

基于云模型的电压暂降设备敏感度评估

孙晓璐, 马静, 李渊博, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 设备电压暂降敏感度评估的难点在于不确定性, 包括随机性和模糊性, 利用云模型将两者结合起来, 综合描述设备电压耐受曲线的综合不确定性, 通过云滴将定性的不确定性有效地转换为定量的不确定性, 实现了对复杂不确定性的定量刻画。用复化 Simpson 数值积分法求云滴分布的数值解, 再定量计算设备敏感度。对个人计算机的评估结果与现有模糊评估法比较, 结果证明了该方法的正确性和准确性, 并能更好地揭示设备敏感度的不确定性, 有一定的理论价值和应用前景。

关键词: 电压暂降; 设备敏感度; 电压耐受曲线; 模糊性; 随机性; 云模型; 定性定量转换

Equipment sensitivity evaluation based on cloud model due to voltage sags

SUN Xiao-lu, MA Jing, LI Yuan-bo, XIAO Xian-yong

(College of Electrical Engineering & Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The critical problem faced by the evaluation of equipment sensitivity due to voltage sag is the uncertainty including randomness and fuzziness. In this paper, the randomness and fuzziness are integrated into a cloud model. This model can present the uncertainty of voltage tolerant curve (VTC) of sensitive equipment roundly. The cloud drop is used to transform the qualitative uncertainty into the quantitative uncertainty, which realizes the quantitative description of complex uncertainty. After the numerical value of cloud drop distribution is obtained by Simpson numerical integral method, the sensitivity of equipment due to voltage sag can be calculated. Comparing the proposed method with existing fuzzy evaluation method, the results show that this method is proper and accurate, can present the above mentioned uncertainty more reasonably, and has theoretical value and application prospect.

Key words: voltage sag; equipment sensitivity; voltage tolerance curve; fuzziness; randomness; cloud model; the transformation between qualitative and quantitative uncertainty

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0100-05

0 引言

电压暂降是电力用户和供电企业共同关心的最严重的电能质量问题^[1-3], 其原因在于给使用敏感设备的用户造成的经济损失巨大^[4]。因此, 近年来, 准确评估设备电压暂降敏感度和可能造成的影响^[5]成为了国内外研究的热点, 其难点在于电压暂降作用下, 敏感设备的电压耐受能力、可能出现的运行状态等的不确定性。设备敏感度常用设备故障率表示^[6], 对其进行准确评估, 仅对于用户采取合理供电方案和必要的技术措施具有重要意义, 对于提高供电质量和用户满意度等, 均具有重要理论价值和现实意义。

现有设备电压暂降敏感度评估方法主要有: 概率估计法和模糊评估法^[7], 实质是分别采用随机模型和模糊模型对设备电压耐受曲线在不确定区域的

分布进行建模, 其中, 随机性是由于事件的因果律缺失引起的不确定性, 而模糊性的原因是事件的排中律缺失, 显然随机法和模糊法在各自的假设条件下均具有其合理性, 同时也说明设备敏感度事件既具有内涵不确定的随机性, 又具有外延不确定的模糊性, 是同时包含随机性和模糊性的多重不确定性, 只有寻找到能准确刻画这样的随机模糊性的建模方法, 才能准确、客观地评估设备电压暂降敏感度。

正如文献[8]指出, 系统中实际往往同时包含随机性和模糊性, 且这些模糊性和随机性具有很强的个体性, 通常仅能用定性语言描述, 对于这样的不确定性的建模是进行设备敏感度评估的关键^[9]。云模型建立在传统模糊集理论和概率论的基础上, 能对模糊性问题的亦此亦彼性和隶属度的随机性进行统一刻画^[10], 通过云滴分布和云的数字特征能从个体性很强的随机性和模糊性中寻找反映固有不确定

定性的定量表达, 因此, 本文利用正向正态云模型建立描述设备电压耐受能力不确定性的云模型^[9], 把电压耐受曲线的不确定性描述为云滴的分布, 通过求取云滴的数值分布后, 定量计算设备敏感度。在实测样本的基础上, 将对个人计算机的评估结果与现有方法进行比较, 结果证明了提出方法的正确性和可行性, 为进一步深入揭示设备敏感度提出了理论依据和有效的评估方法。

1 云模型基本原理

我国著名学者李德毅、李德仁兄弟院士共同提出的云模型^[10], 揭示了自然和社会科学中大量存在的不确定现象所遵循的基本规律, 具有普遍的实用性^[8,10-16], 不仅可用于空间数据挖掘和自然语言的表达, 对为评估设备敏感度时建立设备电压耐受曲线的不确定模型提供了更合理的方法。

敏感设备的电压暂降敏感度受设备结构、负载水平等影响, 设备从正常到故障有量变到质变的积累过程, 该过程中设备中间状态具有模糊性, 但最后质的飞跃时机等具有随机性, 根据云模型的基本定义和属性, 用云模型进行描述是有效的方法。云模型的基本定义为:

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念, 若定量值 $x \in U$, 且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是有稳定倾向的随机数:

$$\mu: U \rightarrow [0, 1] \quad \forall x \in U \quad x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云 (cloud), 每一个 x 称为一个云滴^[10]。

从云的定义可见, 云是实现用语言值表示的某个定性概念与其定量表示之间的转换的不确定性建模方法, 用以反映自然语言中概念的不确定性, 该模型不仅可从经典随机理论和模糊集合理论给出解释, 用实际建模方法证明了模糊性与随机性的统一性原则, 建立了不确定性问题从定性到定量的映射关系。

2 设备电压耐受曲线的不确定性

敏感设备电压暂降耐受能力受其安装地点、功能、结构、运行方式、负载水平、使用寿命等影响, 具有不确定性, 因此, 电压耐受曲线 (Voltage Tolerate Curve, VTC) 在电压幅值-扰动持续时间平面上存在不确定区域。现有测试和标准表明, PC、PLC、ASD 等敏感负荷的 VTC 一般呈矩形^[17-19], 如图 1。图中, U 为电压暂降剩余电压, T 为持续时间。 U_{\min} 和 U_{\max} 为电压暂降幅值的最小值与最大

值; T_{\min} 和 T_{\max} 为电压暂降持续时间的最小值与最大值。曲线 1 的外部区域 ($U > U_{\max}$ 或 $T < T_{\min}$) 是正常工作区域; 曲线 2 的内部区域 ($U < U_{\min}$ 且 $T > T_{\max}$) 是故障区域; 曲线 1、2 之间为不确定区域。

不同负荷 VTC 的不确定区域存在差异, 其中几种典型负荷 VTC 的不确定区域为^[5,7,17-19]: PC 的电压幅值 46%~63%, 持续时间 40~205 ms; PLC 的电压幅值 30%~90%, 持续时间 20~400 ms; ASD 的电压幅值 59%~71%, 持续时间 15~175 ms。

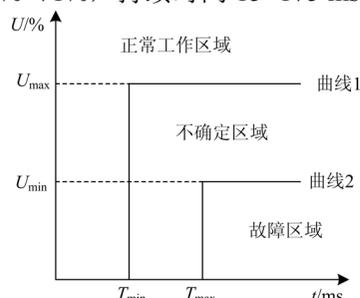


图 1 负荷敏感度曲线的不确定性区域

Fig.1 Region of uncertainty for sensitivity curve of the equipment

3 云的数学特征与云发生器

3.1 数字特征

云概念的整体特性可以用云的数字特征来反映, 这是定性概念的整体定量特性, 对理解定性概念的内涵和外延有重要意义。云用期望 Ex (Expected value)、熵 En (Entropy) 和超熵 He (Hyper entropy) 三等数字特征来整体表征一个概念^[7], 如图 2, 对于图中刻画的云模型: $Ex=0$, $En=1$, $He=0.1$, $n=1000$ 。

期望 Ex : 云滴在论域空间分布的期望, 即最能够代表定性概念的点。

熵 En : 定性概念的不确定性度量, 由概念的随机性和模糊性共同决定。一方面 En 是定性概念随机性的度量, 反映了能够代表该定性概念的云滴的离散程度; 另一方面又是定性概念亦此亦彼的度量, 反映了论域空间中可被概念接受的云滴的取值范围。通常, 熵越大, 概念越宏观, 模糊性和随机性也越大, 确定性量化也越困难。

超熵 He : 是熵的不确定性度量, 即熵的熵, 反映了云滴的离散程度。超熵越大, 云滴离散度越大, 隶属度随机性越大, 云的厚度也越大。 He 对云模型的形态、云滴分布的影响可见文献^[8,11]。

3.2 云发生器

云发生器分为正向云发生器和逆向云发生

器^[8,10-16]。正向云发生器是从定性到定量的映射，

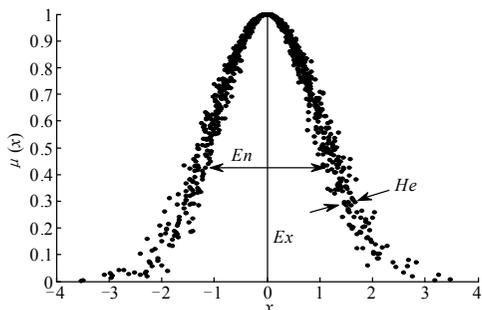


图2 云模型的数字特征
Fig.2 Digital characters of the cloud model

它根据云的数字特征 (Ex, En, He) 产生云滴。而逆向云发生器相反，它将一定数量的精确数据转换为以数字特征 (Ex, En, He) 表示的定性概念。正态云模型是最重要的一种云模型，由于其具有良好的数学性质，可表示设备电压耐受曲线的不确定，李德毅院士等证明了正态云模型的普适性^[12]。

当概念对应的数域为一维时，正态正向云发生器的算法如下：

- (1) 生成以 En 为期望值， He^2 为方差的一个正态随机数 En' ；
- (2) 生成以 Ex 为期望值， En'^2 为方差的一个正态随机数 x ；
- (3) 计算确定度 $\mu = \exp(-\frac{(x - Ex)^2}{2En'^2})$ ；
- (4) 具有确定度 μ 的 x 成为数域中的一个云滴；
- (5) 重复步骤 (1) ~ (4)，直至产生要求的 n 个云滴为止。

正态云发生器可以生成不确定概念的随机量化值，并且给出随机的量化值代表该概念的确定度。

4 敏感设备故障率评估

云滴是云模型在概率意义下的随机实现，根据正态云发生器算法，所有云滴 x 构成随机变量 X ^[15-16]，其期望为 Ex ，方差为 $En^2 + He^2$ ，概率密度函数为：

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2\pi He|y|} \exp(-\frac{(x - Ex)^2}{2y^2} - \frac{(y - En)^2}{2He^2}) dy \quad (2)$$

式 (2) 是一个没有解析形式的概率密度函数，其分布呈“中间多，两头少”的特点。当 $He=0$ 时，云模型退化为普通正态函数。对任意 x_0 ，可通过积分变换 $y = En + t \cdot \sqrt{2}He$ 后用 Gauss-Hermite 积分求得相应的函数值 $f(x_0)$ ^[20]。

求得 $f(x)$ 的值后，可以求解其在区间 $[a, b]$

上的积分，如式 (3)：

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad (3)$$

由于 $f(x)$ 没有明晰的解析形式，可用数值积分法求解该积分，具体可用复化 Simpson 数值积分法^[17]。首先将区间 $[a, b]$ 分成 n 等分，各节点为 $x_k = a + kh$ ($k=0, 1, \dots, n$)，步长 $h = (b-a)/n$ ，在各子区间 $[x_k, x_{k+1}]$ 上采用 Simpson 公式，求得积分近似值 I_k ，再用 $I = \sum_{k=0}^{n-1} I_k$ 作为准确积分的近似值。复化

Simpson 公式如式 (4)，其中 $x_{k+0.5}$ 为区间 $[x_k, x_{k+1}]$ 的中点， I 作为云滴在区间 $[a, b]$ 上的积分。

$$I = [f(a) + 4 \sum_{k=0}^{n-1} f(x_{k+0.5}) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k) + f(b)] * h / 6 \quad (4)$$

本文将暂降电压幅值和持续时间看作独立变量，分别建立云模型，并用上述方法求解其云滴的概率密度函数 $f_U(u)$ 、 $f_T(t)$ ，然后确定设备在特定暂降特征 (u, t) 下的故障率 p ：

$$p = \int_u^{U_{max}} f_U(u) du \int_{T_{min}}^t f_T(t) dt \quad (5)$$

5 算例仿真

本文在作者所在实验室进行的实际测试的基础上，对 PC 机进行仿真，其他敏感设备的评估过程与此类似。根据测试结果，PC 对电压幅值的耐受能力范围为 46%~63%，对暂降持续时间的耐受范围为 40~205 ms。用 (Exv, Env, Hev)、(Ext, Ent, Het) 分别表示设备耐受能力对电压幅值、持续时间的云模型参数。随机选取几个电压暂降特征点评估其故障率。

为了便于与现有模糊评估法进行比较，采用文献[21-22]提出的模糊评估模型，模糊分布函数采用应用最广的正态隶属函数^[11]，将模糊评估结果与本文方法进行对比，如表 1。为说明方法，下面仅对电压幅值参数变化情况进行分析，暂降持续时间的分析类似。

从表 1 中可见：1) 设备电压耐受水平相同时，随着系统暂降严重性增加 (电压幅值降低，暂降持续时间增加)，设备故障率明显增加，如表中 1~4 行，这与现实是一致的；2) 当系统扰动相同时，随设备耐受能力增强，故障率降低，如表中 7~8 行，说明本文方法能正确反映设备耐受能力对故障率的影响；3) 设备电压耐受能力云模型的三个参数 (Ex, En, He) 对设备故障率都有影响，其中 Ex 的影响最为严重， He 最轻。

同时可见，本文方法的评估结果与模糊评估法

基本吻合, 存在微小差异, 两种方法均能正确反映系统暂降、设备电压耐受能力对设备敏感度的影响, 但本文方法考虑的敏感设备耐受能力的不确定因素更全面, 因此, 本文方法更符合实际, 能更好地刻画设备电压耐受曲线和设备敏感度的不确定性。虽

然不同敏感设备的敏感度差异很大, 在具体采用云模型进行评估时需结合实际样本的数字特征进行分析, 但本文提出的方法同样适用, 限于篇幅本文仅给出 PC 机的评估结果。

表 1 PC 机的电压暂降评估结果

Tab.1 Assessment results of the voltage sag sensitivity of PC

电压暂降 $V/\%$, T/ms	(Ex_v , Env , Hev)	(Ext , Ent , Het)	云模型评估法	模糊评估法
(57, 95)	(54.5, 2.8, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.028 1	0.029 0
(57, 150)	(54.5, 2.8, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.152 2	0.155 2
(51, 95)	(54.5, 2.8, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.138 7	0.140 4
(51, 150)	(54.5, 2.8, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.750 9	0.750 2
(35, 105)	(54.5, 2.8, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.257 8	0.260 5
(56, 240)	(54.5, 2.8, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.290 1	0.294 4
(51, 150)	(54.5, 2, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.804 2	0.806 3
(51, 150)	(52, 2, 0.4)	(122.5, 27.5, 3)	0.586 9	0.580 8
(51, 150)	(54.5, 2, 1)	(122.5, 27.5, 3)	0.789 1	0.806 3

6 结论

1) 用云模型刻画设备电压耐受能力的不确定性, 通过云模型实现不确定现象从定性到定量的转换, 根据云滴分布数值解定量评估设备敏感度, 能更好地同时考虑设备敏感事件的随机性和模糊性, 评估结果更加符合客观实际。

2) 基于云模型的评估结果的准确度, 取决于描述设备电压耐受能力的模型精确度, 即云模型的三个数字特征, 尤其是期望 Ex 。该值可以根据大量实测数据和现场运行经验得到, 且获得期望值比直接获得分布规律显然要容易得多, 因此, 本文方法的应用价值更大。

3) 在实际工程评估中, 如何结合供电系统的电压暂降描述模型, 同时考虑系统暂降特征和设备电压耐受能力的不确定性, 建立更加完备的评估系统是值得研究的重要课题。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 程浩忠, 艾芊, 张志刚, 等. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [3] 刘安定, 肖先勇, 邓武军. 短时电能质量扰动检测的一种新方法[J]. 继电器, 2005, 33(8): 27-30.
LIU An-ding, XIAO Xian-yong, DENG Wu-jun. A new method for detecting short duration disturbance of power quality[J]. Relay, 2005, 33(8): 27-30.

- [4] 楼书氢, 徐永海, 陈恩黔. 配电网中电压暂降源的检测方法比较[J]. 继电器, 2006, 34(15): 63-67.
LOU Shu-qing, XU Yong-hai, CHEN En-qian. Comparison on methods for voltage sag source detection in power distribution network[J]. Relay, 2006, 34(15): 63-67.
- [5] 肖先勇, 王希宝, 薛丽丽, 等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机估计方法[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 30-33.
XIAO Xian-yong, WANG Xi-bao, XUE Li-li, et al. A method to stochastically estimate voltage sag sensitivity of sensitive equipments[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 30-33.
- [6] 冉志红, 李乔. 结构可靠性方法研究[J]. 计算力学学报, 2008, 25(5): 711-716.
RAN Zhi-hong, LI Qiao. Research on structure possibilistic reliability method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25(5): 711-716.
- [7] 曾鸣, 甘德一, 崔拓伟, 等. 基于动态仿真和云模型的发电竞争参数设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 7-11, 17.
ZENG Ming, GAN De-yi, CUI Tuo-wei, et al. Research on parameter design of competitive generation markets based on dynamic simulation and cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 7-11, 17.
- [8] 李德毅, 杜鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 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] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的电力

系统运行风险评估(二)理论部分[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 11-15, 21.

FENG Yong-qing, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory part two theory fundament[J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(2): 11-15, 21.

[11] 李德毅. 知识表示中的不确定性[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 73-79.

LI De-yi. Uncertainty in knowledge representation[J]. Engineering Science, 2000, 2(10): 73-79.

[12] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.

LI De-yi, LIU Chang-yu. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.

[13] 刘常昱, 李德毅, 杜鹤, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239, 248.

LIU Chang-yu, LI De-yi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model[J]. Information and Control, 2005, 34(2): 236-239, 248.

[14] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 32-35.

LIU Chang-yu, LI De-yi, PAN Li-li. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. Computer Engineer and Application, 2004, 40(2): 32-35.

[15] 罗自强, 张光卫, 李德毅. 一维正态云的概率统计分析[J]. 信息与控制, 2007, 36(4): 471-475.

LUO Zi-qiang, ZHANG Guang-wei, LI De-yi. Probability statistics analysis of one-dimensional normal cloud[J]. Information and Control, 2007, 36(4): 471-475.

[16] 胡斌, 王生进, 丁晓青. 基于云模型的驾驶员驾驶状态评估方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 39-43.

HU Bin, WANG Sheng-jin, DING Xiao-qing. Estimation of driver's driving state based on cloud model[J]. Tsinghua Univ: Sci&Tech, 2009, 49(10): 39-43.

[17] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sag, short interruptions and undervoltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.

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

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

[20] 胡兵, 李清朗. 现代科学与工程计算基础[M]. 成都: 四川大学出版社, 2003.

[21] 黄洪钟, 孙占全, 郭东明, 等. 随机应力模糊强度时模糊可靠性的计算理论[J]. 机械强度, 2001, 23(3): 305-307.

HUANG Hong-zhong, SUN Zhan-quan, GUO Dong-ming, et al. Fuzzy reliability analysis in the case of random stress and fuzzy strength[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(3): 305-307.

[22] 肖先勇, 杨洪耕, 陈武, 等. 敏感设备电压暂降敏感度的模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 90-95.

XIAO Xian-yong, YANG Hong-geng, CHEN Wu, et al. Fuzzy-random evaluation of equipment sensitivity due to voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 90-95.

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-04-28

作者简介:

孙晓璐(1987-), 女, 本科, 研究方向为电能质量与智能电网; E-mail: sunxiaolu2008@126.com

马静(1991-), 女, 本科, 研究方向为电能质量与智能电网;

李渊博(1984-), 男, 硕士, 研究方向为电能质量及其控制技术。

(上接第 99 页 continued from page 99)

HU Liang-deng, YE Zhi-hao, FANG Ming, et al. Analysis protection setting of different capacity generators parallel for integrated power system[C]. //25th CUS-EPSC, 2009.

[20] 王琦. 新型船舶电力系统短路特征分析与保护措施研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.

WANG Qi. Research on short-circuit characteristic and protection of new shipboard power system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.

[21] Lin Liang-zhen, Ye Lin. Transient analysis software package of electromagnetism in PSCAD/EMTDC[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 65-66.

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-06-05

作者简介:

胡亮灯(1986-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全运行; E-mail: hldhdg@163.com

叶志浩(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全运行;

方明(1984-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全运行。