

敏感设备电压暂降失效可能性非可加性测度与评估方法

李皖¹, 桂贤明², 肖先勇¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川省电力公司通信自动化中心, 四川 成都 610004)

摘要: 测度选取是准确评估敏感设备电压暂降失效可能性的基础, 失效事件基本属性与评估指标是关键。在概率测度要求的可加性条件不满足时, 采用满足非可加性条件的可能度为测度更符合实际。利用模糊统计和多项式拟合法对样本做处理, 确定敏感设备电压耐受能力隶属函数, 再由模糊安全事件隶属函数确定原理确定设备失效可能性分布函数, 以此建立设备失效度评估模型。以实测样本为依据, 对PC机进行评估, 并与现有概率法和模糊随机法进行比较, 仿真结果证明该方法正确有效, 更客观地反映实际情况, 可满足工程应用需要。

关键词: 电压暂降; 敏感设备; 失效可能性; 非可加性测度; 失效度; 可能性分布函数; 实测对比

Non-additive measure and assessment method of the failure possibility of sensitive equipment due to voltage sag

LI Wan¹, GUI Xian-ming², XIAO Xian-yong¹

(1. School of Electrical Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Telecommunication & Automation Center of SEPC, Chengdu 610004, China)

Abstract: The choice of measure is the foundation of accurate assessment of sensitive equipment failure possibility due to voltage sag and the basic attribute of failure event and assessment indices are the key. When the additivity of probability measure is unable to be fulfilled, the use of possibility measure which is possessed of non-additivity is more realistic. The membership function of sensitive equipment voltage tolerance capability is determined after using fuzzy statistical method and polynomial fitting method to dispose samples, and the possibility distribution function of equipment failure is deduced by the determination principle of membership function of fuzzy safety event. Hence, assessment model of equipment failure degree is constructed. Based on practical samples, the PC is evaluated with the proposed model and the assessment method is compared with the existing probabilistic method and fuzzy-probabilistic method; the simulation results show that this method is correct as well as able to reflect practical situation more objectively and meet the needs of engineering application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No.50877049 and No.50677041) and also supported by Science and Technology Bureau of Sichuan Province (No.2008JY0043-2).

Key words: voltage sag; sensitive equipment; failure possibility; non-additive measure; failure degree; possibility distribution function; practical comparison

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0096-06

0 引言

随着社会和科技的发展, 用户对电力系统的满意度已成为电力企业和用户共同关心的问题^[1]。在系统电压等级不断提高、规模不断增大的同时, 用户侧敏感设备, 如可编程逻辑控制器 (Programmable

Logic Controllers, PLC)、调速驱动装置 (Adjustable Speed Drives, ASD)、计算机 (Personal Computers, PC)、交流接触器 (AC-contactor, ACC) 等, 大量接入系统, 这些设备因电压暂降造成的经济损失巨大^[2], 因此, 科学评估电压暂降引起的用户设备失效可能性是值得研究的重要课题^[3-4], 尤其是在建设智能电网的今天, 关系到用户和系统之间的相互友好性, 具有重要意义。

失效可能性评估的关键是确定评估测度, 测度

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50877049, 50677041);
四川省应用基础研究项目 (2008JY0043-2)

选取的正确性决定了结果的可信性^[5]。电压暂降造成设备失效是用户抱怨的主要原因^[6]。实际发生电压暂降时,因影响设备失效的因素和物理属性的差异,使设备失效具有很强的不确定性^[7]。现有评估方法有:概率评估法^[4,8]、模糊评估法^[9]及其改进法^[7]。概率法将设备状态定义为正常和失效两种状态,通过建立随机模型进行评估,对中间状态缺乏描述;模糊法基于模糊推理规则对多值状态进行评估,可反映设备中间状态;文献[7]提出的改进法,综合考虑了随机性和模糊性,较原有方法更符合实际。但以上方法在测度选取上均基于经典测度理论^[10],采用了满足可加性条件的概率测度,而实际上设备从正常到失效的量变到质变的过程中很难满足可加性条件,其状态属性不明确,表现为边界模糊状态,此时的测度为非可加性测度^[11]。

可能性测度(以下简称为可能度)是可能性理论中的一种非可加性测度。用可能度作为敏感设备失效可能性的评估测度较原有概率测度更符合实际。本文从分析敏感设备处于中间状态时设备失效可能性的非可加特性出发,对设备处于中间状态时的电压耐受能力和设备失效可能性分布函数进行研究,利用模糊统计法和多项式拟合法确定设备电压耐受能力隶属函数,再根据模糊安全事件隶属函数确定原理并结合设备电压耐受能力隶属函数,构造设备失效可能性分布函数,并提出设备失效度评估模型,最后以PC机为例,通过仿真和实验测试对提出的非可加性测度及评估方法的正确性和可行性进行验证。

1 非可加性测度与中间状态属性

1.1 非可加性测度

L.A.Zadeh教授将可能性概念与模糊集结合起来,于1978年提出可能性理论,建立了可能性分布和可能度概念^[12]。可能性反映了事物可实现或达到某一目标的难易程度,由满足非可加性条件的可能度表示。可能性分布函数描述该测度的分布规律。

设 F 是论域 U 上的模糊子集,其隶属函数为 μ_F , X 是取值于 U 的一个变量,则命题“ X 是 F ”给出了对 X 取值的一个模糊约束,记为 $R(X)$,等价于确定了变量 X 取值的一个可能性分布,记为 Π_X 。相应地, Π_X 的可能性分布函数 π_X 在数值上等于 F 的隶属函数 μ_F ,即 $\pi_X = \mu_F$ ^[12]。

根据以上定义,设集合 $A \in U$, Π_X 为与变量 X 关联的可能性分布,则 A 的可能度 $\pi(A)$ 为 $[0, 1]$ 上的一个数,即:

$$Poss\{X \in A\} = \pi(A) = \sup_{u \in A} \pi_X(u) \quad (1)$$

式中: \sup 为取上界; $\pi_X(u)$ 是 Π_X 的可能性分布函数。

1.2 中间状态的非可加性

设备状态从正常到失效的量变到质变的中间状态存在明显的边界不确定性,表现为模糊属性,如果仍采用概率测度进行评估,存在以下问题:

1) 概率测度是可加性测度,其存在条件是状态定义明确^[12]。当设备从正常到失效的状态转移过程中,即从量变到质变的过程,属于正常或失效的边界是不明确的,即设备可能正常,也可能失效^[7],如图1。这种模糊性导致设备失效正常的可能性之和不为1,即不满足概率测度存在所要求的可加性条件。而可能度作为一种常用的模糊测度反映了设备状态之间的交叠现象,克服了概率测度的可加性,在处理模糊性方面体现出了巨大优越性。

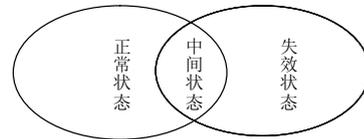


图1 敏感设备中间状态

Fig.1 The intermediate state of sensitive equipment

2) 概率测度对样本要求高,实际中难以满足。概率测度所需的概率分布模型的建立和参数估计对样本依赖性强,在实际中,由于成本、时间等原因,难以满足^[12]。而可能度适合于评估信息不完整或边界不精确状态;由于模糊性和随机性的物理意义和产生机理不同,模糊变量的可能性分布函数比随机变量的概率分布函数的确定对数据的要求低,因而基于可能度的敏感设备电压暂降失效可能性模型对样本的依赖性较低^[13]。

3) 可能度比概率测度更符合工程实际。传统概率测度评估,假设电压下降值 U 和暂降持续时间 T 引起的设备失效事件为独立随机事件,其判据为^[14]:电压暂降严重程度($s(U, T)$)大于设备电压耐受能力($x(U, T)$),定义事件 M 为 $s(U) > x(U)$,事件 N 为 $s(T) > x(T)$,则设备失效概率为 $P(M \cap N) = P(M)P(N)$ 。事实上,当电压暂降幅值或持续时间中任意一量超过设备电压耐受能力时,设备均有可能失效,设备失效概率应为并集模型 $P(M \cup N) = P(M) + P(N) - P(MN)$,式中事件 M 、 N 并非完全独立的,则 $P(MN)$ 不易求取。而根据可能度属性^[12],设 M 、 N 均为 U 上的模糊子集,则 $\pi(M \cup N) = \pi(M) \vee \pi(N)$,式中 \vee 为取大运算符。该性质不要求 $M \cap N = \Phi$,即 M 、 N 可非独立,符

合上述分析，且 $\pi(M \cup N)$ 容易求出，因此，以可能度为测度更符合实际。

综上所述，选取满足非可加性条件的可能度作为评估敏感设备电压暂降失效可能性的评估测度，是进行准确评估的基础，可以准确真实地反映敏感设备中间状态地模糊性，而准确评估的难点便是敏感设备失效可能性分布函数的确定。

2 非可加性测度评估模型

2.1 失效可能性分布函数

敏感设备受电压暂降的影响会出现多值状态，对于正常、完全失效这两种状态的评估较容易，难点在于中间状态评估。中间状态下的失效度用可能性分布函数描述，其模型可根据模糊安全事件隶属函数确定原理判定^[15]。根据电压暂降强度与设备电压耐受能力的关系，中间状态下设备电压耐受能力的隶属函数可根据样本，用模糊统计法^[16]与多项式拟合法^[17]构造，根据区间样本确定其解析式：

$$\mu(x) = k_1 x^n + k_2 x^{n-1} + \dots + k_n x + k_{n+1} \quad (2)$$

式中： $k_i (i=1, 2, \dots, n+1)$ 为多项式系数； x 为设备电压耐受能力； n 为多项式阶次，与样本容量有关，实际中， n 一般取小于 6 的正整数。

确定上述隶属函数后，设备失效可能性分布函数 π_X 可用 $\mu(x)$ 在某程度上的失效区 $[x_{\min}, s]$ 的面积^[15]，如图 2，与整个隶属函数在区间 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 的覆盖面积的比值定义，即：

$$\pi_X = \begin{cases} 0 & (0 \leq s < x_{\min}) \\ \frac{\int_{x_{\min}}^s \mu(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu(x) dx} & (x_{\min} \leq s \leq x_{\max}) \\ 1 & (s > x_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

式中， x_{\min} 、 x_{\max} 分别为设备电压耐受能力上限、下限，进行归一化处理，为标么值。

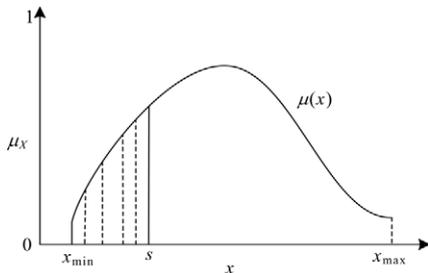


图 2 设备电压耐受能力的隶属函数

Fig.2 Membership function of equipment voltage tolerance

2.2 设备失效度评估模型

在设备失效度评估中，失效状态是设备状态论域 U 中的某集合 W ，当设备电压耐受能力 x 属于 W 时，设备失效。根据 2.1 节得到的设备失效可能性分布函数 π_X ，结合可能度测度的定义^[12]，设备失效度评估模型为：

$$Poss\{X \in W\} = \pi(W) = \bigvee_{u \in W} \pi_X(u) \quad (4)$$

式中： $Poss\{*\}$ 为设备失效度。当同时考虑电压下降值和暂降持续时间时，式 (4) 可分解为：

$$Poss(X \in W) = \pi(W) = \pi(M) \vee \pi(N) \quad (5)$$

式中， $\pi(M)$ 、 $\pi(N)$ 分别为电压下降值与暂降持续时间引起的设备失效度，满足非可加性条件。

3 敏感设备电压暂降失效度评估过程

敏感设备失效度评估过程如图 3。

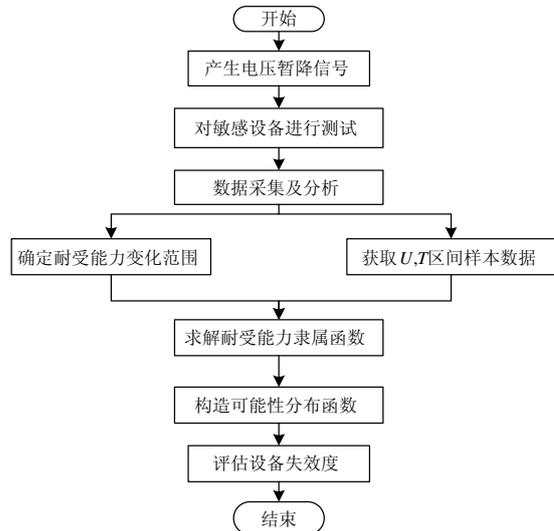


图 3 失效度评估流程图

Fig.3 Flow chart of failure degree assessment

1) 根据实测或历史记录获得敏感设备电压暂降耐受能力样本数据。

本文以 PC 机为例，采用实测方式获得样本。电压暂降幅值和持续时间按设定等级分别产生，依次记录不同暂降严重程度下 PC 机的工作状态，以此确定设备电压耐受能力不确定区间范围，获得区间样本。

2) 根据设备电压耐受能力区间样本数据，用模糊统计和多项式拟合法，根据式 (2) 确定设备电压耐受能力隶属函数，再由式 (3) 确定设备失效可能性分布函数。

3) 结合设备失效可能性分布函数和式 (4) ~ (5)，评估敏感设备电压暂降失效度。

4 实例验证

4.1 实测条件与结果

为验证本文方法的正确性, 对实际测试结果进行评估。采用 Fluke 6100A 扰动发生器和作者所在实验室研制的线性功率放大器构成电压暂降源, 通过参数设置, 产生步长为 5% 的暂降幅值和 20 ms 的暂降持续时间, 暂降开始时刻按需要设定 (一般 5 s), 对线性功率放大器输出端的 PC 机进行测试, PC 机型号及参数如表 1。

表 1 PC 机型号与参数

型号	联想开天 4610
生产年代	2003 年 9 月
操作系统	Windows XP
CPU	P4/2.4 GHz
内存	256 MB
工作电源	220 V/5 A/50 Hz/250 W

在不同暂降幅值和持续时间水平下, 对 PC 运行在不同工作条件下进行 5 000 次独立测试, 得到 PC 机电压耐受能力特性散点图, 如图 4, 由散点图得到其耐受能力不确定的区间范围, 如表 2。

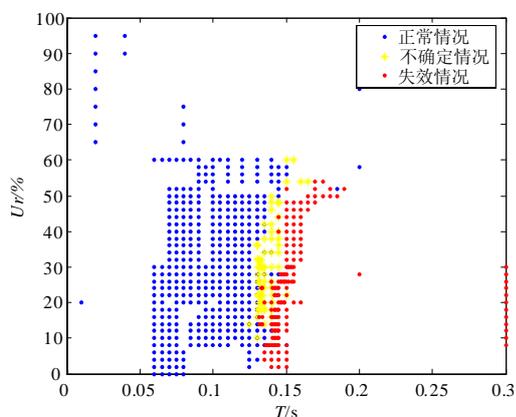


图 4 PC 机测试结果图

Fig.4 The chart of testing results of PC

表 2 PC 机实测电压耐受能力变化范围

Tab. 2 Variation of voltage tolerance capability of PC based on experiments

测试设备	$U_{r, \min}/\%$	$U_{r, \max}/\%$	T_{\min}/ms	T_{\max}/ms
PC	10	60	125	165

4.2 实测样本处理

由于隶属函数以样本为基础, 反映的是同类型 PC 机电压耐受能力整体情况, 但由于测试时间及经费限制, 仅根据 1 台 PC 机的测试结果建立隶属函

数有失一般性, 为此, 以实测 PC 机电压耐受能力的区间范围为基准, 在此范围内随机产生 50 组区间数作评估样本, 限于篇幅, 具体样本略。

利用 2.1 节方法分别确定 PC 机对电压下降值与暂降持续时间的耐受能力隶属函数。大量试验证明, 3 阶多项式能较准确拟合 PC 机电压耐受能力的隶属函数, 不会出现数据冗余, 3 阶多项式系数如表 3。PC 机对电压下降值的耐受能力隶属函数和失效可能性分布函数如图 5, 对暂降持续时间的耐受能力隶属函数和失效可能性分布函数如图 6。

表 3 PC 机电压耐受能力隶属函数的多项式系数

系数	电压下降值耐受能力	
	隶属函数系数	电压暂降持续时间耐受能力隶属函数系数
k_1	0.000 001 592 466 26	0.000 035 225 296
k_2	-0.001 231 652 925 64	-0.016 435 118 901
k_3	0.140 209 174 633 67	2.529 918 259 587
k_4	-3.800 558 529 491 33	-128.196 939 581 014

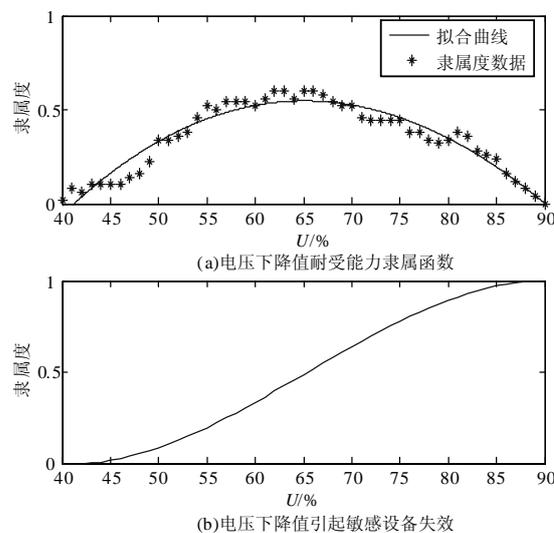


图 5 电压下降幅下 PC 机隶属函数和失效可能性分布函数
Fig.5 Membership function and failure possibility distribution function of PC to decrease magnitude

4.3 评估与实测结果比较

分别用本文提出的非可加性测度和评估方法以及原有概率评估法^[8]、模糊随机评估法^[7]对实测结果进行评估, 其中传统方法的失效可能性采用 1.2 节提出的并集模型, 即 $P(M \cup N) = P(M) + P(N) - P(MN)$ 。分别评估基于非可加性测度和基于概率测度的 PC

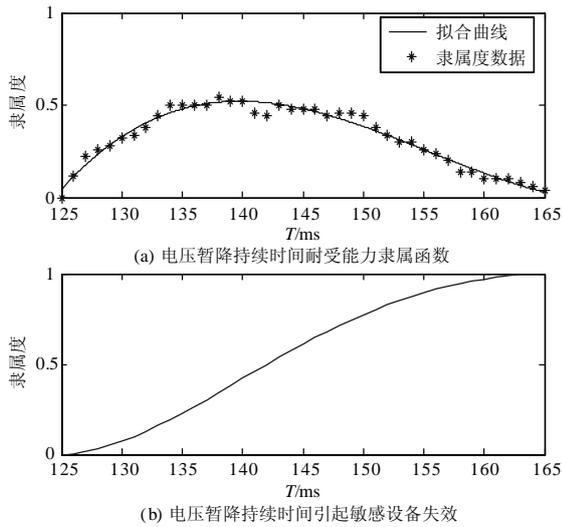


图 6 电压暂降持续时间下 PC 机隶属函数和失效可能性分布函数

Fig.6 Membership function and failure possibility distribution function of PC to voltage sag duration

机失效可能性，并与实测结果比较，如表 4。其中，相对误差 $e\%$ 的数学表达式为：

$$e\% = \frac{|a_1 - a_0|}{a_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中， a_0 、 a_1 分别为实测及评估所得 PC 机电压暂降失效可能性。

由表 4 知，不同测度和评估方法对结果影响很大。本文方法评估结果最大误差为 9.58%，而概率评估法的最大误差为 27.63%，模糊随机评估法的最大误差为 36.56%。误差原因在于概率测度受可加性条件限制，且设备因暂降幅值和持续时间引起的失效事件为非完全独立事件。本文以非可加性条件为出发点，采用的可能度不仅考虑了设备失效事件基本属性，并且其评估结果与实测统计结果更吻合，误差更小，证明了该方法的准确性和有效性。

表 4 PC 机电压暂降失效可能性评估与测试结果比较

Tab.4 Comparison on the assessment results and test results

电压暂降强度 ($U_r\%$, T/ms)	实测		本文法		概率法		模糊随机法	
	a_0	a_1	$e\%$	a_1	$e\%$	a_1	$e\%$	
1 42,145	0.600 0	0.574 2	4.30	0.434 2	27.63	0.776 3	29.38	
2 34,130	0.500 0	0.486 3	2.74	0.383 3	23.34	0.570 7	14.14	
3 32,130	0.500 0	0.547 9	9.58	0.432 0	13.60	0.682 8	36.56	
4 26,131	0.714 3	0.724 6	1.44	0.597 8	16.31	0.865 6	21.18	
5 26,132	0.750 0	0.724 6	3.39	0.603 6	19.52	0.867 9	15.72	
6 24,132	0.750 0	0.778 2	3.76	0.658 2	12.24	0.903 6	20.48	
7 20,131	0.857 1	0.872 7	1.82	0.763 8	10.89	0.954 0	11.31	
8 18,135	0.857 1	0.912 0	6.41	0.828 6	3.33	0.974 4	13.69	

5 结论

综上所述，基于对电压暂降影响下敏感设备中间状态的非可加性特性分析，并结合可能性理论，提出了敏感设备失效可能性评估测度及方法。

采用模糊统计和多项式拟合法确定设备电压耐受能力隶属函数，并根据模糊安全事件隶属函数确定原理建立设备失效可能性分布函数，无需主观假设，方法简单，易于实现。

通过对实测样本进行评估并与现有概率法和模糊随机法比较，证明本文方法正确、有效，能更好地满足工程评估要求。

参考文献

[1] 肖先勇. 电力市场营销原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

XIAO Xian-yong. Principle of electric power marketing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

[2] 高效, 彭建春. 供电方支付给用户的电压凹陷补偿[J]. 继电器, 2005, 33 (13): 60-63.

GAO Xiao, PENG Jian-chun. Voltage sags' compensation to customers from power providers [J]. Relay, 2005, 33 (13): 60-63.

[3] 汪穗峰, 张勇军, 任倩, 等. 配电网可靠性定量分析研究综述[J]. 继电器, 2008, 36 (3): 79-83.

WANG Sui-feng, ZHANG Yong-jun, REN Qian, et al. An overview of quantitative analysis of distribution system reliability[J]. Relay, 2008, 36 (3): 79-83.

[4] 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.
- [5] 陈文丽, 韩立岩. λ 可加模糊测度的一般形式及分布特征[J]. 模糊系统与数学, 2007, 21 (1): 42-50. CHEN Wen-li, HAN Li-yan. The generalized form and distribution properties of λ -fuzzy measure[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2007, 21 (1): 42-50.
- [6] XIAO Xiang-ning, TAO Shun, BI Tian-shu, et al. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (2): 1003-1008.
- [7] 陈武, 苟剑, 肖先勇. 敏感设备电压凹陷敏感度的随机-模糊评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 39-43. CHEN Wu, GOU Jian, XIAO Xian-yong. A stochastic-fuzzy assessment method for voltage sag sensitivity of sensitive equipment[J]. Power System Technology, 2009, 33 (6): 39-43.
- [8] 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.
- [9] Bonatto B D, Niimura T, Dommel H W. A fuzzy logic application to represent load sensitivity to voltage sags[C]. //8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Greece: 1998: 60-64.
- [10] Halmos P R. Measure theory[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2007.
- [11] 杨敏生. 模糊理论简介[J]. 数学传播, 1994, 18 (1): 7-11. YANG Min-sheng. Fuzzy theory introduction[J]. mathmedia, 1994, 18 (1): 7-11.
- [12] 佟欣. 基于可能性理论的模糊可靠性设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2004. TONG Xin. Fuzzy reliability design based on possibility theory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [13] 郭书祥, 吕震宙, 张陵. 结构的能度可靠性方法和随机可靠性方法的比较[J]. 计算机力学学报, 2003, 20 (4): 446-450. GUO Shu-xiang, Lü Zhen-zhou, ZHANG Ling. Comparison of possibilistic reliability and stochastic reliability methods for uncertain structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2003, 20 (4): 446-450.
- [14] Bollen M H J. Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions[M]. Wiley-IEEE Press, Power Engineering Press, 1999.
- [15] 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.
- [16] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005. LI Hong-ji. Fuzzy mathematical foundation and practical algorithms[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [17] 张德丰. Matlab 数值分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. ZHANG De-feng. Matlab numerical analysis and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

收稿日期: 2009-10-31

作者简介:

李皖 (1986-), 女, 工学硕士, 研究方向为电能质量及其控制技术; E-mail: liwanvicky@163.com

桂贤明 (1968-), 男, 高级工程师, 从事电力自动化运行及研究工作;

肖先勇 (1968-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事电能质量及其控制技术、绿色友好智能电网等方面的教学和研究。

(上接第 91 页 continued from page 91)

- [8] 樊丽娜, 许跃进. 农村中压配电网电压等级的优化选择[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (11): 102-105. FAN Li-na, XU Yue-jin. Optimized selection of voltage level in rural medium-voltage power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (11): 102-105.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2009-12-02

作者简介:

柳占杰 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划; E-mail: lzhantie@163.com

许跃进 (1958-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统规划及仿真。