

敏感设备电压凹陷敏感度综合评估方法的研究

王华伟, 李华强

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 实际电力系统中, 系统电压凹陷特征及设备电压凹陷耐受能力具有不确定性的特点, 给敏感设备电压凹陷敏感度评估带来了困难。在深入分析现有评估方法及不确定性影响因素的基础上, 综合考虑系统侧和设备侧两方面的不确定性, 提出一种基于模糊变量与随机变量组合的不确定性综合评估方法。将供电系统产生的电压凹陷特征和待评估敏感设备对电压扰动的耐受能力分别处理为模糊变量和随机变量, 直接利用样本数据估计模型参数。最后通过仿真实例验证了所提出评估模型及算法的合理性和准确性, 该方法具有一定的理论价值和明显的工程应用价值。

关键词: 电压凹陷; 设备敏感度; 模糊变量; 随机变量; 不确定性; 参数估计

Abstract: In practical power system, both the voltage sag characteristics occurring in power supply system and the voltage disturbance tolerable ability of sensitive equipment are uncertain, which makes it difficult to evaluate the sensitivity of sensitive equipment to voltage sag. After analyzing the existing assessment methods and the uncertainties of the influence factors deeply, a new integrated uncertain evaluation method based on the combination of fuzzy variable and random variable is proposed comprehensively considering the uncertainties of power system disturbance and equipment tolerant ability. The voltage sag characteristic at the power supply site and the voltage sag tolerable ability of equipment are treated as fuzzy variable and random variable respectively, and the parameters of the evaluation model are estimated by practice samples. The simulation results prove that this method is reasonable and accurate.

Key words: voltage sag; equipment sensitivity; fuzzy variables; random variables; uncertainty; parameter evaluation

中图分类号: TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0001-04

电压凹陷 (voltage sag or dip) 在 IEEE 标准中被定义为: 供电系统母线工频电压有效值突然下降至额定值的 10%~90%, 并持续 10 ms~1 min 后恢复正常的电压扰动现象^[1]。IEC 与 IEEE 均提出了各自的定义, 他们的不同之处在于定义为电压下降值不同, IEC 定义的电压范围为 1%~90%, 而 IEEE 定义的电压范围为 10%~90%^[2]。系统中输配电线路故障、变压器投运、感应电动机启动以及其它启动电流较大的大型负荷接入电力系统时均会引起一定范围的电压凹陷, 因此系统内发生电压凹陷是不可避免的。

随着微电子、电力电子和自动化控制技术的发展, 过程控制器、可编程逻辑器件、调速驱动器等设备对电压凹陷越来越敏感, 使用范围也越来越广, 因此对于用现代科学技术武装起来的工业用户来说, 电压凹陷及其造成的危害已逐渐成为最重要的电能质量问题。严重的电压凹陷可能导致企业生产率和产品质量下降、制造成本增加, 阻碍企业正常的生产计划,

从而造成严重的经济损失^[3,4]。因此, 评估敏感设备的电压凹陷敏感度已经成为电力企业和用户必须面对的重要课题, 同时也是合理规划和改造电网, 制定最优供电方案, 采取合理技术措施的前提, 有重要理论价值和现实意义。

1 现有评估方法

现有敏感设备电压凹陷敏感度评估方法主要有统计法^[5,6]、概率评估法^[7~10]、模糊评估法^[11]等。统计法将系统电压凹陷特征与 CBEMA 曲线或 ITIC 曲线进行比较, 原理简单并易于实现。但不同类设备、同类不同型号设备对电压凹陷的敏感度不同, 因此仅用固定的 ITIC 或 CBEMA 曲线进行评估, 其结果很难符合实际, 且该方法不能进行预测, 对于规划和建设中的电网及用户无法进行评估。

概率评估法基于主观假设的概率模型进行评估, 即在划分出设备敏感度等级的基础上, 假设对应于不同敏感度等级, 敏感设备在凹陷幅值-持续时间平面

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

上的电压耐受曲线 (voltage tolerate curve VTC) 分别服从均匀、正态、指数、反指数等分布, 用假设的概率密度函数进行评估。该方法考虑了负荷 VTC 曲线的不确定性, 但仅能对给定特征的电压凹陷进行评估, 不能完整反映敏感设备受电压凹陷影响的总体情况。

基于推理规则的模糊评估方法结合 ESKOM Windows、ITIC、SEMI F47 等曲线及相应推理规则, 得出系统扰动曲线和设备抗扰动曲线, 并将之统一为基于能量的模糊指标, 通过计算两条曲线的干涉区得出设备可靠性。该方法综合考虑了系统侧与设备侧的不确定性, 但对模糊变量在论域的划分尚无统一标准, 主要依靠研究人员的经验获得。

2 设备敏感度影响因素及其描述

在电力系统中, 系统侧电压凹陷主要由输配电系统的故障引起^[6,8], 其凹陷特征的不确定性主要表现为产生的扰动幅值和持续时间的不确定, 是外延的不确定, 因此用模糊变量描述更符合实际, 如凹陷幅值取决于故障点位置及最大短路电流值^[12], 在故障发生时, 系统可能运行在不同的稳态条件从而产生不同幅值的电压凹陷^[7]。故障点受天气条件、绝缘体污染、动物接触等因素的影响, 具有不确定性^[13], 且同一故障点位置发生不同类型故障, 对公共连接点 (point of common coupling PCC) 电压幅值的影响也不相同。

敏感设备的电压凹陷耐受能力可由设备制造厂提供, 或通过实验测试获得^[7]。由实验测试结果可知, 不同类型设备对电压凹陷的敏感度不同, 同类设备因系统运行特性与状态、带负载水平等条件不同, 其敏感度也存在很大差异, 而在实际中人们不可能对所有设备进行试验和测试。研究表明, 常见敏感设备的电压凹陷耐受能力在凹陷幅值—持续时间平面的区域为: PLC 的电压幅值范围为 30%~90%, 持续时间为 20~400 ms ASD 的电压幅值范围为 59%~71%, 持续时间为 15~1755 ms PC 的电压幅值范围为 46%~63%, 持续时间为 40~205 ms。在该不确定区域, 敏感设备的 VTC 一般受供电侧和设备自身安装位置、结构、性能指标等多因素影响随机分布^[10], 设备电压凹陷耐受能力的不确定性主要表现为造成设备失效的内涵的不确定, 因此, 用随机变量描述更恰当。

当设备供电点发生电压凹陷时, 敏感设备的实际运行状态包括: 正常、基本正常、不太正常偶尔故障、完全故障等多种可能状态。评估电压凹陷引起敏感设备故障, 需要同时结合电压凹陷特征和敏感设备敏感特征进行, 才能更全面反映实际。

3 评估方法

为弥补现有评估方法的不足并结合电力系统实际特点, 这里综合考虑系统电压凹陷特征和设备电压凹陷耐受能力的不确定性, 提出一种新的敏感设备电压凹陷敏感度评估方法^[14]。

3.1 电压凹陷严重程度模糊变量

将敏感设备接入点处的电压凹陷幅值记作 U_p (标么值), 电压下降幅值记为 $\Delta U_p = 1 - U_p$, 并设 ΔU_p 为服从线性分布的 L-R 模糊数 (m, α, β) , 如式 (1)、(2)^[15,16]。

$$\mu(\Delta U_p) = \begin{cases} L(\Delta U_p) & (\Delta U_p < m) \\ 1 & (\Delta U_p = m) \\ R(\Delta U_p) & (\Delta U_p > m) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L(\Delta U_p) = \max[0, 1 - \frac{m - \Delta U_p}{\alpha}] & (\Delta U_p \leq m) \\ R(\Delta U_p) = \max[0, 1 - \frac{\Delta U_p - m}{\beta}] & (\Delta U_p > m) \end{cases} \quad (2)$$

其中, m 为 ΔU_p 的均值, 描述电压凹陷幅值集中的位置; α, β 称为左、右分布参数, 描述电压凹陷幅值可能偏离均值 m 的范围; 左、右参照函数 $L(\Delta U_p), R(\Delta U_p)$ 代表模糊变量 ΔU_p 隶属函数 $\mu(\Delta U_p)$ 的形状。

3.2 模糊参数识别

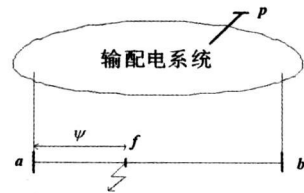


图 1 线路 a-b 发生故障

如图 1, 当线路 a-b 上 f 处发生故障, 求敏感设备接入母线 p 处的电压幅值 U_p 。假定故障点 f 到母线 a 的距离为 ψ (线路 a-b 的长度进行归一化后, 可取 $0 \leq \psi \leq 1$), f 点到母线 b 的距离为 $(1-\psi)$, U_p 与 ψ 有关, 可表示为 $U_p = f(\psi)$ ^[17]。为说明方法, 这里仅以发生三相故障为例进行分析。

设系统中发生三相故障引起母线 p 处电压凹陷

的线路共有 n 条。

(1) 由历史数据统计可分别得出此条线路每年发生三相故障的次数 δ_k ($k=1, 2, \dots, n$);

(2) 求出此 n 条线路分别发生三相故障时, 母线 p 处电压幅值 U_p 的可能取值区间及样本数。

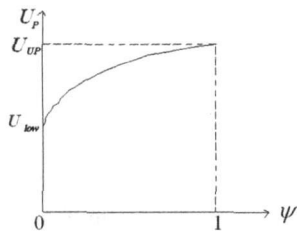


图 2 放射式网络中故障电压与故障位置的关系

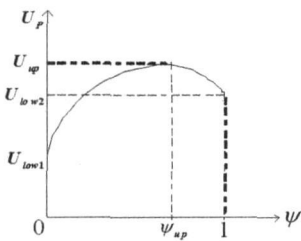


图 3 环式网络中故障电压与故障位置的关系

当线路 $a-b$ 处于放射式网络时, $U_p = f(\psi)$ 如图 2, 则记此时 ΔU_p 可能取值区间为 $[1-U_{up}, 1-U_{low}]$ 一种样本, 样本数为 δ_{ab} 。其中 U_{up} 、 U_{low} 分别为线路 $a-b$ 上发生三相故障时, U_p 的最大、最小值。 δ_{ab} 为线路 $a-b$ 上每年发生三相故障的次数。

当线路 $a-b$ 处于环式网络时, $U_p = f(\psi)$ 如图 3, 则将此时 ΔU_p 可能取值区间分解为 $[m \min(1-U_{low1}, 1-U_{up}), \max(1-U_{low1}, 1-U_{up})]$ 、 $[m \min(1-U_{low2}, 1-U_{up}), \max(1-U_{low2}, 1-U_{up})]$, 并分别记为一种样本, 其样本数分别为 $\delta_{ab} \psi_{up}$ 、 $\delta_{ab} (1-\psi_{up})$ 。其中, U_{low1} 、 U_{low2} 分别为线路 $a-b$ 上 $\psi=0$ 、 $\psi=1$ 处发生三相故障时 U_p 的值, U_{up} 为 U_p 的极值, ψ_{up} 为 U_{up} 所对应的 ψ 值。

n 条线路的所有样本构成电压凹陷幅值 ΔU_p 的模糊集合 $\Delta \bar{U}_p$ 。

(3) 取 $U_j = \frac{j}{1000}$ ($j=1, 2, \dots, 1000$), 由模糊统计法求 U_j 对 $\Delta \bar{U}_p$ 的隶属度 $\mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j)$, 即 $\mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j)$ 覆盖 U_j 的样本数 / 总样本数。

(4) 求出 ΔU_p 的均值 m 。

$$m = \frac{\sum_{j=1}^{1000} \mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j) \cdot U_j}{\sum_{j=1}^{1000} \mu_{\Delta \bar{U}_p}(U_j)} \quad (3)$$

(5) 利用各样本左端点最小值 $\Delta U_{p \min}$ 、右端点最大值 $\Delta U_{p \max}$ 、 m 值可得左右分布参数 α 、 β 如式 (4)。

$$\begin{cases} \alpha = m - \Delta U_{p \min} \\ \beta = \Delta U_{p \max} - m \end{cases} \quad (4)$$

3.3 设备电压耐受能力

设备的电压耐受能力为随机变量, 假设敏感设备电压耐受能力 ΔU_1 服从参数为 μ 、 σ 的正态分布^[10], 记为 $\Delta U_1 \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其概率密度函数为

$$f(\Delta U_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\Delta U_1 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

其中, μ 、 σ 分别为电压耐受能力 ΔU_1 的均值和方差。对凹陷持续时间, 方法类似。

3.4 敏感度评估模型

确定设备因电压凹陷引起故障的判据是系统电压凹陷严重程度大于敏感设备电压耐受能力^[18]。因此, 设备故障事件可表示为 $\Delta U_p > \Delta U_1$ 或 $\Delta U_p - \Delta U_1 > 0$, 记为 \bar{A} 。则基于模糊变量和随机变量组合的敏感设备电压凹陷敏感度评估模型为

$$P(\bar{A}) = P(\Delta U_p > \Delta U_1) \quad (6)$$

$$\text{或 } P(\bar{A}) = P(\Delta U_p - \Delta U_1 > 0) \quad (7)$$

因设备故障事件隶属函数求解困难, 故引入模糊数学中截集概念和分解定理^[15, 16], 将求解 $P(\bar{A}) = P(\Delta U_p - \Delta U_1 > 0)$ 转化为求解 $P(\bar{A}_\lambda) = P(\Delta U_{p\lambda} - \Delta U_1 > 0)$, 其中, $\Delta U_{p\lambda}$ 为 ΔU_p 的 λ 截集。

3.5 敏感度评估方法

对任意阈值 λ , 由式 (1)、(2) 可得系统侧电压下降幅值 ΔU_p 的区间 $\Delta U_{p\lambda} = [\alpha, d_\lambda]$, α 、 d_λ 的求解公式如下:

$$\begin{cases} \alpha = m - (1-\lambda)\alpha \\ d_\lambda = m + (1-\lambda)\beta \end{cases} \quad (8)$$

设系统侧电压凹陷幅值 ΔU_p 在区间 $[\alpha, d_\lambda]$ 内服从均匀分布, 其概率密度函数为:

$$f(\Delta U_{p\lambda}) = \frac{1}{d_\lambda - \alpha} \quad (9)$$

根据概率理论, 普通事件 \bar{A}_λ 的概率, 即当阈值为 λ 时, 敏感设备的故障概率 F_λ 为:

$$\begin{aligned} F_\lambda &= P(\bar{A}_\lambda) = P(\Delta U_{p\lambda} - \Delta U_1 > 0) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta U_1) \left[\int_{\Delta U_1}^{+\infty} f(\Delta U_{p\lambda}) d(\Delta U_{p\lambda}) \right] d(\Delta U_1) \\ &= \int_{-\infty}^{\alpha} f(\Delta U_1) d(\Delta U_1) + \int_{\alpha}^{d_\lambda} \frac{d_\lambda - \Delta U_1}{d_\lambda - \alpha} f(\Delta U_1) d(\Delta U_1) \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (5)、(8)、(9) 代入, 经过积分变换, 则求 F_λ 的公式 (10) 变为

$$F_{\lambda} = \frac{1}{d_k - \alpha} \left\{ [d_k - \mu] \Phi \left(\frac{d_k - \mu}{\sigma} \right) - (\alpha - \mu) \Phi \left(\frac{\alpha - \mu}{\sigma} \right) \right\} + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[\exp \left(-\frac{(d_k - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) - \exp \left(-\frac{(\alpha - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \right] \quad (11)$$

在 (0, 1) 内产生均匀分布的随机数 λ_i ($i=1, 2, \dots, N$), 由式 (11) 求得阈值为 λ_i 时的故障概率 F_{λ_i} , 则当模拟次数 N 足够大时, 设备故障的概率 F 为

$$F = P(\Delta U_p - \Delta U_1 > 0) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{\lambda_i} \quad (12)$$

4 测试系统仿真与分析

4.1 IEEE-30 节点标准测试系统

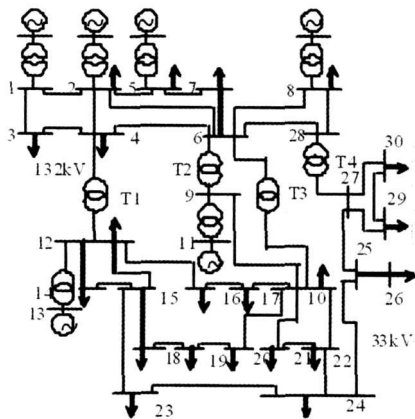


图 4 IEEE-30 节点标准测试系统

利用前面提出的评估模型和方法, 对如图 4 所示的 IEEE-30 节点标准测试系统^[19]运用 Matlab 进行仿真分析。测试系统由 6 台发电机组、30 条母线、4 台变压器和 37 条线路组成, 且变压器 T1 为 $Y_0/\Delta-11$ 接线方式; T2~T4 为 $Y0/\Delta-11$ 接线方式; 线路发生故障的概率见文献 [20]。

4.2 敏感设备接入不同母线的故障概率分析

以 PC 机作为敏感设备接入不同母线进行分析。基于文献 [10] 的研究成果, 取 PC 机电压下降幅值耐受能力 ΔU_1 为服从参数 $\mu=0.455$, $\sigma=0.028$ 的正态分布。

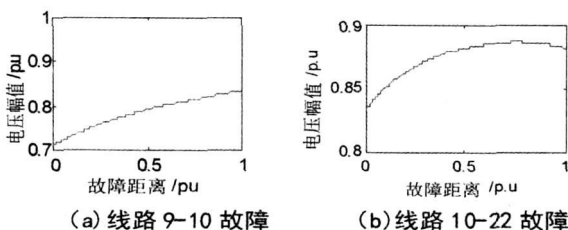


图 5 三相故障时母线 11 的电压幅值

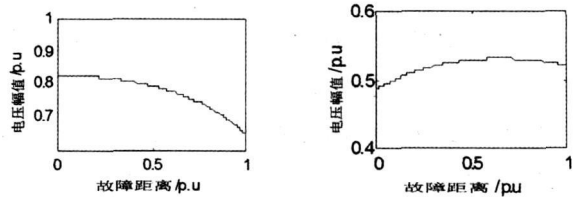


图 6 线路三相故障时母线 26 的电压幅值

图 5、图 6 分别给出当线路 9-10、线路 10-22 发生三相故障时, 母线 11 的 $U_p = f(\psi)$ 曲线以及当线路 14-15、线路 10-21 发生三相故障时, 母线 26 的 $U_p = f(\psi)$ 曲线, 对应的 ΔU_p 取值样本如表 1 所示。

表 1 节点 11、26 的电压凹陷幅值取值样本

敏感设备 接入母线	故障线路		电压凹陷 ΔU_p 的取值样本		
	首末端 母线号	年故障 次数	样本	ψ	$1-\psi$
11	9-10	0.028 8	(0 166 2 0 290 4)	1	—
	10-22	0.032 9	(0 112 4 0 166 2) (0 112 4 0 116 6)	0.761	—
	14-15	0.037 4	(0 173 0 0 349 7)	1	—
26	10-21	0.027 7	(0 466 9 0 513 2) (0 466 9 0 476 7)	0.655	—

由 3.2 节求得母线 11、母线 26 的电压凹陷幅值模糊变量 (m, α, β) 分别为 0.180 5、0.167 6、0.819 5 和 0.448 8、0.357 5、0.551 2。对 PC 机接入此两条母线分别用前面方法和蒙特卡罗法^[14]进行 10 000 次仿真, 结果如表 2。

表 2 PC 机电压凹陷敏感度评估结果

节点	本文方法	蒙特卡罗法	相对误差 %
11	0.248 4	0.249 1	0.28
26	0.578 3	0.578 2	0.02

该方法与蒙特卡罗方法的评估结果吻合, 相对误差最大均小于 1%, 同时, PC 机在母线 11 的故障概率小于母线 26, 与实际中发电机组附近凹陷频次明显降低的情况^[20]是一致的, 表明所提出的评估模型及算法具有合理性和准确性。

5 结论

针对现有评估方法仅考虑系统电压凹陷特征或设备电压凹陷耐受能力的问题, 基于系统扰动和设备耐受能力的不确定性在内涵和外延上的区别, 分别采用随机变量和模糊变量对不同特点的不确定性进行

(下转第 10 页)

—997.

[8] 岳蔚,刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13—17.

[9] 崔屹. 图象处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京, 科学出版社, 2002.

[10] 赵春晖. 数字形态滤波器理论及其算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 1998.

[11] 曾纪勇. 基于数学形态学的电能质量检测方法及应用[D]. 华中科技大学, 2006.

[12] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京, 国防工业出版社, 1999.

[13] 葛哲学,陈仲生. Matlab时频分析技术及其应用[M]. 北京, 人民邮电出版社, 2006.

作者简介:

王丽霞 (1985—), 女, 山西, 硕士研究生, 研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用;

何正友 (1970—), 男, 教授, 四川, 博士生导师, 主要从事现代信息论在电力系统故障分析中的应用、配电网综合自动化等方面的研究工作;

赵静 (1982—), 女, 四川, 博士研究生, 研究方向为数字信号处理及信息理论在电力系统中的应用.

(收稿日期: 2009—05—10)

(上接第 4 页)

表达, 综合考虑了两方面的不确定性, 提出了一种更符合实际的综合不确定性评估方法. 对个人计算机的仿真结果证明了提出的评估模型及算法的合理性和准确性.

参考文献

[1] IEEE Std 1159—1995. IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality

[2] 程浩忠. 电能质量概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[3] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 王建华, 耿英三. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 6.

[4] M. H. J. Bollen. Reliability Analysis of Industrial Power Systems Taking into Account Voltage Sags [J]. Industry Applications Society Annual Meeting 1993., Conference Record of the 1993 IEEE 2—8 Oct 1993 Page(s): 1461—1468 vol 2.

[5] Lee G J, Abu M M, Heydt G T. A power quality index based on equipment sensitivity, cost and network vulnerability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1504—1510.

[6] Martinez J A, Martin A J. Voltage sag studies in distribution networks— part II: voltage sag assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679—1688.

[7] Gupta B, Milanovic J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 711—718.

[8] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses caused by interruptions and voltage sags part I— the methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 918—924.

[9] Milanovic J V, Gupta C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags— part II: practical implementation[J]. IEEE Trans on Power De-

livery, 2006, 21(2): 935—932.

[10] 肖先勇, 王希宝, 薛丽丽, 刘波, 杨洪耕. 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.

[11] 沈正杰. 敏感性设备受电压骤降影响评估[C]. 中国台湾: 中国台湾国立中山大学博士学位论文, 2007.

[12] T. A. Short 著, 徐政译. 配电可靠性与电能质量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[13] Milanovic J V, Aung M T, Gupta C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 278—285.

[14] 董玉革. 随机变量和模糊变量组合时的模糊可靠性设计[J]. 机械工程学报, 2000, 36(6): 25—29.

[15] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.

[16] 李安贵, 张志宏. 模糊数学及其应用[M]. 第二版. 北京, 冶金工业出版社, 2006.

[17] C. H. Park and G. Jang. Stochastic Estimation of Voltage Sags in a Large Meshed Network [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1655—1664.

[18] M. H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions[M]. ser Power Engineering Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.

[19] 李娟娟. 电网电压骤降的分析评估及其抑制措施[D]. 福州: 福州大学, 2005.

[20] C. H. Park, G. Jang and R. J. Thomas. The Influence of Generator Scheduling and Time-Varying Fault Rates on Voltage Sag Prediction [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243—1250.

作者简介:

王华伟 (1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电压稳定及电压无功控制;

李华强 (1965—), 男, 博士, 教授, 长期从事电压稳定及优化问题研究.

(收稿日期: 2009—04—11)