

Voltage Sag Evaluation Method Based on Blind Number Model of Component Reliability Parameter*

Shanshan Hu¹, Xianyong Xiao^{1#}, Xiaotian Wei²

¹College of Electrical Engineering & Information Technology, Sichuan University, Chengdu

²Leshan Electric Power Co., Ltd., Leshan

Email: #xiaoxianyong@163.com

Received: Jan. 9th, 2013; revised: Jan. 11th, 2013; accepted: Feb. 18th, 2013

Abstract: The way to depict the uncertainty of components reliability parameters and voltage sag evaluation results has significant influence on the credibility of evaluation results and engineering application value. Based on the blind number theory, this paper proposed a new method to depict components reliability parameters and voltage sag evaluation results. Introducing the blind number into depicting the multiple uncertainties of components reliability parameters, combining the advantage of the analytical method to assess voltage sag, this paper establish the model of evaluation voltage sag on the base of the blind number and research on the specific evaluation algorithm. Upon obtaining the possible interval of voltage sag frequency and the corresponding credible degree, this paper take the blind number expectations of evaluation results as voltage sag frequency evaluation results. The proposed method had been applied to the IEEE-30 bus test system, the simulation results have shown that the evaluation results have high accuracy, including the advantage of deterministic method and interval number method, this method can not only give the possible interval results but also the corresponding credible degree, better satisfying the engineering applications.

Keywords: Voltage Sag; Voltage Sag Frequency; Blind Number; Uncertainty; Stochastic Estimation; Credible Degree

考虑系统元件故障不确定性的电压暂降盲数评估*

胡珊珊¹, 肖先勇^{1#}, 魏晓天²

¹四川大学电气信息学院, 成都

²乐山电力股份有限公司, 乐山

Email: #xiaoxianyong@163.com

收稿日期: 2013年1月9日; 修回日期: 2013年1月11日; 录用日期: 2013年2月18日

摘要: 系统元件可靠性参数和电压暂降评估结果的不确定性刻画方式对评估结果的可信性和工程应用价值有重要影响。本文基于盲数理论提出考虑复杂不确定性的元件可靠性参数盲数刻画模型和电压暂降评估方法。在研究元件可靠性参数盲数模型及算法的基础上, 结合电压暂降解析式评估法, 建立了电压暂降盲数评估模型, 并研究具体算法。在得到评估结果的可能取值区间和可信度的基础上, 通过求取盲数均值值得暂降频次定量评估结果。对 IEEE-30 节点测试系统进行仿真并与现有方法比较证明, 所得结果准确, 同时具有点值法和区间法的优点, 不仅能获得暂降频次的可能区间取值, 而且还能获得取值可信度, 更满足工程应用需要。

关键词: 电压暂降; 可靠性参数; 盲数模型; 复杂不确定性; 随机估计; 可信度

1. 引言

电压暂降是电压在短时间内下降到额定有效值 10%~90%的扰动事件, 持续时间为 0.5 周波到 1 min^[1]。为了提高供电可靠性, 系统被大量采用自动重合闸和

*基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2010GZ0256)。

#通讯作者。

其他控制措施,大大减少了用户停电次数,但电压暂降和电压短时中断次数却明显增加^[2]。随着系统内负荷结构的改变,大量可编程逻辑控制器(programmable logic controllers, PLC)、计算机(personal computers, PC)、调速驱动器(adjustable speed drives, ASD)等敏感设备接入电网,这些设备对电压暂降、短时电压中断非常敏感,给用户造成巨大经济和产品损失^[3-8],因此,在重视供电可靠性的同时,如何科学评价敏感设备供电母线的电压暂降,不仅具有重要理论价值,更具有工程意义。

电压暂降被认为是当前最严重的电能质量问题,已受到国内外专家、学者和工程人员的高度重视。围绕电压暂降评估方法,已开展了大量研究,提出了实测法^[9]、随机估计法、模糊等不确定性评估方法^[10-15]。实测法能客观、准确地反映电压暂降水平和才程度,但没有预测性和推广性,概率评估等考虑电压暂降原因的不确定性的方法,通过建立评估模型进行定量评估,具有预测性和可推广性,但现有评估方法中,重点研究了导致电压暂降的系统故障位置的不确定性,基于临界距离或故障点,提出了临界距离法、故障点法,并研究了不同故障类型引起的电压暂降评估方法,但是,对系统元件故障的不确定性的分析还处于起步阶段,目前提出的考虑元件故障水平不确定性的方法主要有时变故障率法^[16]、区间数法^[17,18]等,这些方法在一定程度上能刻画元件故障率的不确定性对电压暂降的影响,但事实上,元件故障水平的变化是复杂的不确定性问题,受安装时间、维护与检修周期、检修状况、环境等多因素影响^[19],采用时变故障率刻画是一种有效的方法,但如何正确确定时变故障率是仍值得探索的问题,采用区间数刻画还很难充分利用其中包含的不确定信息,因此,如何挖掘元件故障率中包含的不确定性信息,并以此建立更科学合理的电压暂降评估方法,是值得研究的重要课题。

由于元件故障率受诸多因素影响,其参数变化具有复杂不确定性,本文引入王光远院士提出的未确知数学概念^[20],用盲数模型刻画元件系统可靠性参数,给出元件参数盲数刻画方法的具体方法,建立基于解析式法的电压暂降频次评估模型,并研究了相关算法,对 IEEE-30 节点测试系统仿真并与现有评估方法进行比较,结果证明,本文方法能弥补现有方法对元件可靠性参数刻画的不足,证明了本文方法的准确

性、可行性和工程应用价值。

2. 元件可靠性参数的盲数表示及运算

元件可靠性参数的不确定性包括随机性、模糊性、灰色性和未确知性等。通常分别用概率统计、模糊数学、灰色数学、未确知数学等方法刻画。现实中,元件参数的不确定性并非单一不确定性,往往以多重不确定性混合存在的方式出现。具有上述两种及以上不确定性的信息被称为“盲信息”^[20]。盲数理论是处理和表达盲信息的一种数学工具。

对于系统元件可靠性参数中包含的多重不确定性信息,可靠性参数的真实值通常不会始终为某固定不变的点值,而总会在该点值附近的某区域内不确定地变化。如果用区间数序列 $x = \{x_i\}$ 表示可靠性参数的可能取值区间, $\sigma = \{\sigma_i | \sigma_i \in [0,1]\}$ 为该区间序列内各区间数取值的可信度,则元件可靠性参数的盲数刻画形式,就是由区间序列 $x = \{x_i\}$ 及其可信度序列 $\sigma = \{\sigma_i\}$ 构成的,以此刻画元件可靠性参数的复杂不确定性。

假设包含复杂不确定性的可靠性参数,可用区间型灰数 $H(I)$ ^[20,21]表示,其中 $x_i \in h(I)$ 为该区间型灰数上的不同取值, $\sigma_i \in [0,1]$ 为不同取值的可信度, $i=1,2,\dots,n$, 并假设存在函数 $\varphi(x)$, 满足:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \sigma_i & x = x_i (i=1,2,\dots,n) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{且, } \sum_{i=1}^n \sigma_i = \sigma \quad 0 < \sigma \leq 1 \quad (2)$$

则称 $\varphi(x)$ 为一个盲数, n 为该盲数的阶数, σ_i 为盲数 $\varphi(x)$ 取 x_i 的可信度, σ 为该盲数的总可信度^[20]。

在以上定义中,无须假设可信度的分布,可直观反映实际中存在的不确定性,因此,用盲数表示系统元件可靠性参数的不确定性,能同时反映可能的取值及其可信度。

根据 n 阶盲数 $\varphi(x)$ 的定义可知,盲数的阶数越大,表示的不确定程度越高;阶数越小,不确定程度越低。如果仅取 1 阶,且总可信度为 1,此时的盲数退化为区间型灰数,这说明盲数法与现有方法具有兼容性,是合理的。

盲数的加、减、乘、除四则运算规则简单,容易实现,运算法则如下^[20],设有盲数 A、B:

$$A = f(x) = \begin{cases} \alpha_i & x = x_i (i=1,2,\dots,m) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$B = g(x) = \begin{cases} \beta_i & x = x_i (i=1,2,\dots,n) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

则 A 、 B 两盲数间的运算, 可通过可能值和可信度积两个矩阵(如图 1、图 2)来实现。

假设“*”表示“+”, “-”, “×”, “÷”四则运算中任一运算, A 与 B 两盲数“*”运算后结果为一新 $m \times n$ 阶盲数。图 1 和图 2 的右上部元素分别表示新盲数的可能值序列和可信度序列。可能值矩阵中数值相同的元素算一个, 并在可信度积矩阵中将这些元素对应的值相加, 对应的可信度。

设 w 、 r 为实数, 且 $w \leq r$, 称 $\frac{1}{2}(w+r)$ 为区间灰数 $[w, r]$ 的心, 记为 $\Theta(w, r)$, 盲数 A 、 B 的均值为:

$$E(A) = \begin{cases} \alpha & x = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \Theta(x_i, x_{i+1}) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

$$E(B) = \begin{cases} \beta & x = \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot \Theta(x_j, x_{j+1}) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

x_1	$x_1 * y_1$	...	$x_1 * y_i$	...	$x_1 * y_n$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
x_i	$x_i * y_1$	...	$x_i * y_i$	...	$x_i * y_n$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
x_m	$x_m * y_1$	...	$x_m * y_i$	...	$x_m * y_n$
*	y_1	...	y_i	...	y_n

Figure 1. Matrix of possible values for blind number “*”
图 1. 盲数“*”运算的可能值矩阵

α_1	$\alpha_1 \cdot \beta_1$	...	$\alpha_1 \cdot \beta_i$	...	$\alpha_1 \cdot \beta_n$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
α_i	$\alpha_i \cdot \beta_1$	...	$\alpha_i \cdot \beta_i$	...	$\alpha_i \cdot \beta_n$
\vdots	\vdots		\vdots		\vdots
α_m	$\alpha_m \cdot \beta_1$	...	$\alpha_m \cdot \beta_i$	...	$\alpha_m \cdot \beta_n$
*	β_1	...	β_i	...	β_n

Figure 2. Matrix of credible degree for blind number operation “*”
图 2. 盲数“*”运算的可信度矩阵

则有:

$$E(A+B) = \begin{cases} \alpha\beta & z = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \Theta(x_i, x_{i+1}) + \sum_{j=1}^m \beta_j \cdot \Theta(y_j, y_{j+1}) \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

可见, 概率论只能给出随机不确定这一特定场景下的评估结果, 而实际中同时存在的两种以及两种以上的不确定性, 用盲数理论不仅能给出复杂不确定性的评估结果的可能取值, 还能给出不同取值的可信度, 使结果更具有工程应用价值。

3. 基于盲数的电压暂降评估

3.1. 元件可靠性参数的盲数模型

系统内的典型故障元件是线路, 其可靠性参数通常用故障率表示, 定义为单位时间内(如 1 年)单位长度(如 1 km)线路上发生的故障次数。该次数受气象、负载和维护水平, 以及鸟、树木等外来入侵因素的影响, 具有复杂不确定性, 用盲数刻画可综合利用各种可能信息, 反映元件参数可靠性不确定性对暂降评估结果的影响。

根据元件参数统计资料, 可得可靠性参数的可能区间序列, 即: $x = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, 其中

$x_i (i=1,2,\dots,n)$ 表示可靠性参数的可能区间取值。建立盲数模型还需确定 x_i 的可信度值 σ_i 。在盲数模型中, 可信度相当于各区间的权重系数。从模糊综合评判的角度看, 属模糊择优问题, 相当于确定因素论域 x 上的模糊子集 $\sigma = \{\sigma_1, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_n\}$ 。确定 σ_i 的方法较多, 有专家调查法、判断矩阵法以及德尔菲法(Delphi)等。本文采用判断矩阵法, 把 n 个评价因素排成一 n 阶判断矩阵, 通过因素间两两比较确定判断矩阵的元素值, 计算矩阵最大特征值和特征向量, 特征向量即为所求元素权重系数, 即盲数模型的可信度值, 具体步骤为:

- 1) 确定相对评价向量;
- 2) 构造判断矩阵;
- 3) 确定各区间的可信度。

3.2. 电压暂降频次评估

3.2.1. 电压暂降幅值确定

图 3 为电压暂降评估的一般系统模型。由于电压

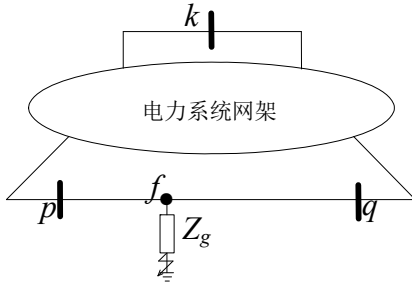


Figure 3. System network structure
图 3. 系统网架结构

暂降主要由系统短路故障引起, 用基于节点阻抗矩阵的短路算法计算暂降幅值。任选母线 k 为被评估母线, 假设 f 为故障点, 故障阻抗为 Z_g 。

设任一线路 $p-q$ 发生短路故障, 并假设故障点 f 到母线 p 的距离为 l , $0 \leq l \leq 1$ (以本线路长度为基准归一化), 以发生三相短路故障为例, 母线 k 的电压幅值为^[22]: (下见公式(8))

其中, $U_k^{\text{pref}}, U_f^{\text{pref}}$ 分别表示母线 k 和故障点 f 故障前的电压, Z_{pp}, Z_{qq} 分别表示母线 p, q 的自阻抗; Z_{kp}, Z_{kq}, Z_{pq} 为母线间的互阻抗; z_{pq} 为线路 $p-q$ 的阻抗。其它类型的故障引起的母线电压暂降幅值算法类似^[22], 不再赘述。

3.2.2. 暂降频次评估模型

按照第 2.1 节方法确定元件可靠性参数的可能取值区间和可信度, 得元件可靠性参数盲数表达式(用形如 \tilde{x} 的记号表示盲数):

$$\tilde{\lambda} = \begin{cases} \alpha_1 & [c_1, d_1] \\ \vdots & \\ \alpha_i & [c_i, d_i] \\ \vdots & \\ \alpha_n & [c_n, d_n] \end{cases} \quad (9)$$

其中, $[c_i, d_i]$ ($i=1, 2, \dots, n$) 为不同水平的可能取值区间; α_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为不同取值区间的可信度。

基于现有解析式法, 统计被评估母线给定暂降幅值的暂降域内母线数和故障线路长度, 母线暂降频次为:

$$E\tilde{S}F = \sum_{g=1}^4 \sum_{\text{line}=1}^m \tilde{\lambda}_{\text{line},g} \cdot L_{\text{line}} + \sum_{g=1}^4 \sum_{\text{bus}=1}^n \tilde{\lambda}_{\text{bus},g} \quad (10)$$

其中, m 和 n 为暂降域内总故障线路数和母线数; g 表示故障类型, $g=1, 2, 3, 4$ 分别对应于单相接地故障、两相故障、两相接地故障和三相故障; $\tilde{\lambda}_{\text{bus},g}, \tilde{\lambda}_{\text{line},g}$ 为各种故障类型下的母线、线路可靠性参数的盲数形式; 下标 line、bus 表示暂降域内的线路和母线; L_{line} 为线路 line 在暂降域内的长度。

将形如式(9)的可靠性参数代入式(10), 根据盲数运算法则得待评估母线暂降频次的盲数形式, 包括暂降频次的可能取值区间和各区间取值的可信度。此时的暂降频次为盲数形式, 为了明确其工程意义, 根据式(7)进一步求盲数均值, 并作为电压暂降点值评估结果, 即:

$$ESF = E[E\tilde{S}F] \quad (11)$$

4. 母线电压暂降频次评估过程

基于上述原理, 母线电压暂降频次评估过程如下:

1) 对系统元件可靠性参数的历史资料加以分析整理, 用判断矩阵法将元件可靠性参数(故障率)表示为盲数形式;

2) 用短路算法确定被评估母线电压暂降域, 统计暂降域内的故障线路长度和母线数;

3) 用式(10)计算被评估母线电压暂降频次, 求得用盲数形式表示的评估结果。

为避免多盲数运算引起阶数增长过快, 抑制计算量增长, 每次盲数运算后, 对新盲数立即进行降阶处理, 再进行下一次运算。目前, 常用降阶方法^[20]有压缩取值区间法和合并点法, 本文中采用“按期望值进行合并”的方法^[23]。

母线电压暂降频次评估流程如图 4。

5. IEEE-30 节点系统仿真

用本文方法对 IEEE-30 节点系统(如图 5)进行仿真, 参数见文献[13]。系统含 6 台发电机、30 条母线、

$$U_{kf} = U_k^{\text{pref}} - \frac{[(1-l)Z_{kp} + lZ_{kq}]U_f^{\text{pref}}}{[(1-l)^2 Z_{pp} + l^2 Z_{qq} + 2l(1-l)Z_{pq} + l(1-l)z_{pq}]} \quad (8)$$

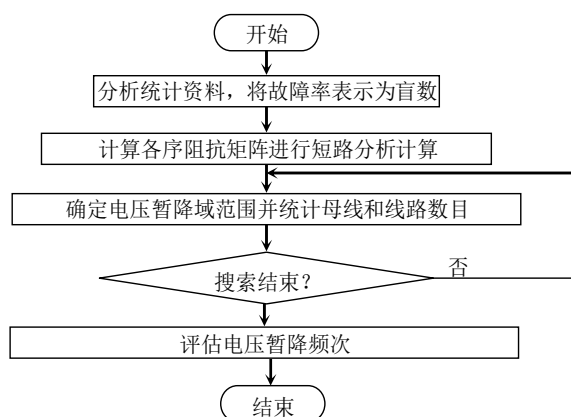


Figure 4. Flow chart of voltage sag frequency assessment
图 4. 电压暂降频次评估流程

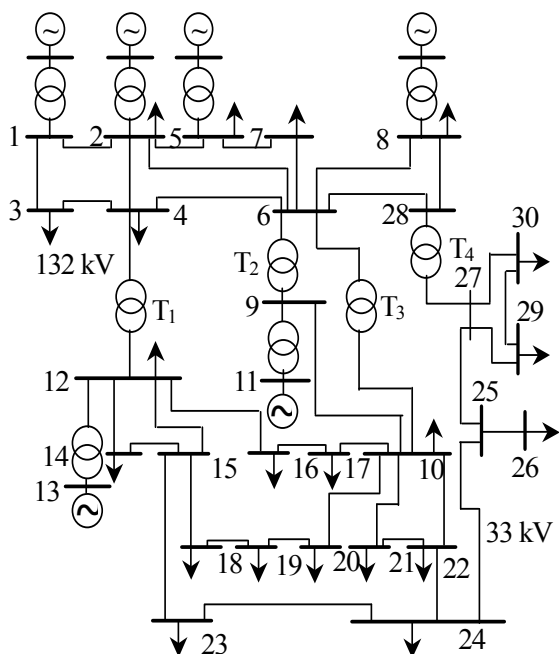


Figure 5. IEEE-30 bus test system
图 5. IEEE-30 节点测试系统

37 条线路和 4 台变压器, 假设所有变压器为 Y0/Y0 接线方式。

当发生单相接地故障时, 按文献[13]提供的故障率, 用判断矩阵法将线路故障率处理为 3 阶盲数形式。任选母线 30 为被评估母线, 结果见表 1。同时, 表 1 中还给出了点值结果和区间结果。可见, 母线 30 在各电压区间的暂降频次的点值结果与盲数的期望值很相近, 误差均小于 0.5%, 证明了本方法的正确性和合理性。盲数结果中同时包含了点值结果和区间结果, 不仅能得到暂降频次所在区间, 而且还得到出各区间的可信度, 其工程应用价值更大。如: 当电压区间为[0.3, 0.5]时, 暂降频次在[4.4478, 6.5871]区间的可信度最大, 点值结果也在该区间内, 区间估计结果与本方法结果相近, 进一步证明了本方法的正确性, 说明本方法得到的信息量更丰富。

传统点值评估仅是本方法的一种特殊情况, 但当元件故障率取点值时, 只能反映暂降频次的总体期望值, 不能反映暂降频次的不确定性, 而区间法仅能给出区间值, 无法给出可信度。盲数评估法能同时给出点值法和区间法无法得到的暂降频次的变化情况及其分布, 结果更可信, 更符合实际。

6. 结论

- 1) 系统元件可靠性参数的不确定性往往具有多样性, 用盲数法可更好地刻画可靠性参数的多种不确定信息(如模糊性、灰色性等)。
- 2) 在盲数理论和现有电压暂降评估方法的基础上提出的基于盲数的暂降频次评估模型, 能更好地刻画元件参数的不确定性, 所得结果与现有点值估计、区间估计结果兼容, 且包含的信息更丰富。

Table 1. Voltage sag frequency at bus 30 when single phase grounding fault take place
表 1. 发生单相接地故障时母线 30 处的暂降频次

电压区间	[0.1, 0.3]		[0.3, 0.5]		[0.5, 0.7]		[0.7, 0.9]	
	可能值	可信度	可能值	可信度	可能值	可信度	可能值	可信度
ESF 3 阶盲数	[2.0162, 3.2179]	0.17	[2.7472, 4.4478]	0.23	[3.7765, 6.2904]	0.18	[8.4652, 14.8668]	0.24
	[3.2179, 4.3281]	0.58	[4.4478, 6.5871]	0.65	[6.2904, 8.7257]	0.72	[14.8668, 19.2104]	0.64
	[4.3281, 5.3263]	0.25	[6.5871, 7.7391]	0.12	[8.7257, 10.7502]	0.10	[19.2104, 23.4684]	0.12
ESF(区间法)	[1.8039, 5.4021]		[2.5350, 7.6517]		[3.8132, 10.6680]		[8.3709, 23.4187]	
ESF(点值)	3.8264		5.2596		7.2633		16.3032	
盲数均值	3.8400		5.2733		7.2856		16.2653	
误差	0.36%		0.26%		0.31%		0.23%	

3) 对 IEEE-30 节点的仿真结果证明, 本文提出的盲数评估方法所得结果更符合实际, 不仅可揭示元件参数不确定性对评估结果的影响, 还能揭示评估结果的变化规律及其可能性分布, 具有一定理论价值和工程应用前景。

参考文献 (References)

- [1] IEEE Std.1159-1995. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality, 1995.
- [2] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 124-125.
- [3] 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.
- [4] S. Z. Djokic, J. Desmet, G. Vanalrnm, et al. Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 375-383.
- [5] S. Z. Djokic, K. Stockman, J. V. Milanovic, et al. Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [6] 陈铁敏, 杨洪耕. 基于改进故障点法的电压凹陷评估[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 66-73.
- [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.
- [8] 肖先勇, 李政光, 陈武等. 考虑故障阻抗与多级变压器影响的电压凹陷评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 43-47.
- [9] J. A. Martinez, J. Martin-Arnedo. Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1975-1982.
- [10] M. H. J. Bollen. Fast assessment method for voltage sags in distribution systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1414-1423.
- [11] M. H. J. Bollen. Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags. IEEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(1): 70-76.
- [12] M. R. Qader, M. H. J. Bollen. Stochastic prediction of voltage sags in a large transmission system. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(1): 152-162.
- [13] C. H. Park, G. Jang. Stochastic estimation of voltage sags in large meshed network. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1655-1664.
- [14] E. J. Elisa, H. Araceli. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1493-1500.
- [15] 肖先勇, 陈武等. 敏感设备电压暂降敏感度模糊随机评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 90-95.
- [16] M. T. Aung, J. V. Milanovic. Stochastic prediction of voltage sags by considering the probability of the failure of the protection system. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 322-329.
- [17] 肖先勇, 徐培栋, 陈卫东等. 配电系统电压凹陷幅值与频次的区间评估[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 7-10.
- [18] 任震, 万官泉, 黄雯莹. 参数不确定性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.
- [19] 胡毅. 输电线路运行故障的分析与防治[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 1-8.
- [20] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军等. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 160-184.
- [21] 雷秀仁, 任震, 陈碧云等. 电力系统可靠性评估的不确定性数学模型探讨[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 1-4.
- [22] M. N. Moschakis, N. D. Hatzargyriou. Analytical calculation and stochastic assessment of voltage sags. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1727-1734.
- [23] 雷秀仁, 任震, 黄雯莹. 处理配电系统可靠性评估不确定性的未确知数学方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 28-33.