

电压互感器谐波特性测量用可控谐波电压源的构建

王玲¹, 冯宇¹, 邱进¹, 毛安澜¹, 徐思恩¹, 张宜阳²

(1. 中国电力科学研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 国网陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 谐波电压源的构建是开展电压互感器(Voltage Transformer, VT)谐波特性测量所需要解决的关键问题之一。为解决电压互感器谐波特性测量中要求谐波电压源容量大、谐波成分丰富且可控等问题, 构建了以 IGBT 单相逆变器为核心的可控谐波电压源。分析了其工作原理、设计了系统参数并分析了控制器特性, 仿真实验验证了所提方案的可行性。在此基础上构建了 VT 谐波特性测量平台并开展了输出性能测试, 其输出结果进一步验证了所提方案的有效性, 为 VT 谐波特性的测量及试验研究奠定了基础。

关键词: 谐波测量; 电压互感器; 谐波特性; 可控谐波电压源; IGBT 逆变器

Construction of controllable harmonic voltage source for harmonic characteristic measurement

WANG Ling¹, FENG Yu¹, QIU Jin¹, MAO Anlan¹, XU Sien¹, ZHANG Yiyang²

(1. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: The building of harmonic voltage source is the one of key issues in harmonic characteristic measurement of voltage transformer. It is required to output large capacity and controllable harmonic components, but the existing harmonic sources cannot satisfy these requirements. To solve the problem, this paper refers the scheme of IGBT single-phase inverter as the core to build the controllable harmonic voltage source. The working principle of the controllable harmonic voltage source is introduced, the system parameters are designed and simulated and the characteristics of the controller are analyzed. The simulation results show the feasibility of the proposed scheme. On this basis, the VT harmonic characteristic measurement platform is built. The output results further verify the effectiveness of the scheme, which lay the foundation for harmonic characteristic measurement and test study of the voltage transformer.

Key words: harmonic measurement; voltage transformer; harmonic characteristic; controllable harmonic voltage source; IGBT inverter

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0106-06

0 引言

电力系统中某些设备和负荷的非线性特性导致的谐波问题已经严重威胁电力系统安全和稳定运行。获取准确的谐波测量信息是研究分析谐波问题的主要依据和出发点^[1-4]。高电压的谐波测量需要通过互感器转换至低压来测量, 互感器对谐波的传感精度, 构成了影响谐波测量准确度的重要环节。因此, 掌握电压互感器谐波传变特性, 明确其对电网谐波电压测量的影响具有十分重要的意义。

目前, 110 kV及以上电压等级电网中通常装设电容式电压互感器(CVT)测量系统电压, 但其频率响应特性为非线性的, 因此, 公用电网谐波国标中明确指出CVT不能用于谐波测量^[5-6]。传统的电磁式

电压互感器频率响应范围窄, 一般仅适用于20次及以下谐波的测量, 并且在高压系统中使用数量较少, 不能满足现代系统谐波测量要求。文献[7]推荐采用电流互感器的末屏构成电容分压器来实现谐波测量, 但该方式存在需停电接线的问题, 并且对于倒立式SF6电流互感器不适用, 无法进行谐波测量。随着智能化电网建设, 电子式电压互感器(EVT)使用数量逐渐增多。通常认为, 电子式互感器的谐波特性优于传统电磁式互感器, 其频率响应宽, 适合于电网谐波测量^[8-9], 但该结论一直缺乏试验验证。并且, 其后续的传输系统、信号处理系统等环节以及电磁环境与温度等因素都可能对EVT谐波特性产生影响。因此, 从理论上获得其准确的谐波特性、进而实现准确的谐波测量还存在一定困难。在此背

景下, 对入网电压互感器开展谐波特性测量试验, 获得其实际的谐波传变特性具有重要的现实意义与工程价值。

现阶段电子式电压互感器谐波准确度试验存在的主要问题之一是: 缺少高电压的谐波电压标准源, 试验用谐波源的构建成为了开展互感器谐波特性研究所需要解决的关键问题。受电网运行条件的限制, 决定了试验或检测用高压谐波电压源很难直接取自电网, 而必须自行构建。文献[10]对电子式互感器谐波特性试验中的谐波激励有如下规定: 理想情况下应在额定频率和额定一次电压上叠加所要求的各次谐波频率分量(一般要求50次谐波), 该分量为额定一次电压的某一百分数。可知该谐波激励需要满足容量大, 谐波次数丰富及可控三个方面的要求。现有的标准谐波源的电压输出几乎都在数百伏以内, 难以满足电子式互感器的试验或检测要求。在高压试验领域中使用的三极管式变频电源可产生大容量, 谐波次数丰富的电压谐波, 但需在纯阻性负载情况下才能输出较理想的波形, 如将其用做电子式互感器谐波特性检测的谐波源, 则需要在各谐波频率下配置补偿装置, 投资巨大。文献[11]提出了一种电子式电压互感器谐波特性检测方法, 其中的高压谐波源采用整流负荷法的方式产生, 但该方法不能根据需要定制谐波次数和幅值。

为解决上述技术困难, 本文提出了采用逆变器法构建试验用谐波电压源, 通过理论分析与仿真论证了所提方案的可行性。并搭建了谐波特性测量平台验证了其输出特性, 试验结果表明, 该方案能实现基波和谐波的合成输出, 且谐波含量可控, 可以用于电压互感器的谐波特性试验或检测。

1 逆变器法构建谐波电压源的基本原理

1.1 基本原理

以IGBT单相逆变器为核心部件构成的高压谐波电压源的原理图如图1所示。三相二极管整流桥对三相交流电压进行整流后向逆变器直流侧电容 C 充电, 得到大小等于 V_{dc} 的直流电压, 该电压基本恒定。单相IGBT全控桥逆变器采用SPWM调制, 对 V_{dc} 进行逆变获得交流电压 V_{inv} 。 V_{inv} 经滤波电感 L_f 和滤波电容 C_f 滤波后获得交流负载电压 V_{ld} , 其滤波频带根据电压互感器谐波准确度要求选择。考虑到LC滤波器很容易发生振荡, 设计LC滤波器时串入了很小的阻尼电阻 R_f , 用于有效抑制振荡。逆变器交流侧输出电流为 i_{inv} , 滤波电容电流为 i_c 。交流负载电

压 V_{ld} 经升压变压器 T_2 升压至试验电压, 该电压即可作为电压互感器谐波特性测量用的谐波电压。将待检测电压互感器试品与溯源用电容分压器并联接于 T_2 输出侧, 测量装置接收试品与电容分压器的待检测信号与溯源信号, 对其进行频谱与测差分析, 即可获得待测电压互感器的谐波特性。

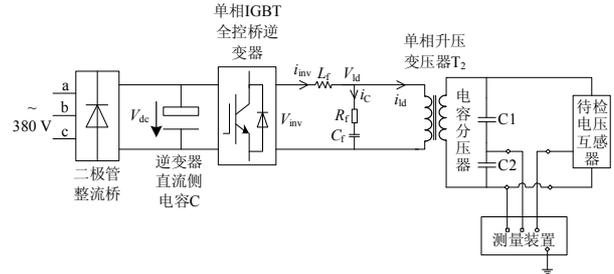


图1 逆变器法构成谐波电压源的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of harmonic voltage source constituted by inverter

1.2 控制系统设计

单相全控桥逆变器中的IGBT动作规律由图2所示的控制系统实现。该控制系统为电压电流环, 采用交流负载电压 V_{ld} 和滤波电容电流 i_c 作为被控量, 电压环采用PI控制器, 该PI控制器的输出与指令电压 V_{ld}^* 的微分运算 $C_f s$ 之和作为电流环参考电流 I_c^* (i_c 的指令值为 i_c^* 、其拉式变换为 I_c^* , i_c 的拉式变换为 I_c)。再经电流环比例控制环节后得到可控调制信号 \tilde{m} , 用于驱动IGBT动作^[12-14]。 K_{vp} 和 K_{vi} 为PI控制器的比例系数和积分系数, K 为电流比例环节的比例系数。

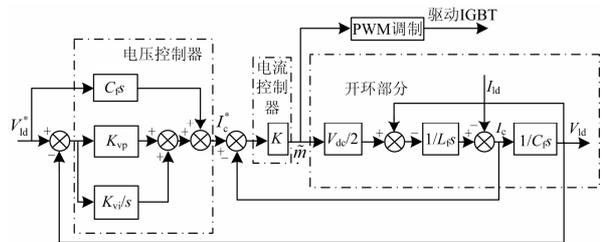


图2 控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of control system

以 I_c^* 为输入, I_c 为输出, 相应电流环的传递函数为

$$I_c = \frac{(KV_{dc}/2)C_f s}{L_f C_f s^2 + (KV_{dc}/2)C_f s + 1} I_c^* - \frac{L_f C_f s^2}{L_f C_f s^2 + (KV_{dc}/2)C_f s + 1} I_{ld} = G_{I_c}(s)I_c^* - G_{I_{ld}}(s)I_{ld} \quad (1)$$

式中： $G_{I_c}(s)$ 为电流比例增益传递函数； $G_{I_{ld}}$ 为电流比例干扰传递函数。

电流环设计要求为： I_c 输出能跟踪并保持为参考电流 I_c^* ， I_{ld} 基本不影响 I_c 。图3给出了不同 K 值情况下， $G_{I_c}(s)$ 的频响特性。从中可以看出： $G_{I_c}(s)$ 在1~10 kHz频带内的幅值等于1且无相位移。此时 I_{ld} 变化对 I_c 的影响很小，基本可以忽略。由控制理论可知，比例系数 K 越大，电流环的动态响应越好，但 K 太大会引起系统的不稳定。

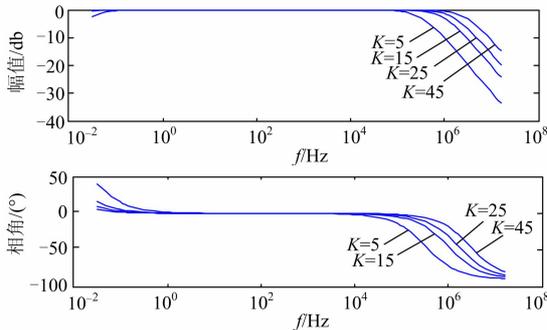


图3 比例参数 K 变化时 $G_{I_c}(s)$ 的频响曲线

Fig. 3 Frequency response of $G_{I_c}(s)$ when K varied

以 V_{ld}^* 为输入， V_{ld} 为输出，相应电压环的传递函数为

$$V_{ld} = \frac{\frac{KV_{dc}}{2} C_f s^2 + \frac{KK_{vp} V_{dc}}{2} s + \frac{KK_{vi} V_{dc}}{2}}{L_f C_f s^3 + \frac{KV_{dc}}{2} C_f s^2 + (1 + \frac{KK_{vp} V_{dc}}{2})s + \frac{KK_{vi} V_{dc}}{2}} U_{ld}^* - \frac{L_f s^2}{L_f C_f s^3 + \frac{KV_{dc}}{2} C_f s^2 + (1 + \frac{KK_{vp} V_{dc}}{2})s + \frac{KK_{vi} V_{dc}}{2}} I_{ld} = G(s)U_{ld}^* - Z(s)I_{ld} \quad (2)$$

其中： $G(s)$ 为电压比例增益传递函数； $Z(s)$ 为逆变器等效输出阻抗。

图4给出了 $G(s)$ 和 $Z(s)$ 在 K_{vp} 发生变化时的频响特性。从中可以看出：在10 kHz频带内， $G(s)$ 的幅值基本保持1且无相位移， $Z(s)$ 随着 K_{vp} 的变大逐渐变为感性阻抗。因此 K_{vp} 取值不宜过大，本文选择 $K_{vp}=30$ 。同样分析可得到， K_{vi} 取值不宜过大，本文选择 $K_{vi}=100$ ，此时 $G(s)$ 的幅值基本保持1且无相位移， I_{ld} 变化对 V_{ld} 的影响很小，可以忽略。

2 仿真分析

为了验证本文所提方法的可行性，利用Matlab/Simulink软件对图1进行了仿真。仿真系统

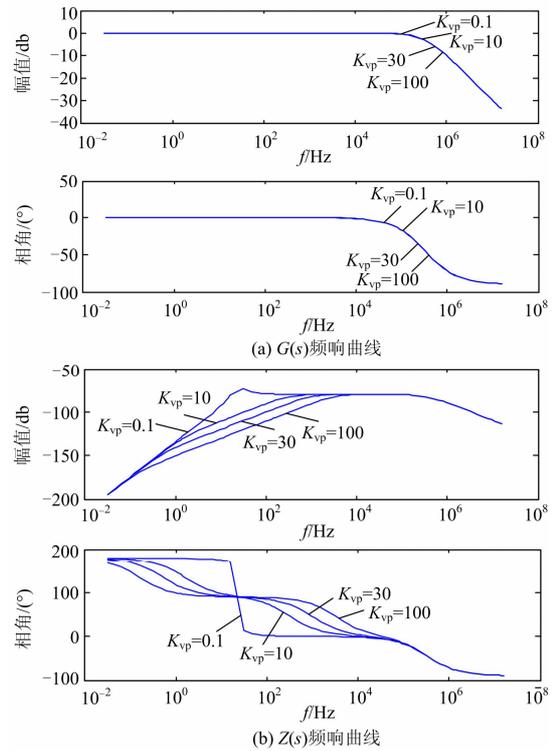


图4 比例参数 K_{vp} 变化时 $G(s)$ 和 $Z(s)$ 的频响曲线

Fig. 4 Frequency response of $G(s)$ and $Z(s)$ when K_{vp} is varied

的基本参数为：系统工作电压为 $U_s=380$ V，频率 $f=50$ Hz，直流侧电容 $C=4700$ μ F。考虑滤波频带要求，选择 $C_f=1500$ μ F， $L_f=0.6$ mH， $R_f=0.01$ Ω 。升压变压器 T_2 额定容量为125 kVA，额定变比为380 V/110 kV。控制器参数选择为： $K=5$ ， $K_{vp}=30$ ， $K_{vi}=100$ 。设定指令电压 V_{ld}^* 中包含幅值为250 V的基波以及谐波含有率为 $HR_3=10\%$ 、 $HR_5=5\%$ 、 $HR_7=3\%$ 的谐波，图5(a)为被控量 V_{ld} 跟随指令值 V_{ld}^* 变化的仿真波形，两者波形基本能保持一致。图5(b)为升压变压器 T_2 输出电压波形，其基波幅值为89.6 kV， $HR_3=9.94\%$ 、 $HR_5=4.91\%$ 、 $HR_7=2.90\%$ 。在上述指令电压 V_{ld}^* 中加入9次谐波，设定 $HR_9=3\%$ ，仿真结果为：升压变压器 T_2 输出电压基波幅值为89.71 kV， $HR_3=9.94\%$ 、 $HR_5=4.91\%$ 、 $HR_7=2.90\%$ 、 $HR_9=2.86\%$ 。从中可以看出，所提方法可以根据需要定制谐波次数和幅值，产生可控的电压谐波。

需要指出的是，仿真中的升压变压器使用了线性变压器模型。如果考虑到变压器的非线性变化，则标么值下的 V_{ld} 与 T_2 输出电压之间的误差可能加大，电压环PI控制参数的调节难度可能增大。

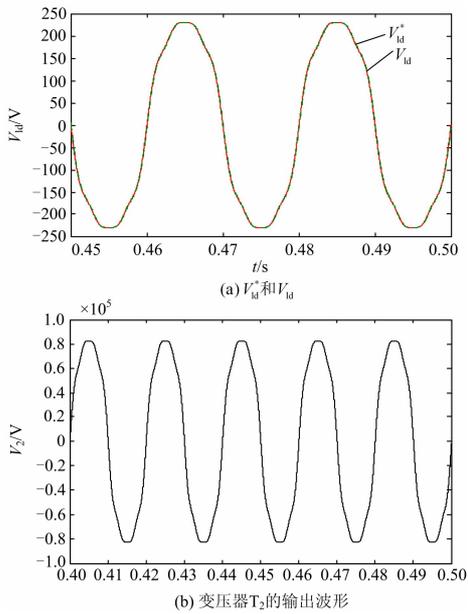


图 5 逆变器法构建谐波电压源的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of harmonic voltage source constituted by inverter

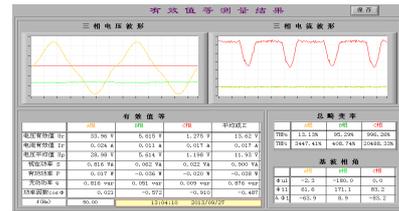
3 谐波特性试验平台输出性能测试

基于 1.1 节原理搭建了 110 kV 电压等级电压互感器谐波特性试验平台, 其平台组件主要包括谐波电压源、升压变压器、分压器、谐波测试仪、互感器谐波特性测试装置等, 谐波电压源的输入为 50 Hz 三相四线制 220 V/380 V 电压。单相 IGBT 全控桥逆变器容量 100 kVA, 开关频率 6 kHz。升压变压器的设计充分考虑了其运行电压中含有谐波的情况, 最终选择了充气式无局放高压试验变压器, 额定容量为 125 kVA, 额定电压为 380 V/110 kV。分压器选用电容型分压器, 分压比为 2 000。谐波特性测量平台输出性能测试的实物接线如图 6 所示。谐波测试仪和数字示波器接至分压器低压侧。使用谐波测试仪测量平台输出结果, 并使用数字示波器进行录波, 录波数据经 Matlab 处理, 获得的傅里叶分析结果与谐波测试仪的输出结果相比较。

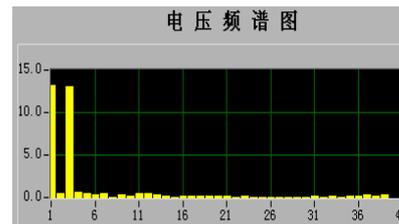


图 6 电压互感器谐波特性试验平台输出性能测试回路
Fig. 6 Output test loop of voltage transformer harmonic characteristic test platform

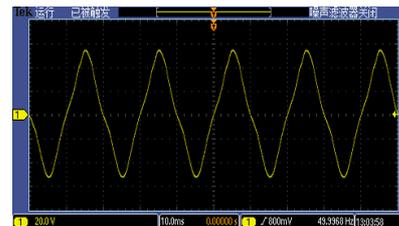
以谐波电压为基波叠加 3 次谐波和基波叠加 5、13、15 次谐波两种情况为例进行平台输出性能测试。设定指令电压 V_{id}^* 中包含幅值为 250 V 基波和 $HR_3=13\%$ 的 3 次谐波。谐波测试仪输出的波形及其频谱、数字示波器输出的波形及其录波数据的频谱如图 7 所示, 各次谐波含量及大小如表 1 所示。从中可以看出, 谐波测试仪与数字示波器的测量结果基本一致, 两者的差别在合理范围之内, 系统输出主要为基波和 3 次谐波。此时, 升压变压器 T_2 输出电压基波有效值为 66.82 kV, $HR_3=13.04\%$ 。



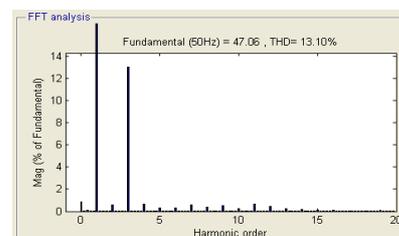
(a) 谐波测试仪的输出波形



(b) 谐波测试仪的输出波形频谱



(c) 数字示波器的输出波形



(d) 数字示波器的输出波形频谱

图 7 输出基波与 3 次谐波电压的测试结果

Fig. 7 Test result of fundamental and 3rd harmonic output voltage

设定指令电压 V_{id}^* 中包含幅值为 250 V 基波和 $HR_5=8\%$ 、 $HR_{13}=4.4\%$ 、 $HR_{15}=12\%$ 的谐波。谐波测试仪输出的波形及其频谱、数字示波器输出的波形及其录波数据的频谱如图 8 所示, 各次谐波含量及大小如表 2 所示。从中可以看出, 谐波测试仪与数

表 1 输出基波与 3 次谐波电压的测试结果
Table 1 Test result of fundamental and 3rd harmonic output voltage

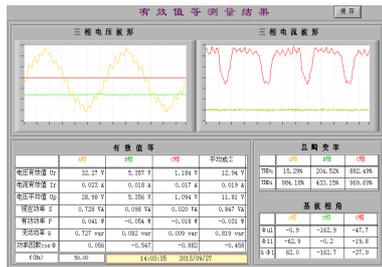
数据	U_1 (RMS, V)	THD/%	HR_3 /%	HR_5 /%	HR_7 /%
谐波测试仪	33.41	13.13	13.04	0.39	0.53
数字示波器	33.28	13.10	12.98	0.31	0.56

数据	HR_9 /%	HR_{11} /%	HR_{13} /%	HR_{15} /%	HR_{17} /%
谐波测试仪	0.31	0.43	0.25	0.07	0.11
数字示波器	0.48	0.62	0.21	0.08	0.05

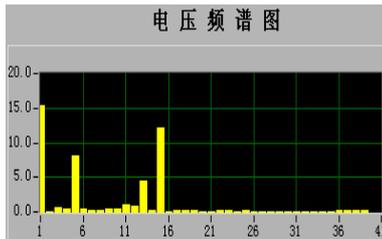
表 2 输出基波与 5、13、15 次谐波电压的测试结果
Table 2 Test result of fundamental and harmonic output voltage

数据	U_1 (RMS, V)	THD/%	HR_3 /%	HR_5 /%	HR_7 /%
谐波测试仪	31.66	15.29	0.62	8.11	0.28
数字示波器	31.52	15.37	0.74	7.91	0.27

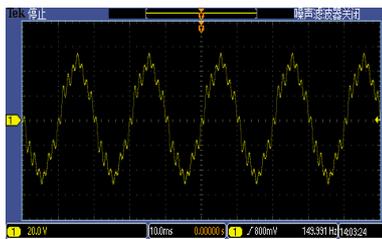
数据	HR_9 /%	HR_{11} /%	HR_{13} /%	HR_{15} /%	HR_{17} /%
谐波测试仪	0.46	0.94	4.36	12.08	0.22
数字示波器	0.26	0.77	4.51	12.13	0.23



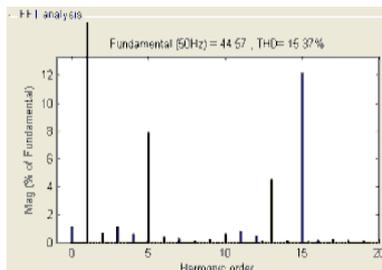
(a) 谐波测试仪的输出波形



(b) 谐波测试仪的输出波形频谱



(c) 数字示波器的输出波形



(d) 数字示波器的输出波形频谱

图 8 输出基波与 5、13、15 次谐波电压的测试结果
Fig. 8 Test result of fundamental and harmonic output voltage

字示波器的测量结果基本一致，两者的差别在合理范围之内，系统输出主要为基波和 5、13、15 次谐波。此时，升压变压器 T_2 输出电压基波有效值为 63.32 kV, $HR_5=8.11\%$ 、 $HR_{13}=4.36\%$ 、 $HR_{15}=12.08\%$ 。

由图 7、图 8 及表 1、表 2 的测试结果可知，基于逆变器法构建的电压互感器谐波特性试验平台可产生 3~17 次奇次谐波，既可以输出基波与单次谐波的叠加电压，也可以输出基波与多种谐波的叠加，且谐波含量可控，可以用于电压互感器的谐波特性试验或检测。

4 结论

(1) 提出了以 IGBT 单相逆变器为核心部件构成的高压谐波电压源的方法，仿真结果验证了所提方案的可行性。

(2) 基于逆变器法构建了 VT 谐波特性测量平台，输出性能测试结果表明，所提方法正确有效，可以实现基波电压与谐波电压的合成，且谐波含量可控，可以用于 VT 的谐波特性测量。

(3) 变压器非线性特性会增加电压环 PI 控制参数的调节难度，影响可控谐波源的输出，其解决方法将作为本文今后的研究方向。

参考文献

[1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
LIN Haixue. The basic problem of modern power quality[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12.

[2] 彭卉, 邹舒, 付永生, 等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for

- impact loads connected into power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 54-61.
- [3] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-159.
LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-159.
- [4] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 一种基于瞬时无功功率率的数字谐波检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 185-192.
HE Yingjie, LIU Jinjun, WANG Zhaoan, et al. A digital method for detecting harmonic currents based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 185-192.
- [5] 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]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [6] 冯宇, 王晓琪, 陈晓明, 等. 电容式电压互感器电路参数对电网谐波电压测量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4968-7975.
FENG Yu, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. Influences of circuit parameters of capacitor voltage transformer on grid harmonic voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4968-7975.
- [7] 全国电磁兼容标准化技术委员会. GB/T 17626.7-2008 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、谐波间波的测量和测量仪器导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [8] 邵霞, 周有庆, 彭红海. 一种改进的直测电容电流型电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 240-247.
SHAO Xia, ZHOU Youqing, PENG Honghai. An improved electronic voltage transformer based on direct detecting capacitor current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 240-247.
- [9] 冯宇, 谢超, 王玲, 等. 电子式电压互感器谐波传变特性分析[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 97-102.
FENG Yu, XIE Chao, WANG Ling, et al. Analysis on harmonic transfer characteristics of electronic voltage transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 97-102.
- [10] 全国互感器标准化技术委员会. GB/T 20840.8-2007 互感器 第8部分: 电子式电流互感器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [11] 冯宇. 电子式电压互感器谐波特性检测方法及其检测装置: 中国, 201110124536.0[P]. 2011-12-07.
- [12] 杨秋霞, 高金玲, 赵晔, 等. 有源电力滤波器的特定次谐波控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 119-123.
YANG Qiuxia, GAO Jinling, ZHAO Ye, et al. Research on specific harmonic control strategy for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 119-123.
- [13] 谭智力, 朱冬姣, 陈坚, 等. 一种三相四线统一电能质量调节器的零稳态误差控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 77-83.
TAN Zhili, ZHU Dongjiao, CHEN Jian, et al. A new zero steady-state error control strategy used in three-phase four-wire UPQC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 77-83.
- [14] 黄薇, 周荔丹, 郑益慧, 等. 基于神经网络PI重复控制器的三相并联有源电力滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 78-84.
HUANG Wei, ZHOU Lidan, ZHENG Yihui, et al. Neural network PI repetitive controller for three-phase three-wire shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 78-84.

收稿日期: 2014-11-11; 修回日期: 2015-01-08

作者简介:

王玲(1983-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电子式互感器技术研究; E-mail: wl00532@163.com

冯宇(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为特高压技术及互感器技术;

邱进(1981-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电子互感器及微机继电保护的研究。

(编辑 葛艳娜)