

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.10.014

电容分压型电子式电压互感器扰动信号测量性能仿真研究

徐志超^{1,2}, 杨玲君², 李晓明^{2,3}, 黎咏梅¹

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072;
3. 武汉大学苏州研究院, 江苏 苏州 215123)

摘要: 推导并建立了电容分压型电子式电压互感器(ECVT)的传递函数模型,分析了ECVT频率特性及正常测量频率范围,重点研究了其对多种暂、稳态扰动信号的测量性能。研究表明:在正常测量频率范围内,ECVT可对多种暂态扰动信号及国标中所要求的谐波信号进行准确测量,具有良好的—次信号还原性能。

关键词: 电容分压型电子式电压互感器; 数学模型; 扰动信号; 测量性能

Simulation Study on Measurement Performance of Disturbance Signal of Electronic Capacitive Voltage Transformer

XU Zhichao^{1,2}, YANG Lingjun², LI Xiaoming^{2,3}, LI Yongmei¹

(1. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Suzhou Institute of Wuhan University, Jiangsu Suzhou 215123, China)

Abstract: The transfer function model of ECVT(electronic capacitive voltage transformer) is deduced and established. Both the frequency characteristic and the normal frequency domain of ECVT are analyzed; meanwhile, the measurement performance of ECVT for various transient and steady-state disturbance signals is studied in details. Research results show that, within the normal measuring frequency domain, variety of transient disturbance signals as well as harmonic signal required in national standard could be measured accurately by ECVT, and ECVT has excellent restoration capacity for primary signal.

Key words: electronic capacitive voltage transformer; mathematical models; disturbance signal; measurement performance

0 引言

智能变电站是变电站自动化技术发展的延伸,其中数据测量、传输、处理及输出过程的完全数字化是智能变电站的重要特征^[1]。以模拟量数据采集、测量为目的的电磁式互感器由于受到工作原理与自身功能等因素限制,已无法满足智能变电站中高精度的数字化数据测量与通信要求,因此在智能变电站中,电子式互感器已成为一次侧数据测量的基础性设备^[2]。引入电子式互感器实现高精度数据测

量的主要目的之一是保证数据处理的准确性与有效性,以满足智能电网环境下严格的电能质量监测的要求。

电容分压型电子式电压互感器(electronic voltage transformer based on capacitive voltage divider, ECVT)是目前应用较为广泛的一类有源电子式电压互感器^[3-5]。这种互感器采用了相对成熟的电容分压技术,不含铁心线圈,无需考虑复杂的制作工艺及稳态测量稳定性等问题,其测量频带宽度与一次电压传感器元件参数变化有关^[6-8]。目前对 ECVT 研究较多集中于暂态性能分析,文中从该类型互感器在

收稿日期:2015-04-08; 修回日期:2015-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277134);江苏省基础研究计划(自然科学基金)资助项目(BK2011347)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51277134), Basic Research Program of Jiangsu Province (Natural Science Fund) Funded Project(BK2011347).

电能质量数据测量应用的角度出发,通过仿真分析得出在正常测量带宽范围内, ECVT 对各类扰动信号的测量性能, 对 ECVT 在智能变电站中的实用化具有重要意义。

1 ECVT 工作原理

电容分压型电子式电压互感器的具体结构组成见图 1, 其主要包括电容分压器传感头、一、二次

信号处理系统、光纤传输系统以及电源系统等部分。电容分压器将被测导线中的高电压转换为较低的电压, 通过一次信号处理系统对被测电压信号进行调理以及模数转换, 并将电信号转换为光信号通过光纤传输至二次信号处理系统中, 光信号在二次信号处理系统中被转换为相应的电信号, 并经进一步处理后以模拟量或数字量信号的形式输出^[9-12]。

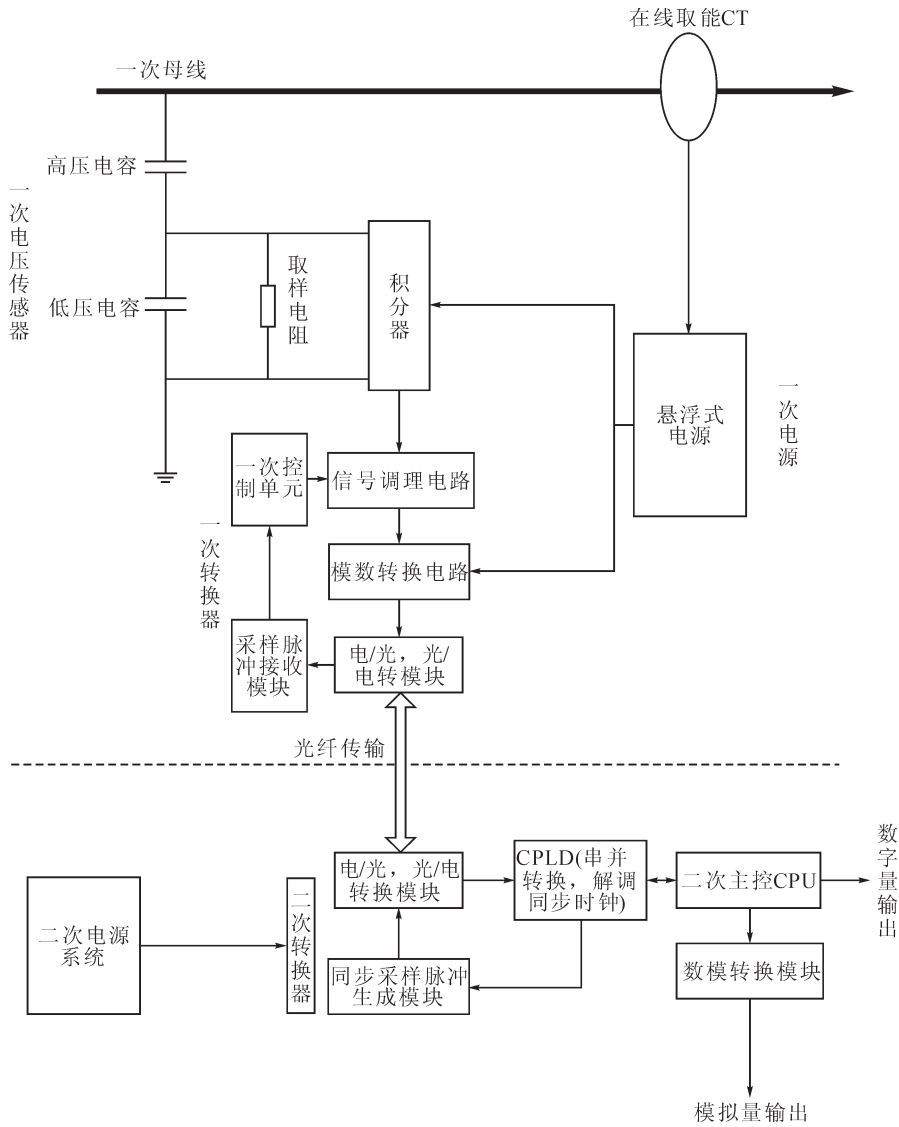


图 1 ECVT 结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of ECVT

电容分压器是 ECVT 实现电能测量功能的核心环节。电容分压器通过两个电容器对一次侧的高压进行分压, 从而得到二次侧低压。为了改善暂态性能, 提高测量精度, 通常在低压电容的两端并联一个精密的取样电阻 R 。电容分压器等效电路见图 2。

通过拉普拉斯变换可得电容分压器输入和输出电压的关系为

$$U_2 = \frac{sC_1}{s(C_1+C_2) + \frac{1}{R}} U_1 \tag{1}$$

如果 R 取得足够小, 使得 $s(C_1+C_2) \ll \frac{1}{R}$, 则式(1)可简化为 $U_2 \approx sRC_1U_1$ 。此时, 电容分压器二次电压为一次电压的微分, 因此在电容分压器输出侧加上积

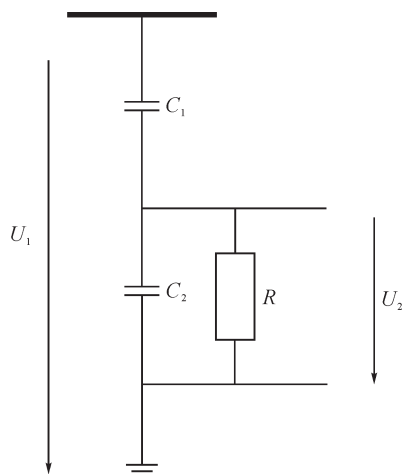


图2 电容分压器等效电路示意图

Fig. 2 Equivalent circuit of capacitive voltage divider

分环节即可实现对一次电压的测量。带有负反馈通道的有源负反馈模拟积分器是目前互感器传感头中实际应用较多的一类积分器,其等效电路见图3。

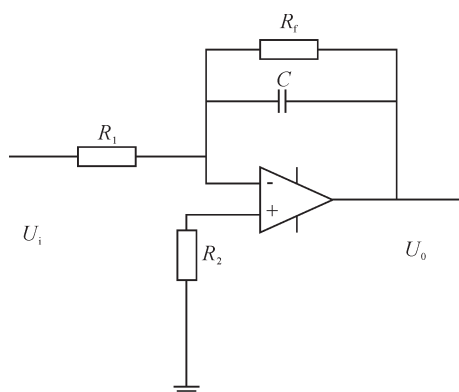


图3 有源负反馈模拟积分器结构示意图

Fig. 3 Structural schematic diagram of active feedback analog integrator

有源负反馈模拟积分器输入、输出关系见式(2)。

$$\frac{U_0}{U_i} = -\frac{R_f}{R_1(1+sCR_f)} \quad (2)$$

为使积分器长期稳定工作,通常在积分电容两端所并联的负反馈电阻为兆欧级电阻,即 $sCR_f \gg 1$, 则式(2)可化简为 $U_0 \approx \frac{U_i}{sCR_f}$ 。此时,输入与输出信号形成近似的积分关系,从而实现信号的还原。

ECVT中,由电容分压器与有源负反馈型模拟积分器共同构成的一次电压传感器的整体结构见图4。

根据式(1)、(2)可推得,在一次侧线路正常运行的稳态条件下时,一次电压传感器传递函数为

$$H(s) = \frac{U_0}{U_2} \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_f}{R_1(1+sCR_f)} \cdot \frac{sC_1}{s(C_1+C_2) + \frac{1}{R}} \quad (3)$$

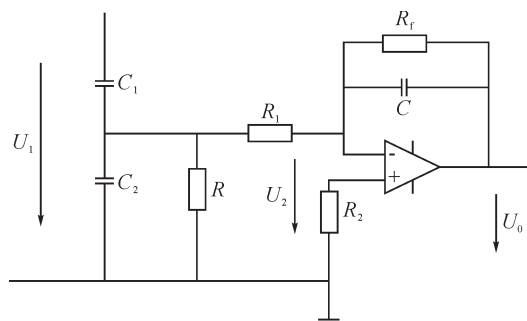


图4 一次电压传感器整体等效电路示意图

Fig. 4 Equivalent circuit of primary voltage sensor

取 $s=j\omega$, 根据电容分压器的分析,当 $s(C_1+C_2) \ll \frac{1}{R}$, 即 $\omega \ll \frac{1}{R(C_1+C_2)}$ 时,电容分压器二次电压是一次电压的微分。根据有源负反馈型模拟积分器的分析,当 $R_f C_s \gg 1$, 即 $\omega \gg \frac{1}{R_f C}$ 时,积分器输出电压是输入电压的积分。因此,当选择适当的参数,使被测电压信号频率处于 $\frac{1}{R_f C} \ll \omega \ll \frac{1}{R(C_1+C_2)}$ 中时,积分器的输出电压可很好的还原电容分压器一次侧电压,此时一次电压传感器变比为 $K \approx \frac{RC_1}{R_1 C}$ 。

2 ECVT 频率特性分析

取 $s=j\omega$, 根据一次电压传感器的整体传递函数式(3)可推得互感器幅频特性为

$$|H(j\omega)| = \frac{R_f}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 R_1^2 C^2 R_f^2}} \cdot \frac{\omega C_1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 (C_1+C_2)^2}} \quad (4)$$

其相频特性为

$$\Delta\theta = 180^\circ - \arctan(\omega CR_f) + 90^\circ - \arctan[\omega R(C_1+C_2)] \quad (5)$$

根据上述分析可知,当被测电压频率处于 $\frac{1}{R_f C} \ll \omega \ll \frac{1}{R(C_1+C_2)}$ 中时,积分器的输出电压可很好地还原电容分压器一次侧电压,因此互感器的上、下限频率为

由式(4)–(6)可看出,ECVT的频率特性与其主要元件参数有关。选取适当的元件参数,可得互感器频率特性见图5。

$$\begin{cases} f_H = \frac{1}{2\pi R(C_1+C_2)} \\ f_L = \frac{1}{2\pi R_f C} \end{cases} \quad (6)$$

由图5可知,互感器正常测量的频率范围约为 $5 \sim 10^4$ rad/s(即 0.8~1.6 kHz),超过国标中规定 19 次

谐波测量的要求^[13]。

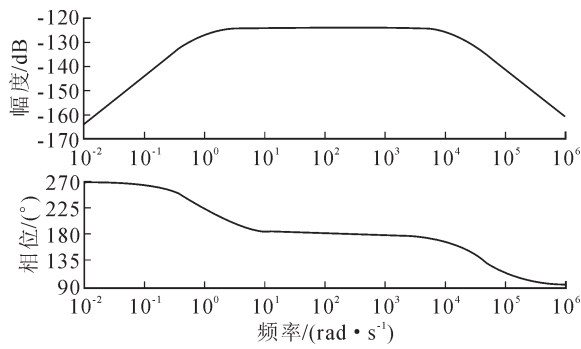


图5 ECVT 频率特性图

Fig. 5 Frequency characteristics of ECVT

3 扰动信号测量性能分析

目前,智能变电站电能质量监测过程中,通过 ECVT 测量所获取的电压数据可用于多种暂、稳态扰动信号(如电压暂升/暂降/中断,暂态脉冲、暂态振荡、电压谐波等)分析工作。当扰动信号频率处于互感器正常测量频率范围内时,互感器应能对其进行较为理想的测量。取无扰动时一次侧基频电压最大值 $\sqrt{2} U_p = 10 \text{ kV}$,根据式(5)可知,正常工作条件下,互感器一、二次信号应保持 180° 的相位差,互感器一次电压传感器理论变比为 $K \approx \frac{R_1 C_1}{R_1 C} = 6.355 \times 10^{-7}$ 。

首先对电压谐波扰动信号进行分析, 国标《GB/T 14549—1993》电能质量公用电网谐波标准中指出,电力系统中需测量的谐波次数一般为第 2 至第 19 次,分别以 3 次谐波、19 次谐波及 40 次谐波为例进行仿真,见图 6-8。

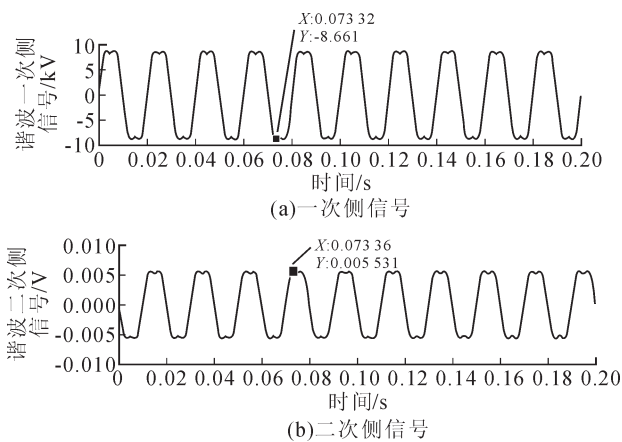


图6 3次谐波信号测量分析图

Fig. 6 Measurement analysis diagram of 3rd harmonic

由图 6-8 中可看出,3 次谐波和 19 次谐波的幅值测量误差分别为 0.49% 和 0.48%,满足互感器准确级 0.5 级的要求,且相角未出现明显偏移;40 次谐波频率范围超出 ECVT 正常测量范围,其幅值测量

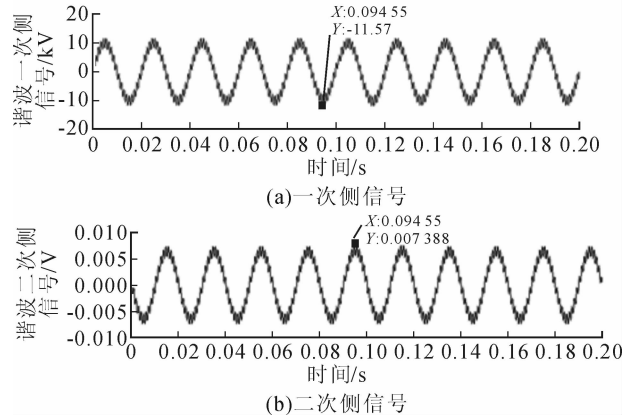


图7 19次谐波信号测量分析图

Fig. 7 Measurement analysis diagram of 19th harmonic

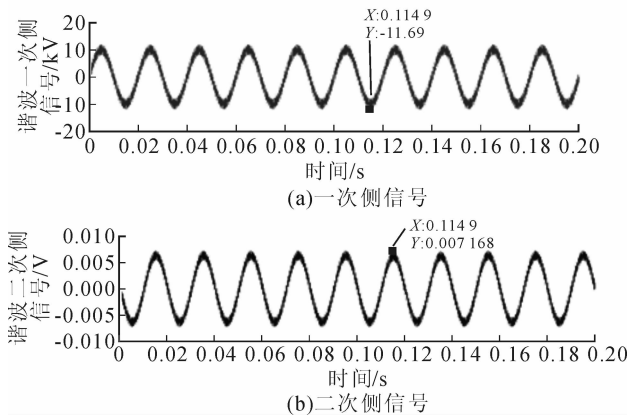


图8 40次谐波信号测量分析图

Fig. 8 Measurement analysis diagram of 40th harmonic

误差为 3.5%,测量不准确。由此可见,ECVT 可对国标中所规定的 19 次以内谐波信号进行测量,但当谐波信号的频率超出互感器测量带宽范围时,二次输出信号会出现较大误差,无法对一次信号进行准确还原。

图 9-11 分别为电压暂降、暂态脉冲以及暂态振荡信号仿真分析图。

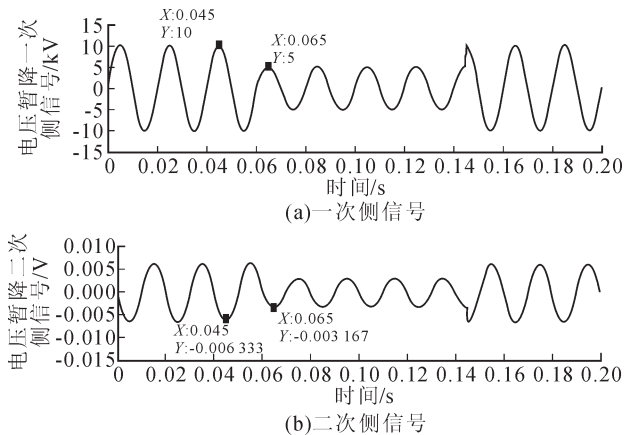


图9 电压暂降信号测量分析图

Fig. 9 Measurement analysis diagram of voltage sag

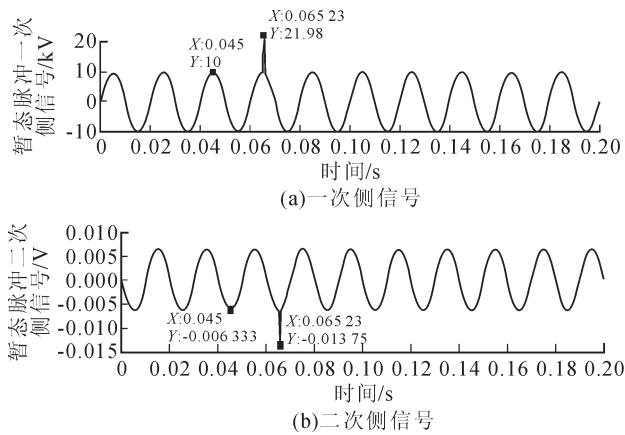


图 10 暂态脉冲信号测量分析图

Fig. 10 Measurement analysis diagram of transient pulse

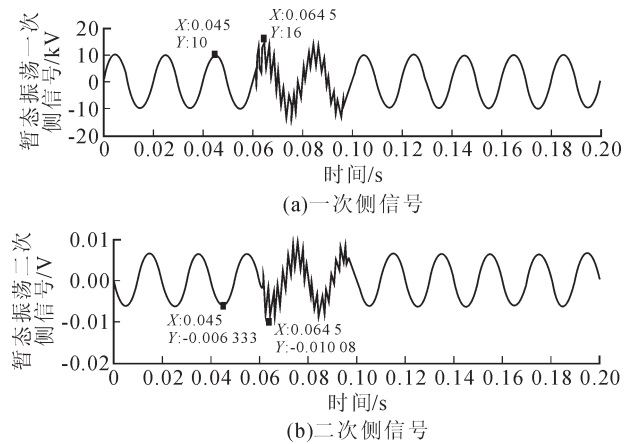


图 11 暂态振荡信号测量分析图

Fig. 11 Measurement analysis diagram of transient oscillation

由图 9-11 可看出,ECVT 在正常测量频率范围内具有良好的幅频及相频特性,测量后所得二次侧信号与一次侧信号波形相同且相同时间点一、二次信号幅值之比与理论变比基本吻合,二次信号相位无明显偏移。采用该类型 ECVT 对含有 3、5、9 次谐波信号的某 35 kV 线路电压数据进行测量,一次侧实际信号与二次侧测量信号见图 12。

由图 12 可知,经过 EVCT 测量后所得二次信号幅值误差为 0.48%,相位保持良好。综上所述可得,在稳态测量条件下,该类型互感器具有较好的电能质量扰动信号数据测量性能。

4 结语

文中以应用于智能变电站电能质量电压数据测量的 ECVT 为研究对象,通过理论推导、MATLAB 仿真及实测信号分析对互感器测量性能进行深入探讨。结果表明,ECVT 测量带宽较宽,在正常测量频率范围内,根据各类暂、稳态扰动信号仿真测量

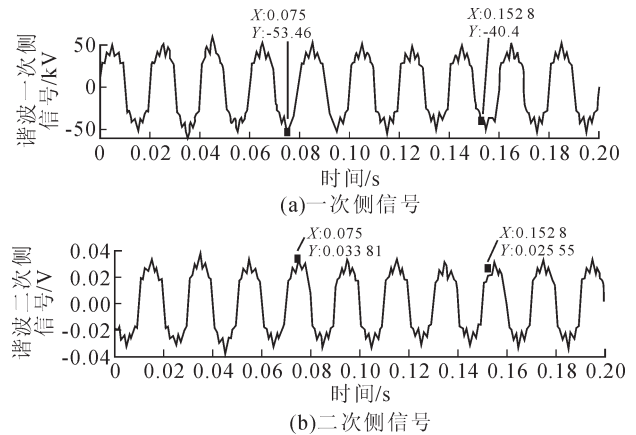


图 12 实际谐波信号测量分析图

Fig. 12 Measurement analysis diagram of actual harmonic

及实际信号测量可看出,经互感器处理后所得二次信号无明显幅值及相位误差产生,因此其幅频与相频响应特性良好,具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] 庞红梅,李淮海,张志鑫,等. 110 kV 智能变电站技术研究状况[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(6):146-150.
PANG Hongmei,LI Huaihai,ZHANG Zhixin et al. Research situation of 110 kV smart substation technology[J]. Power System Protection and Control,2010,38(6):146-150.
- [2] 张建超,刘晓波,张 飞,等. 电子式高压电力互感器的发展现状及在电力系统中的应用[J]. 高压电器,2009,45(4):106-110.
ZHANG Jianchao,LIU Xiaobo,ZHANG Fei,et al. Development of high-voltage electronic transducers and their application in power system[J]. High Voltage Apparatus, 2009,45(4):106-110.
- [3] 王红星,张国庆,蔡兴国,等. 电容分压型电子式电压互感器研究与设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):83-87.
WANG Hongxing,ZHANG Guoqing,CAI Xingguo,et al. Electronic capacitive voltage transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(10):83-87.
- [4] 罗苏南,南振乐. 基于电容分压的电子式电压互感器的研究[J]. 高电压技术,2004,30(10):7-8.
LUO Sunan,NAN Zhenle. Research on electronic voltage transformer based on capacitive voltage divider[J]. High Voltage Engineering,2004,30(10):7-8.
- [5] 段雄英,廖敏夫,邹积岩. 基于电容分压器的电子式电压互感器的研究[J]. 高电压技术,2003,29(1):50-51.
DUAN Xiongying,LIAO Minfu,ZOU Jiyan. Electronic voltage transformers based on capacitive voltage divider[J]. High Voltage Engineering,2003,29(1):50-51.
- [6] 王佳颖,郭志忠,张国庆,等. 电子式电压互感器暂态特性仿真与研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):62-65.
WANG Jiaying,GUO Zhizhong,ZHANG Guoqing,et al.

- Simulation and research on transient characteristics of electronic voltage transformer[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(3):62-65.
- [7] 陈润颖,王周祥. 电容式电压互感器介损增长异常分析[J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(4):31-34.
CHEN Runying, WANG Zhouxiang. Abnormal growth analysis of dielectric loss factor in capacitor voltage transformer[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2012, 28(4):31-34.
- [8] 王化冰,赵志敏. 基于电容分压器的电子式电压互感器的研究[J]. *继电器*, 2007, 35(18):46-49.
WANG Huabing, ZHAO Zhimin. Research of electronic voltage transformer based on capacitive voltage divider[J]. *Relay*, 2007, 35(18):46-49.
- [9] 全国互感器标准化技术委员会. GB/T 20840.7—2007 互感器第7部分: 电子式电压互感器标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
National Technical Committee on Transformers of Standardization Administration of China. GB/T 20840.7—2007 Instrument transformers Part 7: Electronic voltage transformers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [10] 文艺,陈少卿. CVT暂态过电压响应研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2014, 35(1):45-50.
WEN Yi, CHEN Shaoqing. Study on transient overvoltage response of CVT[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2014, 35(1):45-50.
- [11] 李慧杰,陈奎,冯宇,等. IEC互感器标准制定新动向[J]. *变压器*, 2014, 51(10):44-49.
LI Huijie, CHEN Kui, FENG Yu, et al. New trend of IEC standards of instrument transformer[J]. *Transformer*, 2014, 51(10):44-49.
- [12] 王晓锋,谢艳娟. 互感器产品的真空注油[J]. *变压器*, 2014, 51(6):39-41.
WANG Xiaofeng, XIE Yanjuan. Vacuum oil filling of instrument transformers[J]. *Transformer*, 2014, 51(6):39-41.
- [13] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. GB/T 14549—1993 电能质量公用电网谐波[S]. 1993. Standard Voltages, Current Ratings and Frequencies. GB/T 14549—1993 Quality of electric energy supply harmonics in public supply network[S]. 1993.
- 徐志超(1985—),男,博士,工程师,主要研究方向为电子式互感器及其在电力系统中的应用。
- 杨玲君(1978—),女,博士,讲师,主要研究方向为电气信息与信号处理技术。
- 李晓明(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制等方面研究。
- 黎咏梅(1970—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制。

(上接第90页)

- tion algorithm based on catastrophe progression method of high voltage switchgears[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(8):2372-2380.
- [22] 李昆仑,曹铮,曹丽苹,等. 半监督聚类的若干新进展[J]. *模式识别与人工智能*, 2009, 22(5):735-742.
LI Kunlun, CAO Zheng, CAO Liping, et al. Some developments on semi-supervised clustering[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2009, 22(5):735-742.
- [23] 肖宇,于剑. 基于近邻传播算法的半监督聚类[J]. *软件学报*, 2008, 19(11):2803-2813.
XIAO Yu, YU Jian. Semi-supervised clustering based on affinity propagation algorithm[J]. *Journal of Software*, 2008, 19(11):2803-2813.
- 谢静(1983—),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为输变电设备状态评估及继电保护。
- 束洪春(1961—),男,博士(后),教授,博导,从事电力系统故障检测及保护与控制的教研工作,主要研究方向为电力信号处理、电力系统新型继电保护与故障测距等。
- 王科(1982—),男,工学硕士,工程师,研究方向为配电一次设备的检测、带电和在线检测技术应用。