 刘若溪,张建华,吴迪.基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J].电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.  
LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.
- [5] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003:90-91.
- [6] 刘健,徐精求,董海鹏.配电网静态安全分析[J].电力系统自动化, 2003, 27(17): 26-30.  
LIU Jian, XU Jingqiu, DONG Haipeng. Static security assessment of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 26-30.
- [7] 荆朝霞,李晓波,邬志峰,等.一种综合考虑馈线和主变约束的配电网主变N-1校验方法[J].电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 111-117.  
JING Zhaoxia, LI Xiaobo, WU Zhifeng, et al. A method of main-transformer N-1 verification for distribution network considering feeder and main-transformer constraints[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 111-117.
- [8] 潘凯岩,谭大帅,赵勇,等.地区电网计及自备投的N-1静态安全分析快速计算方法[J].电力系统自动化,

- 2015, 39(24): 122-128.
- PAN Kaiyan, TAN Dashuai, ZHAO Yong, et al. A fast computing method of  $N-1$  in static analysis considering BATS in regional power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 122-128.
- [9] 杨晓梅, 赵洽, 归三荣, 等. 基于线路分段负荷转移的中压配电系统  $N-1$  校验[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(8): 66-72.
- YANG Xiaomei, ZHAO Han, GUI Sanrong, et al.  $N-1$  verification of distribution system based on subsection load transfer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(8): 66-72.
- [10] 傅旭, 王锡凡, 解利斌. 考虑  $N-1$  静态安全的电力系统最大负荷能力计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 6-10.
- FU Xu, WANG Xifan, XIE Libin. A new method of calculating maximum load-ability of power system considering  $N-1$  static security[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 6-10.
- [11] 肖骏, 贡晓旭, 王成山. 配电网最大供电能力与  $N-1$  安全校验的对比验证[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 78-79.
- XIAO Jun, GONG Xiaoxu, WANG Chengshan. Comparative research between total supply capability and  $N-1$  security verification for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 78-79.
- [12] 刘健, 徐精求, 董海鹏. 配电网概率负荷分析及其应用[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 67-70.
- LIU Jian, XU Jingqiu, DONG Haipeng. Probabilistic load flow analysis of distribution network and its applications[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 67-70.
- [13] 刘怡芳, 张步涵, 李俊芳, 等. 考虑电网静态安全风险的随机潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 49-64.
- LIU Yifang, ZHANG Buhuan, LI Junfang, et al. Probabilistic load flow analysis considering static security risk of power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 49-64.
- [14] 傅旭. 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 120-124.
- FU Xu. Static security preventive control considering uncertainty factors for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 120-124.
- [15] DONG Lei, ZHANG Chuancheng, YANG Yihan, et al. Improvement of probabilistic load flow to consider network configuration uncertainties[C] // Proceedings of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 27-31, 2009, Wuhan, China: 1-5.
- [16] WILLIAMS T, CRAWFORD C. Probabilistic load flow modeling comparing maximum entropy and Gram-Charlier probability density function reconstructions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 272-280.
- [17] KLOUBERT M, REHTANZ C. Enhancement to the combination of point estimate method and Gram-Charlier Expansion method for probabilistic load flow computations[C] // Proceedings of IEEE Manchester Power Tech Conference, June 18-22, 2017, Manchester, UK: 1-6.
- [18] DENG Weisi, ZHANG Buhuan, DING Hongfa, et al. Risk-based probabilistic voltage stability assessment in uncertain power system[J]. Energies, 2017, 10(2): 180-198.
- [19] 张美霞, 陈洁, 杨秀, 等. 考虑风光和负荷随机性的微网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 101-107.
- ZHANG Meixia, CHEN Jie, YANG Xiu, et al. Three-phase power flow calculation for micro-grid with volatile wind power, photovoltaic power and load[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 101-107.
- [20] MARSADK M, MOHAMED A, NORPIAH Z M, et al. Risk of static security assessment of a power system using non-sequential Monte Carlo simulation[J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 11(2): 300-307.
- [21] 刘开第, 吴和琴. 盲数的概念、运算与性质[J]. 运筹与管理, 1998, 7(3): 14-17.
- LIU Kaidi, WU Heqin. The concept, operation and properties of blind number[J]. Operations Research and Management Science, 1998, 7(3): 14-17.
- [22] 胡美玉, 胡志坚. 多场景技术与盲数相结合的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 21-27.
- HU Keyu, HU Zhijian. Distribution system reliability evaluation based on multiple scenarios technique and blind number[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 21-27.
- [23] 刘健, 朱继萍, 程红丽. 相关因素不确定性对负荷预测结果的影响[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 20-24.
- LIU Jian, ZHU Jiping, CHENG Hongli. Effects of uncertainty in related elements to load forecasting results[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 20-24.
- [24] 王晓路, 卢建军. 基于抽样盲数的煤与瓦斯突出不确定性预测[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 28(2): 227-232.
- WANG Xiaolu, LU Jianjun. Sample blind number based forecasting of coal and gas outburst with uncertainties[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2010, 28(2): 227-232.

收稿日期: 2018-06-28; 修回日期: 2018-11-23

作者简介:

刘瑶(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交直流混联电力系统安全稳定分析; E-mail: liuyaoseu@163.com

彭书涛(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统分析计算研究, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析; E-mail: Powersys@263.net

张志华(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化技术。E-mail: zzhtsky123@163.com

(编辑 葛艳娜)