

贝叶斯网络法与盲数相结合的配电网可靠性评估

陈骥群, 赵书强, 马燕峰, 胡永强

(华北电力大学 电气与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对可靠性评估过程中原始参数具有多种不确定性的问题, 提出一种基于贝叶斯网络法与盲数相结合的配电网可靠性评估的方法。该方法用盲数理论处理原始参数的不确定性, 可靠性参数及指标均为盲数形式。与常规可靠性评估方法相比, 该方法在简化盲数计算的情况下得到负荷与系统可靠性指标的范围及对应的可信度, 结果反映出参数不确定性对可靠性指标的综合影响, 并利用贝叶斯网络特有的双向推理模式, 辨识出网络的薄弱环节。算例分析验证了该方法的有效性。

关键词: 配电; 可靠性; 评估; 贝叶斯网络; 盲数; 不确定性

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.017

0 引言

配电网可靠性评估常见的方法有故障模式后果分析法^[1]、最小路法^[2-3]、等值法^[4]、混合型算法^[5-7]等。此外还有新发展的人工智能算法如人工神经网络法^[8-9]、模糊评估方法^[10]等。但这些方法评估可靠性均是基于元件可靠性参数为确定值的假设, 实际上天气的好坏、地理因素、统计资料的限制或者缺乏统计资料的新元件的投入等都会使元件的故障率、修复时间等具有不确定因素^[11]。为了使评估结果真实反映出实际运行情况, 应充分考虑参数的不确定性。考虑不确定性的一般方法是将可靠性参数作为区间数处理^[12], 来评估负荷及系统的区间可靠性指标^[13]。

贝叶斯网络^[14]是 20 世纪 80 年代后期兴起的一种人工智能方法, 利用推理模式将其应用到电网的可靠性评估中^[15], 不仅能得到负荷及系统的可靠性指标, 而且可以辨识出负荷及系统的薄弱环节, 提出具有针对性的改进措施^[16]。

基于贝叶斯网络法特有的双向推理模式, 且计及元件可靠性参数的不确定性, 本文将盲数^[17-18]与贝叶斯网络相结合, 应用贝叶斯网络建立含不确定因素的结构层次清晰的配电网模型。该方法全面考虑分支线保护、隔离开关、备用电源等的影响, 综合考虑了配电网可靠性原始参数存在的随机性、模糊性、未确知性等众多不确定问题。建立系统的模型后, 将元件参数的不确定性信息用盲数来表示, 最终不仅得到系统的可靠性指标的范围及其对应可能性的分布情况, 提供了比区间数更加全面的信息, 而且定量给出了网络中特定部分对整个配电网可靠性的影响, 识别出系统的薄弱环节。该方法可为工程技术人员提供更为丰富实用的信息。

1 模型建立

1.1 贝叶斯网络法简介

贝叶斯网络^[14]是一种对概率关系的图解描述, 它是一个有向无环图, 其节点用随机变量标识, 节点间的弧代表父节点与子节点之间的概率关系。已知一个系统的条件概率分布和网络的拓扑结构可得到系统的联合概率分布, 应用贝叶斯网络推理的实质就是计算概率的过程。图 1 为一个简单的贝叶斯网络。

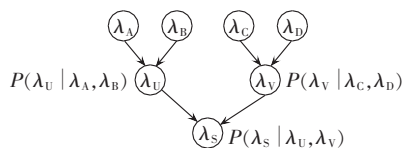


图 1 简单贝叶斯网络

Fig.1 Simple Bayesian network

假设图 1 表示一个可靠性系统, $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \lambda_D$ 是表征系统各元件状态的变量, λ_U, λ_V 表征元件组合的状态, λ_S 表征系统状态。状态量取“0”表示正常工作, 取“1”表示故障。根节点 $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ 与 λ_D 分别具有先验概率分布 $P(\lambda_A), P(\lambda_B), P(\lambda_C), P(\lambda_D)$ 。剩余节点具有条件概率表, 例如 $P(\lambda_U | \lambda_A, \lambda_B)$ 表示节点 λ_U 在父节点 λ_A 和 λ_B 下的条件概率^[19]。图 1 表达了一个联合概率的分布:

$$P(\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \lambda_D, \lambda_U, \lambda_V, \lambda_S) = P(\lambda_S | \lambda_U, \lambda_V) P(\lambda_U | \lambda_A, \lambda_B) \times P(\lambda_V | \lambda_C, \lambda_D) P(\lambda_A) P(\lambda_B) P(\lambda_C) P(\lambda_D) \quad (1)$$

系统故障概率为:

$$P(\lambda_S=1) = \sum_{\lambda_A=0}^1 \sum_{\lambda_B=0}^1 \sum_{\lambda_C=0}^1 \sum_{\lambda_D=0}^1 \sum_{\lambda_U=0}^1 \sum_{\lambda_V=0}^1 [P(\lambda_S=1 | \lambda_U, \lambda_V) \times P(\lambda_U | \lambda_A, \lambda_B) P(\lambda_V | \lambda_C, \lambda_D) P(\lambda_A) P(\lambda_B) P(\lambda_C) P(\lambda_D)] \quad (2)$$

若已知系统出现故障, 则可根据已知的信息更新网络中其他节点的后验故障概率:

$$P(Y=1 | \lambda_S=1) = \frac{P(Y=1, \lambda_S=1)}{P(\lambda_S=1)} = \frac{P(\lambda_S=1 | Y=1) P(Y=1)}{P(\lambda_S=1)} \quad Y = \lambda_A, \lambda_B, \lambda_C, \lambda_D, \lambda_U, \lambda_V, \lambda_S \quad (3)$$

即系统出现故障时,可后向推理出系统中的元件对该事件影响程度的大小,找出系统中影响此事件概率最大的即为系统的薄弱环节。

1.2 盲数模型

通过对原始数据的收集及对设备未来运行状况的预测得到影响配电网可靠性参数的因素(设备的故障率、修复时间等)集为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, 其中 x_i ($i=1, 2, \dots, m$) 为可靠性参数的可能区间, 本文采用自然断点法得到该区间。自然断点法就是将数据集中不连续的地方作为分级的依据, 将数据集合进行分级。例如若需要处理 p 个数据, 先将 p 个数据进行从小到大进行排序, 区间中任意数据 s_1 与 s_j 需要满足 $s_j - s_1 \leq \delta$, 其中 δ 为 $d_j = s_j - s_1$ 的平均值。以不满足约束的数据作为断点, 从小到大依次化为 m 个区间, 组成区间序列, 即为可靠性参数的盲数的数值区间。

X 为建立盲数模型提供了区间灰数值, 该模型为 m 阶的盲数模型。为得到配电网可靠性参数的盲数模型, 还需 x_i 对应的可信度 α_i 。 α_i 表示各个区间出现的可能程度, 利用文献[20]中的判断矩阵法求得盲数对应的可信度。该方法首先要构造出指标因素集对可靠性的相对评价向量矩阵, 然后两两比较评价因素得到判断矩阵, 求解判断矩阵的最大特征根对应的特征向量, 此特征向量即为所求盲数对应的可信度。

经过上述 2 步处理可得到盲数模型为:

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i & x = x_i (i=1, 2, \dots, m) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

若某元件故障率出现在 $x_1 = [a_1, b_1]$, $x_2 = [a_2, b_2]$, $x_3 = [a_3, b_3]$, $x_i \in X (i=1, 2, 3)$, 3 个区间上可信度分别为 0.1、0.6、0.3, 则该元件故障率的盲数模型为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x = x_1 \\ 0.6 & x = x_2 \\ 0.3 & x = x_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

可见盲数模型包含多种不确定性信息, 可较全面地描述配电网可靠性评估中的不确定性信息, 为评估具有不确定性信息的配电网可靠性奠定了基础。

2 贝叶斯网络与盲数相结合的配电网可靠性评估算法

将盲数与贝叶斯网络法相结合的配电网可靠性评估与传统贝叶斯网络评估方法相比, 公式的形式相同, 区别在于公式中的不确定性参数用盲数形式表示, 用盲数运算代替实数运算。具体算法步骤如下。

a. 根据不同时间、地区电力部门统计的资料及相关参考文献等, 收集配电网可靠性原始数据。

b. 建立配电网的盲数模型。通过对原始数据的收集及对设备未来运行状况的预测, 得到设备的故障

率为 p 个值; 用自然断点法得到可靠性参数的盲数区间集; 最后用判断矩阵法得到盲数区间对应的可信度。

c. 结合贝叶斯网络法计算负荷点的可靠性指标。

对于组成配电网的元件节点, 因其无父节点, 它们的条件概率就是其先验概率。对于线路元件, 其正常工作的概率为:

$$P(\lambda_{L_j}=0) = 1 - l_j \bar{\lambda}_L \bar{\gamma}_L / 8760 \quad (6)$$

对于变压器、断路器、负荷开关元件, 其正常的工作概率为:

$$P(\lambda_T=0) = 1 - \bar{\lambda} \bar{\gamma} / 8760 \quad (7)$$

其中, l_j 为线路 j 的长度; $\bar{\lambda}$ 为元件的故障率; $\bar{\gamma}$ 为元件的故障修复时间。本文均用形如 $\bar{x}$ 的形式表示盲数。

负荷点 i 的故障率 $\bar{\lambda}_i$ 为:

$$\bar{\lambda}_i = \sum \bar{\lambda}_k \quad (8)$$

负荷点 i 的停运概率 P_{LPi} 为:

$$P_{LPi} = 1 - \prod P_k \quad (9)$$

其中, $\bar{\lambda}_k$ 、 P_k 分别为贝叶斯网络图上与负荷点 i 有关的元件的故障率、正常工作的概率。

在实际运算过程中, 为避免运算阶数增长过快, 每次仅处理 2 个盲数, 并对得到的结果按区间降阶^[21], 例如 2 个 3 阶盲数进行运算会得到 1 个 9 阶盲数, 而这个 9 阶盲数的取值会有交叉的现象, 首先要除去交叉, 即将交叉的部分分裂为新阶, 对应的可信度也以同样的方式进行分配处理, 然后根据所需要的阶数重新进行数据分配, 降阶后再进行下一次运算。用该方法进行计算, 计算量仅为点值贝叶斯网络的常数倍, 该常数仅依赖于盲数的阶数。只要合理控制盲数的阶数, 计算量并不是很大, 得出的结果更具参考价值。

d. 计算盲数形式的配电网可靠性评估指标, 各个指标的贝叶斯网络形式的表达式如下。

系统平均停电频率(SAIFI, 单位次/(用电用户·a)):

$$\delta_{SAIFI} = \left(\sum_{i=1}^n \bar{\lambda}_i N_{LPi} \right) / \left(\sum_{i=1}^n N_{LPi} \right) \quad (10)$$

系统平均停电持续时间(SAIDI, 单位 h/(用电用户·a)):

$$\delta_{SAIDI} = 8760 P(\lambda_s=1) = 8760 \left(\sum_{i=1}^n P_{LPi} N_{LPi} \right) / \left(\sum_{i=1}^n N_{LPi} \right) \quad (11)$$

用户平均停电持续时间(CAIDI, 单位 h/(断电用户·a)):

$$\delta_{CAIDI} = \delta_{SAIDI} / \delta_{SAIFI} \quad (12)$$

平均供电可用度(ASAI, 单位 %):

$$\delta_{ASAI} = 1 - P(\lambda_s=1) \quad (13)$$

系统总电量不足指标(ENS, 单位 MW·h/a):

$$\delta_{ENS} = 8760 \sum_{i=1}^n (P_{LPi} A_{LPi}) \quad (14)$$

其中, A_{LPi} 为负荷点 i 的平均负荷; n 为系统中负荷点的个数; N_{LPi} 为负荷点 i 的用户数; $P(\lambda_s=1)$ 为系统出

现故障的概率。

e. 用贝叶斯的后向推理找到系统的薄弱环节,在系统故障已知的情况下,元件 e_0 (其状态为 λ_{e0} , 其他类似)发生故障的概率为:

$$P(\lambda_{e0}=1|\lambda_S=1)=\frac{P(\lambda_S=1|\lambda_{e0}=1)P(\lambda_{e0}=1)}{P(\lambda_S=1)} \quad (15)$$

该概率取决于元件的可靠性参数,其故障率与修复时间的积最大的元件最可能是造成系统故障的元件,该元件就可能为负荷点的薄弱环节。

仅利用上述概率对负荷点进行薄弱环节分析难以识别整个配电网的薄弱环节,因为若元件的可靠性参数相同,因其在配电网中位置或周围开关的配置不同,其故障的影响也可能不同。所以用系统总电量不足指标来分析,根据分摊电量确定配电网薄弱环节,此方法更符合实际情况。第 k 个元件的分摊电量为:

$$\delta_{ENS_k}=\sum_{i=1}^{N_{IP}}(A_i\lambda_k\gamma_k) \quad (16)$$

其中, A_i 为负荷点 i 的负荷; λ_k 为第 k 个元件的故障率; γ_k 为第 k 个元件故障时负荷点 i 的缺电时间。

最后的评估结果可根据需要将盲数形式的可靠性指标转化为盲数期望值的形式,或直接取可信度较高的区间值的期望值作为可靠性指标进行参考。

3 算例分析

各种类型配电网均以单一的辐射型馈电系统运行。辐射型系统是由一组串联元件包括线路、隔离开关、分支线保护、变压器等组成。以某 10 kV 辐射型配电网为例,如图 2 所示,其中 A、B、C、D 为主干线路,a、b、c、d 为分支线路,考虑有隔离开关、分支线保护(r_1-r_4)及备用电源的影响的运行方式。

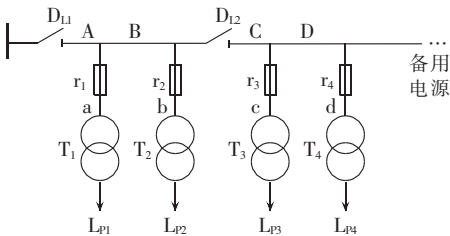


图 2 辐射型配电网接线图
Fig.2 Wiring diagram of radial distribution network

3.1 原始参数处理

设 4 个负荷点的用户数均为 1,倒闸操作时间为 0.5h,备用电源投入时间为 1h,4 台变压器参数相同,各主干线长度均为 3 km,分支线长度 1 km。由 2006—2013 年配电线路的故障率,将其转化为盲数形式。

表 1 中数据经 $d_j=s_j-s_1$ 得到故障率差值,并取故障率差值的平均值作为断点处,可得 $\delta=3.1$,将此处作为断点,划分配电线路故障率盲数区间见表 2。

表 1 配电网线路故障率

Table 1 Line failure rate of distribution network

年份	λ /[次·(100 km·a) ⁻¹]	年份	λ /[次·(100 km·a) ⁻¹]
2006	8.8	2010	6.9
2007	8.3	2011	6.0
2008	7.7	2012	5.1
2009	7.2	2013	4.0

表 2 配电线路故障率的盲数形式

Table 2 Line failure rate of distribution network in blind number form

区间	落入区间的数据个数
[4.0,6.9]	4
[7.2,8.8]	4

同理,通过对收集到的数据进行处理、分析,可得到各电气设备可靠性参数的可能区间,并用判断矩阵法得到各区间的可信度,进而得到参数的盲数模型。近几年的修复时间变化范围并不是很大,为减少计算,可以直接取最大最小值组成盲数的区间,对应的可信度为 1。根据近 8 a 提供的配电网元件可靠性参数,用上述方法对其进行处理,结果如表 3 所示。

表 3 中压配电网各种元件可靠性参数

Table 3 Reliability parameters of different elements in medium-voltage distribution network

元件	参数	盲数		
		可能值	可信度	期望值
线路	$\bar{\lambda}$	[7.2,8.8]	0.2	6.0
	λ	[4.0,6.9]	0.8	
	$\bar{\gamma}$	[4,5]	1	
变压器	$\bar{\lambda}$	[0.39,0.41]	0.2	0.2
	λ	[0.14,0.16]	0.8	
	$\bar{\gamma}$	[5,7]	1	
隔离开关、熔断器	$\bar{\lambda}$	[0.69,0.71]	0.2	0.5
	λ	[0.44,0.46]	0.8	
	$\bar{\gamma}$	[3,5]	1	

注: λ 为设备故障率(线路单位次/(100 km·a),其他单位次/(台·a)); $\bar{\gamma}$ 为故障修复时间(单位 h/次)。

3.2 计算负荷点及系统的可靠性指标

建立贝叶斯网络模型如图 3 所示,图中 λ_r 为图 2 中分支线保护状态; λ_{A-D} 、 λ_{B-D} 、 λ_{DL1-D} 为计及备用电源

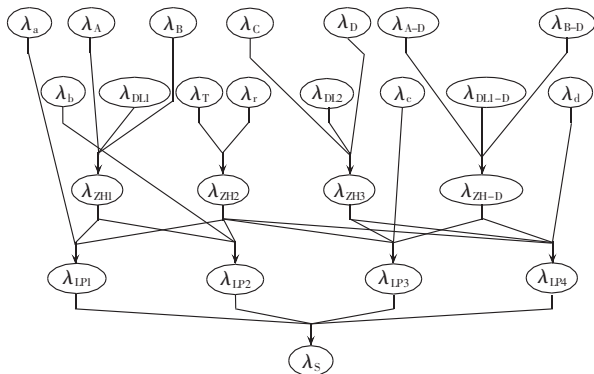


图 3 配电网完整贝叶斯网络
Fig.3 Complete Bayesian network of distribution network

时,与备用电源有关的节点状态; λ_{ZH1} 、 λ_{ZH2} 、 λ_{ZH3} 、 λ_{ZH-D} 为元件的组合节点状态(为减少贝叶斯条件概率表而设置的中间节点状态)。

用本文提出的方法计算负荷点的停运概率及系统的可靠性指标。用等值法^[4]的评估结果做对比,等值法采用的可靠性参数为统计值的平均值。评估结果如表 4、表 5 所示。

表 4 负荷点的停运概率
Table 4 Load node failure probability

概率	盲数			
	可能值	可信度	期望值	等值法
P_{LP1}	[0.0202,0.0289)	0.861	0.025 7	0.025 0
	[0.0289,0.0362]	0.139		
P_{LP2}	[0.0202,0.0289)	0.861	0.025 7	0.025 0
	[0.0289,0.0362]	0.139		
P_{LP3}	[0.0222,0.0304)	0.858	0.027 4	0.027 0
	[0.0304,0.0377]	0.142		
P_{LP4}	[0.0222,0.0304)	0.858	0.027 4	0.027 0
	[0.0304,0.0377]	0.142		

表 5 系统可靠性指标
Table 5 Reliability indices of distribution network

指标	盲数			
	可能值	可信度	期望值	等值法
ASUI	[2.12×10 ⁻⁴ ,2.97×10 ⁻⁴)	0.868	0.026 5%	0.026 0%
	[2.97×10 ⁻⁴ ,3.70×10 ⁻⁴)	0.132		
ASAI	[0.999 630,0.999 703)	0.132	99.973 5%	99.974 %
	[0.999 703,0.999 788]	0.868		
SAIDI	[1.857,2.602)	0.868	2.320	2.278
	[2.602,3.241]	0.132		
SAIFI	[0.557,0.896)	0.730	0.815	0.812
	[0.896,1.209]	0.270		
CAIDI	[1.765,3.081)	0.630	2.893	2.805
	[3.081,4.310]	0.370		

通过表 4、表 5 的结果可知,等值法的点值均落在了可信度较高的区间内,即盲数包含了点值方法计算的结果。盲数的期望值反映的是评估指标的整体期望,侧重于整体性,而传统方法得到的结果仅反映出该指标其中的一种情况。通过对比可以看出,传统方法评估结果没有反映出原始参数的不确定性对可靠性评估结果的影响,而运用本文提出的方法反映出参数不确定性的影响,评估结果既有区间形式及其对应可信度,又有以期望值表示的点值结果。可见盲数形式更符合实际情况,包含更丰富的信息。

3.3 配电网薄弱环节的分析

假设 L_{P1} — L_{P4} 的负荷均值分别为 0.535 MW、0.535 MW、0.454 MW、0.400 MW。根据式(16)计算 δ_{ENSE} ,分摊电量最大者为系统最薄弱环节。

根据计算可知:线路 A、B 分摊的系统总电量不足指标最多,为配电网最薄弱的环节。增加系统薄弱环节的可靠性可以比较高效率地提高整个配电网的可靠性。在实际配电网中,可综合考虑系统及负

荷点的薄弱环节、负荷点的重要程度等因素,采取更加经济有效的提高系统可靠性的措施。现给出系统最薄弱环节的盲数形式作为参考,如表 6 所示。

表 6 系统的最薄弱环节
Table 6 Weakest part of distribution network

元件	缺供电量		
	盲数值/(MW·h·a ⁻¹)	可信度	盲数期望值/(MW·h·a ⁻¹)
线路	[0.85,1.02]	0.80	1.02
A、B	[1.32,1.49]	0.20	

4 结论

在配电网实际运行中,为尽可能考虑各类不确定因素对配电网可靠性原始参数的影响,本文将盲数与贝叶斯网络相结合,形成了一种新的可靠性评估方法。该方法计算出的可靠性指标包含了影响配电网可靠性评估的不确定性信息,并且描述出系统可靠性的真实程度(通常的灵敏度分析法、区间算法、模糊可靠性评估方法等均无法综合反映出这些信息)及辨识出系统的薄弱环节,为可靠性优化、电网规划等问题提供更加细致的数据,有利于做出最优决策,与实际情况结合紧密。通过算例验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] ALLAN R N,BILLINTON R,SJARIEF I,et al. A reliability test education proposes:basic distribution system data and results[J]. IEEE Trans on Power Systems,1991,6(2):813-820.

[2] 戴雯霞,吴捷. 基于最小路的配电网可靠性快速评估法[J]. 电力自动化设备,2002,22(7):29-31.

DAI Wenxia,WU Jie. Fast evaluation for distribution network reliability based on minimal path[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(7):29-31.

[3] XIE Kaigui,ZHOU Jiaqi,BILLINTON R. Reliability evaluation algorithm for complex medium voltage electrical distribution networks based on the shortest path[J]. IEE Proceedings of Generation,Transmission and Distribution,2003,150(6):686-690.

[4] 任倩,张勇军,任震,等. 基于馈线分块等值的中压配电网可靠性评估改进 FMEA 法[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):53-56.

REN Qian,ZHANG Yongjun,REN Zhen,et al. Improved FMEA method for reliability evaluation of mid-voltage distribution system based on divided feeder equivalence[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(12):53-56.

[5] 熊俊,肖先勇,邓武军,等. 基于广度优先搜索算法和区域节点行向量法的复杂配电网可靠性评估[J]. 电网技术,2007,31(9):27-32.

XIONG Jun,XIAO Xianyong,DENG Wujun,et al. Distribution system reliability evaluation based on breadth first search algorithm and zone node row vector algorithm[J]. Power System Technology,2007,31(9):27-32.

[6] 邵黎,谢开贵,王进,等. 基于潮流估计和分块负荷削减的配电网可靠性评估算法[J]. 电网技术,2008,32(24):33-38.

SHAO Li,XIE Kaigui,WANG Jin,et al. Reliability evaluation algorithm of distribution network based on power flow estimation and section load shedding[J]. Power System Technology,2008,32

- (24):33-38.
- [7] 万国成,任震,吴日昇,等. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):92-98.
- WAN Guocheng,REN Zhen,WU Riyi,et al. Hybrid method for the reliability evaluation of the complex distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):92-98.
- [8] AMAJADY N,EHSAN M. Evaluation of power systems reliability by an artificial neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(1):287-292.
- [9] 宋云婷,吴俊玲,彭东,等. 基于BP神经网络的城网供电可靠性预测方法[J]. 电网技术,2008,32(20):56-58.
- SONG Yunting,WU Junling,PENG Dong,et al. A BP neural network based method to predict power supply reliability of urban power network[J]. Power System Technology,2008,32(20):56-58.
- [10] 王峻峰,周家启,谢开贵. 中压配电网可靠性的模糊评估[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006,29(2):45-49.
- WANG Junfeng,ZHOU Jiaqi,XIE Kaigui. Fuzzy reliability evaluation algorithm for medium voltage distribution networks[J]. Journal of Chongqing University:Natural Science Edition,2006,29(2):45-49.
- [11] 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):68-73.
- 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):68-73.
- [12] 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):77-84.
- ZHANG Peng,WANG Shouxiang. A novel interval method for reliability evaluation of large scale distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):77-84.
- [13] 郑彦芹,娄北,张鸿雁,等. 基于区间数和价值理论的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(18):19-23.
- ZHANG Yanqin,LOU Bei,ZHANG Hongyan,et al. Reliability evaluation of distribution system based on interval data and value[J]. Power System Protection and Control,2008,36(18):19-23.
- [14] PEARL J. Fusion,propagation,and structuring in belief networks[J]. Artificial Intelligence,1986(29):241-288.
- [15] YU D C,NGUYEN T C,HADDAWY P. Bayesian network model for reliability assessment of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1999,14(2):426-432.
- [16] 王成山,谢莹华. 基于双层同构贝叶斯网络模型的配电网可靠性评估[J]. 电网技术,2005,29(7):41-46.
- WANG Chengshan,XIE Yinghua. A new Bayesian network model for distribution system reliability evaluation on dual isomorphic Bayesian network model[J]. Power System Technology,2005,29(7):41-46.
- [17] 刘开第,吴和琴,庞颜军,等. 不确定信息处理及应用[M]. 北京:科学出版社,1999:160-176.
- [18] 王清印,刘志勇. 不确定性信息的概念、类别及其数学表述[J]. 运筹与管理,2001,10(4):9-15.
- WANG Qingyin,LIU Zhiyong. The conception,sort and mathematical expression of uncertainty information[J]. Operations Research and Management Science,2001,10(4):9-15.
- [19] XU Hua,ZOU Hongliang. Research on complex multi-state distribution system reliability modeling and assessment methods based on Bayesian networks and random set theory[C]//2010 China International Conference on Electricity Distribution(CIC-ED). Nanjing,China:IEEE,2010:1-5.
- [20] 张昊,陶然,李志勇,等. 判断矩阵法在网页恶意脚本检测中的应用[J]. 兵工学报,2008,29(4):469-473.
- ZHANG Hao,TAO Ran,LI Zhiyong,et al. The application of judgment matrix approach in detection of vicious script in HTML[J]. Acta Armentarii,2008,29(4):469-473.
- [21] 杨兆升,高学英,孙迪. 基于不确定信息的震后道路抢修时序[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,7(41):53-58.
- YANG Zhaosheng,GAO Xueying,SUN Di. Schedule study of post-earthquake rapid road repair based on uncertainty information[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2011,7(41):53-58.

作者简介:



陈骥群

陈骥群(1990—),女,河北保定人,硕士研究生,从事电力系统运行、分析与控制方面的研究(E-mail:chenjiquan1990@163.com);

赵书强(1964—),男,河北衡水人,教授,博士,从事电力系统运行、分析与控制,电力系统规划与可靠性方面的研究;

马燕峰(1978—),女,河北唐山,副教授,博士,从事电力系统运行、分析与控制方面的研究;

面的研究;

胡永强(1981—),男,河北邯郸人,讲师,博士,从事电力系统运行、分析与控制方面的研究。

Distribution network reliability assessment based on Bayesian network and blind number

CHEN Jiqun,ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,HU Yongqiang

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: Aiming at the original parameter uncertainty of reliability assessment,a distribution network reliability assessment method based on Bayesian network method and blind number is proposed,which adopts the blind number theory to deal with the original parameter uncertainty and takes the reliability parameters and indices as blind numbers. Compared with the conventional reliability assessment methods,the proposed method can obtain the range of load or system reliability index and the corresponding credibility by the simplified blind number calculation to reflect the comprehensive influence of parameter uncertainty on the reliability index,and can also identify the weak parts of distribution network by the specific bi-direction reasoning of Bayesian network. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power distribution; reliability; assessment; Bayesian network; blind number; uncertainty