

用电设备电能质量敏感度测试系统研究

赵剑锋, 王 浔, 潘诗锋

(东南大学电气工程系, 江苏省 南京市 210096)

STUDY ON POWER QUALITY SUSCEPTIVITY TESTING SYSTEM OF AC CONTACTOR

ZHAO Jian-feng, WANG Xun, PAN Shi-feng

(Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The concept, configuration, usage and function of the power quality susceptibility testing system are described. The mathematical model of AC contactor is built, and its power quality susceptibility have been carried through simulation research. Based on AC contactor's power quality susceptibility testing system, which is composed of power quality signal generator and AC contactor, many experiments have been done through changing the input voltage of AC contractor, and the ITI curve is gotten. Simulation and experiment results show that the mathematical model of AC contactor is correct; the testing system not only can fulfill its functions, but also can provide reference for AC contactor's design or manufacture and popularize to other equipments power quality susceptibility test.

KEY WORDS: Power quality; Susceptivity testing system; AC contactor; Signal generator; Voltage Sag; ITI curve

摘要: 提出了电能质量敏感度测试系统的概念, 对其组成、用途、功能进行了定义和描述; 以交流接触器为例, 建立了数学模型, 并对其电能质量敏感度进行了仿真研究; 用大功率电能质量信号发生装置与某型号的交流接触器构成电能质量敏感度测试系统, 通过改变接触器线圈输入电压的跌落幅值和持续时间进行了大量的实验, 得到了反映交流接触器对于电压跌落耐受能力的 ITI 曲线。仿真和试验所得结果可以为交流接触器在生产过程中的测试提供参考, 并能推广到对其它用电设备进行电能质量敏感度测试。

关键词: 电能质量; 敏感度测试系统; 交流接触器; 信号发生装置; 电压跌落; ITI 曲线

1 引言

随着经济的发展, 大量非线性、冲击负荷的使

用, 导致电网中的电能质量问题日益严重。但是, 各种以计算机、可编程控制器、嵌入式处理器为核心的精密用电设备对电源电压的要求越来越高。当电源电压发生畸变, 会给半导体制造、信息、计算机或电子通信等行业带来巨大的经济损失。据统计, 美国因为电能质量问题所带来的损失一年超过 500 亿美元^[1-2]。因此, 对电能质量的研究引起了国内外学者的广泛关注。但是, 目前的研究热点主要在电能质量的检测、分析、评估、控制与治理等方面^[3-6], 对用电设备的电能质量敏感度研究还没有引起足够的重视。然而, 解决电能质量问题对用电设备产生的不利影响, 一方面可以通过治理电网的电能质量; 另一方面也可以对电气设备在出厂之前进行电能质量敏感度测试, 若有问题进行改进, 使之能够很好地适应电网用电环境, 减少电能质量问题带来的经济损失。因此, 对电气设备的电能质量敏感度进行研究具有很强的实用价值。

目前, 未对用电设备的电能质量敏感度进行深入研究的主要原因是能够模拟产生各种电能质量信号的大功率发生装置还不完善, 现有方法和设备存在结构笨重, 功能单一, 精度差, 输出功率小, 缺乏智能化, 通用性不够的缺点^[7-8]。本文根据所研制的、基于现代电力电子技术的大功率电能质量信号发生装置对电气设备的电能质量敏感度进行了初步的研究^[9]。

当前, 国外对设备的电能质量敏感度测试取得了一定的成果, 但是所测试的设备也很有限, 主要局限于电机调速系统、可编程逻辑控制器等^[10-11]; 国内对该领域的研究正处于起步状态^[12]。本文对交流接触器电能质量敏感度进行了研究, 主要原因是目前电压跌落是发生概率最大的电能质量问题^[13],

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50207002)。

Project Supported by Natural Science Foundation of China (50207002).

交流接触器在各行各业中被大量使用，它对电压跌落比较敏感，有研究表明当电压低于 50%、持续时间超过 1 个周期，甚至低于 70% 或者更高，交流接触器就会脱扣^[14]，从而影响生产的正常进行，导致巨大的经济损失。

本文的主要工作是提出了电能质量敏感度测试系统的概念，并对其组成、用途、功能进行了定义和描述；建立了交流接触器的数学模型，并对其电能质量敏感度进行了仿真和试验研究，首次得到了反映交流接触器对于电压跌落耐受能力的 ITI 曲线。

本文的研究结果可以为交流接触器在生产过程中的测试提供参考，可以降低在实际使用中的由于电源电压的问题所造成的经济损失。另外，在改变测试方法后也能推广到其它用电设备的电能质量敏感度测试。

2 电能质量敏感度测试系统

电能质量敏感度测试系统指由电能质量信号发生装置、数据采集系统、后台计算机及控制分析软件、被测设备组成，能够完成对电气设备的电能质量敏感度测试并获取实验数据的系统，其组成如图 1 所示。在该系统中，核心是后台计算机及控制分析软件，它通过通讯接口控制电能质量信号发生装置产生需要的信号提供给测试设备，测试设备是否正常工作的反馈信号由数据采集系统获得并送到后台计算机，控制分析软件根据反馈信息做出被测设备的电能质量敏感度曲线。

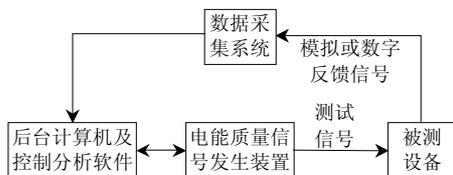


图 1 电能质量敏感度测试系统结构图
Fig.1 Configuration of power quality susceptibility testing system

电能质量敏感度测试系统应当具有如下基本功能：

(1) 能够产生各类电能质量信号，包括电压跌落、闪变、凹陷、谐波、尖峰、骤升、过压、欠压等信号，并有较高的精度和较大功率。

(2) 具有完善的数据采集、通讯功能；可以采集反映被测设备工作状态的模拟和数字信号送入后台计算机。

(3) 智能化的控制分析软件；能够完成对电能质量信号发生装置的控制、信号分析处理以及自动形成测试报表的功能。

(4) 完善的保护功能；在测试中发生故障时可以有效地保护信号发生装置和被测试设备。

与单纯对某个电气设备进行敏感度测试有所不同，电能质量敏感度测试系统体现的是全自动和智能化的特点。在这个系统中，测试设备和被测设备之间紧密联系，后台计算机、信号发生装置以及被测设备之间都有数据交换，控制分析软件是整个测试系统的核心。

3 交流接触器数学模型及仿真

3.1 电磁铁运动方程

交流接触器的厂家技术资料表明，接触器线圈电压在 85%~110% 额定电压时能够可靠吸合，在 20%~70% 额定电压时能可靠分断。如果接触器线圈发生 15%~30% 的跌落时，接触器的动作行为存在不确定的情况，既可能出现脱扣，也可能保持吸合，但是接触电阻发生变化。本文根据上述资料建立了交流接触器数学模型，用以进行仿真研究。

图 2 中为交流接触器的基本结构， d 为气隙宽度； x 为衔铁行程； k 为弹性系数； $L(x)$ 为电感线圈； m 为衔铁质量； D 为不加电时平衡位置长度。其中 $L(x)$ 为变量是行程 x 的函数。

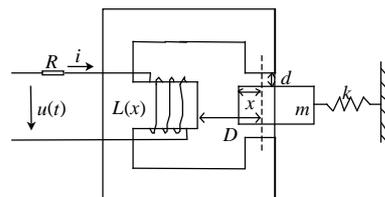


图 2 交流接触器基本结构
Fig.2 Structure of AC contactor

根据拉格朗日方程法构造的电磁铁运动方程^[15]。动能 T 、位能 V 、拉格朗日函数 P 、耗散函数 F 和假设磁路不饱和时电感 $L(x)$ 分别为

$$\left\{ \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} L(x) i^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2 \\ V &= \frac{k}{2} x^2 \\ P &= T - V \\ F &= \frac{1}{2} R i^2 + \frac{1}{2} r \dot{x}^2 \\ L(x) &= \frac{c}{d + D - x} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

拉格朗日方程如下

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P}{\partial \dot{z}_K} \right) - \frac{\partial P}{\partial z_K} + \frac{\partial F}{\partial z_K} = Q_K \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)，化简得电磁铁运动方程

$$\begin{cases} Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dt} = u(t) \\ \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} - r \frac{dx}{dt} - kx = m \frac{d^2 x}{dt^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 r 为衔铁移动阻尼系数; c 为常数; z_K 为广义速度; q_K 为广义坐标; Q_K 为广义力。

3.2 触头接触电阻数学模型

对于接触器的触点，假定触头发生弹性形变，接触电阻的计算模型如式(4)所示^[16]

$$\begin{cases} R = g \frac{1}{f^n(t)} \\ f(t) = bh \end{cases} \quad (4)$$

其中, R 为接触电阻; g 为常系数; $f(t)$ 为压力; n 为 0.9 或 0.333 常系数, 本文中取 0.333; b 为常数; h 为形变长度。

式(3)和(4)为交流接触器的数学模型。由于上述二式是非线性方程组, 难以得到解析解, 文中将其转化为仿真模型, 用仿真的方法对接触器线圈电压发生跌落时的动作行为和触点接触情况进行研究。

3.3 仿真研究

在上述数学模型的基础上, 考虑实际的边界约束条件就可以对发生电压跌落是交流接触器的动作行为进行仿真研究。主要边界约束条件如下: 最大行程 $X=2\text{cm}$; 触头接触范围 1.9~2.0cm, 接触电阻单位为 Ω ; 额定电压 $u=220\text{V}$; 额定电压下接触器吸合时间为 160ms。

图 3~5 是在上述参数条件下得到的仿真结果。

图 3~5 分别是电压跌落 18%、18%、28%, 持续时间为 100ms、200ms 和 40ms 的仿真波形; 在图 3~5 中, 从上到下三个波形依次为接触器交流线圈输入电压、行程和触头接触电阻。

从图 3 可以看到, 当输入电压在 3s 时发生幅值为 18%、持续 5 个周期的电压跌落时, 在跌落过程中由于电磁力减小, 行程 X 发生微小改变, 触头仍然处于接触位置, 但是, 此时触头间的压力减小, 导致接触电阻 R 上升。从图 4 可以看到, 虽然跌落幅值也为 18%, 但是持续时间增加到 10 个周期后, 接触器发生脱扣, 主要原因在于电流衰减时间增加, 导致电磁力下降幅度增大, 无法维持吸合状态。图 5 是电压跌落 28%、40ms 时机构触头行程发生

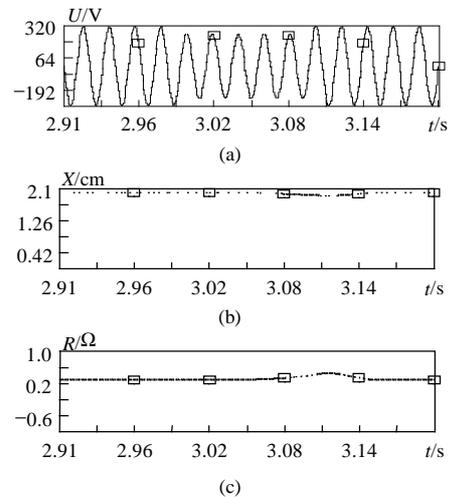


图 3 电压跌落 18%, 持续 100ms 时仿真波形
Fig.3 Simulation results of sag 18% and duration 100ms

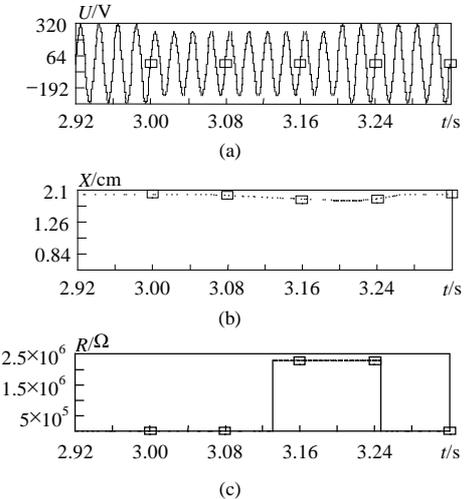


图 4 电压跌落 18%, 持续 200ms 时仿真波形
Fig.4 Simulation results of sag 18% and duration 200ms

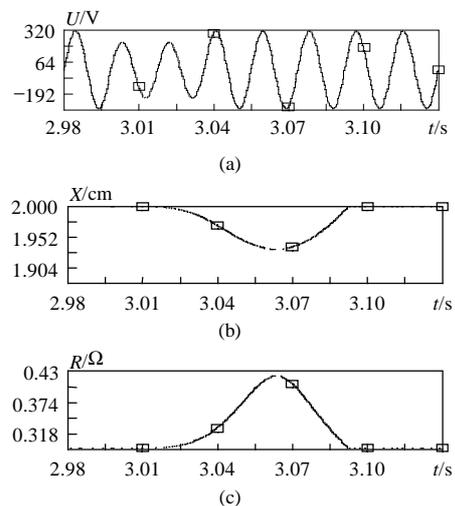


图 5 电压跌落 28%, 持续 40ms 时仿真波形
Fig.5 Simulation results of sag 28% and duration 40ms
小幅改变, 此时触头虽然处于接触状态, 但接触电阻明显增大。上述仿真结果表明: 交流接触器的动

作行为与电压跌落的幅值和持续时间有关。

通过连续改变交流接触器线圈输入电压的跌落幅值和持续时间，就可以得到图 6 所示的交流接触器的安全工作电压曲线。在曲线的左上方为能够正常工作的区域，阴影部分为不安全工作区。当发生跌落后电压幅值和持续时间对应的点在安全工作区时，接触器能够保持吸合状态，否则会脱扣。

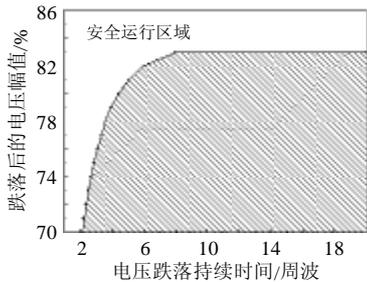


图 6 接触器安全工作区域仿真

Fig.6 Simulation of AC contactor safety operation area

4 交流接触器电能质量敏感度测试

4.1 测试系统

本文通过所研制的大功率电能质量信号发生装置和交流接触器组成的电能质量敏感度测试系统，进行了相关的试验研究。

图 7 为建立的交流接触器电能质量敏感度测试系统框图，其中 s 为交流接触器的常开辅助触头，c 为线圈，9V 直流电压经限流电阻 r 接到触头上，触头两端电压送给示波器观察。当触头两端电压为零时，接触器吸合；当触头两端电压不为零时，接触器工作在不安全工作区，因此，通过检测常开辅助触头电压的大小可以判断接触器的工作状态。

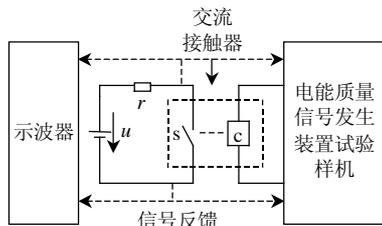


图 7 交流接触器电能质量敏感度测试系统框图

Fig.7 Framework of AC contactor power quality susceptibility testing system

4.2 试验样机介绍

试验样机以 DSP 作为控制核心，智能化功率模块 (IPM) 为功率器件，采用 AC-DC-AC 双 PWM 变换器作为主电路，结合相应控制策略实现。在整流控制策略上采用滞环电流控制能够快速准确控制直流电压，同时其网侧功率因数基本为 1。逆变侧使用正弦脉宽调制 (PWM)，满足输出电能质量

信号的需要。图 8 是试验样机产生的电压凹陷实验波形。除上述波形外，试验样机还能够产生各类电能质量信号，如电压谐波、跌落、闪变、骤升、中断等^[13-14]。

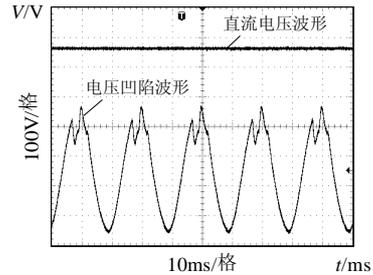


图 8 产生电压凹陷波形

Fig.8 Voltage notch waveform

4.3 敏感度测试

利用所建立的测试系统进行了相应的实验研究，下面仅给出部分实验波形。图 9~12 分别是跌落幅值为 100%、60%、60%、30%，持续时间为 20ms、60ms、80ms 和 400ms 实验结果。在图 9~12 中，通

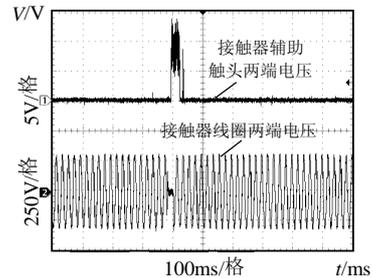


图 9 电压跌落 100%，持续 20ms 时的实验波形

Fig.9 Experimental results of sag 100% and duration 20ms

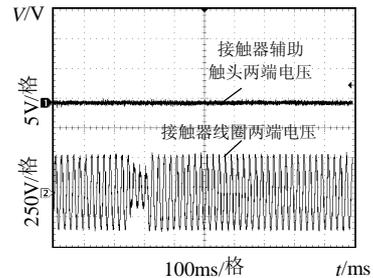


图 10 电压跌落 60%，持续 60ms 时的实验波形

Fig.10 Experimental results of sag 60% and duration 60ms

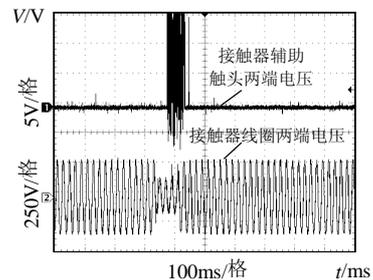


图 11 电压跌落 60%，持续 80ms 时实验波形

Fig.11 Experimental results of sag 60% and duration 80ms

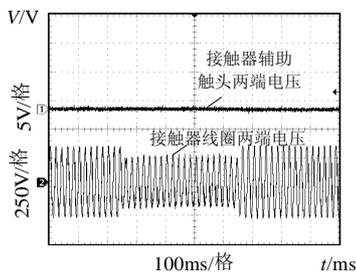


图 12 电压跌落 30%，持续 400ms 时的实验波形

Fig.12 Experimental results of sag 30% and duration 400ms

道 1 的波形为接触器辅助触头两端电压；通道 2 的波形为接触器线圈两端电压；在实验波形中，通道 1 低电平表示接触器吸合，高电平表示接触器脱扣，但是由于测试时接触器产生的强烈电磁干扰，使得高电平的波形有很多毛刺，但实验结果可以明显区分高低电平，不影响实验结论和判断。

图 9 表明当电压发生短时中断时，即使时间很短，仅持续一个周期，交流接触器也发生脱扣现象。在图 10 中电压跌落 60%，持续 60ms 接触器没有发生脱扣现象。但是在图 11 中，虽然跌落幅值与图 10 的情况相同，仅仅是时间由 60ms 增加到 80ms 接触器就发生脱扣了，上述试验结果在现场是无法得到的。图 12 表明该接触器在电压跌落 30% 时能够正常运行。

实验结果表明，即使交流接触器的线圈电压跌落的幅值相同，但是持续时间不同，也会对接触器的工作产生很大的影响。对所测试的接触器，当电压跌落幅值小于 30% 时，能够保持吸合状态。在电压跌落幅值大于 30% 时，随着电压跌落幅值和跌落持续时间的不同而出现不同的动作状态。图 13 为该接触器的电压跌落敏感度测试曲线（ITI 曲线），当发生的电压跌落位于曲线的左上方时，该接触器能够正常工作；当发生的电压跌落位于阴影区时，该接触器会发生脱扣现象。

在实际应用中，可以根据现场的电能质量状况

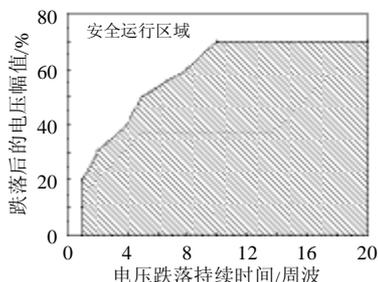


图 13 接触器的实测 ITI 曲线

Fig.13 AC contactor ITI curve

和 ITI 曲线，来判断接触器在该现场能否正常工作；如果不能，可以选取安全工作区域范围宽的接触器，也可以采用电能质量补偿手段来提高现场的电能质量等级，以避免由于接触器跳闸产生的经济损失。当然，所得的 ITI 曲线也能为接触器厂家在设计生产时提供参考和依据。

4 结论

(1) 采用拉格朗日方程建立的交流接触器运动方程和触头接触电阻模型是正确、有效的，该模型可以对交流接触器的研究提供理论依据。

(2) 所建立的交流接触器电能质量敏感度测试系统实现了设计功能，能够通过产生不同跌落幅值和持续时间的信号加到接触器线圈中，完成对其的测试，并得到了交流接触器的电压跌落敏感度曲线（ITI 曲线）。

(3) 建立用电设备的电能质量敏感度测试系统，是非常有必要的。它的推广应用，不但可以降低实际使用中由于电源电压问题所造成的经济损失，为设备的设计生产提供依据，也可以通过所得到的 ITI 曲线对电能质量经济评估提供依据。

参考文献

- [1] Redl R, Tenti P, V W J. Power electronics polluting effects[J]. IEEE Spectrum, 1997, 34(5): 33-39.
- [2] Perry T S. Fueling the internet[J]. IEEE Spectrum, 2001, 38(1): 80-84.
- [3] Gaouda A M, Salama M M A, Sultan M R. Power quality detection and classification using wavelet multi-resolution signal decomposition [J]. IEEE Trans.on Power Delivery, 1999, 14: 1469-1470.
- [4] 胡铭, 陈珩. 电能质量及其分析方法综述[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
Hu Ming, Chen Heng. Survey of power quality and its analysis method[J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 36-38.
- [5] 束洪春, 王晶, 陈学允. 动态电能质量扰动的多尺度形态学分析 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 20-24.
Shu Hongchun, Wang Jing, Chen Xueyun. Multiscale morphology analysis of dynamic power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 20-24.
- [6] 陈志业, 尹华丽, 李 鹏. 电能质量及其治理新技术[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 67-70.
Chen Zhiye, Yin Huali, Li Peng. Power quality problem and new technology and its improvement[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 67-70.
- [7] Collins E R, Morgan Jr. A three-phase sag generator for testing industrial equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 526-532.
- [8] Chung Y H, Kwon G H, Park T B *et al.* Voltage sag and swell generator with thyristor controlled reactor[C]. International

- Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002, (3): 1933-1937.
- [9] 赵剑锋, 王浔, 潘诗锋. 大功率电能质量信号发生装置[P]. 中国专利: 03277434.6, 2004-09-08.
Zhao Jianfeng, WangXun, Pan Shifeng. High power instrument for power quality signals generating[P]. Patent No: ZL 03277434.6, 2004-09-08.
- [10] Wagner V E, Andreshak A A, Staniak J P. Power quality and factory automation[J]. IEEE Trans. on industry application, 1990, 26(4): 620-626.
- [11] Matheson E, Jouanne A V, Wallace A. A remotely operated power quality test platform based on a 120kVA fully programmable three-phase source[C]. IEEE Industry Applications Conference, 2001, (2): 1139-1146.
- [12] 赵剑锋, 王浔, 潘诗锋. 基于双 PWM 变换器滞环控制的电能质量信号发生装置及其应用[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 41-44.
Zhao Jianfeng, Wang Xun, Pan Shifeng. Dual PWM converter and hysteresis control based power quality signal generator and its application[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 41-44.
- [13] Brumsickle W E, Schneider R S, Luckjiff G A *et al.* Dynamic Sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2001, 37(1): 212-217.
- [14] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠, 等. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56-59.
Wang Bin, Pan Zhencun, Xu Bingyin *et al.* Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 56-59.
- [15] 孟传富, 钱庆镛. 机电能量转换[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [16] 马骏, 董友苏, 诸惠兴. 电接点动态开闭接触电阻及测量[J]. 贵金属, 1996, 17(4): 24-28.
Ma Jun, Dong Yousun, Zhu Huixing. Dynamic open/close contact resistance and its measurement[J]. Precious Metals, 1996, 17(4): 24-28.

收稿日期: 2005-07-15。

作者简介:

赵剑锋 (1972-), 男, 博士, 副教授, 从事电力电子技术及其在电力系统中的应用, 电能质量监测、分析及治理和电力节能技术的研究;

王浔 (1975-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

潘诗锋 (1980-), 男, 硕士, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。