文章编号:1009-3087(2013)03-0120-07

敏感设备电压暂降失效后果状态格序化评估

汪 颖,杨 达,刘旭娜,陈礼频,肖先勇
(四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:为评估敏感设备经历电压暂降后的最可能故障状态,提出一种格序化方法。从设备电压暂降多值映射后果状态的物理属性出发,提出多值映射后果状态刻画方法,用各后果状态的上、下概率构成的区间数刻画设备状态,各可能状态构成格。引入可能度概念,用可能度矩阵对不满足连通性的后果状态进行比较,确定最可能状态。仿真结果与实测结果表明,提出的方法不仅能准确评估最可能结果,还能给出其它可能结果的排序,对样本的依赖性小,工程应用价值明显。

关键词:电压暂降;设备失效;多值映射;格序化;可能度矩阵;样本依赖性
中图分类号:TM71 **文献标志码:**A

Lattice Order Decision-making Based Evaluation Method of Sensitive Equipment Failure Caused by Voltage Sag

WANG Ying, YANG Da, LIU Xu-Na, CHEN Li-Pin, XIAO Xian-Yong
(School of Electrical Eng. and Info. Technol., Sichuan Univ., Chengdu 610065)

Abstract: To evaluate the most possible failure state of sensitive equipment when they encounter voltage sags, a lattice order based method was studied. Starting with the physical nature of equipment multi-valued mapping outcome due to voltage sag, a multi-valued mapping based outcome state describing method was proposed. Interval numbers which possess the characteristics of lattice order with the upper and lower probabilities of each outcome state as two endpoints were used to describe equipment state, and then the outcome states of decision-making problem could be lattice ordered. The possibility degree concept was introduced, and the possibility degree matrices were used to compare outcome states which don't satisfy connectedness axioms and the most possible outcome state could be obtained. Comparing the simulation result with actual testing result showed that the proposed method can objectively reflect equipment failure state and quantitatively determine the most possible state. The method is accurate, less-sample-dependent and be of great engineering application significance.

Key words: voltage sag; equipment failure; multi-valued mapping; lattice ordered; possibility degree matrix; sample dependence

电压暂降是最严重的电能质量问题之一,其造成的设备失效程度已成为国内外关注重点[1-4]。设备失效程度表现为设备后果状态及危害程度。只有准确评估设备最可能状态,才能对失效程度做出科学评价。因此,设备后果状态属性、刻画方法、映射机制和排序方法,是评价设备暂降失效程度的关键。

国内外对设备电压暂降失效评估开展了大量研究,评估方法有:实测法[5-7]、随机法[8-10]、模糊法[11]以及改进法[12-15]。其中,实测法结果准确、可信,但观测时间长,安装成本高,无可预见性。随机法把设备失效事件看作随机事件,通过概率模型评估故障率,但忽略了设备多值映射后果状态及其不确定性。模糊法用隶属函数或 λ 截集等方法评估故障率,但对各可能状态的数学特征、后果状态连通性等认识不足。文献[12]基于样本特征对评估方法进行了改进,文献[13]提出了模糊随机评估法,文献[14]综合考虑了系统暂降特征和设备耐受能力,文献[15]用混合熵评估失效率的不确定性。这些方法证明了设备后果状态具有不确定性,但均未深入研究最可能状态。实际设备后果状态用确定实

收稿日期:2012-11-06
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877049);国家"863"计划子课题资助项目(2012AA050216);四川省科技支撑计划资助项目(2013GZ0062)
作者简介:汪 颖(1981—),女,博士生,讲师.研究方向:电能质量与智能电网.E-mail:scuwangying@163.com

数值刻画,用区间数或联系数刻画有一定合理性[15-16],但还需解决不满足连通性时的评估问题。事实上,由设备多值映射后果状态区间数构成的后果状态是一个序结构,该序结构在数学上是一个格,可用格序化方法评估最可能状态。

作者从设备电压暂降多值映射后果状态的物理机理出发,引入设备多值映射后果状态概念,通过建立后果状态可能度矩阵,提出一种设备电压暂降响应后果状态格序化评估,实现了对不满足连通性条件的最可能后果状态的评估。在研究评估模型与算法的基础上,对个人计算机进行了实测和仿真,结果表明了提出的方法的正确性、合理性和样本依赖性。

1　设备后果状态多值映射机制

设备电压暂降响应事件后果状态可抽象为从电压暂降空间到设备后果状态空间的映射。设 2 个非空集 X、Y,若存在一个从 X 到 Y 的映射关系 l,使 X 中任一元素 x 在 Y 中有唯一确定元素 y 与之对应,记为 $x \xrightarrow{l} y$,该关系为从 X 到 Y 中的单值映射[17];当 Y 中对应元素不只一个时,为多值映射。对任意 $s \in S$,$\Gamma(s) \subseteq R$,集合 S 到 R 的多值映射可简单表示为 Γ。

诸多设备,如:可编程逻辑控制器、个人计算机和可调速驱动装置等,对电压暂降非常敏感。在物理现象上,设备响应事件表现为多种后果状态,各状态具有不确定性,但通常存在于某区间范围内,为揭示其中蕴涵的必然规律,需研究多值映射机制。

设备后果状态取决于暂降特征和暂降前设备运行状态、负载水平等[9]。通常,暂降特征可用持续时间 (T) 和暂降幅值(U,不失一般性,用剩余电压表示) 构成的数组表示,如:单相短路引起的暂降可表示为:[0.1 s,0.5 p.u.]。不同特征的暂降构成暂降空间。设备后果状态是在后果状态空间上的取值,具有不确定性。以 PC 机为例,实测发现:当发生[0.1 s,0.5 p.u.]暂降时,若暂降前 PC 机处于待机状态,暂降后 PC 机保持正常运行状态;若暂降前 PC 机全速运行,PC 机会直接关机或重启;若暂降前正常运行,则有时正常运行,有时关机或重启,有时出现计算、读写错误等。可见,评估设备电压暂降失效状态时,暂降前 PC 机的运行对后果状态有重要影响,多数情况下,暂降前 PC 机可假设处于正常状态。为此,可将设备电压暂降响应后果定义为从状态集 S 到后果集 R 的多值映射 Γ,如图 1 所示。后果集 R 的元素 r 表示设备状态。

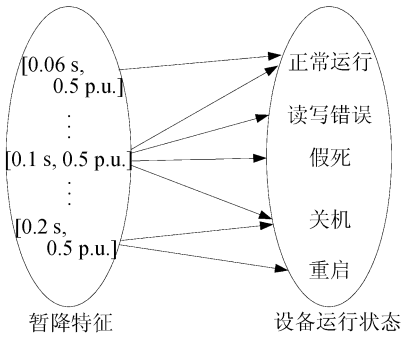

图 1　设备后果状态多值映射

Fig. 1　Multi-valued mapping property of equipment state

2　设备后果状态刻画与格序化

2.1　上、下概率与区间数刻画

设备电压暂降后果状态评估,可转化为已知电压暂降状态 $s \in S$ 在多值映射 Γ 下对应的不确定后果状态 $r \in \Gamma(s)$ 的评估,并确定 $r \in R$ 的可能性。

设 μ 为 S 的子集族上的概率测度 $\Omega \subseteq 2^S$,$\mu(s)$ 为 $s \in S$ 的概率。若映射 Γ 为单值映射,任意 $r \in R$ 的概率与 S 中对应状态概率之和相等,即 $p(r) = \sum_{s \in \{\Gamma(s)=r\}} \mu(s)$。当 Γ 为多值映射时,需用后 R 的上、下概率刻画状态可能性,定义为[18]:

定义 1　设 Γ 是从 S 到 R 的多值映射,对任意 $\chi \subseteq R$,令 $\chi^* = \{s \mid s \in S, \Gamma(s) \cap \chi \neq \varnothing\}$,$\chi_* = \{s \mid s \in S, \Gamma(s) \neq \varnothing$ 且 $\Gamma(s) \subseteq \chi\}$。特别地,$R^* = R_*$ 为 Γ 的定义域。并假设 W 为所有 χ 构成的集合,$W = \{\chi \mid \chi \subseteq R$ 且 $\chi^*, \chi_* \in \Omega\}$,对任意 $\chi \in W$,定义 χ 的上概率为:

$$p^*(\chi) = \mu(\chi^*) \tag{1}$$

χ 的下概率为:

$$p_*(\chi) = \mu(\chi_*) \tag{2}$$

式中,对任意 $s \in S$,$\Gamma(s) \neq \varnothing$,保证 $p^*(R) = 1$。

集合 χ 的上、下概率理解为:χ^* 中包含了可能出现的 χ 中某后果的所有状态 $s \in S$,可认为 $p^*(\chi)$ 为 χ 中后果出现最大的概率。类似地,χ_* 中包含了仅出现 χ 中后果的所有状态 $s \in S$,可认为 $p_*(\chi)$ 为 χ 中后果出现最小的概率。

设备后果状态上、下概率,是某后果状态出现的最大概率和最小概率。例如:负载运行和满载运行时均可能导致“读写错误”状态发生,因此,出现“读写错误”状态的上概率是负载运行和满载运行时导致“读写错误”的概率之和;而其下概率是出现“读写错误”状态的最小概率,由于负载运行和满载运行时均可能导致“读写错误”,但负载运行时发生

“读写错误”的可能性更小,因此,“读写错误”的最小概率是负载运行时导致“读写错误”的概率。

定义2 设R为实数集,$M,N \in R$且$M \le N$,称闭区间$[M,N]$为区间数,记作$Z = [M,N]$。

由设备状态上、下概率构成区间数$A = [a^-, a^+]$、$B = [b^-, b^+]$,在实数轴上存在不重叠、重叠但不包含、重叠且包含等3种情况,如图2所示。

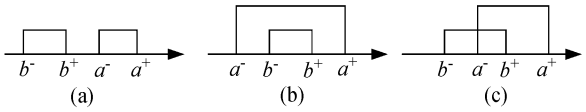

图2 2区间数在数轴上的3种可能情况

Fig. 2 Three situations of arbitrary two interval numbers in axes

2.2 格序化方法

设O为一个集合,若集合O上的二元关系$\le$满足:

1)自反性:$m \le m, \forall m \in O$;

2)反对称性:$m \le n, n \le m \Rightarrow m = n, \forall m,n \in O$;

3)传递性:$m \le n, n \le k \Rightarrow m \le k, \forall m,n,k \in O$。

则此二元关系叫偏序关系,构成的集合$(O, \le)$叫偏序集。

设$(O, \le)$是偏序集,若其中任意2元素都有上确界$x \vee y$和下确界$x \wedge y$,则称$(O, \le)$(简称O)为一个格。格是一类普遍序结构,不要求每对元素均可比,即不要求一定满足连通性,只需要满足任意2元素均存在上确界和下确界的条件。格关系不具有连通性,但保证了任意2元素间的必要联系。将“格”序化是科学评价设备暂降多值后果状态的前提,实质就是将不满足连通性的格按一定方式进行比较。传统评估方法要求满足连通性公理,即后果状态可比。但实际难以满足,见图2。设备后果状态为区间数,不能保证所有元素可比,不满足理性决策的连通性条件。但后果集中任意2元素,均可给出上确界、下确界,由此确定的区间数构成的偏序集具有格序特征[19-20]。为了评估最可能状态,可根据描述格上不同元素优劣关系的可能度参数,建立可能度比较矩阵,对设备后果状态进行格序化评估。

3 后果状态排序与格序化评估

3.1 可能度参数

为了确定非连通关系下2区间数中的较大值,引入可能度概念。图2(a)中,$A > B$,而图2(b)、(c)中,基于可能度概念进行比较。区间数$B < A$的可能度定义为[21]:

$$p(B < A) = \begin{cases} 1, b^+ \le a^-; \\ \dfrac{a^+ - b^+}{a^+ - a^-} + \dfrac{1}{2}\dfrac{b^+ - b^-}{a^+ - a^-}, a^- \le b^- \le b^+ \le a^+; \\ \dfrac{a^+ - b^+}{a^+ - a^-} + \dfrac{b^+ - a^-}{a^+ - a^-}\dfrac{a^- - b^-}{a^+ - a^-} + \dfrac{1}{2}\dfrac{b^+ - a^-}{a^+ - a^-}\dfrac{b^+ - a^-}{b^+ - b^-}, \\ \qquad b^- \le a^- < b^+ \le a^+ \end{cases} \tag{3}$$

定义3 给定区间数A、B和$\theta \in [0, 0.5)$,用$p(B < A)$表示$B < A$的可能度[22]。

1)若$p(B < A) > 0.5 + \theta$,则称B劣于A;

2)若$p(B < A) < 0.5 + \theta$,则称B优于A;

3)若$p(B < A) \in (0.5 - \theta, 0.5 + \theta)$,则称$B$等价于$A$。

以上定义中,θ代表结果准确度,取值越小,结果越准确。由于假设区间内服从均匀分布,可能度为一近似值,如果取值过小,可能导致结果失真,需根据具体问题确定,限于篇幅不多讨论。

3.2 基于可能度矩阵的状态排序

假设设备后果状态区间数为A_1、A_2、…、A_n,n为可能状态数。可能度矩阵$\boldsymbol{p}$为:

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} 0.5 & \cdots & p_{1j} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{i1} & \cdots & p_{ij} & \cdots & p_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & \cdots & p_{nj} & \cdots & 0.5 \end{bmatrix}。$$

其中,p_{ij}表示$p(A_i < A_j)$,为$A_i < A_j$的可能度。各元素值满足:

$$p(B < A) + p(A < B) = 1 \tag{4}$$

排序步骤为:

步骤1:用式(3)和(4)计算可能度矩阵中所有元素的值;

步骤2:找出p_{ij}值不小于0.5的行,记为N_1,此行劣于所有行,表示最不可能状态;

步骤3:划去N_1行和N_1列,重复步骤2,得到所有区间数的优劣,并得出各状态可能性排序,从而确定最可能状态。

3.3 格序化评估过程

设备多值映射后果状态有:正常、假死、读写错误、计算错误、死机、关机、重启等。从严重性看,死机、关机、重启均造成设备完全不能工作,可归为第

1 类,记作 A_1;读写错误和计算错误没有 A_1 严重,可归为第 2 类,记做 A_2;设备假死,程序无响应,在短时间内自动恢复,未必造成故障,但设备效率降低,归为第 3 类,记做 A_3;设备正常为第 4 类,记做 A_4。

后果状态格序化评估过程:

1)根据样本确定在给定电压暂降作用下 A_1、A_2、A_3 和 A_4 这 4 种状态的上、下概率;

2)由上、下概率构成各状态概率区间数,计算两两比较的可能度;

3)建立可能度矩阵,按 3.2 节方法确定各状态的可能性排序;

4)确定最可能设备状态,得到多值映射后果状态格序化评估结果。

4　仿真与分析

4.1　仿真过程

对 PC 机进行实测,暂降源为美国福禄克(FLUKE)的 6100A 标准扰动源,其输出信号通过线性功率放大器(型号 HVP4070B)驱动负荷,清华同方台式机为测试对象。得到 PC 机待机、满载等暂降前状态下的结果,见图 3。

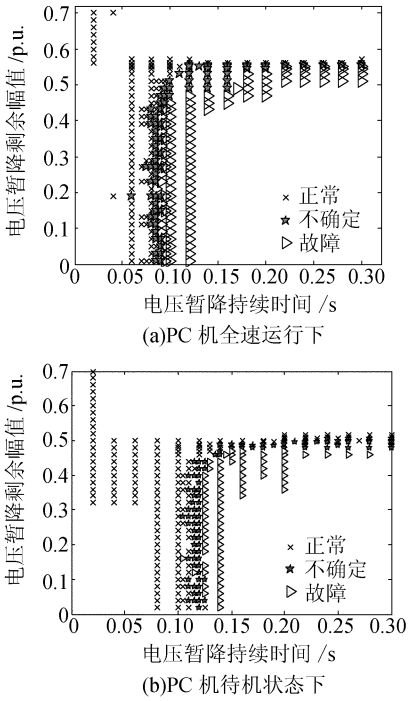

图 3　PC 机不同运行状态下的电压耐受能力散点图

Fig. 3　Voltage tolerance level of PC on different operating conditions

仿真过程:

1)确定暂降特征

随机产生电压暂降 $[T,U]$,其特征 T、U 均服从均匀分布。

2)确定设备状态及不确定区间

确定极端状态下的电压耐受能力不确定区间,见图 4。其中,曲线 1、2 的包络区间为待机状态下不确定区间,曲线 3、4 的包络区间为满载时的不确定区间。

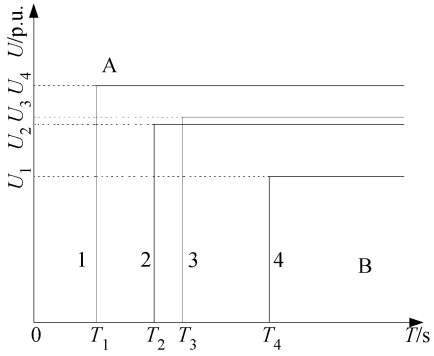

图 4　2 种极端工作状态下的设备不确定区间

Fig. 4　Uncertain area in two extreme working conditions

PC 机后果状态与暂降前 CPU 占用率有关。设待机时 CPU 占用率为 0,满载占用率为 100%,并设电压耐受能力与负载水平成比例,当 CPU 占用率为 $a\%$ 时,4 个边界分别为 $T_3-(T_3-T_1)\cdot a\%$、$T_4-(T_4-T_2)\cdot a\%$、$U_3+(U_4-U_3)\cdot a\%$、$U_1+(U_2-U_1)\cdot a\%$。不同的 CPU 占用率 $a\%$ 可得到不同的电压耐受能力不确定区间。

当暂降发生在 A 区间时,设备正常;在 B 区时设备完全故障;在不确定区间内,设备状态不确定。实测参数见表 1。

表 1　参数值

Tab. 1　Parameter values

参数	T_1	T_2	T_3	T_4	U_1	U_2	U_3	U_4
取值	0.075	0.095	0.105	0.135	0.41	0.49	0.50	0.55

注:时间 T 单位为 s,幅值 U 单位为 p. u.。

3)不确定区间内后果状态

电压暂降发生在不确定区域内时,对设备出现 A_1、A_2、A_3 和 A_4 这 4 种状态的实测发现,越靠近故障区时,A_1 的概率最大,A_4 的最小;越靠近正常运行区域,A_4 的概率最大,A_1 最小。又因为,在不确定区间内的任意点,各状态概率之和为 1,假设在相邻一区域内,设备状态概率恒定,结合实测值,4 种后果状态在不同的暂降持续时间和不同的幅值下,可能出现的概率见图 5。

4)计算各状态概率,进行格序化

改变暂降前设备状态,进行 N 次仿真,得到各状态出现概率,计算各状态上、下概率,对构成的区间数进行格序化。

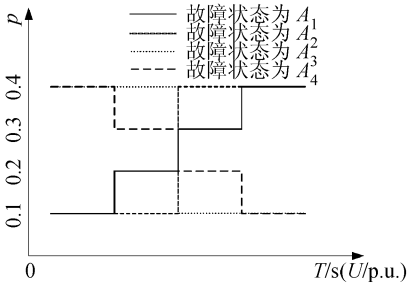

图 5 各状态在不确定区间出现的概率

Fig. 5 Occurrence possibilities of different fault states in uncertain area

5)设备最可能状态格序化评估

建立可能度比较矩阵,用格序评估法确定设备最可能状态。

仿真流程见图 6。

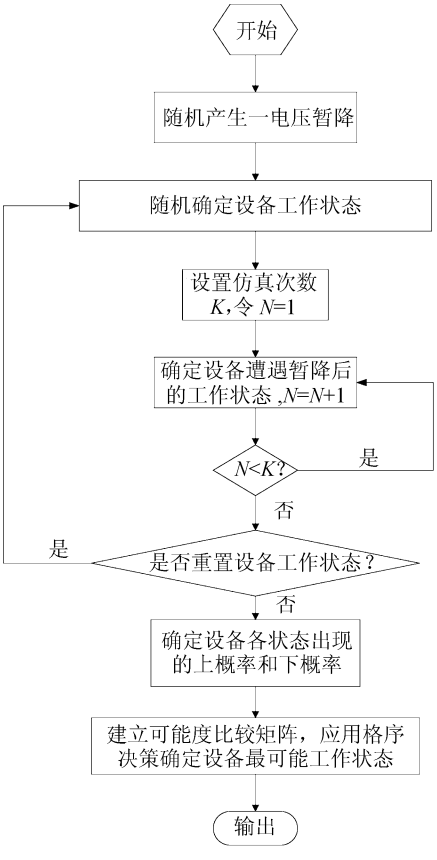

图 6 仿真流程图

Fig. 6 Flow chat of simulation process

4.2 仿真结果

1)不确定区域内设备后果状态

根据 2 极端工作状态下的不确定区间,将暂降持续时间 - 幅值平面划分为 17 个子区域,在各子区域内随机选一点作为电压暂降的代表。随机选择暂降前 10 种 CPU 负载水平,分别进行 50 次暂降设备后果仿真,后果状态排序结果见表 2。可见,因为子区域 A 和 Q 对应于正常运行和故障区域, A 区域内的暂降对设备无影响,Q 区域内的暂降一定导致完全故障,因此,这 2 个区域内的暂降导致的设备后果状态完全确定,暂降严重程度也确定,与实际相符。

表 2 不同电压暂降导致设备可能故障状态仿真结果

Tab. 2 Simulation results of equipment possible failure state subjected to sags of different characteristics

所在区间	暂降特征 [T/s, U/p. u.]	最不可能状态	次不可能状态	次可能状态	最可能状态
A	[0.060,0.45]	—	—	—	A_4
B	[0.080,0.30]	A_1	A_2	A_3	A_4
C	[0.080,0.45]	A_1	A_2	A_3	A_4
D	[0.080,0.495]	A_1	A_2	A_3	A_4
E	[0.080,0.52]	A_1	A_2	A_3	A_4
F	[0.100,0.52]	A_1	A_2	A_3	A_4
G	[0.100,0.495]	A_1	A_2	A_3	A_4
H	[0.100,0.45]	$A_2(A_3)$	$A_3(A_2)$	$A_1(A_4)$	$A_4(A_1)$
I	[0.100,0.30]	$A_2(A_3)$	$A_3(A_2)$	$A_1(A_4)$	$A_4(A_1)$
J	[0.120,0.30]	A_3	A_4	A_2	A_1
K	[0.120,0.45]	A_4	A_3	A_2	A_1
L	[0.120,0.495]	A_1	A_3	A_2	A_4
M	[0.120,0.52]	A_1	A_2	A_3	A_4
N	[0.145,0.52]	A_1	A_2	A_3	A_4
O	[0.145,0.495]	A_1	A_2	A_3	A_4
P	[0.145,0.45]	A_3	A_4	A_2	A_1
Q	[0.145,0.30]	—	—	—	A_1

将表 2 结果在图 7 中用不同灰度表示。颜色越深,出现的后果状态越严重。

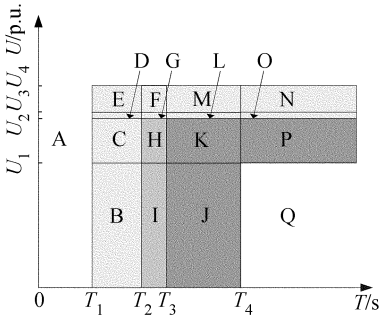

图 7 暂降选择示意图

Fig. 7 Illustration of sag selection

图 7 中,B、C、D、E 等灰度相同的子区域靠近正常运行区域,当经历一次暂降后,最可能出现的运行状态为正常运行,最不可能出现的故障状态是完全故障;而 K、J、P 这 3 个子区域,靠近故障区域,暂降后最可状态为完全故障;在 2 区域之间的子区域 H、I,当发生暂降后,最可能状态不确定。可见,从正常区域到故障区域的过渡过程中,暂降严重程度随之

增大,仿真结果与实测结果(表 3)一致,说明提出的方法正确。

2)仿真与实测结果的比较

在不确定区域内选取电压暂降,利用实验室搭建的设备敏感度测试平台,对选取的每一个电压暂降进行 500 次 PC 机的敏感度测试,得到结果见表 3。

表 3　仿真结果与实测结果的比较

Tab. 3　Comparison between simulation results and real test results

暂降特征 [T/s, U/p. u.]	A_1 实测次数	A_2 实测次数	A_3 实测次数	A_4 实测次数	仿真最可能后果状态
[0.080,0.30]	0	9	28	463	A_4
[0.080,0.45]	10	23	96	371	A_4
[0.120,0.52]	249	160	63	28	A_1
[0.145,0.45]	412	58	30	0	A_1
[0.120,0.30]	368	102	26	4	A_1

由表 3 可见,提出的评估方法与实测结果一致,能准确评估最可能后果状态。

3)样本依赖性验证

在 B 到 P 区域内随机选取 7 个电压暂降,在每次暂降发生时,随机确定 10 种工作状态,对各工作状态分别进行 10、20、50、100、200 次仿真,得最可能设备后果状态,见表 4。

表 4　不同仿真次数对结果的影响

Tab. 4　Effect of simulation times on simulation results

暂降特征 [T/s, U/p. u.]	所在区间	不同仿真次数下的后果状态				
		10	20	50	100	200
[0.080,0.30]	B	A_4	A_4	A_4	A_4	A_4
[0.120,0.30]	J	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
[0.080,0.45]	C	A_4	A_4	A_4	A_4	A_4
[0.100,0.45]	H	$A_4(A_1)$	$A_4(A_1)$	$A_4(A_1)$	$A_4(A_1)$	$A_4(A_1)$
[0.120,0.45]	K	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
[0.145,0.45]	P	A_1	A_1	A_1	A_1	A_1
[0.080,0.52]	E	A_4	A_4	A_4	A_4	A_4

可见,在各工作状态下进行 10 ~ 200 次仿真所得结果一致,说明提出的方法样本依赖性低。

5　结　论

1)通过设备后果状态数学特性的研究,揭示了偏序特性,提出的格序化评估法能合理地评估设备最可能状态。

2)针对设备后果状态的不确定性和偏序特性,引入可能度概念,通过可能度矩阵准确评估设备状态,克服了非连通性带来的困难。

3)提出的方法所得评估结果与实测结果一致,不仅能获得最可能状态,还能得到可能状态排序,为决策者提供了更丰富的信息。

4)仿真证明,提出的方法结果准确,样本依赖性小,工程应用价值明显。

提出的方法不仅可用于设备电压暂降失效事件评估,对实际中大量存在的诸多具有不确定性的多值映射现象的评估,也有一定参考价值。如何结合实际系统电压暂降特征及其可能性,开发评估系统,是值得深入研究的课题。

参考文献:

[1] Chan J Y, Milanovic J V, Delahunty A. Risk-based assessment of financial losses due to voltage sag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 492 - 500.

[2] Vegunta S C, Milaniovic J V. Estimation of cost of downtime of industrial processes due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 576 - 587.

[3] Tao Shun, Xiao Xiangning, Liu Xiaojuan. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 63 - 69. [陶顺,肖湘宁,刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 63 - 69.]

[4] Zhao Jianfeng, Wang xun, Pan Shifeng. Study on power quality susceptivity testing system of AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 32 - 37. [赵剑锋,王浔,潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32 - 37.]

[5] Djokic K Z, Desmet J, Vanalrne G, et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruption[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 375 - 383.

[6] Djokic K Z, Stockman K, Milanovic J V, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and interruption [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494 - 505.

[7] Djokic K Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruption, and undervoltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

2004,19(3):1299-1307.

[8] Olguin G. Voltage dip(sag) estimation in power systems based on stochastic assessment and optimal monitoring[D]. Göteborg,Sweden:Chalmers University of Technology,2005.

[9] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(2):711-718.

[10] Xiao Xianyong,Ma Chao,Yang Honggeng,et al. Stochastic estimation of equipment sensitivity to voltage sag based on voltage sag severity index and maximum entropy principle [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(31):115-121. [肖先勇,马超,杨洪耕,等.用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J].中国电机工程学报,2009,29(31):115-121.]

[11] Chen Ping,Yang Honggeng,Xiao Xianyong. Sensitivity evaluation of sensitive equipment based on fuzzy failure criterion due to voltage sags[J]. Power system protect and control,2011,38(6):8-11. [陈平,杨洪耕,肖先勇.基于模糊失效准则的敏感设备电压凹陷敏感度评估[J].电力系统保护与控制,2011,38(6):8-11.]

[12] Chen Weidong,Xiao Xianyong,Li Wan,et al. Voltage sag sensitivity assessment of sensitive equipments by optimal square approximation[J]. Power System Technology,2009,33(8):55-59. [陈卫东,肖先勇,李皖,等.敏感负荷电压凹陷敏感度的最佳平方逼近评估法[J].电网技术,2009,33(8):55-59.]

[13] Xiao Xianyong,Yang Honggeng,Chen Wu,et al. Fuzzy-random assessment method of equipment sensitivity to voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):90-95. [肖先勇,杨洪耕,陈武,等.敏感设备电压暂降敏感度模糊随机评估[J].中国电机工程学报,2009,29(34):90-95.]

[14] Xiao Xianyong,Chen Wu,Yang Honggeng. Multi-uncertainty assessment for failure level of sensitive equipment caused by voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):36-42. [肖先勇,陈武,杨洪耕.敏感设备电压暂降故障水平的多不确定性评估[J].中国电机工程学报,2010,30(10):36-42.]

[15] Zhao Hong,Xiao Xianyong,Li Zhengguang,et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(10):70-75. [赵泓,肖先勇,李政光,等.敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J].电力自动化设备,2011,31(10):70-75.]

[16] Li Zhengguang,Gui Xianming,Xiao Xianyong. Interval failure probability assessment of sensitive load due to voltage sags[J]. Power System Protection and Control,2010,38(17):37-42. [李政光,桂贤明,肖先勇.敏感负荷电压暂降失效率区间概率评估[J].电力系统保护与控制,2010,38(17):37-42.]

[17] 李养成.集与映射[M].长沙:湖南人民出版社,1980:70-71.

[18] Couso I,Sánchez L. Upper and lower probabilities induced by a fuzzy random variable[J]. Fuzzy Sets and Systems,2011,165(1):1-23.

[19] Guo Chunxiang,Guo Yaohuang. An approach to multiple attribute lattice order decision making with interval numbers [J]. Forecasting,2004,23(5):71-73. [郭春香,郭耀煌.具有区间数的多目标格序决策方法研究[J].预测,2004,23(5):71-73.]

[20] Guo Chunxiang. Study on latticing and group lattice order decision[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2005. [郭春香.格序化与群格序决策研究[D].成都:西南交通大学,2005.]

[21] Li Dadong. Interval number and its application[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2004. [李大东.区间数的排序和它的一些应用[D].成都:西南交通大学,2004.]

[22] Lin Tao,Liu Jiacheng,Guo Yaohuang. Research on lattice order decision making on outcome space with multivalued mapping and its application[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University,2009,31(3):23-27. [林涛,刘家诚,郭耀煌.多值映射后果空间上的格序决策及其应用研究[J].湘潭大学自然科学学报,2009,31(3):23-27.]

(编辑 赵 婧)