

DOI: 10.7667/PSPC160004

# 多场景技术与盲数相结合的配电系统可靠性评估

胡美玉, 胡志坚

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了提高考虑可靠性原始参数不确定性的配电系统可靠性评估效率, 提出了多场景技术与盲数理论相结合的可靠性评估算法。该算法首先分析配电网元件可靠性参数的变化过程, 提出了通过浴盆形曲线函数获得可靠性参数初始盲数区间和可信度的方法。为降低可靠性评估的复杂性, 采用后向场景缩减法对盲数场景进行缩减, 利用最少的场景最大程度地拟合可靠性参数的不确定性。最后提出了一种新的可靠性评估算法, 采用顺向层级矩阵传递元件块故障对下游负荷可靠性指标的影响, 采用逆向层级矩阵传递隔离开关块故障对上游负荷可靠性指标的影响。算例仿真结果表明, 上述方法有效可行。

**关键词:** 多场景技术; 盲数理论; 浴盆形函数; 双向层级矩阵; 可靠性评估

## Distribution system reliability evaluation based on multiple scenarios technique and blind number

HU Meiyu, HU Zhijian

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In order to improve distribution system reliability evaluation efficiency with original parameter uncertainty taken into consideration, a method based on multiple scenarios technique and blind number is proposed. Firstly, the change process of reliability parameters on distribution system component is analyzed and the method to obtain the initial blind intervals and credibility by bathtub-shaped curve function is proposed. In order to reduce the complexity of the reliability assessment, the backward scenarios reduction technique is utilized to cut down the degree of blind number scenarios, with which a minimum scenario is used to fit reliability parameters uncertainty to the maximum extent. Finally, a new algorithm of reliability assessment is proposed, of which the sequential hierarchy matrix is used to transfer the impact of element block faults on the downstream load reliability indexes while the reverse hierarchy matrix is used to transfer the impact of disconnecter block faults on upstream load reliability indexes. The reliability assessment results of the example show that the algorithm is effective and feasible.

This work is supported by the Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20110141110032).

**Key words:** multiple scenarios technique; blind number theory; bathtub-shaped function; bidirectional hierarchy matrix; reliability assessment

## 0 引言

电力系统可靠性是对系统按照可接受的质量标准和所需数量不间断地向用户供应电力和电能能力的度量。可靠性评估能为电网规划和设计提供依据, 对电力系统的最佳综合效益分析具有重要的意义。

大多数配电系统可靠性评估算法广泛采用指数

型可靠性模型, 认为电气元件的故障率为常数<sup>[1-4]</sup>。实际上, 元件的故障率受环境污染、元件维护水平、元件使用年龄和内部老化等诸多因素协同影响<sup>[5]</sup>, 其故障率一般服从浴盆曲线<sup>[6]</sup>。因此需要充分考虑可靠性参数的不确定性, 使可靠性评估结果准确量化供电现状。针对上述不确定性因素的影响, 区间分析法<sup>[7-8]</sup>只能得到可靠性指标的区间范围, 不能反映其分布情况; 联系数法<sup>[9-10]</sup>将可靠性参数表示成确定性和不确定性两个部分, 凭经验假定不确定部分的百分比, 不能得到客观的评估结果; 盲数法<sup>[11]</sup>

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目  
(20110141110032)

将可靠性参数表示成区间和可信度的形式，能够很好地处理不确定性信息，但是盲数区间及区间可信度分别通过自然断点法和判断矩阵法获得，不能客观准确地描述参数的连续变化。文献[12]运用序贯蒙特卡洛模拟法，计及可靠性参数不确定性对可靠性评估的影响，但耗时较长。场景削减技术<sup>[13-17]</sup>利用最少的场景最大程度地拟合变量的特性，以提高计算效率，可以较好地解决不确定性问题，并已应用于考虑分布式电源的配电网无功优化、经济调度、风光耦合特性的研究中。

本文充分考虑了绝缘老化导致元件故障率的不确定性，提出了多场景技术与盲数相结合的配电系统可靠性评估模型。根据元件可靠性参数的统计数据，通过参数拟合得到分布函数，进而获得初始盲数区间和区间可信度。采用后向场景缩减法对盲数场景进行缩减，用最少的场景最大程度地拟合可靠性参数的不确定性，以保证可靠性评估的整体效率。分别采用顺向层级矩阵和逆向层级矩阵传递元件故障对下游负荷以及隔离开关故障对上游负荷可靠性指标的影响，通过算例验证了本文所提算法的有效性。

## 1 盲数理论

盲数的本质是定义在区间上的灰函数<sup>[18]</sup>，由区间序列和可信度构成，能表达和处理由随机信息、模糊信息、未确知信息和灰色信息交叉形成的复杂不确定信息。该复杂不确定信息被称之为“盲信息”。

### 1.1 盲数定义与运算

设  $g(I)$  为有理灰数集， $x_i \in g(I)$ ， $\alpha_i \in [0,1]$ ，盲数  $f(x)$  为定义在  $g(I)$  上的灰函数。

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i & x = x_i (i=1, 2, \dots, n) \\ 0 & x \neq x_i \text{ 且 } x \in g(I) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $n$  表示盲数  $f(x)$  的阶数； $\alpha_i$  为  $x_i$  对应的可信度，且  $x_i \neq x_{i+1}$ ， $\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i \leq 1$ 。

设盲数  $A$ 、 $B$  的表达式如式(2)、式(3)所示：

$$A = f(x) = \begin{cases} \alpha_i & x = x_i (i=1, 2, \dots, n) \\ 0 & x = \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$B = g(y) = \begin{cases} \beta_j & y = y_j (j=1, 2, \dots, m) \\ 0 & y = \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

盲数的运算抽象于各个盲信息之间的真实关系，通过可能值矩阵和可信度积矩阵实现，设\*表示  $A$  与  $B$  之间的任一四则运算，运算结果为  $m \times n$  阶盲数，如图 1 和图 2 所示。

$x_1$	$x_1 * y_1$	$\dots$	$x_1 * y_j$	$\dots$	$x_1 * y_m$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$x_i$	$x_i * y_1$	$\dots$	$x_i * y_j$	$\dots$	$x_i * y_m$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$x_n$	$x_n * y_1$	$\dots$	$x_n * y_j$	$\dots$	$x_n * y_m$
*	$y_1$	$\dots$	$y_j$	$\dots$	$y_m$

图 1 盲数计算的可能值矩阵

Fig. 1 Probable value matrix of blind number calculation

$\alpha_1$	$\alpha_1 * \beta_1$	$\dots$	$\alpha_1 * \beta_j$	$\dots$	$\alpha_1 * \beta_m$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$\alpha_i$	$\alpha_i * \beta_1$	$\dots$	$\alpha_i * \beta_j$	$\dots$	$\alpha_i * \beta_m$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$
$\alpha_n$	$\alpha_n * \beta_1$	$\dots$	$\alpha_n * \beta_j$	$\dots$	$\alpha_n * \beta_m$
*	$\beta_1$	$\dots$	$\beta_j$	$\dots$	$\beta_m$

图 2 盲数计算的可信度积矩阵

Fig. 2 Degree of belief matrix of blind number calculation

### 1.2 盲数均值与降阶

盲数均值是未确知期望与有理灰数心的概念的推广，体现了盲数的平均取值<sup>[19]</sup>。设  $a$ 、 $b$  均为实数，且  $a \leq b$ ，称  $(a+b)/2$  为有理灰数  $[a,b]$  的心，记为  $\odot(a,b)$ ，则盲数  $f(x)$  的均值计算如下。

$$Ef(x) = \begin{cases} \alpha & x = \frac{1}{\alpha} (\odot \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

根据盲数的运算结果可知，多个盲数进行四则运算时，盲数的阶数会迅速增大。为减小盲数运算的计算量，需要合理地对盲数进行降阶处理。本文采用按期望值合并的方法对盲数  $A$ 、 $B$  的运算结果盲数  $C$  进行降阶，使其保持为  $m$  阶或  $n$  阶，具体步骤如下。

- 1) 计算盲数  $C$  的各区间均值，并按照从大到小依次排序；
- 2) 按照式(4)依次计算每  $m$  或  $n$  个可能值的期望值  $z_i$ ；
- 3) 计算  $z_i$  对应的可信度  $\delta_i$ ， $\delta_i$  为上述  $m$  或  $n$  个可能值的可信度之和。

## 2 多场景技术

多场景技术主要包括场景的产生和场景的削减两个方面。场景的规模越大，计算结果越精确，但同时也会带来计算量和计算时间增加的问题，这就需要进行场景削减，采用最少的场景最大程度地拟合变量的不确定性，具体描述如下。

### 2.1 场景生成

配电系统元件的修复时间变化不大；而元件故障率由于内部绝缘老化则服从浴盆形曲线函数，并

且具有明显的阶段性。第一阶段为“磨合期”，故障率随时间递减；第二阶段为“偶然失效期”，故障率为常数；第三阶段为“损耗期”，故障率随时间递增。根据统计规律，电力系统的故障率可以用威布尔分布函数来模拟。但是在损耗期，威布尔分布的形状参数的取值难以满足故障率的实际分布情况<sup>[12]</sup>，因此本文采用改进的威布尔分布模拟元件故障率，如式(5)所示。

$$h(t) = Ke^{\beta t} \quad (5)$$

式中： $K$ 为偶然失效期的故障率； $\beta$ 为威布尔分布的形状参数。

故障率浴盆曲线在时间上是连续的，不同阶段的 $\beta$ 取值并不相同。第一阶段的 $\beta < 0$ ， $h(t)$ 随时间递减；第二阶段的 $\beta = 0$ ， $h(t)$ 为常数；第三阶段的 $\beta > 0$ ， $h(t)$ 随时间递增。根据故障率历史统计数据，通过最小二乘估计即可得到 $\beta$ 的取值。

如图3所示，本文将服从浴盆曲线分布的连续故障率离散为 $N$ 段，每个区间的宽度 $\Delta\lambda$ 相等，且区间总宽度为故障率最大值 $\lambda_{\max}$ 与最小值 $\lambda_{\min}$ 的差值。每个区间的可信度为该区间故障率对应的持续时间与元件寿命周期 $T$ 的比值。

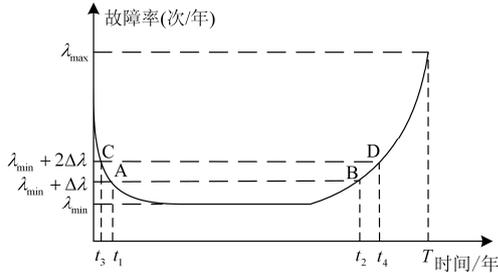


图3 故障率浴盆曲线图

Fig. 3 Bathtub-shaped hazard curve

以图3中的故障率区间 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\min} + \Delta\lambda]$ 为例，通过对各阶段威布尔分布函数进行逆变换，可以得到该区间的运行持续时间 $T_1$ 和区间可信度 $p_1$ 。

$$T_1 = t_2 - t_1 \quad (6)$$

$$p_1 = \frac{T_1}{T} \quad (7)$$

式中， $t_1$ 、 $t_2$ 分别为磨合期和损耗期故障率为 $\lambda_{\min} + \Delta\lambda$ 的元件运行年份。

重复进行上述过程，便可以得到 $N$ 个故障率盲数区间和可信度，并且区间 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\min} + \Delta\lambda]$ 包含整个偶然失效期，其可信度值最大，与实际情况相符。

## 2.2 场景削减

故障率区间总数 $N$ 越大，区间宽度越小，区间值越接近点值，可靠性评估结果越准确，但也增加

了计算量。为了使计算结果精确的同时提高运算效率，本文采用后向场景缩减法<sup>[17]</sup>对故障率盲数 $f(x)$ 的规模进行缩减，具体步骤如下。

1) 设 $N$ 个场景分别由 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 表示，对应发生的概率即为区间可信度 $\alpha_i$ ；

2) 计算所有场景组合 $x_i$ 与 $x_k$ 之间的 Kantorovich 距离，本文采用区间均值之差的绝对值表示 Kantorovich 距离， $D(x_i, x_k) = |\ominus x_i - \ominus x_k|$ ；

3) 对每一个场景 $i$ ，寻找与其距离最近的场景 $r$ ，记为 $DM_i = \min(D(x_i, x_k))$ ，并计算乘积 $PDM_i = DM_i \times \alpha_i$ ；

4) 在 $N$ 个场景中寻找场景 $d$ ，使得 $PDM_d = \min(PDM_i)$ ；

5) 将场景 $d$ 概率加到距离其最近的场景上，并将 $x_d$ 从 $f(x)$ 中削减，同时场景总数减1；

6) 判断是否到达满足要求的场景数目，若是转步骤7)，否则转步骤3)；

7) 完成场景削减。

## 3 基于双向层级矩阵的可靠性评估算法

大部分配电系统可靠性评估采用的都是根据故障持续时间划分类型，建立故障模式后果表的方法，这种方法在分析故障影响范围时存在大量的冗余计算。但是实际上，不考虑备用电源时，可认为配电系统的上游故障是顺向逐层向下传递，下游故障是逆向逐层向上传递的。

如图4所示的配电系统， $S$ 表示开关， $k$ 表示包含负荷的馈线区。根据边界开关元件的不同，可将馈线区划分为断路器块( $k_1 \sim k_3, k_5$ )和隔离开关块( $k_4, k_6$ )。

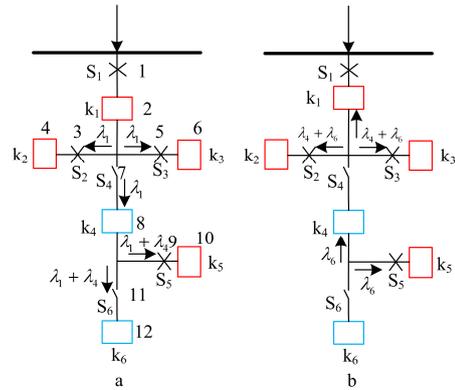


图4 简单辐射状配电系统

Fig. 4 Simple radial distribution system

为隔离分支馈线对主馈线及其他分支馈线的影响，分支馈线首端配置断路器。因此主馈线元件故

障影响所有主馈线的负荷，分支馈线故障影响该分支馈线的所有负荷。因此主馈线与分支馈线故障分析过程相同，可以分开计算，并在考虑主馈线影响时将分支馈线作为主馈线的一个馈线区。

以故障率双向传递为例说明馈线区故障传递过程。如图 4(a)所示，馈线区  $k_1$  故障时，将其故障率  $\lambda_1$  传递并累加至下游馈线区  $k_2 \sim k_4$ ；馈线区  $k_4$  故障时，将更新后的故障率  $\lambda_1 + \lambda_4$  传递并累加至下游馈线区  $k_5 \sim k_6$ ，即可完成可靠性参数顺向传递。

逆向传递过程则以线路末端为起点，并且断路器故障不影响上游负荷，隔离开关对上游负荷故障率和故障持续时间的影响分别为馈线区的故障率和隔离开关的切换时间。如图 4(b)所示，馈线区  $k_6$  故障时，将其故障率  $\lambda_6$  传递并累加至上游馈线区  $k_4 \sim k_5$ ；馈线区  $k_4$  故障时，将更新后的故障率  $\lambda_4 + \lambda_6$  传递并累加至上游馈线区  $k_1 \sim k_3$ ，即可完成可靠性参数逆向传递。若  $k_4$  为断路器块，则馈线区  $k_6$  的故障影响将不会继续传递。

若线路末端有备用电源，只需根据顺向层级矩阵依次寻找主馈线区  $k_n$ ，对  $k_n$  相邻下一层级的主馈线区  $k_i$  以及  $k_i$  之后馈线区的负荷故障持续时间进行修正即可。如  $k_1$  故障时，只需修正  $k_4 \sim k_6$  中的负荷故障持续时间。

上述可靠性双向传递过程与广度遍历过程相同，为快速定位下游或上游馈线区以进行可靠性传递，本文提出了顺向层级矩阵和逆向层级矩阵的概念。图 4 所示的配电系统元件块顺向层级矩阵  $H$  和逆向层级矩阵  $H_1$  分别为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 2 & 2 \\ 1 & 6 & 2 & 2 \\ 2 & 8 & 1 & 2 \\ 1 & 10 & 2 & 3 \\ 2 & 12 & 1 & 3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 \\ 1 & 4 & 2 & 3 \\ 1 & 6 & 2 & 3 \\ 2 & 8 & 1 & 2 \\ 1 & 10 & 2 & 2 \\ 2 & 12 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

矩阵第一列表示馈线区类型，“1”表示断路器块，“2”表示隔离开关块；第二列表示支路编号，第三列表示等级，“1”表示在主馈线上，“2”表示在分支馈线上；第四列表示层级。

顺向层级以主馈线首端断路器块层级为 1，根

据馈线区与主电源之间的馈线区个数由少到多依次编号，个数相同为同一层级；而逆向层级以线路末端元件块层级为 1，根据与线路末端之间的馈线区个数进行编号。将盲数形式的可靠性参数由低层级传递到高层级，即可实现上述双向传递过程。

算法流程图如图 5 所示。

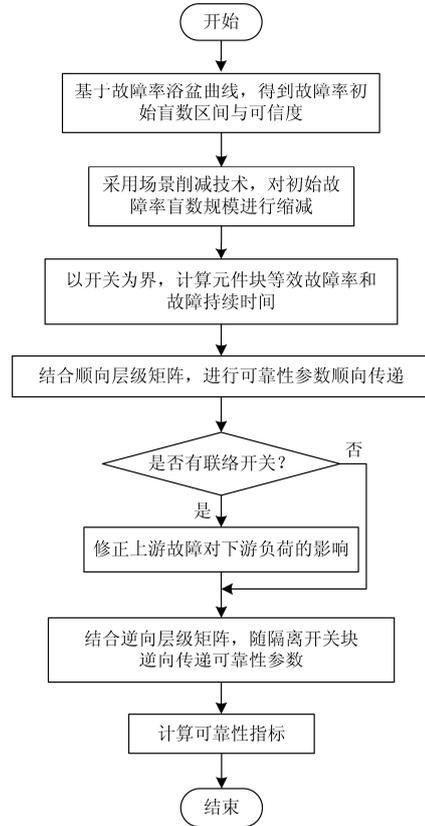


图 5 可靠性评估算法流程图

Fig. 5 Reliability assessment algorithm procedure

## 4 算例分析

本文以改造的 IEEE RBTS BUS6 馈线 F4 为算例，系统接线图如图 6 所示。该系统包括 30 条线路、23 负荷点、23 个配电变压器。馈线长度与负荷点参数见文献[20]，倒闸操作时间与备用电源投入时间为均为 1 h，元件的平均修复时间均为 5 h，元件故障率分布参数取自文献[12]，如表 1 所示。

表 1 元件故障率分布参数

Table 1 Element failure rate parameters

元件	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$K$
馈线	10	15	30	-0.02	0	0.08	0.06
配变	2	15	30	-0.2	0	0.17	0.02
开关	1	10	20	-0.3	0	0.15	0.06

注：0~ $T_1$ 为“磨合期”； $T_1 \sim T_2$ 为“偶然故障期”； $T_2 \sim T_3$ 为“偶然故障期”； $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 分别为三个阶段的威布尔分布的形状参数的取值。

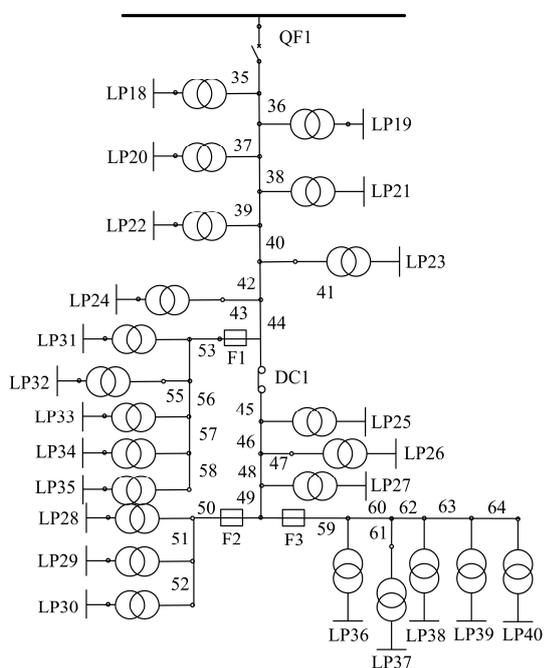


图 6 改造后的 IEEE RBTS BUS6 系统接线图

Fig. 6 Configuration of the IEEE RBTS BUS6 after modifying

根据元件故障率分布参数以及各个阶段的持续时间, 可得到故障率浴盆曲线。通过 2.1 节的场景生成方法得到 1 000 个初始故障率盲数区间与可信度, 然后通过 2.2 节的后向场景削减技术最终得到配电系统各元件故障率的 3 阶盲数, 如表 2 所示。

表 2 配电系统元件故障率参数

Table 2 Failure rate parameters of elements in distribution network

元件	故障率盲数形式		
	可能值	可信度	期望值
馈线	[0.060 0, 0.060 1]	0.650 7	
	[0.093 8, 0.094 0]	0.140 5	0.081 0
	[0.137 5, 0.137 7]	0.208 8	
配变	[0.020 0, 0.020 2]	0.752 0	
	[0.112 5, 0.112 8]	0.145 6	0.048 8
	[0.168 0, 0.168 2]	0.102 5	
开关	[0.060 0, 0.060 1]	0.587 7	
	[0.063 3, 0.063 4]	0.211 3	0.062 3
	[0.068 0, 0.068 2]	0.201 0	

本文算例中的馈线长度、负荷点参数、故障隔离时间等方面与文献[12]所用算例完全相同, 不同的是文献[12]中元件故障修复时间为常数 5 h, 而本文认为元件故障修复时间在小范围内变化, 并取盲数区间为[4, 6], 可信度为 1。结合表 2 中各元件的故障率盲数模型分析该系统的可靠性, 在计算过程中每次只进行两个盲数的运算, 并采用 1.2 节中的

方法进行降阶处理。典型负荷点的可靠性指标与文献[12]通过模拟可靠性参数的时序变化得到的可靠性指标对比如表 3 所示。

表 3 部分负荷点可靠性指标

Table 3 Part load point reliability indices

负荷点	文献[12]		本文均值指标	
	$\lambda/(次/a)$	$U/(h/a)$	$\lambda/(次/a)$	$U/(h/a)$
LP <sub>18</sub>	2.738 0	9.339 0	3.022 6	10.204 5
LP <sub>25</sub>	2.738 0	13.839 0	3.022 6	15.116 2
LP <sub>28</sub>	3.558 0	19.903 0	3.857 4	19.291 1
LP <sub>31</sub>	4.039 0	15.756 0	4.408 5	17.171 8
LP <sub>36</sub>	4.015 0	20.175 9	4.372 1	21.865 1

改造后的算例系统各馈线区的负荷可靠性指标相同, 根据表 3 中的负荷可靠性指标可计算文献[12]中馈线 F4 的系统可靠性指标。在图 6 支路 64 增加一条联络线路, 分析有备用时算例系统的可靠性, 并与文献[12]以及不考虑备用时系统可靠性指标并列于表 4 中。

表 4 系统可靠性指标

Table 4 System reliability indices

指标	盲数(无联络线)			文献[12]	有联络线
	可能值	可信度	期望值		
SAIFI (次/a)	3.492 0	0.914 8			
	3.560 5	0.074 1	3.498	3.190 4	3.498
	3.620 3	0.007 5			
SAIDI (h/a)	14.537 7	0.936 6			
	14.803 7	0.060 3	14.555 2	13.629 9	11.959 5
	15.029 5	0.003 0			
ASAI	0.998 3	0.936 6			
	0.998 3	0.060 3	0.998 3	0.998 4	0.998 6
	0.998 3	0.003 0			
ENS (MW·h/a)	78.640 4	0.959 2			
	79.681 5	0.039 1	78.684 6	73.457 3	62.850 6
	80.649 0	0.001 8			

注: SAIFI 为系统平均停电频率指标; SAIDI 为系统平均停电持续时间指标; ASAI 为平均供电可用率指标; ENS 为期望缺供电能量。

分析表 4 中有联络线和无联络线时的系统可靠性指标可知, 增加联络线路, 系统的停电频率指标基本不变, 系统年平均停电时间减小, 从而有效地降低了系统的缺供电量, 提高了系统的供电可用率; 对比表 4 中文献[12]与本文算法所求的可靠性指标可知, 本文算法得到的年平均停电次数与年平均停电时间较高, 导致系统的供电可用率 ASAI 偏低, 而其他可靠性指标均偏高。这是因为盲数均值是通过区间均值得到的, 而如图 3 所示的凹曲线  $\overline{BD}$  的中点值  $h((t_2 + t_4)/2)$  小于由凹曲线端点连成的直线 BD 的中点值  $(h(t_2) + h(t_4))/2$ , 即盲数区间的均值

$\odot(\lambda_{\min} + \Delta\lambda, \lambda_{\min} + 2\Delta\lambda)$ 。但是由于初始区间的规模较大,  $\widehat{BD}$  与直线  $BD$  基本重合。并且通过场景削减技术减小概率区间, 盲数指标与文献[12]采用模拟法得到的可靠性指标相差不大, 其中平均供电可用率指标  $ASAI$  只相差 0.01%。综上所述, 可以认为本文所提的方法能够客观有效地进行计及计算可靠性参数不确定性的配电系统可靠性评估。

## 5 结论

1) 提出的一种基于故障率浴盆曲线获得连续的盲数区间的方法, 使评估结果更符合客观实际;

2) 通过场景削减技术将时序变化的故障率转化为给定场景的确定性区间, 能有效解决考虑可靠性参数不确定性的配电系统可靠性评估问题。

## 参考文献

- [1] 葛少云, 张鑫, 刘洪, 等. 基于点估计法的有源配电网概率可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 91-100.  
GE Shaoyun, ZHANG Xin, LIU Hong, et al. Active distribution network probabilistic reliability evaluation based on point estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 91-100.
- [2] 李海娟, 黄学良, 陈中, 等. 含电动汽车无线充电的配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊1): 244-250.  
LI Haijuan, HUANG Xueliang, CHEN Zhong, et al. Reliability evaluation of distribution network with wireless charging of electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 244-250.
- [3] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.  
BIE Chaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.
- [4] 白浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 联合发电系统用于含电动汽车的配网可靠性评估研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 127-137.  
BAI Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. Reliability assessment based on combined power generation system for distribution system with electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 127-137.
- [5] 齐先军, 彭翔天, 张晶晶. 基于浴盆形故障率函数的配电系统可靠性评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 81-87.  
QI Xianjun, PENG Xiangtian, ZHANG Jingjing. Reliability evaluation algorithm of power distribution system based on bathtub-shaped hazard function[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 81-87.
- [6] WONDMAGEGNEHU E T, NAVARRO J, HERNANDEZ P J. Bathtub shaped failure rates from mixtures: a practical point of view[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(2): 270-275.
- [7] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 82-89.  
ZHANG Peng, WANG Shouxiang. A novel interval method for reliability evaluation of large scale distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 82-89.
- [8] 任震, 万官泉, 黄雯莹. 参数不确定的配电系统可靠性区间评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 71-76.  
REN Zhen, WAN Guanquan, HUANG Wenying. An interval approach to evaluate distribution system reliability with parameters uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 71-76.
- [9] 万官泉, 张尧, 汪穗峰. 基于联系数的配电系统可靠性不确定性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 30-34.  
WAN Guanquan, ZHANG Yao, WANG Suifeng. Uncertainty evaluation for distribution system reliability based on connection number[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 30-34.
- [10] 张彼德, 刘代伟, 邹江平, 等. 基于图论及联系数的复杂配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 74-79.  
ZHANG Bide, LIU Daiwei, ZOU Jiangping, et al. Reliability evaluation of complex distribution networks based on graph theory and connection number[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 74-79.
- [11] 赵书强, 王海巍. 基于盲数的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 7-12.  
ZHAO Shuqiang, WANG Haiwei. Power distribution system reliability evaluation based on blind number[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 7-12.
- [12] 赵洪山, 赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 56-62.  
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu. Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes[J]. Power System Protection and Control, 2015,

- 43(11): 56-62.
- [13] 汪文达, 崔雪, 马兴, 等. 考虑多个风电机组接入配电网的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1860-1865.  
WANG Wenda, CUI Xue, MA Xing, et al. Multi-objective optimal reactive power flow of distribution network with multiple wind turbines[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1860-1865.
- [14] 柳丹, 李强, 袁晓冬. 考虑随机性的微网能量优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 112-117.  
LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.
- [15] 罗庆, 晁勤, 王一波, 等. 基于场景划分方法的风光出力耦合特性机理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 42-46.  
LUO Qing, CHAO Qin, WANG Yibo, et al. Characteristics of wind-photovoltaic power output coupling based on scenario classification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 42-46.
- [16] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 67-73.  
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 67-73.
- [17] CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An analytical adequacy evaluation method for distribution networks considering protection strategies and distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1392-1400.
- [18] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 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, PANG Yanjun, et al. The concept, operations and properties of blind number[J]. Operations Research and Management Science, 1998, 7(3): 14-17.
- [19] 庞彦军, 马桂珍, 张博文. 盲数均值及其应用[J]. 河北建筑科技学院学报, 1998, 15(4): 58-61.  
PANG Yanjun, MA Guizhen, ZHANG Bowen. The even value of blind number & its application[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 1998, 15(4): 58-61.
- [20] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

---

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-04-25

作者简介:

胡美玉(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事含 DG 的配电网优化运行、电力系统规划运行的研究; E-mail: 850488263@qq.com

胡志坚(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 新能源与分布式发电。E-mail: zhijian\_hu@163.com

(编辑 葛艳娜)