

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191464

# 基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法

代双寅<sup>1</sup>, 刘书铭<sup>1</sup>, 赵麒哲<sup>2</sup>, 李琼林<sup>1</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国家电投河南检修工程公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 准确有效地进行谐波电压测量是掌握电网谐波状况、开展谐波治理、提升电能质量水平的重要前提和依据。为解决目前大量在运 CVT 无法准确测量谐波的问题, 提出基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法。该方法测量流过高压电容和中压电容支路的电流并进行谐波分析, 根据电容参数即可方便准确地计算得到高压侧谐波电压。该方法只需对 CVT 二次回路进行简单改造, 在不影响设备运行安全的前提下, 实现谐波电压测量。首先给出该方法的基本原理, 然后结合仿真计算分析电流测量精度和电容值变化对谐波测量误差的影响, 对实际 CVT 完成了物理试验验证。试验表明: 该方法的 2~50 次谐波电压测量误差均小于 2%, 满足谐波国家标准的相关要求。

**关键词:** 电容式电压互感器; 谐波电压; 测量误差; 电容电流; 物理试验

## A harmonic voltage measurement method based on CVT capacitor current

DAI Shuangyin<sup>1</sup>, LIU Shuming<sup>1</sup>, ZHAO Qizhe<sup>2</sup>, LI Qionglin<sup>1</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. SPIC Henan Maintenance Engineering Company, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Accurate and effective measurement of harmonic voltage is an important prerequisite and basis for mastering the harmonic status of a power grid, carrying out harmonic control and improving the level of power quality. In order to solve the problem that a large number of currently running CVT cannot accurately measure harmonics, a harmonic voltage measurement method based on CVT capacitor current is proposed. This method measures the current flowing through the high voltage capacitor and the middle voltage capacitor branch and carries out harmonic analysis. Given the capacitance parameters, the high voltage side harmonic voltage can be calculated conveniently and accurately. This method only needs simple modification of the CVT secondary circuit to realize harmonic voltage measurement without affecting the safety of the equipment. First, the basic principle of this method is given, and then the influence of current measurement accuracy and capacitance variation on harmonic measurement error is analyzed by simulation. The physical test verification of actual CVT is completed. Test result shows that the measurement errors of 2-50 harmonic voltages are less than 2%, which meets the relevant requirements of harmonic national standards.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5200-201924064A).

**Key words:** capacitive voltage transformer; harmonic voltage; measurement error; capacitor current; physical test

## 0 引言

随着电力系统的迅速发展和各种非线性设备的大量接入, 电力系统谐波问题日趋严重。准确有效地进行谐波测量, 是电网企业和用户掌握谐波状况、开展谐波治理、提升电能质量水平的重要前提和依据<sup>[1-5]</sup>。电容式电压互感器(Capacitor Voltage

Transformer, CVT)是目前电力系统中广泛使用的电压信号测量设备。CVT 用于谐波测量时, 由电容分压器等值电容和补偿电抗器电感组成的工频串联谐振回路工作点发生偏离, 其变比的幅频和相频特性呈现严重的非线性, 导致谐波测量存在较大误差<sup>[6-19]</sup>。因此, 国家标准 GB/T 14549-1993《电能质量公用电网谐波》明确规定: 电容式电压互感器不能用于谐波测量。开展电网谐波电压测量方法研究具有重要的现实意义和实用价值。

目前所采用的谐波电压测量方法分为以下三

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5200-201924064A)

类<sup>[20-27]</sup>: (1) 基于频率响应特性对 CVT 二次侧电压进行修正, 得到高压侧谐波电压。但这种方法需要获取各组成元件的宽频等效参数, 通过仿真计算或者现场试验得到每台 CVT 的频率响应特性, 因此该方法实现难度较大, 限制了其应用。(2) 利用变压器高压套管或者电流互感器一次绕组主绝缘电容作为高压电容, 在其末屏接地端串联接入分压电容作为低压电容, 基于电容分压原理实现谐波电压测量。这种方法会改变一次设备的接地方式, 影响设备安全, 无法长期挂网运行。(3) 在 CVT 的低压端子和接地端子间安装谐波测量专用电容  $C_3$ , 从  $C_3$  两端取电压信号进行谐波测量。为保证测量准确性和运行安全, 对电容  $C_3$  的温度系数、耐压、耐热性能均有较高要求, 需要制造商重新研制具备谐波测量功能的电压互感器, 待产品成熟后逐步更换在运的 CVT, 因此该方法实施周期长且成本较高。

本文提出基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法, 对 CVT 高压电容、中压电容支路电流分别进行谐波分析, 结合电容参数, 即可方便准确地计算得到高压侧谐波电压。该方法只需对 CVT 二次回路进行简单改造, 不影响设备运行安全, 无需大量更换在运的 CVT, 即可实现电网谐波电压测量。本文首先给出该方法的基本原理, 提出不同连接方式下谐波电压计算方法, 然后对该方法的谐波测量误差进行仿真计算, 分析电容值变化和电流互感器测量精度对谐波电压测量误差的影响。最后对某 35 kV CVT 开展实际物理试验, 验证本文所提出方法的正确性和有效性。

## 1 谐波电压测量方法研究

### 1.1 测量原理

CVT 由电容分压器和电磁单元组成。电容分压器由一节或几节电容器串联组成, 电磁单元由中间变压器、补偿电抗器和抑制铁磁谐振的阻尼装置组成, CVT 基本结构如图 1 所示。

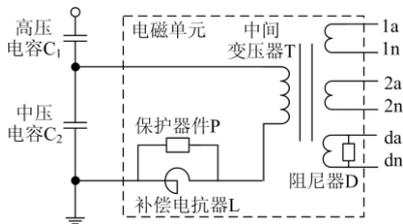


图 1 CVT 基本结构

Fig. 1 Fundamental structure of CVT

在低于 5 kHz 的频率范围内, CVT 高压电容和中压电容的容值基本保持不变, 其容抗与频率的倒

数呈线性变化关系<sup>[28]</sup>。基于此特性, 提出基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法(简称电容电流方法), 原理如下: 在 CVT 二次侧安装 2 个电流互感器, 分别测量流过高压电容  $C_1$  和中压电容  $C_2$  的电流, 对所测得的电流进行谐波分析, 然后根据电容容抗值, 计算得到一次侧谐波电压。

### 1.2 谐波电压计算方法

CVT 二次侧电容分压器低压端子 N、电磁单元低压端子 X 与接地端子 E 采用 N-X-E 或者 N-E/X-E 连接方式, 两种方式下谐波电压计算方法如下。

#### (1) N-X-E 连接方式

连接方式如图 2 所示。分别在端子 X 与 E、N 与 X 之间接入电流互感器, 测量得到  $C_1$  支路电流  $i_1$ 、 $C_2$  支路电流  $i_2$ , 对所测得的电流  $i_1$ 、 $i_2$  进行谐波分析, 可求得一次侧第  $h$  次谐波电压  $U_{Sh}$  为

$$U_{Sh}^{\&} = U_{1h}^{\&} + U_{2h}^{\&} = \dot{I}_{1h} \cdot Z_{1h} + \dot{I}_{2h} \cdot Z_{2h} \quad (1)$$

式中,  $Z_{1h}$ 、 $Z_{2h}$  分别为高压电容  $C_1$ 、中压电容  $C_2$  的第  $h$  次谐波阻抗。

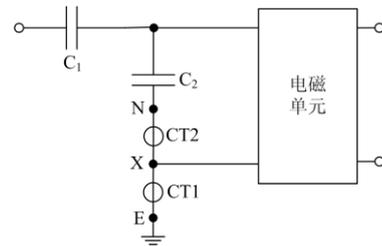


图 2 N-X-E 连接方式

Fig. 2 N-X-E connection mode

#### (2) N-E/X-E 连接方式

连接方式如图 3 所示。分别在端子 X 与 E、N 与 E 之间接入电流互感器, 测量得到电磁单元支路电流  $i_L$ 、 $C_2$  支路电流  $i_2$ , 对所测得的电流  $i_L$ 、 $i_2$  进行谐波分析, 可求得一次侧第  $h$  次谐波电压  $U_{Sh}$  为

$$U_{Sh}^{\&} = (\dot{I}_{Lh} + \dot{I}_{2h}) \cdot Z_{1h} + \dot{I}_{2h} \cdot Z_{2h} \quad (2)$$

对所有次谐波( $h=1, 2, L, m$ ,  $m$  为所关注的最高谐波次数)均进行上述计算, 即可得到一次侧的各次谐波电压。

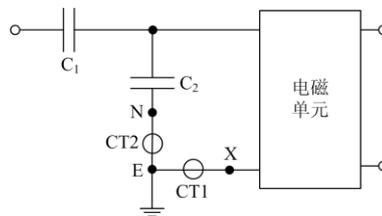


图 3 N-E/X-E 连接方式

Fig. 3 N-E/X-E connection mode

## 2 谐波电压测量仿真与影响分析

### 2.1 谐波测量仿真计算

基于 PSCAD 仿真软件, 建立如图 4 所示的 CVT 仿真模型, 对电容电流方法的谐波电压测量误差进行仿真计算, 电容式电压互感器参数如表 1 所示<sup>[29]</sup>。

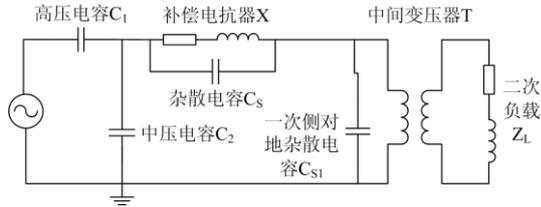


图 4 CVT 仿真模型

Fig. 4 Simulation model of CVT

表 1 35 kV 电容式电压互感器参数

Table 1 Parameters of 35 kV CVT

参数	数值	参数	数值
频率/Hz	50	二次侧绕组电压/V	100/ $\sqrt{3}$
一次侧电压/kV	35/ $\sqrt{3}$	中压电容/ $\mu\text{F}$	0.040 4
高压电容/ $\mu\text{F}$	0.039 6	额定负荷/VA	50
补偿电感/H	126.65	补偿电抗器电阻 $R_2/\Omega$	32
中间变压器漏电阻 $R_1/\Omega$	1 086	二次侧激磁电感/H	0.745
二次侧激磁电阻/ $\Omega$	193.9	二次侧负载电感/H	0.127
二次侧负载电阻/ $\Omega$	53.6	杂散电容 $C_s/\text{pF}$	240
中间变压器变比 $N$	173.2	杂散电容 $C_{s1}/\text{pF}$	500

仿真中在 CVT 一次侧施加谐波电压, 二次侧接入 2 个电流互感器, 采用电容电流方法计算得到谐波电压。以一次侧谐波电压为基准, 分别计算 CVT 和电容电流方法的各次谐波电压测量误差, 第  $h$  次谐波电压测量误差定义为

$$e_h \% = (U_{2h} - U_{1h}) / U_{1h} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $e_h$  为测量误差;  $U_{1h}$  为一次侧第  $h$  次谐波电压;  $U_{2h}$  为 CVT 或电容电流方法第  $h$  次谐波电压(折算到一次侧)。根据式(3), 计算得到电容电流方法和 CVT 的 2~50 次谐波电压测量误差对比如图 5 所示, 误差数据如表 2 所示。

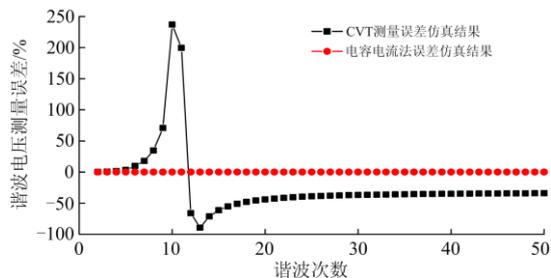


图 5 谐波测量误差仿真对比

Fig. 5 Simulation comparison of measurement error

表 2 谐波测量误差仿真结果

Table 2 Simulation result of harmonic measurement error

谐波次数	CVT 误差/%	电容电流法误差/%	谐波次数	CVT 误差/%	电容电流法误差/%
2	0.245	0.002	27	-37.995	0.001
3	0.748	0.001	28	-37.568	0.001
4	1.328	0.001	29	-37.193	0.001
5	3.454	0.001	30	-36.862	0.001
6	9.879	0.001	31	-36.568	0.001
7	17.826	0.001	32	-36.306	0.002
8	34.511	0.001	33	-36.071	0.001
9	70.786	0.001	34	-35.859	0.002
10	237.091	0.001	35	-35.668	0.002
11	199.671	0.001	36	-35.494	0.002
12	-66.089	0.001	37	-35.336	0.002
13	-89.395	0.001	38	-35.192	0.003
14	-71.184	0.001	39	-35.060	0.003
15	-61.304	0.001	40	-34.938	0.005
16	-55.164	0.001	41	-34.827	0.003
17	-50.987	0.001	42	-34.723	-0.002
18	-47.977	0.001	43	-34.628	0.000
19	-45.715	0.001	44	-34.540	0.001
20	-43.963	0.001	45	-34.457	0.001
21	-42.568	0.001	46	-34.381	0.001
22	-41.435	0.001	47	-34.310	0.001
23	-40.500	0.001	48	-34.243	0.003
24	-39.717	0.001	49	-34.181	0.002
25	-39.054	0.001	50	-34.122	0.002
26	-38.486	0.001	—	—	—

由图 5 可知: (1) 考虑杂散电容的影响, CVT 幅频曲线呈现先尖峰后低谷变化趋势, 存在较大的谐波测量误差。(2) 电容电流方法的 2~50 次谐波电压误差较小且基本保持不变, 验证了该方法的正确性。

### 2.2 电流测量精度的影响分析

根据电容电流方法的原理, 准确测量电容支路电流是谐波电压测量的基础。当电流互感器存在测量误差时, 会对谐波电压测量精度产生影响。

由式(1)可知, 第  $h$  次谐波电压幅值为

$$U_{Sh} = \sqrt{U_{1h}^2 + U_{2h}^2 + 2U_{1h}U_{2h} \cos(\theta_{1h} - \theta_{2h})} \quad (4)$$

式中:  $U_{1h}$ 、 $U_{2h}$  分别为  $C_1$ 、 $C_2$  支路第  $h$  次谐波电压幅值, 且  $U_{1h} = I_{1h}Z_{1h}$ ,  $U_{2h} = I_{2h}Z_{2h}$ ;  $\theta_{1h}$ 、 $\theta_{2h}$  分别为  $C_1$ 、 $C_2$  支路电流第  $h$  次谐波相位角。根据 CVT 参数特点, 电磁单元支路的电流较小, 因此可近似认为:  $I_{1h} \approx I_{2h}$ ,  $\theta_{1h} \approx \theta_{2h}$ 。第  $h$  次谐波电压幅值为

$$U_{Sh} \approx I_{1h}Z_{1h} + I_{2h}Z_{2h} \quad (5)$$

设  $C_1$ 、 $C_2$  支路第  $h$  次谐波电流幅值的测量误差

分别为  $\Delta i_{1h}$ 、 $\Delta i_{2h}$ ，则该次谐波电压测量误差为

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta U_{Sh}}{U_{Sh}} \approx \frac{\Delta i_{1h} Z_{1h} + \Delta i_{2h} Z_{2h}}{I_{1h} Z_{1h} + I_{2h} Z_{2h}} \approx \frac{\Delta i_{1h}}{I_{1h}} \cdot \frac{Z_{1h}}{Z_{1h} + Z_{2h}} + \frac{\Delta i_{2h}}{I_{2h}} \cdot \frac{Z_{2h}}{Z_{1h} + Z_{2h}} \quad (6)$$

可见，第  $h$  次谐波电流的测量误差越大，相应该次谐波电压测量误差也越大。在电流测量精度相同的情况下，电容支路的谐波阻抗越大，该支路电流测量精度对谐波电压测量误差的影响越大。

在图 4 的仿真模型中，设置电流互感器二次输出，以模拟电流测量误差。电容电流方法需要 2 个电流互感器的配合，考虑到电流互感器的测量误差可能相同或相异，仿真中设置如下 4 种误差条件：(1) 电流互感器均无测量误差；(2) 仅  $C_1$  或  $C_2$  支路电流互感器存在  $\pm 1\%$  的测量误差；(3)  $C_1$  和  $C_2$  支路电流互感器存在相同的测量误差，同为  $-1\%$  或  $1\%$ ；(4)  $C_1$  和  $C_2$  支路电流互感器存在相异的测量误差，一个误差为  $1\%$ ，而另一个误差为  $-1\%$ 。不同误差条件下 2~50 次谐波电压测量误差对比如图 6 所示，13 次谐波电压误差仿真和近似计算结果如表 3 所示。

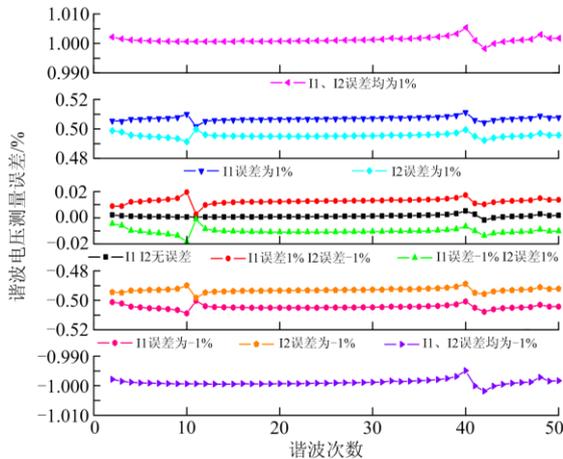


图 6 电流测量误差变化时谐波电压测量误差

Fig. 6 Harmonic voltage measurement error when current measurement error changes

表 3 13 次谐波电压测量误差

Table 3 The 13th harmonic voltage measurement error

误差条件	仿真/%	计算/%	误差条件	仿真/%	计算/%
I1+1%	0.506	0.505	I1+1% I2+1%	1.001	1.000
I1-1%	-0.505	-0.505	I1-1% I2-1%	-0.999	-1.000
I2+1%	0.495	0.495	I1+1% I2-1%	0.011	0.010
I2-1%	-0.494	-0.495	I1-1% I2+1%	-0.010	-0.010

可以看出：(1) 谐波电压测量误差随着电流测量误差的增大而增大，误差仿真与近似计算结果基本

相同；(2) 与 2 个电流互感器测量误差相同条件下分析结果相比，误差相异条件下该方法的谐波电压测量误差较小。因此，应尽可能选择 2 个测量误差相异的电流互感器，以减小电容电流方法的测量误差。

### 2.3 电容值变化的影响分析

电容电流方法的谐波电压测量结果与高压电容  $C_1$ 、中压电容  $C_2$  的谐波阻抗密切相关。由于环境温度的变化、自身发热和老化等因素，CVT 电容值会发生微小的变化，使得实际谐波阻抗偏离额定值，导致该方法的谐波测量结果存在误差。

设  $C_1$ 、 $C_2$  的第  $h$  次谐波阻抗偏差分别为  $\Delta Z_{1h}$ 、 $\Delta Z_{2h}$ ，则第  $h$  次谐波电压测量误差为

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta U_{Sh}}{U_{Sh}} \approx \frac{\Delta Z_{1h} I_{1h} + \Delta Z_{2h} I_{2h}}{I_{1h} Z_{1h} + I_{2h} Z_{2h}} \approx \frac{\Delta Z_{1h}}{Z_{1h}} \cdot \frac{Z_{1h}}{Z_{1h} + Z_{2h}} + \frac{\Delta Z_{2h}}{Z_{2h}} \cdot \frac{Z_{2h}}{Z_{1h} + Z_{2h}} \quad (7)$$

设  $C_1$ 、 $C_2$  容值变化范围为  $\pm 5\%$ ，具体变化如表 4 所示。在图 4 所示的仿真模型中，改变  $C_1$  和  $C_2$ ，以模拟电容值变化。图 7、图 8 分别为  $C_1$ 、 $C_2$  增加或减小时 2~50 次谐波电压测量误差。仿真分析表明：(1) 随着  $C_1$  或  $C_2$  容值偏差的增大，谐波电压测量误差相应地增大，误差仿真与近似计算结果基本相同；(2) 与仅  $C_1$  或  $C_2$  容值变化时误差相比较， $C_1$  和  $C_2$  同时变化时各次谐波电压误差明显增大。因此，应定期测量 CVT 高压电容和中压电容的容值，根据实际容值计算谐波电压，以提高电容电流方法的测量精度。

表 4 电容值变化

Table 4 Variants of the capacitor parameters

电容	额定值	-5%	-2.5%	+2.5%	+5%
高压电容 $C_1/\mu\text{F}$	0.039 6	0.037 62	0.038 61	0.040 59	0.041 58
中压电容 $C_2/\mu\text{F}$	0.040 4	0.038 38	0.039 39	0.041 41	0.042 42

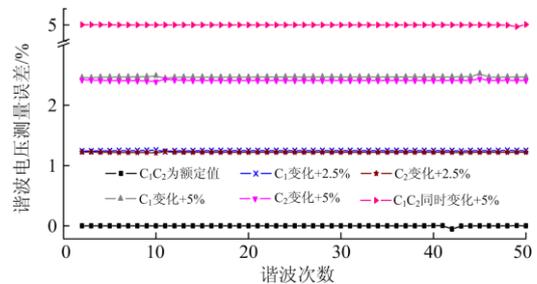


图 7  $C_1$  或  $C_2$  增加时谐波电压测量误差

Fig. 7 Harmonic voltage measurement error when capacitor  $C_1$  or  $C_2$  increases

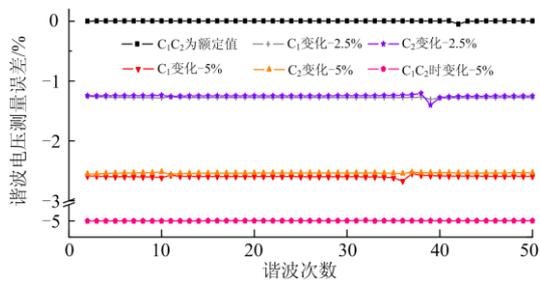


图 8  $C_1$  或  $C_2$  减小时谐波电压测量误差

Fig. 8 Harmonic voltage measurement error when capacitor  $C_1$  or  $C_2$  decreases

### 3 物理试验

为了验证电容电流方法的测量准确性, 以型号为 TYD35/ $\sqrt{3}$ -0.02HF 的 35 kV CVT 为试验对象, 开展谐波电压测量误差试验。

建立 CVT 谐波测量误差试验系统, 基于电容电流方法研制了谐波电压测量装置样机, 试验接线如图 9 所示。10 kV 谐波扰动源输出经试验变压器升压至 35 kV, 然后连接至 CVT、阻容式电压互感器 (RCVT) 的一次侧, 采用 Fluke1760 电能质量分析仪对二次侧电压进行测量分析。试验定制的 RCVT 采用电阻、电容并联分压原理, 具有测量频率范围宽、线性度好的特点。出厂试验数据表明: RCVT 在 5 kHz 及以下频率范围内电压测量误差小于 1%, 因此 RCVT 的谐波电压测量结果折算到一次侧后作为基准值使用。

在 CVT 二次侧安装 2 只电流互感器, 分别测量流过高压电容和中压电容的电流, 其输出接入谐波电压测量装置样机, 计算得到一次侧谐波电压。电流互感器主要参数如下: 额定电流 5 A, 准确度 1%, 频率范围 40 Hz~5 kHz。试验中将二次测试线多次穿心缠绕于电流互感器, 使被测电流大幅增加, 以提高电流测量准确性。

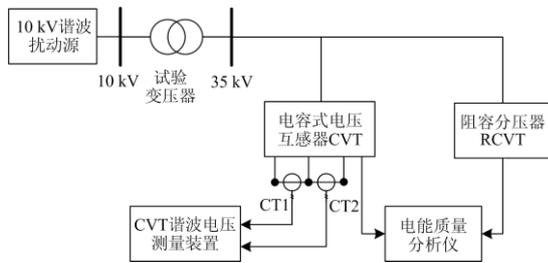


图 9 CVT 谐波测量误差试验接线

Fig. 9 CVT harmonic measurement error test connection

试验过程如下: 在 CVT 和 RCVT 一次侧施加幅值为  $35/\sqrt{3}$  kV 的额定基波电压, 分别叠加 2~50

次谐波电压。以 RCVT 测量结果为基准, 根据式(3), 计算得到 CVT 和电容电流方法的 2~50 次谐波电压测量误差对比如图 10 所示, 误差数据如表 5 所示, 图中同时给出 CVT 谐波电压测量误差的仿真曲线。

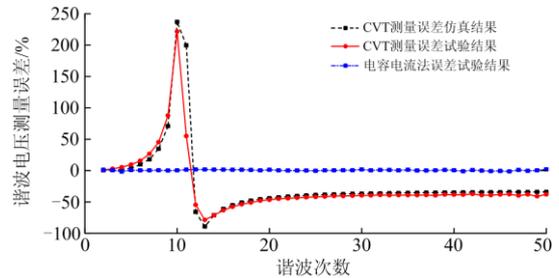


图 10 谐波测量误差试验对比

Fig. 10 Test comparison of harmonic measurement error

表 5 谐波测量误差试验结果

Table 5 Test result of harmonic measurement error

谐波次数	CVT 误差/%	电容电流法误差/%	谐波次数	CVT 误差/%	电容电流法误差/%
2	0.93	1.08	27	-40.56	0.34
3	2.84	0.46	28	-40.53	0.52
4	5.34	-1.51	29	-40.19	0.61
5	9.63	0.81	30	-39.69	1.58
6	15.61	0.30	31	-39.71	0.20
7	26.76	0.31	32	-38.98	0.99
8	45.30	0.52	33	-39.33	0.96
9	87.67	0.12	34	-39.11	0.34
10	221.67	0.23	35	-39.15	1.18
11	55.14	1.54	36	-39.22	0.01
12	-54.72	1.70	37	-39.06	0.05
13	-78.74	1.56	38	-39.56	0.36
14	-71.25	1.40	39	-38.37	0.94
15	-63.26	1.39	40	-38.41	0.58
16	-57.86	1.16	41	-38.61	-1.16
17	-53.79	1.30	42	-37.33	0.68
18	-50.95	0.87	43	-39.16	-0.26
19	-48.12	0.29	44	-39.13	-0.98
20	-46.61	1.25	45	-38.17	-0.56
21	-44.93	0.26	46	-37.80	-1.39
22	-44.41	0.05	47	-40.00	0.87
23	-43.48	0.06	48	-37.93	-0.52
24	-42.77	0.10	49	-41.07	0.31
25	-41.89	-0.46	50	-38.10	1.78
26	-41.48	0.30	—	—	—

由图 10 和表 5 可知: (1) 电容电流方法的 2~50 次谐波电压测量误差均小于 2%, 满足国家标准《电能质量公用电网谐波》中互感器引入的幅值误差不应大于 5% 的要求, (2) CVT 谐波电压测量误差较大,

其中第 2~11 次谐波电压测量值偏大, 第 12~50 次谐波电压测量值偏小, 第 25~50 次谐波电压测量误差基本保持不变。试验曲线和仿真曲线峰、谷对应的谐波次数相同, 但测量误差略有差异。

#### 4 结论

本文提出了基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法, 结合仿真计算分析了电流测量精度和电容值变化对该方法谐波测量误差的影响, 以某 35 kV CVT 为对象完成了实际物理试验, 主要结论如下。

(1) 谐波电压测量误差随着电流互感器测量误差的增大而增大, 当 2 个电流互感器测量误差相异时, 其对谐波测量误差的影响较小。为减小电容电流方法的测量误差, 应尽可能选择 2 个测量误差相异的电流互感器。

(2) 随着电容值偏差的增大, 谐波电压测量误差相应地增大。因此, 应定期测量 CVT 高压电容和中压电容的容值, 根据实际容值计算谐波电压, 以提高电容电流方法的测量精度。

(3) 对于型号为 TYD35/ $\sqrt{3}$ -0.02HF 的 CVT 试验表明, 电容电流方法的 2~50 次谐波电压测量误差均小于 2%, 满足国家标准《电能质量公用电网谐波》的相关要求。所提出的电容电流方法仅需对 CVT 二次回路进行简单改造, 即可实现电网谐波电压的准确测量, 具有较高的工程应用价值。

#### 参考文献

[1] 周胜军, 谈萌. 基于监测数据的高铁动车组谐波特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 128-133.  
ZHOU Shengjun, TAN Meng. Harmonic characteristics analysis of electric multiple units in high-speed railway based on the monitoring data[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 128-133.

[2] 庄双勇, 赵伟, 何学农, 等. 超谐波引发的电能质量问题及相关研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1): 41-52.  
ZHUANG Shuangyong, ZHAO Wei, HE Xuenong, et al. Power quality problems caused by supraharmonics and related research[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 41-52.

[3] 徐佳夫, 王旭红, 李浩, 等. 无序充电模式下电动汽车对住宅区配电网谐波影响研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 61-67.  
XU Jiafu, WANG Xuhong, LI Hao, et al. Research on the harmonic effect of electric vehicles on distribution network in residential areas under the disordered charging mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 61-67.

[4] 单士睿, 杨富营, 杨沛豪. 基于谐波注入法的 L 型光伏并网逆变器谐波抑制方案[J]. 热力发电, 2019, 48(7):

97-102.  
SHAN Shirui, YANG Fuying, YANG Peihao, et al. Harmonic suppression scheme of L-type photovoltaic grid-connected inverter based on harmonic injection method[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(7): 97-102.

[5] 孙钢虎, 王恩南, 贺婷, 等. 基于自适应暂态下垂控制的光伏频率快速响应方案[J]. 热力发电, 2019, 48(8): 94-100.  
SUN Ganghu, WANG Ennan, HE Ting, et al. Fast response scheme of photovoltaic frequency based on self-adaptive transient droop control[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(8): 94-100.

[6] 彭庆华, 陈龙, 康文斌, 等. 电容式电压互感器谐波测量误差分析[J]. 高压技术, 2015, 41(3): 956-962.  
PENG Qinghua, CHEN Long, KANG Wenbin, et al. Analysis of harmonic measurement error using capacitive voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 956-962.

[7] XIAO Yao, FU Jun, HU Bin. Problems of voltage transducer in harmonic measurement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 1483-1487.

[8] 徐思恩, 冯宇, 汪本进, 等. 特高压电容式电压互感器误差在线同级比对技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 132-137.  
XU Si'en, FENG Yu, WANG Benjin, et al. Research on on-line peer comparison of UHV capacitor voltage transformer error[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 132-137.

[9] 吴世普, 吴细秀, 李璿, 等. 1000 kV CVT 运行状态下误差测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 122-127.  
WU Shipu, WU Xixiu, LI Xuan, et al. Study on error test technology for 1000 kV CVT under operation condition[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 122-127.

[10] BISWAL M, BISWAL S. A positive-sequence current based directional relaying approach for CCVT subsidence transient condition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 81-91. DOI: 10.1186/s41601-017-0038-0.

[11] 臧雯, 冯志彪. 电容式电压互感器的数字仿真模型[J]. 同济大学学报, 2004, 32(4): 401-405.  
ZANG Wen, FENG Zhibiao. Digital simulation models of capacitor voltage transformer[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(4): 401-405.

[12] 熊小伏, 周家启, 周永忠, 等. 电容式电压互感器暂态误差的数字校正方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 154-158.  
XIONG Xiaofu, ZHOU Jiaqi, ZHOU Yongzhong, et al. Digital revision method on transient error of capacitive voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,

- 25(12): 154-158.
- [13] 乐健, 柳永妍, 李琼林, 等. 电容式电压互感器谐波测量误差试验技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 108-113.  
LE Jian, LIU Yongyan, LI Qionglin, et al. Harmonic measurement error test technology of capacitor voltage transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 108-113.
- [14] International Electrotechnical Commission. IEC/TR 61869-103 Instrument transformers-The use of instrument transformers for power quality measurement[EB/OL]. [2012]. www.iec.ch.
- [15] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量 公用电网谐波: GB/T14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [16] TZIOUVARAS A, MCLAREN P, ALEXANDER G, et al. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 62-72.
- [17] VERMEULEN H J, DAVEL P. Harmonic distortion measurements using capacitive voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(6): 1012-1017.
- [18] TZIOUVARAS A, MCLAREN P, ALEXANDER G, et al. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 62-72.
- [19] 王锐. CVT 谐波测量畸变研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.  
WANG Rui. Research on distortion measurement using CVT[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [20] 李琳, 段晓波, 刘观起. 高压系统谐波测量信号提取方法分析[J]. 河北电力技术, 2014(1): 52-54.  
LI Lin, DUAN Xiaobo, LIU Guanqi. Analysis on harmonic measurement signal extraction method of high power system[J]. Hebei Electric Power, 2014(1): 52-54.
- [21] 司文荣, 贺林, 金珩, 等. 500 kV CVT 内置低压电容 C3 测量过电压波形的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 43-47.  
SI Wenrong, HE Lin, JIN Heng, et al. Testing research on overvoltage wave shape measurements using capacitor element C3 in series connection within 500 kV CVT[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 43-47.
- [22] 姜春阳, 刘浩, 周峰, 等. 有源电容式分压器的研制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 148-152.  
JIANG Chunyang, LIU Hao, ZHOU Feng, et al. The development of an active capacitive voltage divider[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 148-152.
- [23] 王玲, 冯宇, 邱进, 等. 电压互感器谐波特性测量可控谐波电压源的构建[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 106-111.  
WANG Ling, FENG Yu, QIU Jin, et al. Construction of controllable harmonic voltage source for harmonic characteristic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 106-111.
- [24] 王德忠, 王季梅. 电容式电压互感器误差频率特性的研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 66-68.  
WANG Dezhong, WANG Jimei. The study of error characteristic changing with frequency for the capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 66-68.
- [25] 何学农. 现代电能质量测量技术[M]. 北京: 福禄克公司, 2012.
- [26] 周存和. 关于电容式电压互感器测量谐波电压的问题[J]. 电力电容器, 2005(2): 43-45.  
ZHOU Cunhe. Some problem about the harmonic voltage measurement by capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor, 2005(2): 43-45.
- [27] 毛涛, 乐健, 黄银龙, 等. 一种新型的高压直流输电系统交流侧谐波电压测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 796-803.  
MAO Tao, LE Jian, HUANG Yinlong, et al. A novel AC side harmonic voltage measurement scheme of high-voltage DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 796-803.
- [28] 王昕, 沈鑫, 曹敏, 等. 电容式电压互感器谐波测量特性研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 1-9.  
WANG Xin, SHEN Xin, CAO Min, et al. Research on capacitive voltage transformer harmonic measurement features[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 1-9.
- [29] 郜洪亮, 李琼林, 余晓鹏, 等. 电容式电压互感器的谐波传递特性研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3125-3130.  
GAO Hongliang, LI Qionglin, YU Xiaopeng, et al. Harmonic transfer characteristic of capacitor voltage transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3125-3130.

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2020-01-19

作者简介:

代双寅(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: daishuangyin@163.com

刘书铭(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: liushuming@ha.sgcc.com.cn

赵麒哲(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力工程项目管理。E-mail: zhaoqizhe@spic.com.cn

(编辑 许威)