

个人电脑电压暂降失效事件组合不确定性评估

汪颖¹, 杨达¹, 肖先勇¹, 杨景岗²

(1. 四川大学电气信息学院 成都 610065; 2. 乐山电力股份有限公司 四川 乐山 614000)

【摘要】提出一种基于混合熵的用户设备电压暂降失效事件组合不确定性评估方法。在研究组合不确定性评估模型与算法的基础上,根据实测样本数据特征,将组合不确定性分解为随机性、模糊性以及两者的交叉不确定性。以PC为例,并考虑到PC机在电压暂降前可能处于全速、空载和正常等运行状态,暂降后可能出现完全死机、运算出错和“假死”等失效状态,利用该方法进行失效率评估,并与现有概率、模糊等评估法进行比较,结果证明,该方法可克服传统方法中存在的过估计或欠估计问题,结果更符合工程实际。

关键词 组合不确定性; 用户设备; 失效率; 混合熵; 联合空间; 电压暂降

中图分类号 TM711

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.011

Combined Uncertainty Evaluation of Personal Computer Failure Event Caused by Voltage Sag

WANG Ying¹, YANG Da¹, XIAO Xian-Yong¹, and YANG Jing-gang²

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University Chengdu 610065;

2. Leshan Electric Power Co. Ltd Leshan Sichuan 614000)

Abstract The paper proposes a method based on maximum hybrid entropy (MHE) to assess the uncertainty of equipment failure event caused by voltage sag. By considering the data characteristics of the tested samples, the combined uncertainty is decomposed into a random, a fuzzy, and a cross uncertainty. As a case study, PC is tested and assessed when it is in full speed, no-load and normal operation states. During voltage sags, PC is in different result states, such as completely crash, operating error, or false crash. The proposed method is applied to assess the failure rate and compared with existing probability methods and fuzzy methods. The results show that this method overcomes the disadvantages of over-estimating or low-estimating problem and it is more accurate in accord with the engineering practice.

Key words combined uncertainty; customer equipment; failure rate; hybrid entropy; joint space; voltage sag

为了提高生产效率,大量基于电力电子、微电子和计算机芯片等的用户设备接入电力系统,成为电力系统的重要负荷。这些用户设备对供电系统内可能产生的电压暂降等短时电能质量扰动非常敏感,给用户和社会造成了巨大损失^[1]。与此同时,大量风电、太阳能发电等分布式电源等也越来越多地接入电网,这些设备同样对电压暂降很敏感,因此,研究电压暂降引起的用户设备失效率,不仅对大量敏感用户,而且对于大量涌现的新能源发电设备和储能设备等均有重要意义^[2-3]。

电压暂降导致的设备故障受暂降严重程度、暂降原因、故障位置、设备运行状态与环境等多因素影响,这些原因可能是由于因果律缺失,也可能是

由于排他律缺失造成,因此,同时具有随机性、模糊性等复杂不确定性^[4-6]。现有评估方法有实测法和模型评估法两大类。实测法原理简单,结果可信,但测量成本高,不具有预见性,推广性也不强^[7];模型评估法包括概率估计法、模糊评估法及其改进方法^[7-10]。模型法通过建立概率模型和模糊模型,估计由内涵或外延的不确定引起的随机或模糊不确定性,分别评估设备失效不确定性和失效严重程度^[8-10]。事实上,电压暂降导致的设备失效事件同时包含随机性、模糊性和两者交叉的不确定性,是复杂的混合不确定性,需采用不确定性评估方法进行评估^[11-12]。

到目前位置,国内外诸多学者对电压暂降引起的设备失效率开展了大量研究。提出了概率评估法、

收稿日期: 2012-05-08; 修回日期: 2012-10-29

基金项目: 四川省科技支撑计划(2010GZ0256, 2013GZ0062)

作者简介: 汪颖(1981-),女,博士生,主要从事电能质量、智能供配电系统方面的研究。

模糊评估法、以及模糊随机和随机模糊等双重不确定性评估方法。实际测试证明, 以PC机为代表的用户设备的电压暂降失效率的不确定性, 从样本特征和不确定属性看, 传统方法均存在过估计或欠估计等问题。

综合考虑设备失效率的混合不确定性, 建立与现有随机测度、模糊测度兼容, 并能同时度量随机性和模糊性的统一评估测度, 已成为该领域发展的必要要求。熵是刻画不确定性的有效测度之一, 随机熵和模糊熵可分别刻画随机不确定性和模糊不确定性, 而两类不确定性交叉形成不确定性, 类似地, 可用交叉熵刻画。因此, 引入随机熵、模糊熵和交叉熵概念, 构造刻画复杂不确定性的混合熵评价测度, 可克服现有方法的不足。

混合熵方法已在数据挖掘等领域得到广泛应用^[12-13]。本文将该方法引入电压暂降引起的用户设备失效事件的不确定性评估, 提出一种能有效刻画和评价设备失效事件复杂不确定性的混合熵评价测度和评估模型, 并与现有随机评估、模糊评估等方法进行比较, 证明该模型的正确、可行。

1 设备电压暂降失效率的不确定性

大量实测证明, 个人电脑(PC)、变速驱动装置(ASD)、可编程逻辑控制器(PLC)等的电压耐受曲线呈矩形^[6-8], 如图1所示。但耐受曲线存在一个不确定区域, 可分为图1中A、B、C 3个子区域。

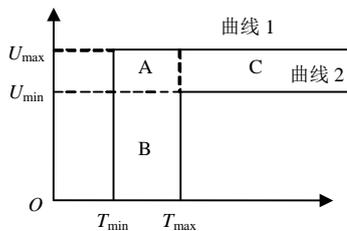


图1 设备电压耐受曲线不确定性区域

设备电压耐受曲线的不确定性区域说明, 发生在不确定区域内的电压暂降所导致的设备失效事件的原因、严重程度不确定, 在各子区域内, 电压暂降导致的设备失效事件的规律也不确定。

当用户设备的供电侧发生电压暂降时, PC机的失效事件不仅与暂降幅值、持续时间等有关, 还与PC机的运行状态、负载情况、运行环境等有关, 设备的失效原因不明, 由于其因果率取失, 可用随机性描述。电压暂降发生后, PC机可能出现“假死”等多种状态。这说明, 对于PC机而言, 电压暂降的

严重程度不确定, 这类不确定主要表现为排他律缺失, 因此属于模糊不确定性; 同时, PC机发生短暂失效后能否自动恢复正常也不确定, 这时的不确定造成的原因不明, 属于随机不确定性。可见, 评估电压暂降引起的用户设备失效事件, 需同时考虑随机性、模糊性共同构成的复杂不确定性。

2 混合熵原理及其存在条件

由模糊和随机不确定性共同构成的设备失效事件的混合不确定性, 可通过引入混合熵概念, 用随机熵、模糊熵和交叉熵进行刻画, 如图2所示。这样对实际不确定性的刻画更为完备, 可克服单一考虑随机或模糊不确定性可能造成的过估计或欠估计等问题。

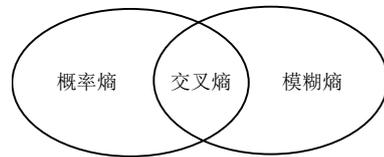


图2 混合熵示意图

根据定义, 离散混合熵为:

$$H_h(R, F) = -\sum_{i=1}^n \{p_i \mu_i \lg(p_i \mu_i)\} - \sum_{i=1}^n \{p_i (1 - \mu_i) \lg p_i (1 - \mu_i)\} \quad (1)$$

式中, $i=1 \sim n$, n 为不确定变量数; p_i 为失效可能性(随机性); μ_i 为失效严重程度(模糊性)。

式(1)定义需满足公理化假设^[14]: 当 $H_h(R, F)$ 的模糊性消失, 即 $\mu_i=0$ 或 1 时, 退化为随机熵; 当随机性消失, 即 $p_i=0$ 或 1 时, 退化为模糊熵。

满足上述公理化假设的混合熵概念能与随机熵、模糊熵概念实现兼容。对式(1)进行数学变换:

$$H_h = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i - \sum_{i=1}^n \{\mu_i \log \mu_i + (1 - \mu_i) \log(1 - \mu_i)\} + \sum_{i=1}^n (1 - p_i) \{\mu_i \log \mu_i + (1 - \mu_i) \log(1 - \mu_i)\} = H_r + H_f - H_{rf} \quad (2)$$

其中, 分别定义随机熵 H_r 、模糊熵 H_f 、交叉熵 H_{rf} 如下:

$$H_r = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (3)$$

$$H_f = -\sum_{i=1}^n \{\mu_i \log \mu_i + (1 - \mu_i) \log(1 - \mu_i)\} \quad (4)$$

$$H_{rf} = \sum_{i=1}^n (1-p_i) \{ \mu_i \log \mu_i + (1-\mu_i) \log(1-\mu_i) \} \quad (5)$$

可见, 当 $\mu_i=0$ 或 1 时, $H_h = H_r$; 当 $p_i=0$ 或 1 时, $H_h = H_r$ 。这说明, 式(2)定义的混合熵概念满足公理化假设。

3 不确定性评估模型与算法

3.1 设备失效事件评估模型

评价不确定性可采用熵的概念。在有限约束下, 熵越大时, 不确定规律中包含的主观因素越少^[12-14]。根据第2节引入的混合熵概念, 同时考虑到用户设备因电压暂降造成的失效事件的评估, 最关心相对于电压暂降的典型特征、暂降幅值(剩余电压)和暂降持续时间的设备失效率的不确定性, 因此, 根据式(1)、式(2), 可建立最大混合熵模型评估为:

$$\begin{aligned} \text{MAX } H_h = & - \sum_{i=1}^n \{ p_i \mu_i \log(p_i \mu_i) \} - \\ & \sum_{i=1}^n \{ p_i (1-\mu_i) \log p_i (1-\mu_i) \} = \\ & H_r + H_f - H_{rf} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i = 1 \\ \mu_i = g(p_i) \\ \sum_{i=1}^n i p_i = E_1 \\ \sum_{i=1}^n (i-E_1)^h p_i = E_h \\ 0 \leq p_i \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, E_1 、 E_h 为样本第1阶原点矩和第 h 阶中心距。仿真证明, 当变量个数少于6时, 矩的阶数不大于3, 变量个数再增多时, 仅需取4阶矩或者5阶矩, 详见文献[9]。

实测发现, 当电压暂降引起的用户设备失效事件越严重时, 设备的故障率越高, 根据模糊性与随机性的统一性原则和转换方法, 可将模糊量转化为用随机量刻画的函数, 即:

$$\mu_i = \lambda p_i \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{1}{\max(p)} \quad (9)$$

由此得:

$$g(p_i) = \frac{p_i}{\max(p)} \quad (10)$$

3.2 模型算法

式(6)、式(7)模型可看作一个多目标非线性模

型, 直接求解较难, 本文采用近似规划法求解^[15], 将目标函数和约束条件近似为线性函数。

根据用户设备(本文采用PC机)对电压暂降幅值、持续时间的敏感范围(电压耐受曲线不确定区域的边界)以及实测结果可知, 模型中不确定变量的取值总在某范围内, 可转化为近似线性规划问题, 并用单纯形法等进行求解。用符合条件的某可行解作目标函数解的近似, 并以此作为初始解进行优化, 求得最优解。

4 设备失效率评估

对用户设备电压暂降失效的不确定性可失效率进行量化评估。由于设备失效事件具有混合不确定性, 可分别从随机、模糊和交叉不确定性3个不同的角度分别刻画, 然后进行综合。设备失效率评估步骤如图3所示。

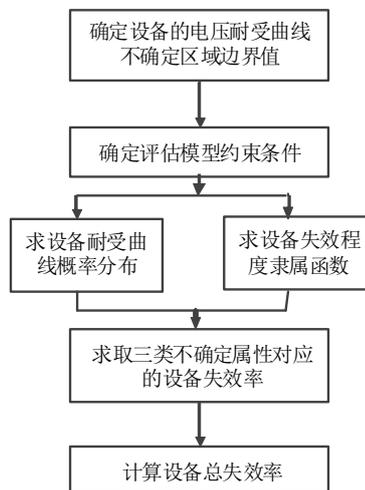


图3 设备失效率评估步骤

1) 随机性评估。如图1所示, 当电压暂降发生在A区域时, 若暂降持续时间和幅值分别为 S_1 、 S_2 , 则失效率为:

$$m = m_t m_v = \int_{t=T_{\min}}^{S_1} p_t dt \int_{v=S_2}^{V_{\max}} p_v dv \quad (11)$$

式中, t 、 v 分别为持续时间和幅值变量; p_t 、 p_v 是用混合熵模型求得的设备电压耐受曲线对持续时间和暂降幅值的概率。

2) 模糊性评估。用户设备失效事件有随机性, 失效严重程度有模糊性, 此时的设备失效率为:

$$y = (m_t \mu_t)(m_v \mu_v) \quad (12)$$

式中, m 为设备失效概率; μ 为失效严重程度, 参数由混合熵模型中的设备失效隶属度确定。

3) 交叉不确定性评估。用户设备的电压暂降失效事件中, 由模糊性与随机性共同确定的失效率为:

$$d = (m_t n_t)(m_v n_v) \quad (13)$$

式中, m 为设备失效概率; n 为对应事件的失效率。

当电压暂降发生在不确定区域B、C时, 式(11)~式(13)中仅有与 t 或 v 相关的变量。

对实测数据进行统计, 可得三类不确定样本的比例, 假设分别为 w_1 、 w_2 和 w_3 , 则用户设备总失效率为:

$$F = w_1m + w_2y - w_3d \quad (14)$$

5 样本测试与算例分析

5.1 样本测试及不确定区间

对用户广泛采用的PC进行测试。电压暂降源为Fluke 6100A, 利用自制的线性功率放大器对暂降扰动源进行放大, 并直接带PC运行。根据推荐的IEC测试标准和实测需要, 依次以2%电压幅值和5 ms持续时间为步长产生电压暂降, 对PC机的全速运行、待机、正常负载(CPU负载率30%~40%)等状态进行近万次实验。其中, 全速度运行和待机状态是两个最极端情况, 详细记录测试结果如图4和图5所示。

被测设备电压耐受能力不确定区间如表1所示, 可见, 当PC机全速运行时, VTC曲线的不确定边界为75~95 ms、47%~55%; 当处于待机状态时, VTC曲线的不确定边界为105~130 ms、41%~49%; 当PC机的运行状态位于两者之间时, VTC曲线的不确定边界也应位于这两个不确定边界之间。因此, 该PC机的VTC曲线不确定性边界为75~130 ms、41%~55%。

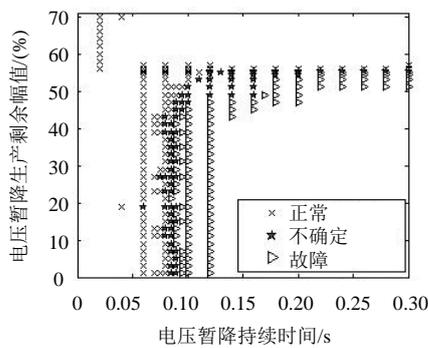


图4 被测设备全速运行时失效事件散点图

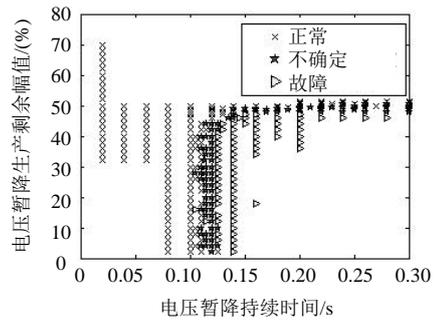


图5 被测设备待机状态下失效事件散点图

表1 被测设备电压耐受能力不确定区间

被测设备	$U_{min}/(\%)$	$U_{max}/(\%)$	T_{min}/ms	T_{max}/ms
PC	41	55	75	130

5.2 结果与比较

仿真表明, 随机选取不确定区域内的样本数越多, 评估结果与实际测试结果越接近。当样本数达到80时, 理论评估结果的误差小于5%, 足以满足工程估计需要。因此, 在利用本文的最大混合熵评估方法进行理论评估时, 选用80个样本。

当电压暂降发生在不确定区域A时, PC机失效与暂降幅值、持续时间均有关, 当电压暂降位于B、C区域时, 失效仅与持续时间、暂降幅值有关。用本文方法进行评估的结果, 以及采用随机评估法、模糊评估法所得的结果如表2所示(表中仅给出了电压暂降发生在B区域的情况), 其中, δ_1 为实测设备失效率, δ_2 为评估所得设备失效率, 评估结果的相对误差为:

$$\xi = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1} \times 100\% \quad (15)$$

可见, 最大混合熵评估方法所得的评估结果更接近实测结果, 最大相对误差为3.906 3%。随机评估方法普遍过估计, 而模糊评估方法会欠估计, 最大误差分别达到39.843 8%和-60.550 5%。其原因在于, 随机评估法仅考虑了因果率缺失, 而模糊评估法仅考虑了设备失效事件的排他率缺失, 两者均会出现较大误差, 同时考虑设备失效事件的混合不确定性后的结果更符合实际。

表2 B区域内暂降引起的设备失效率评估结果

电压暂降特征		$\delta_1 /(\%)$	本文方法		随机评估法		模糊评估法	
幅值/(\%)	持续时间/ms		$\delta_2 /(\%)$	$\xi /(\%)$	$\delta_2 /(\%)$	$\xi /(\%)$	$\delta_2 /(\%)$	$\xi /(\%)$
45	120	10.90	10.77	1.192 7	14.40	32.110 1	4.30	-60.550 5
	115	12.80	13.30	3.906 3	17.90	39.843 8	6.60	-48.437 5
41~55之间任意值	120	27.10	27.40	1.107 0	32.40	19.557 2	19.70	-27.306 3
	125	46.60	46.20	-0.858 3	51.10	11.619 4	37.90	-18.669 5
	130	64.90	64.50	-0.616 3	73.00	9.656 7	50.30	-22.496 1

6 结论

对于用户设备的电压暂降失效事件具有混合不

确定性, 将其分解为随机性、模糊性和交叉不确定性, 分别用随机熵、模糊熵和交叉熵进行不确定性刻画, 建立最大混合熵评估模型, 可在全面考虑混

合不确定性的同时,避免随机法、模糊法可能导致的过估计和欠估计的不足。对PC机的实际测试和理论评估表明,本文方法正确、可行,评估结果更符合工程实际。评估结果可作为采取必要技术措施和进行投资决策的依据。

本文方法不仅可用于用户设备电压暂降失效率评估,也可用于分布式电源低电压穿越能力评估和电力系统内其他复杂不确定性事件的评估。

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 Trans on Power Delivery, 2011, 26(2): 492-500.
- [2] 代双寅, 韩民晓, 严稳莉. 含分布式电源的配电网电压暂降评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 145-149.
DAI Shuang-yin, HAN Min-xiao, YAN Wen-li. Voltage sag assessment for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 145-149.
- [3] 杨晓东, 李庚银, 周明, 等. 电压暂降随机预估的自适应信赖域方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 39-44.
YANG Xiao-dong, LI Geng-yin, ZHOU Ming, et al. Adaptive trust region method for stochastic estimation of voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 39-44.
- [4] HANNAN M A, NORDIN N A, MOHAMED A. Evaluation of AC contactor ride through capability during voltage sag with point-in-wave of initiation[J]. International Review of Electrical Engineering, 2011, 5(4): 1754-1759.
- [5] CHAN J Y, MILANOVIC J V, DELAHUNTY A. Generic failure-risk assessment of industrial processes due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(4): 2405-2414.
- [6] 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.
CHEN Wei-dong, XIAO Xian-yong, LI Wan, et al. Voltage sag sensitivity assessment of sensitive equipments by optimal square approximation[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 55-59.
- [7] DOVIC J V, GUPTA C P. Probability assessment of financial losses caused by interruptions and sags, part I: the methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 918-924.
- [8] XIAO Xian-yong, MA Chao, YANG Hong-geng, et al. Failure probability analysis of sensitive equipment due to voltage sags using fuzzy-random assessment method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2970-2975.
- [9] 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.
XIAO Xian-yong, MA Chao, YANG Hong-geng, 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.
- [10] 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 assessment method of equipment sensitivity to voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 90-95.
- [11] 史玉峰, 史文中, 靳奉祥. GIS空间数据不确定性的混合熵模型研究[J]. 武汉大学学报, 2006, 31(1): 82-85.
SHI Yu-feng, SHI Wen-zhong, JIN Feng-xiang. Hybrid entropy model of spatial data uncertainty in GIS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(1): 82-85.
- [12] 孙永厚, 周洪彪, 黄美发, 等. 几何产品测量不确定度的混合熵评定方法[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(4): 67-68
SUN Yong-hou, ZHOU Hong-biao, HUANG Mei-fa, et al. Evaluation method of geometric product measurement uncertainty based on hybrid entropy[J]. Machine Design and Research, 2008, 24(4): 67-68.
- [13] 刘艳芳, 兰泽英, 刘洋, 等. 基于混合熵模型的遥感分类不确定性的多尺度评价方法研究[J]. 测绘学报, 2009, 38(1): 82-87.
LIU Yan-fang, LAN Ze-ying, LIU Yang, et al. Multiscale evaluation method for uncertainty of remote sensing classification based on hybrid entropy model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(1): 82-87.
- [14] 尚修刚, 蒋慰孙. DeLuca-Termini混合熵的合理性分析及其推广[J]. 华东理工大学学报, 1996, 23(5): 590-595.
SHANG Xiu-gang, JIANG Wei-sun. Reasonableness analysis and generalization of hybrid entropy proposed by DeLuca-Termini[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1996, 23(5): 590-595.
- [15] CIVANLAR M R, TRUSSELL H J. Constructing membership function using statistical data[J]. Fuzzy Sets and System, 1986, 18(1): 1-13.

编辑 漆 蓉