

敏感负荷电压暂降失效率区间概率评估

李政光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: 敏感负荷电压耐受能力分布规律具有不确定性, 现有基于确定的点值估计法在实际样本较少时难以得出准确结果。提出估计敏感负荷电压耐受能力不确定性分布的区间概率评估法, 用区间概率分布描述负荷耐受能力的不确定性, 得出设备失效可能性区间概率值。利用实验测得的PC机电压耐受能力样本, 以IEEE-30节点系统为例进行仿真, 证明该方法较点值评估法更好地反映了实际情况, 结果可信度和精确性较高, 可应用于工程实际。

关键词: 电压暂降; 电压耐受能力; 区间概率分布函数; 最大熵原理; 失效率

Interval failure probability assessment of sensitive load due to voltage sags

LI Zheng-guang¹, 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 complex uncertainty is involved in voltage tolerance capability of sensitive equipment, and it makes difficult for point-valued assessment method to evaluate the impact of voltage sags on equipment, especially in the case of small sample size. Considering that it is hard to determine the distribution of voltage tolerance capability accurately, the confidence interval of probability function is introduced to describe this distribution, so as to derive an interval probability of equipment failure rate. With the help of personal computers, the proposed method is finally verified in IEEE-30 bus test system with high reliability and accuracy, which can be applied to engineering practice.

Key words: voltage sag; voltage tolerance capability; interval probability distribution function; maximum entropy principle; failure possibility

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0037-06

0 引言

电压暂降因其给用户和社会经济造成的巨大损失^[1-2]已被国内外专家认为是严重的质量问题。采取有效措施, 降低损失的关键在于准确评估电压暂降可能引起的敏感负荷失效率。为此, 国内外开展了大量研究^[3-8]。

现有方法着重对负荷故障概率或频次进行研究, 主要包括: 实测统计法^[4]、概率评估法^[6-7]和模糊评估法^[8]。实测法通过实际测量判定负荷状态, 监测时间长且成本高, 难以广泛采用; 概率评估法和模糊评估法分别从因果律和排他律缺失的角度, 根据样本建立负荷电压耐受能力的随机和模糊评估模型, 具有预测性和推广性, 已受到国内外重视。学者 Milanovic 提出用划分敏感度等级的方法确定耐受能力分布^[6], 但等级划分和概率密度函数选取

带有主观性, 不同的假设对结果影响很大; 文献[7]和文献[8]分别用最大熵方法和最佳平方逼近法得出负荷失效的概率; 文献[9]利用模糊变量描述负荷耐受能力特性, 提出了敏感度评估的随机模糊方法。上述方法中的评估指标大多仍然采用负荷故障或中断指标, 而实际中往往因非正常运行所造成的损失更大^[10], 因此本文以失效率作为评估指标更具合理性。

此外, 实际评估中, 样本或资料的不足将导致传统统计分析法不能对负荷运行环境或状态进行有效估计。文献[4-10]以点值概率来度量负荷的失效可能性, 未考虑到实际中由于已知信息的不足难以得到负荷点值失效率。本文基于可靠性原理, 提出区间概率评估方法, 用区间概率代替现有点值概率, 更好地反映实际情况。

区间概率同时具有清晰事件和模糊概率的特

性, 主要由概率密度函数的模糊性引起, 属第二类随机模糊问题^[11]。本文对敏感负荷电压暂降失效率评估的区间密度函数、区间概率随机变量及其分布函数等进行了研究, 并以 PC 机为例, 用作者所在实验室实际试验获得的样本数据进行仿真, 获得 PC 机的电压耐受能力区间概率分布函数, 并以 IEEE-30 节点标准测试系统随机产生电压暂降, 仿真结果与随机评估方法进行比较, 证明本文方法更符合实际。

1 敏感负荷电压暂降区间概率评估原理

引入区间概率、区间概率密度函数、区间概率随机变量及分布函数定义^[11-12]:

定义 1: n 个实数区间 $[L_i, U_i], i=1, 2, \dots, n$, 若满足: $0 \leq L_i \leq U_i \leq 1, i=1, 2, \dots, n$, 则可用来描述概率空间中基本事件相应的概率, 称 $[L_i, U_i]$ 为事件的区间概率。

定义 2: 设 ζ 是随机变量, $f(x)$ 是 ζ 的概率密度函数, $I(x)=[I_1(x), I_2(x)]$ 是 ζ 取值范围的区间值函数, 且 $I(x) \geq 0, f(x) \in I(x)$, 则称 $I(x)$ 是 ζ 的区间概率密度函数, 简称 IPD (Interval Probability Density) 函数, ζ 为具有区间密度的区间概率随机变量。

由于概率密度函数 $f(x)$ 满足:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (1)$$

如有:

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} I_1(x) dx \leq 1 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} I_2(x) dx \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

称 $I(x)$ 为 ζ 上合理的 IPD 函数。

实际中, 事件概率值大于 1 没有意义, 因而 (2) 中区间概率应取 1 为上限, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} I_2(x) dx = 1 \quad (3)$$

定义 3: 设 ζ 是区间概率随机变量, $I(x)$ 是 ζ 上合理的 IPD 函数, 假设 ζ 的分布函数可表示为:

$$F(x) = Q(\zeta < x) = \left\{ \begin{aligned} &\int_{-\infty}^x f(y) dy | f(y) \in I(y), y \in (-\infty, +\infty), \\ &\int_{-\infty}^{+\infty} f(y) dy = 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $F(x)$ 称为 ζ 的区间值分布函数。本文中为便于区别, 概率密度函数和分布函数特指点值函数。

以失效率为负荷敏感度测度函数, 考虑了负荷在电压暂降时可能的多种运行状态, 能更好反映电压暂降对负荷造成的影响。负荷电压耐受曲线 (voltage tolerance curve, VTC) 具有不确定性及矩形特征^[6], 如图 1 所示。其中 A 为正常运行区域; B 为故障区域; C 为不确定性区域。因此, 确定 VTC 在不确定性区域内的分布规律是进行准确评估的关键。在样本数较小, 数据不充分, 耐受能力概率分布函数不能完全确定的情况下, 用区间概率分布函数来描述其分布规律, 进一步得到失效率的区间概率值, 更具有实际意义。

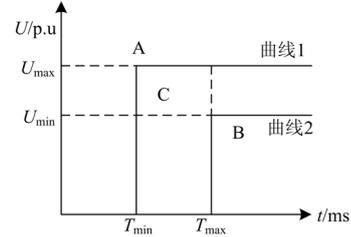


图 1 敏感负荷 VTC 不确定区域

Fig.1 Uncertain area of equipment voltage tolerance curve

以 U, T 分别代表敏感负荷电压暂降耐受能力在不确定区域内的电压幅值和持续时间。VTC 区间分布函数可通过求取置信区间的方法来确定。以电压暂降幅值为例, 求解具体步骤如下:

1) 根据实测数据, 利用最大熵方法^[7], 得出电压暂降幅值概率密度函数 $\bar{f}_u(u)$ 和分布函数为 $\bar{F}_u(u)$ 。

2) 对任取的 $U_0 \in [U_{min}, U_{max}]$, 事件 $U \leq U_0$ (下文用事件 X 表示) 发生的概率可看作是 0-1 分布^[13]。 X 满足:

$$X = \begin{cases} 0 & \text{若抽取一个样本 } U > U_0 \\ 1 & \text{若抽取一个样本 } U \leq U_0 \end{cases}$$

则 $X \sim B(1, \bar{F}_u(U_0))$, 即 $P(X=1) = \bar{F}_u(U_0)$ 。

$\bar{F}_u(U_0)$ 根据步骤 1) 所述求出, 有:

$$\bar{F}_u(U_0) = P(U \leq U_0) \quad (5)$$

3) 由 0-1 分布区间估计方法^[13], 可得:

$$\frac{|\bar{F}_u(U_0) - F_u(U_0)|}{\sqrt{F_u(U_0)(1 - F_u(U_0))/n}} < u_{1-\alpha/2} \quad (6)$$

式中: n 为样本总数; $u_{1-\alpha/2}$ 为置信度 $1-\alpha$ 对应的标准正态分布随机变量取值。由式 (5)、(6) 求

解不等式可得 $F_{u1}(U_0) < F_u(U_0) < F_{u2}(U_0)$, 则 $[F_{u1}(U_0), F_{u2}(U_0)]$ 为 $F_u(U_0)$ 的 $1-\alpha$ 置信区间。

4) 对 $[U_{\min}, U_{\max}]$ 内每一个 U_0 求解, 得到负荷电压暂降幅值耐受能力区间概率分布函数^[11]。由于最大熵方法本身精度较高, 相应置信度可设置较小, 获得的区间估计也能够很好地覆盖真值。本文通过仿真试验表明, 置信度为 60%~80% 能完全包括真值。

图 2 为电压暂降幅值耐受能力区间概率分布函数示意图。由图可知, 与点值概率函数不同, $F(U=0.46)$ 表示电压耐受能力曲线出现在 $U \leq 0.46$ 区域内的概率为 $[0, a]$ 。由于考虑了试验统计误差, 得出的区间值结果比点值更具可信度^[14]。同样, $F(U=0.63)$ 表示电压耐受能力曲线出现在 $U \leq 0.63$ 区域内的概率为 $[b, 1]$ 。

同理可得电压暂降持续时间耐受能力区间概率分布函数。

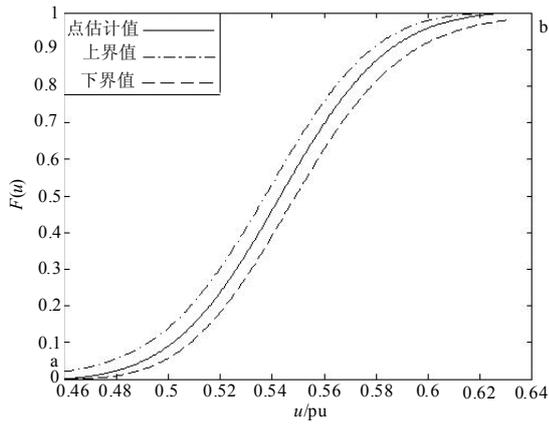


图 2 电压暂降幅值耐受能力区间概率分布函数

Fig.2 Interval probability distribution function of voltage sag magnitude tolerance

2 区间概率评估模型与算法

根据可靠性设计中的应力强度干涉理论, 当系统产生的电压暂降强度大于设备耐受能力时, 设备处于失效状态^[15]。考虑 U 和 T 的独立性^[6], 负荷故障概率 p 评估模型为:

$$p = p_u \cdot p_t \quad (7)$$

其中:

$$p_u = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{su}(U_s) \left[\int_{-\infty}^{U_s} f_u(U_r) dU_r \right] dU_s = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{su}(U) [F_u(U) - F_u(-\infty)] dU \quad (8)$$

$$p_t = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{st}(T_s) \left[\int_{T_s}^{+\infty} f_t(T_r) dT_r \right] dT_s = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{st}(T) [F_t(T) - F_t(-\infty)] dT \quad (9)$$

式中: $f_{su}(U)$ 和 $f_{st}(T)$ 为系统产生电压暂降幅值和持续时间概率密度函数; $f_u(U)$ 和 $f_t(T)$ 为负荷电压暂降幅值耐受能力和持续时间耐受能力概率密度函数, $F_u(U)$ 和 $F_t(T)$ 为其分布函数。

根据网络拓扑结构、线路故障点分布和故障率等参数, 由最大熵原理得出负荷处电压暂降幅值 U 的概率密度函数 $f_{su}(U)$ 。电压暂降持续时间主要取决于系统保护的整定值^[16], 考虑到保护动作时操作机构动作时间误差的影响, 可以认为 T 服从参数为 (μ_t, σ_t) 的正态分布^[9,17], 即:

$$f_{st}(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{(T-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right] \quad (10)$$

式中, μ_t 和 σ_t 分别为 T 的均值和方差。本文测试中由 T 的分布范围, 根据 3σ 原则可得出 μ_t 及 σ_t 的值^[9]。

应用上节方法, 得出负荷 VTC 区间概率分布函数:

$$\begin{cases} F_u(U) = [F_{u1}(U), F_{u2}(U)] \\ F_t(T) = [F_{t1}(T), F_{t2}(T)] \end{cases} \quad (11)$$

结合式 (7)、(8)、(9)、(10) 以及 $f_{su}(U)$, 分别得出随机变量 U 和 T 的概率:

$$p_u = [\min(p_{u1}, p_{u2}), \max(p_{u1}, p_{u2})] \quad (12)$$

$$p_t = [\min(p_{t1}, p_{t2}), \max(p_{t1}, p_{t2})] \quad (13)$$

其中:

$$p_{u1} = \int_R f_s(u) [F_{u1}(u) - F_{u1}(-\infty)] du \quad (14)$$

$$p_{u2} = \int_R f_s(u) [F_{u2}(u) - F_{u2}(-\infty)] du \quad (15)$$

$$p_{t1} = \int_R f_s(t) [F_{t1}(t) - F_{t1}(-\infty)] dt \quad (16)$$

$$p_{t2} = \int_R f_s(t) [F_{t2}(t) - F_{t2}(-\infty)] dt \quad (17)$$

根据区间运算乘法公式, 得到负荷失效率区间概率

$$p = [\min(p_{u1}, p_{u2}) \cdot \min(p_{t1}, p_{t2}), \max(p_{u1}, p_{u2}) \cdot \max(p_{t1}, p_{t2})] \quad (18)$$

3 区间概率评估方法

基于上述评估模型和算法，敏感负荷电压暂降区间失效率评估过程如下，流程如图 3。

- 1) 根据实验测得敏感负荷耐受能力样本值，利用最大熵方法求得耐受能力点值概率分布函数。
- 2) 将点值分布函数样本观测值代入式 (5)、(6)，求得其区间概率分布函数。
- 3) 由系统侧电压暂降评估方法，得出敏感负荷供电母线处系统电压暂降概率密度函数。
- 4) 根据可靠性评估原理，将负荷耐受能力区间分布函数和系统电压暂降概率密度函数代入式 (8) 和式 (9) 中，结合式 (12)、(13) 及式 (18) 得到负荷失效率区间概率，以此表示负荷的敏感程度。

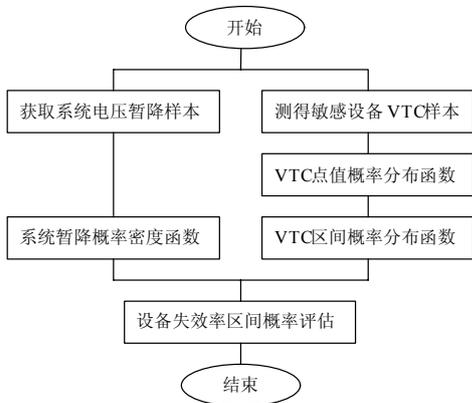


图 3 负荷失效率区间评估流程图

Fig.3 Flow chart of interval failure probability assessment

4 仿真分析

本文以 IEEE-30 节点标准测试系统^[18]为例(图 4)，并以 PC 机作敏感负荷接入系统仿真。

该系统有 30 条母线、41 条线路，PC 机连接到母线 29 上。为简化计算，任意选取一条线路并随机产生三相短路故障。假设线路上共发生 40 次故障，且故障点位置服从均匀分布。根据电压暂降幅值的解析算法，得到不同故障点位置对应母线 29 上暂降幅值样本数据，以此得出概率密度函数 $f_{su}(u)$ 。电压暂降持续时间的概率密度函数 $f_{st}(t)$ 由式 (10) 得到。

在 PC 机测试试验中，利用电能质量扰动源 (6100A) 产生电压暂降，经功率放大器放大后接至 PC 机。所用 PC 机为普通商用机型，结构和性能与一般常用 PC 机相同，能作为 PC 机的典型测试实例，其具体型号及参数如表 1。实测得到 PC 机对电

压暂降幅值和持续时间耐受能力 60 组样本。由第 3 节提出的方法，得出耐受能力区间概率分布函数，如图 5、6 所示。

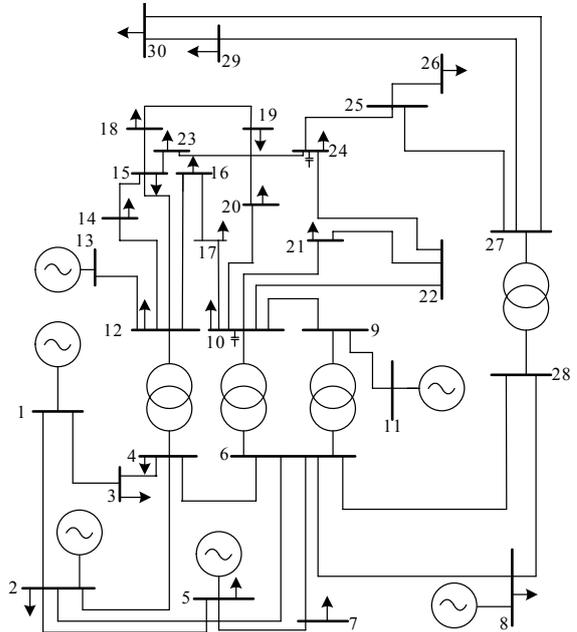


图 4 IEEE-30 节点标准测试系统

Fig.4 IEEE-30 RTS test system

表 1 PC 机型号与参数

Tab.1 Model and parameters of the tested PC

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

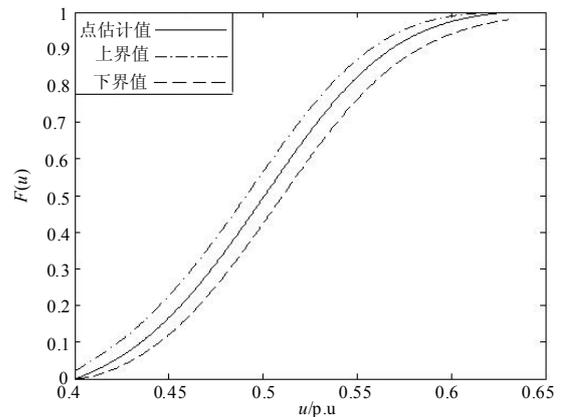


图 5 PC 机电压幅值耐受能力区间概率分布函数

Fig.5 Interval probability distribution function of voltage sag magnitude tolerance of PCs

由图 6 可知, 暂降时间耐受能力有两个峰值(对应分布函数中斜率最大的区域), 分别出现在 100 ms 和 190 ms 前后。这是由于 PC 机分别在低 CPU 使用率状态和满 CPU 使用率状态下测试, 两种不同运行状态对应不同的电压暂降时间耐受能力峰值。

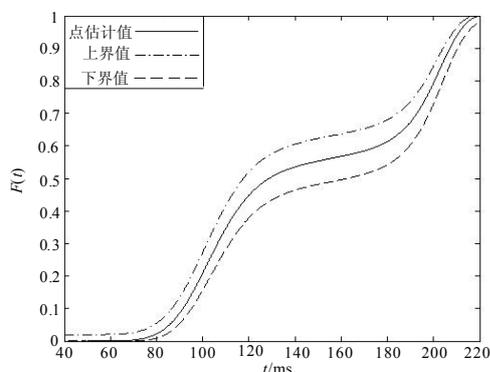


图 6 PC 机暂降时间耐受能力区间概率分布函数

Fig.6 Interval probability distribution function of voltage sag duration tolerance of PCs

本文选择不同的故障线路和主保护动作时间, 以分析电压暂降分布特征量改变引起设备失效率的变化规律。将失效率区间评估结果, 与点值随机评估比较, 结果如表 2。其中 μ_u 表示当线路发生故障时, 母线 29 上产生的电压暂降样本均值。由表 2 知, 点值评估方法得出的失效率都落在区间失效率内, 而区间值不仅能反映出失效率的精确程度, 而且将可能出现的误差考虑进去, 能更好地反映耐受能力的不确定性, 比一个单独的点值更为可信。此外, 供电点处电压暂降特征量发生变化时, 敏感设备失效率也会发生变化。电压暂降幅值偏小时, 负荷失效率增大; 持续时间偏小时, 负荷失效率减小, 正确反映了系统扰动对敏感设备的影响。除 PC 机外, 该方法也可用于评估其他类型敏感负荷的电压暂降敏感度。

表 2 PC 机电压暂降失效区间概率评估结果

Tab.2 Interval failure probability simulation results for PCs

编号	故障线路	电压暂降强度			区间失效率	点值失效率
		$\mu_u/p.u$	μ_t/ms	σ_t		
1	25-26	0.533	150	30	[0.1842, 0.2428]	0.212 0
2	2-6	0.419	150	30	[0.4086, 0.5237]	0.466 5
3	10-17	0.542	150	30	[0.1224, 0.1986]	0.156 7
4	25-26	0.533	180	30	[0.2096, 0.2738]	0.239 5
5	8-28	0.351	150	30	[0.5007, 0.6336]	0.569 0
6	8-28	0.351	180	30	[0.6773, 0.7822]	0.733 6
7	24-25	0.398	150	30	[0.4635, 0.6027]	0.534 9
8	24-25	0.398	120	30	[0.3142, 0.4426]	0.376 8

5 结论

采用区间概率函数描述敏感设备在不确定区域内电压暂降耐受能力, 考虑了样本资料不完备及统计中的误差, 更好地表现了设备敏感性的真实程度。

与点值评估方法得出的结果比较, 失效率的区间值更能反映实际情况, 且能很好地覆盖评估点值, 并且区间范围不大, 说明本文方法正确反映了系统暂降特征和敏感设备耐受能力对设备敏感度的影响。

参考文献

[1] 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.

[2] Carlsson F. On impacts and ride-through of voltage sags exposing line-operated AC-machines and metal process[D]. Sweden: Royal Institute of Technology, 2003. 29-31.

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

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

- [5] Wagner V E, Andreshak A A, Staniak J P. Power quality and factory automation[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26 (4): 620-626.
- [6] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (2): 711-718.
- [7] 肖先勇, 马超, 李勇. 线路故障引起电压凹陷的频次最大熵评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (1): 87-93.
XIAO Xian-yong, MA Chao, LI Yong. Voltage sag occurrence frequency assessment caused by line faults using the maximum entropy method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (1): 87-93.
- [8] 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.
- [9] 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[J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 39-44.
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): 39-44.
- [10] Lamoree J, Mueller D, Vinett P, et al. Voltage sag analysis case studies industry applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 30 (4): 1083-1089.
- [11] 吕恩琳, 钟佑明. 模糊密度随机变量的数学描述[J]. 应用数学和力学, 2000, 21 (8): 861-869.
Lü En-lin, ZHONG You-ming. Mathematic description about random variable with fuzzy density function[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2000, 21 (8): 861-869.
- [12] 钟佑明, 吕恩琳, 王应芳. 区间概率随机变量及其数字特征[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24(1): 24-27.
ZHONG You-ming, Lü En-lin, WANG Ying-fang. Interval probability random variable and its numerical characters[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2001, 24 (1): 24-27.
- [13] 刘晓石, 陈鸿建, 何腊梅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
LIU Xiao-shi, CHEN Hong-jian, HE La-mei. Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [14] 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 Guan-quan, HUANG Wen-ying. An interval approach to evaluate distribution system reliability with parameters uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (12): 68-73.
- [15] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
DONG Yu-ge. Design of mechanism fuzzy reliability[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [16] 徐国政, 张节容, 钱家骊, 等. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
XU Guo-zheng, ZHANG Jie-rong, QIAN Jia-li, et al. Theories and applications of high-voltage circuit breakers[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [17] Myo Thu Aung, Milanovic J V. Stochastic prediction of voltage sags by considering the probability of the failure of the protection system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (1): 322-329.
- [18] University of Washington. IEEE-30 bus test system [EB/OL]. 1993-08-20. http://www.Ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm.

收稿日期: 2009-09-25; 修回日期: 2009-11-03

作者简介:

李政光 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量及其控制技术; E-mail: leezhengguang@163.com

桂贤明 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力自动化运行管理和研究工作;

肖先勇 (1968-), 男, 副教授, 硕士生导师, 长期从事电能质量及其控制技术的教学与研究工作。

(上接第 36 页 continued from page 36)

- [11] 刘金琨. 滑模变结构MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] YONG Feng, YU Xing-huo, MAN Zhi-hong. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38 (2): 2159-2167.

收稿日期: 2009-09-26; 修回日期: 2009-10-19

作者简介:

邹德虎 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制; E-mail: zoupaper@163.com

王宝华 (1968-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统分析与非线性控制。