

基于模糊失效准则的敏感设备电压凹陷敏感度评估

陈 平, 杨洪耕, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出基于模糊理论的敏感设备电压凹陷敏感度评估方法。凹陷期间设备从安全到故障存在一个过渡过程, 将这一过渡过程作为模糊极限过程, 用设备隶属于安全状态的隶属度进行描述。利用能量函数作为设备隶属于安全状态的隶属函数, 并结合正态分布函数刻画系统扰动和设备耐受能力的随机分布规律。系统扰动和设备耐受能力的概率密度函数参数分别由 IEEE30 节点仿真数据及实际测试数据得到。仿真结果验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词: 电压凹陷; 敏感设备; 模糊; 隶属函数; 随机模拟

Sensitivity evaluation of sensitive equipment based on fuzzy failure criterion due to voltage sags

CHEN Ping, YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong

(Department of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper proposes a new sensitivity evaluation method for sensitive equipment based on fuzzy theory due to voltage sags. The transitional process is considered as a fuzzy limit state in this paper, which is from safety to fault during voltage sags. The degree of membership which belongs to safety state is used to describe this transitional process. Energy function is used as the membership function. Normal distribution is used to describe the random process of system disturbance and tolerant capacity of equipment. The parameters of probability density function of system disturbance is calculated from the simulation data of IEEE-30, while that of tolerant capacity of equipment is calculated from the test data. Simulation results show that the method proposed in this paper is available and accurate.

Key words: voltage sags; sensitive equipment; fuzzy; membership function; stochastic simulation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0008-04

0 引言

电能质量与供电可靠性在电力系统中的重要性日益增加, 电压凹陷(Voltage Sag)是最常见且引起经济损失最为严重的电能质量事件之一^[1]。现代工业负荷系统中的可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controllers, PLC)、可调速驱动装置(Adjustable Speed Drives, ASD)、计算机(Personal Computers, PC)、交流接触器(AC-contactor, ACC)等设备对电压凹陷极为敏感^[2-3]。准确评价电压凹陷对工业负荷中敏感设备的影响对于采取合理技术措施, 降低经济损失具有重要理论和现实意义。

国外对敏感设备电压凹陷敏感度评估做了大量的研究。文献[4-6]基于实际测量进行统计分析来确定设备电压凹陷敏感度, 该方法直接、可靠。但是同一电压凹陷对不同敏感设备的影响不同, 即使同一敏感设备在相同特征的凹陷作用下, 因为运行

情况或负载情况不同, 设备敏感度特征也有差异。在实际过程中, 不可能对所有设备都进行测试, 因此, 该方法缺乏预测性和可移植性。针对设备敏感度的随机性, 文献[7-9]提出用基于概率模型的随机建模方法。根据各自的敏感特性对敏感设备进行分级, 并用均匀、正态、指数、负指数分布来描述不同敏感度等级, 用相应的概率密度函数表征设备电压耐受曲线 (Voltage tolerate curve, VTC)在电压幅值-持续时间平面上的不确定区域内的概率分布规律, 根据设备对电压凹陷耐受限值的概率密度函数评估设备的电压凹陷敏感度。该方法考虑了 VTC 曲线的随机性, 但设备敏感度分级缺乏标准, 一旦出现分级错误, 评估结果可能跟实际出现较大偏差。文献[10]根据测试数据建立 VTC 曲线分布的概率模型, 更为客观的描述设备敏感度的随机性。该方法评估的关键为概率模型的确定, 如果样本容量小, 建立的模型可能与实际存在差距, 这就影响了评估

的准确性。

上述评估方法^[7-10]基于二值逻辑, 即认为设备在电压凹陷作用下设备状态明确, 处于正常状态或故障状态。而实际中, 设备在电压凹陷下的运行状态存在模糊性^[11]。设备从正常状态到故障状态之间有一个从量变到质变的过渡过程, 工业负荷在正常状态与故障状态之间还可能出现产品质量降低、产量下降、部分产品报废等中间状态, 这些状态同样造成明显的损失^[5], 二值逻辑不能很好反映该过程中的变化规律。另外, 现有敏感设备的凹陷评估方法, 一般仅针对在具有特定凹陷特征的电压凹陷作用下设备的敏感度, 认为电力系统产生的凹陷特征及分布规律为已知的确定情况, 实际上, 系统产生的凹陷特征与系统运行方式、故障位置、故障类型等因素有关, 而这些因素的随机变化导致特定用户供电点处的凹陷特征具有明显的随机性^[12-13]。

为了弥补传统估计方法在描述设备模糊工作状态及系统侧电压凹陷随机性方面的不足, 本文提出基于模糊失效准则的敏感设备电压凹陷敏感度评估方法。利用概率分布模型描述系统凹陷的随机性, 并针对遭受凹陷时设备的从安全状态到故障状态之间的过渡状态, 提出以能量函数作为隶属函数, 用设备状态隶属于正常状态的隶属度来刻画这一过渡状态。仿真验证了本文方法的准确性和可行性。

1 不确定性评估模型

由于受故障位置、类型及网络结构等多因素影响, 电压凹陷特征具有很强随机性, 可将凹陷特征(主要指凹陷幅值 V 和持续时间 T) 定义为随机变量。电压凹陷幅值主要决定于故障位置和故障类型, 凹陷持续时间决定于系统保护装置的动作时间^[14], 因此 V 和 T 相互独立。假设系统凹陷严重程度 s 的概率分布为正态分布, 则 s 的概率密度函数如式(1)。

$$f(s) = f(V_s) \times f(T_s) = \frac{1}{2\pi\sigma_{vs}\sigma_{ts}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(V_s - \mu_{vs})^2}{\sigma_{vs}^2} + \frac{(T_s - \mu_{ts})^2}{\sigma_{ts}^2}\right]\right\} \quad (1)$$

其中: σ_{vs} 、 σ_{ts} 为设备连接点凹陷幅值 V 及持续时间 T 的样本方差; μ_{vs} 、 μ_{ts} 为设备连接点凹陷幅值 V 及持续时间 T 的样本均值。

敏感设备的电压耐受能力存在很大不确定性, 随时间、空间的变化而变化^[4-6]。可用耐受曲线的分布规律来刻画敏感设备的耐受能力^[7-9]。假设设备耐受能力 r 的概率分布为正态分布^[10], 则 r 的概率密度函数如式(2)。

$$f(r) = f(V_r) \times f(T_r) = \frac{1}{2\pi\sigma_{vr}\sigma_{tr}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(V_r - \mu_{vr})^2}{\sigma_{vr}^2} + \frac{(T_r - \mu_{tr})^2}{\sigma_{tr}^2}\right]\right\} \quad (2)$$

其中: σ_{vr} 、 σ_{tr} 为设备耐受能力凹陷幅值 V 及持续时间 T 的样本方差; μ_{vr} 、 μ_{tr} 为设备耐受能力凹陷幅值 V 持续时间 T 及的样本均值。

2 基于模糊失效准则的敏感度评估算法

在遭受电压凹陷时, 设备从正常状态到故障状态之间有一个从量变到质变的过渡过程, 传统的评估方法将中间过渡过程进行了简化, 即以突变的形式进行处理, 认为设备从正常状态到故障状态的发生是突变的, 这有失科学性, 也难以与工程实际吻合^[15]。本文将设备从正常状态到故障状态中间的过程看成模糊极限状态, 则设备在遭受电压凹陷时的安全状态就是一模糊事件 \tilde{A} , 可用设备状态对 \tilde{A} 的隶属度来刻画模糊事件 \tilde{A} , 即

$$\mu_{\tilde{A}}(s) = \begin{cases} 1 & \text{设备处于安全状态} \\ \in (0, 1) & \text{设备处于模糊极限状态} \\ 0 & \text{设备处于故障状态} \end{cases} \quad (3)$$

2.1 基于能量函数的设备状态隶属函数

凹陷严重程度指数应是凹陷幅值和持续时间的函数^[16]。文献[16]提出能量函数来度量凹陷的严重程度, 如果凹陷是矩形凹陷, 则能量函数定义为:

$$E = \left[1 - \left(\frac{V}{V_{\text{norm}}}\right)^2\right] \times T \quad (4)$$

式中: V_{norm} 是设备连接点的额定电压, T 是凹陷持续时间。

能量函数的物理意义是, 系统对阻性负荷的少供能量。描述设备敏感度的 CBEMA 曲线是基于一个恒定的能量参数^[17]。能量函数能够反映凹陷的严重程度。

PC、ASD、PLC 的耐受曲线呈矩形, 针对某一特定设备类型, 其耐受曲线均在限值(V_{\min}, T_{\max})和(V_{\max}, T_{\min})之间^[8], 各设备耐受能力曲线的变化范围见表 1。设备在遭受凹陷时隶属于安全状态的隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(s)$ 定义为:

$$\mu_{\tilde{A}}(s) = \begin{cases} 1 & (V > V_{\max} \text{ 且 } T < T_{\min}) \\ \left[1 - \left(\frac{V_{\max} - V}{V_{\max} - V_{\min}}\right)^2\right] \times \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}\right) & (V_{\min} < V < V_{\max} \text{ 且 } T_{\min} < T < T_{\max}) \\ 0 & (V < V_{\min} \text{ 且 } T > T_{\max}) \end{cases} \quad (5)$$

在耐受能力不确定性区域中, 凹陷最轻微时

候,即凹陷特征 $(V, T)=(V_{\max}, T_{\min})$ 时,设备隶属于安全状态的隶属度为 1;凹陷最严重时,即凹陷特征 $(V, T)=(V_{\min}, T_{\max})$ 时,设备隶属于安全状态的隶属度为 0。

表 1 设备电压耐受能力变化范围

Tab.1 Variation of equipment voltage tolerance capability

类型	电压幅值/%		持续时间/ms	
	U_{\min}	U_{\max}	T_{\min}	T_{\max}
PLC	30	90	20	400
ASD	59	71	15	175
PC	46	63	40	205

2.2 敏感度评估算法

假设系统扰动强度 s 的概率密度函数为 $f(s)$,设备耐受能力 r 的概率密度函数为 $f(r)$,根据干涉理论,可用联合概率密度函数求出设备的传统可靠性^[15],

$$R = P(s \leq r) = \int_{-\infty}^{+\infty} dR = \int_{-\infty}^{+\infty} f(r) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(s) C_A(s) ds \right] dr \quad (6)$$

式中: $C_A(S)$ 是普通时间 $A = \{s \leq r\}$ 的特征函数,当 $s \leq r$ 时,有 $C_A(S)=1$,否则 $C_A(S)=0$ 。

上述定义为传统可靠性的前提假设,即设备从安全状态突变到故障状态,没有考虑中间的过渡过程。将中间过渡状态考虑成模糊极限状态,推广式(6),就可得基于模糊失效准则的设备可靠性:

$$R = P(s \lesssim r) = \int_{-\infty}^{+\infty} dR = \int_{-\infty}^{+\infty} f(r) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(s) \mu_{\tilde{A}}(s) ds \right] dr \quad (7)$$

则设备的故障概率

$$\bar{R} = 1 - R \quad (8)$$

3 敏感度评估一般方法

基于模糊失效准则的敏感度评估一般步骤如下:

第一步:对设备连接点系统凹陷的样本数据进行处理,求出系统扰动 s 的四个特征参数(μ_{vs} 、 σ_{vs} 、 μ_{ts} 、 σ_{ts}),并根据式(1)得到系统扰动 s 的概率密度函数 $f(s)$ 。

第二步:对设备耐受能力测试数据进行处理,求出耐受能力 r 的四个特征参数(μ_{vr} 、 σ_{vr} 、 μ_{tr} 、 σ_{tr}),并根据式(2)得到设备耐受能力 r 的概率密度函数 $f(r)$ 。

第三步:根据特定敏感性设备,得到对应的 (V_{\min}, T_{\max}) 和 (V_{\max}, T_{\min}) ,从而根据式(5)得到隶属函

数 $\mu_{\tilde{A}}(s)$ 。

第四步:将 $f(s)$ 、 $f(r)$ 和 $\mu_{\tilde{A}}(s)$ 代入式(7),求出设备基于模糊失效准则的可靠性 R 。

第五步:根据式(8)计算出设备的故障概率。

4 蒙特卡罗随机模拟算法及步骤

4.1 蒙特卡罗随机模拟算法

如果系统扰动 s 为一随机变量,且描述设备安全模糊事件 \tilde{A} 的隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(s)$ 已获得,则对于任意一确定的耐受能力值 $r_0 = a_1$,根据可靠性理论^[15],可得设备的可靠度为

$$R = P(s \lesssim a_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s) \mu_{\tilde{A}}(s) ds \quad (9)$$

经 N 次随机模拟后,设备可靠度 R 为

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (10)$$

则设备的故障概率为

$$\bar{R} = 1 - R \quad (11)$$

4.2 蒙特卡罗随机模拟步骤

第一步:根据设备耐受能力特征参数,随机产生 N 对耐受能力样本值 $r_i = (V_i, T_i)$ 。

第二步:将 r_i 、 $f(s)$ 和 $\mu_{\tilde{A}}(s)$ 代入式(9),得到设备基于模糊失效准则的可靠性 R_i 。

第三步:根据式(10)、(11),得到设备的故障概率 \bar{R} 。

5 仿真结果分析

本文以 PC 机作为敏感设备进行分析,其他敏感设备的评估类似。

测试结果显示,PC 的耐受能力范围在(63%, 40 ms)和(46%,205 ms)之间^[8]。根据文献[10]提供的方法,可得出 PC 的耐受能力 r 的各项参数($\mu_{vr}=0.545$ 、 $\sigma_{vr}=0.028$ 、 $\mu_{tr}=122.5$ 、 $\sigma_{tr}=27.5$)。

系统扰动数据由 IEEE-30 节点标准测试系统^[18]随机产生,如图 1。假设 PC 连接在节点 21,在线路 12-15 上随机发生故障,故障位置服从均匀分布,在节点 21 上监测到的数据就为系统扰动数据。经过 Matlab 仿真,得到的系统凹陷电压幅值的参数为($\mu_{vs}=0.533$ 、 $\sigma_{vs}=0.064$)。因为系统凹陷的持续时间决定于系统保护动作时间^[14],假设其参数为($\mu_{ts}=110$ 、 $\sigma_{ts}=30$)。

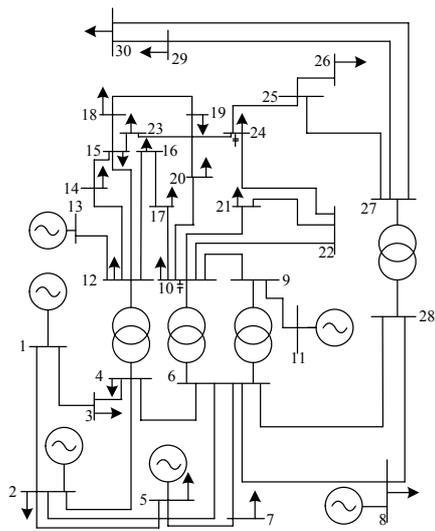


图1 IEEE-30节点标准测试系统

Fig.1 IEEE-30 bus test system

蒙特卡罗随机模拟法根据耐受能力的各项参数,随机产生1000组数据用Matlab7.0进行仿真得出结果。

本文方法的评估结果和蒙特卡罗随机模拟结果见表2。

由表2分析可知:

(1) 系统凹陷严重程度增强(即凹陷幅值 V 减小、凹陷持续时间 T 变长)或减弱(即 V 增大、 T 变短)时,设备的故障概率相应的增加或降低,说明本文方法能够反映系统扰动对设备敏感度的影响。

(2) 设备耐受能力增强(即耐受凹陷幅值 V 减小、持续时间 T 变长)或减弱(即 V 增大、 T 变短)时,设备的故障概率相应的降低或增加,说明本文方法能够反映设备耐受能力对设备敏感度的影响。

(3) 本文方法与蒙特卡罗随机模拟方法结果相吻合,最大绝对误差为0.66%,说明本文方法能够准确的评估设备的敏感度。

表2 PC机电压凹陷敏感度评估结果

Tab.2 Assessment results of the failure probability of PC

编号	系统扰动参数 ($\mu_{Vrs}, \sigma_{Vrs}, \mu_{Trs}, \sigma_{Trs}$)	PC机电压凹陷耐受能力参数 ($\mu_{Vrs}, \sigma_{Vrs}, \mu_{Trs}, \sigma_{Trs}$)	基于模糊失效 准则评估方法	蒙特卡罗随机 模拟方法	相对误差
1	0.533,110,0.064,30	0.545,122.5,0.028,27.5	0.075 1	0.075 6	-0.66%
2	0.46,130,0.064,30	0.545,122.5,0.028,27.5	0.276 6	0.277 8	-0.43%
3	0.58,90,0.064,30	0.545,122.5,0.028,27.5	0.016 2	0.016 4	-0.61%
4	0.533,110,0.064,30	0.48,150,0.028,27.5	0.019 0	0.019 1	-0.52%
5	0.533,110,0.064,30	0.58,90,0.028,27.5	0.148 0	0.147 3	0.48%

6 结论

电压凹陷期间,系统少供能量由设备储存能量补充,用能量函数能够反映凹陷期间设备的工作状态。本文以能量函数作为设备隶属于安全状态的隶属函数,来描述凹陷期间设备从安全到故障之间的过渡过程,提出了基于模糊理论的敏感设备电压凹陷敏感度评估方法。与蒙特卡罗随机模拟结果比较,该方法具有有效性和准确性的特点。

参考文献

- [1] IEEE Standard 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality[S]. New York: 1995.
- [2] McGranaghan M F, Mueller D R, Samotyj M J. Voltage Sags in Industrial Systems[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1993, 29(2): 397-402.
- [3] Moreno-Munoz A, Pallares V, Galisteo P, et al. Study of Voltage Sag in a Highly Automated Plant[A]. in: Electrotechnical Conference, MELECON[C]. 2006.1060-

1063.

- [4] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of ac Coil Contactors to Voltage Sag, Short Interruptions, and Undervoltage Transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [5] 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.
- [6] Djokic S Z, Stockman K, Milanovic J V, et al. Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 494-505.
- [7] Gupta P, Jovica V, Milanovic. Probabilistic Assessment of Equipment Trips due to Voltage Sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 711-718.
- [8] Gupta C P, Milanovic J V. Probabilistic Methods for Counting Equipment Trips Due to Voltage Sags[A]. in: 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH[C]. Stockholm: 2006.

(下转第17页 continued on page 17)

发生单相接地故障的线路 δ 取 1, 非故障线路 δ 取 0, 改进型六相序阻抗距离保护方案的测量阻抗能够真实的反应实际短路阻抗, 不会出现保护范围缩短或增长现象, 同时可以反应双回线的跨线接地故障。仿真结果表明了改进型六相序阻抗距离保护方案的正确性。

参考文献

- [1] 俞波. 超高压同杆并架双回线路微机保护的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.
YU Bo. Research on Microprocessor-based Protective Relay for EHV Double Circuit Lines on Same Tower[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003.
- [2] 鄢安河, 李夏阳, 姚晴林, 等. 正序电压极化的横差保护选择元件的动作研究[J]. 继电器, 2008, 36(8): 6-10.
YAN An-he, LI Xia-yang, YAO Qing-lin, et al. Research on Selectors of Transverse Differential Protection Using Positive Sequence Polarizing Voltage[J]. Relay, 2008, 36(8): 6-10.
- [3] 张太升, 鄢安河, 赵一, 等. 同杆双回线的新型继电保护方案研究[J]. 继电器, 2008, 32(2): 25-28, 39.
ZHANG Tai-sheng, YAN An-he, ZHAO Yi, et al. The Study of a New Relay Protection Scheme for Double Circuit Lines on the Same Pole[J]. Relay, 2008, 32(2): 25-28, 39.
- [4] 陈生贵. 电力系统继电保护[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003. 91-103.

社, 2003. 91-103.

CHEN Sheng-gui. Electric Power System Relay Protection[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2003. 91-103.

- [5] 李瑞生, 王强, 文明浩, 等. WXH-803 光纤电流差动保护的研究[J]. 继电器, 2004, 32(2): 43-46.
LI Rui-sheng, WANG Qiang, WEN Ming-hao, WANG Er-han. Study of WXH-803 Current Differential Protection Based on Optical Fibre[J]. Relay, 2004, 32(2): 43-46.
- [6] 朱晓彤, 郑玉平, 张俊洪, 等. 同杆并架双回线跨线不接地故障的距离保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 63-66, 70.
ZHU Xiao-tong, ZHENG Yu-ping, ZHANG Jun-hong, et al. Distance Protection of Double-circuit Line on the Same Pole when Phase to Phase Fault Occurs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 63-66, 70.

收稿日期: 2009-04-16; 修回日期: 2009-05-13

作者简介:

孟远景(1957-), 女, 教授级高级工程师, 从事电网技术、电力系统调度、生产的研究和管理工作;

鄢安河(1952-), 男, 高级工程师, 从事电网技术、电力系统调度、生产的研究和管理工作;

李瑞生(1966-), 男, 教授级高级工程师, 从事继电保护方面的研究。E-mail: ruishengl@xjgc.com

(上接第 11 页 continued from page 11)

- [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 Delivery, 2006, 21(2): 935-932.
- [10] 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.
- [11] Bonatto B D, Niimura T, Dommel A H W. Fuzzy Logic Application to Represent Load Sensitivity to Voltage Sags[A]. in: Proceedings 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C]. 1998. 60-64.
- [12] Thasananutari T, Chatratana S. Stochastic Prediction of Voltage Sags in an Industrial Estate[A]. in: Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record [C]. 2005. 1489-1496.
- [13] Myo Thu Aung, Milanovic J V. Stochastic Prediction of Voltage Sag by Considering Probability of the Failure of the Protection System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 322-329.
- [14] Myo Thu Aung, Milanovic J V. Stochastic Prediction of Voltage Sag by Considering Probability of the Failure of

the Protection System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 322-329.

- [15] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [16] Bollen M H J, Sabin D D, Thallam R S. Voltage-sag Indices—Recent Developments in IEEE P1564 Task Force[A]. in: CIGRE/IEEE PES International Symposium[C]. 2003. 34-41.
- [17] Thallam R S, Heydt G T. Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense. Presented at the Panel Session on Power Quality: Voltage Sag Indices[A]. in: IEEE PES Summer Meeting[C]. 2000. 905-909.
- [18] IEEE-30 Bus Test System[J/OL]. http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30bus.htm

收稿日期: 2009-03-28; 修回日期: 2009-05-13

作者简介:

陈平(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量; E-mail: nicolas.chen@163.com

杨洪耕(1949-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电能质量分析与控制方面的教学和研究工作;

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教学与研究。