

电磁式电压互感器经消谐器接地对谐波序电压测量的影响

陈宜皇

广东电网有限责任公司广州供电局 广东 广州 510000

摘要：本文针对中性点经消谐器接地的电磁式电压互感器（TV）对正序、负序和零序谐波电压测量的不同影响进行了理论分析与试验验证。首先分析了3只单相TV的励磁特性差异和单只TV励磁特性的非线性对谐波序电压测量的影响。设计了相关的试验平台，进行了三相TV组对谐波序电压测量的试验。试验结果验证了该接地方式下三相TV组对谐波序电压测量的不同影响。

关键词：电磁式电压互感器；消谐器；序电压；励磁特性；谐波测量

1 研究现状

在中压中性点不接地配电网中，通常使用电磁式电压互感器（TV）进行母线电压测量，为避免线路出现故障时发生铁磁谐振^[1]，通常需要在三相TV组的一次侧中性点接消谐器^[2,3]。随着电力系统中谐波源增多，中性点经消谐器接地的三相TV组二次侧测量电压经常出现异常现象，影响了电力系统计量的准确性和保护装置动作的准确性。

目前，对于中性点经消谐器接地的三相TV组对谐波序电压测量影响的研究，主要集中在实际运行中二次侧电压不平衡的理论分析，没有对谐波序电压的定性研究。针对电磁式电压互感器一次侧加装消谐器后出现二次侧三相不平衡现象，从正弦基波下的励磁电流中的3次谐波通道进行分析，说明了该现象主要是3次谐波电流流过消谐器后产生压降所致，并提出了在消谐器上并接谐振频率为150Hz的LC滤波器以解决问题^[4]；通过具体用户实际情况分析，结合理论计算验证，表明35kV、20kV计量电压不平衡故障主要是由3次谐波电流通过消谐器，导致中性点电压升高引起的，并建议采用三相三线接线和3次谐波限制器消除影响^[5]；分析了由于系统中三相电压的不平衡，引起的零序性质的电压流过消谐器，产生中性点悬浮电位，影响TV正常工作^[6]；对TV中性线断线产生的三次谐波电压及基波零序电压进行了分析，并通过实验进行验证；从TV二次侧电压异常情况分析3台TV励磁特性的差异造成中性点电压产生位移，造成各相负载电压不平衡；在4TV的接线方式下，探讨了TV二次侧产生不平衡电压的原因，并相对提出了解决方案；通过TV一次侧中性点加装非线性电阻后的谐振实验，发现非线性电阻的接入会导致中性点电压升高，TV开口三角测量的零序电压变大。这些研究都对TV中性点不直接接地时二次侧测量电压的异常现象做出了一定的理论分析，有的

还进行了现场试验测量进行验证，但是并没有针对谐波序电压对TV的二次测量影响进行研究。

本文进行了中性点经消谐器接地的三相TV组对正序、负序和零序谐波电压测量影响的理论分析与试验研究。首先理论分析了因3只单相TV的励磁特性差异对谐波序电压测量的不同影响，以及TV励磁特性非线性对零序谐波电压测量的影响。设计了中性点接消谐器的三相TV组对正序、零序和负序谐波电压测量的物理试验平台，并进行了各次谐波序电压的测量试验。通过试验结果分析，验证了理论分析的准确性。

2 TV中性点经消谐器接地对谐波序电压测量影响理论分析

2.1 TV励磁特性差别对谐波序电压测量的影响

三相TV组一次侧中性点经消谐器接地的等效电路如下图所示。

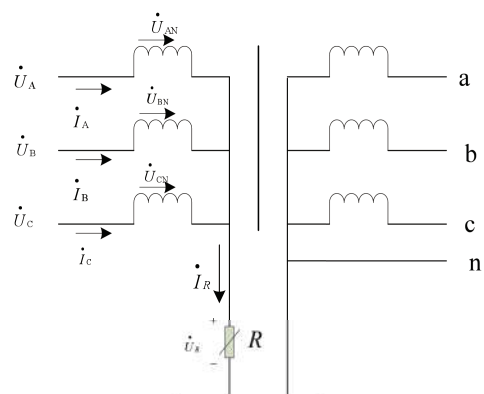


图1 TV中性点经消谐器接地的等效电路

设在对称的正序、负序和零序谐波电压的作用下，流过TV的各相电流分别为 \dot{I}_{A1} 、 \dot{I}_{B1} 、 \dot{I}_{C1} 和 \dot{I}_{A2} 、 \dot{I}_{B2} 、 \dot{I}_{C2} 以及 \dot{I}_{A0} 、 \dot{I}_{B0} 、 \dot{I}_{C0} 。如果3只单相TV的励磁特性一致，各相电流向量的幅值和滞后电压角度相等。在对称的正序和负序谐波电压作用下，流过中性点的电流之和分别为

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} \\ &= I \angle -\alpha_1 + I \angle (-120^\circ - \alpha_1) + I \angle (120^\circ - \alpha_1) = 0\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_2 &= \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} \\ &= I \angle -\alpha_2 + I \angle (120^\circ - \alpha_2) + I \angle (-120^\circ - \alpha_2) = 0\end{aligned}\quad (2)$$

根据图1, 此时经消谐器两端电压 $\dot{U}_R = 0$, 三相TV组中性点的电压没有改变, 所以TV二次侧测量的正序、负序谐波电压能够准确反映母线谐波电压。

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} \\ &= I_{A1} \angle -\alpha_{A1} + I_{B1} \angle (-120^\circ - \alpha_{B1}) + I_{C1} \angle (120^\circ - \alpha_{C1}) \neq 0\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\dot{I}_2 &= \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} \\ &= I_{A2} \angle -\alpha_{A2} + I_{B2} \angle (120^\circ - \alpha_{B2}) + I_{C2} \angle (-120^\circ - \alpha_{C2}) \neq 0\end{aligned}\quad (4)$$

由式(3)和式(4), 此时流过消谐器的电流不再为零。现以正序谐波电压作用下电压、电流向量关系进行分析, 各向量关系图如图2所示。

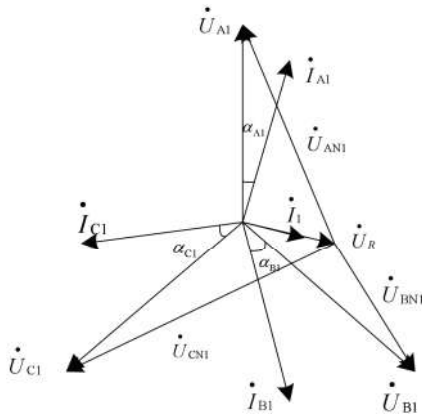


图2 正序谐波下三相电压、电流向量关系图

因为 \dot{I}_1 的大小与方向与三相电流的幅值与相角有关, 假设该电流向量如图所示, 则每相TV一次侧的谐波电压如图中 \dot{U}_{AN1} 、 \dot{U}_{BN1} 、 \dot{U}_{CN1} 所示, 与母线谐波电压关系为 $U_{AN1} > U_{A1}$ 、 $U_{BN1} < U_{B1}$ 、 $U_{CN1} > U_{C1}$, 此时二次侧测量的谐波电压不能准确反映母线谐波电压, 且3只单相TV测量的电压出现不平衡。同理, 以上分析结果适用于负序谐波电压的测量。

对于零序谐波电压作用下的TV, 其流过中性点的电流之和为

$$\begin{aligned}\dot{I}_0 &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{B0} + \dot{I}_{C0} \\ &= I_{A0} \angle -\alpha_{A0} + I_{B0} \angle -\alpha_{B0} + I_{C0} \angle -\alpha_{C0} \neq 0\end{aligned}\quad (5)$$

则无论3只TV的励磁特性是否一致(一致时, $I_{A0} = I_{B0} = I_{C0}$ 、 $\alpha_{A0} = \alpha_{B0} = \alpha_{C0}$), 流过中性点的电流之和均不为0。在零序谐波电压作用下, 其电压、电流相位关系如图3所示。

如果3只单相TV的励磁特性差别较大, 每相的电流向量幅值和滞后电压角度将各不相同。在正序和负序谐波电压作用下, 此时中性点电流之和分别为

此时消谐器两端电压 $\dot{U}_R = \dot{I}_0 \times R$, TV一次侧电压为

$$\dot{U}_{AN0} = \dot{U}_{BN0} = \dot{U}_{CN0} = \dot{U}_{A0} - \dot{U}_R \neq \dot{U}_{A0}\quad (6)$$

明显, TV二次侧测量的电压不能准确反映母线上的零序谐波电压, 但是三相TV组的二次侧三相测量电压保持平衡。

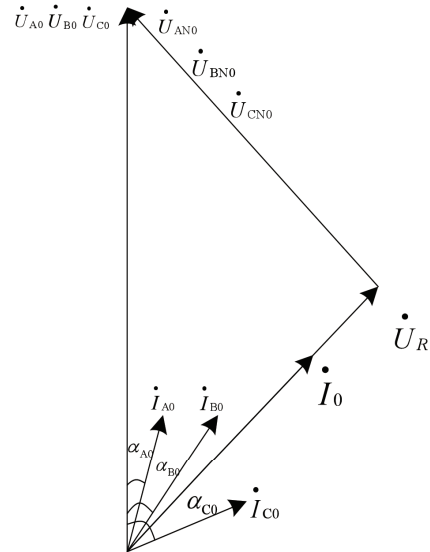


图3 零序谐波下A相电压、电流向量关系图

2.2 单相TV励磁特性的非线性对3次零序谐波电压测量影响

电磁式电压互感器类似于变压器, 其励磁特性是非线性的, 在一次侧施加正弦基波电压 u 时, 由 $u = N_1 \frac{d\phi}{dt}$ 和 $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$, 可得主磁通 ϕ 和二次感应电动势 e_2 均是正弦波。而因为励磁特性的非线性, 铁心里的主磁通与励磁电流的关系为一组非线性曲线, 忽略励磁电流 i_m 中的高次谐波, 仅保留下电流基波分量 i_{m1} 和3次谐波分量 i_{m3} , 此时 i_m 将呈现尖顶波形, 如图4所示。

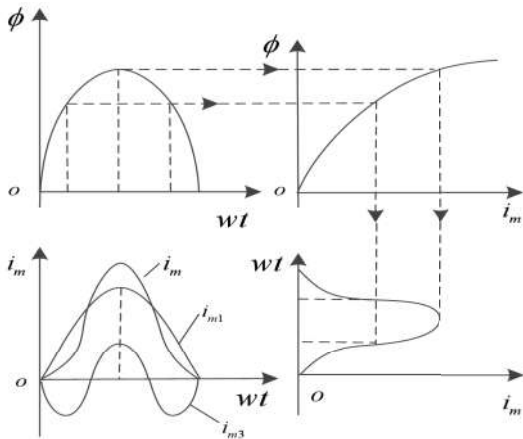


图4 单相TV励磁电流与磁通的关系

由图4可知，为了得到正弦二次电压，需要给励磁电流中的3次谐波保持通路。在三相TV组中，其励磁电流的3次谐波同相，即为零序性，当中性点经消谐器接地时，因为消谐器正常工作情况下阻抗特别大，可假设此时其完全阻断了3次谐波电流，励磁电流中仅含有正弦基波。由于励磁特性的非线性，铁心中将含有一次磁通 ϕ_1 和三次磁通 ϕ_3 ，此时二次感应电势为

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi_1}{dt} - N_2 \frac{d\phi_3}{dt} \quad (7)$$

据上式可知，此时二次侧将会出现3次谐波感应电势

$$e_{23} = -N_2 \frac{d\phi_3}{dt} \quad (8)$$

TV二次侧的3次零序谐波电压测量出现误差。

3 物理试验设计

图5和图6分别为物理试验设计原理图与现场试验接线图。

试验的TV型号是JDZ-10，额定电压比是10kV：0.1kV，准确级为0.2。其中，谐波源可以产生10kV基波叠加不同序性谐波的输入电压，Fluke公司的三相信号频谱分析仪Fluke1760对各相电压进行分析，记录不同频率下电压的有效值。

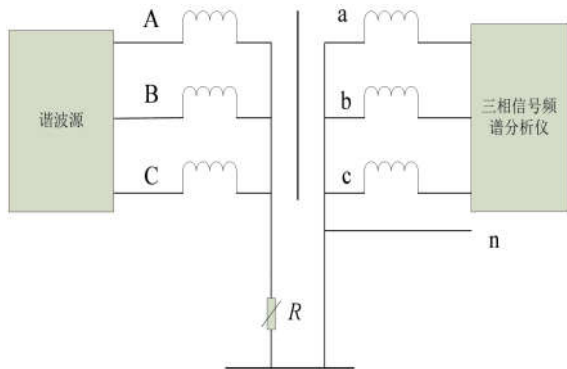


图5 物理试验设计原理图



图6 现场试验接线图

消谐器选用齿轮形大容量消谐电阻器，型号为LXQ-IV-10，其主要电气参数见表1，对其进行伏安特性测试，测试结果如图7所示，可得消谐器是一个非线性电阻，且其电阻值随着两端电压的增大而变小。

表1 消谐器主要电气参数

项目		电气参数
通过交流10mA时	电压 (V)	800~1000
	电阻 (kΩ)	> 80
2h耐受电流(mA)		200

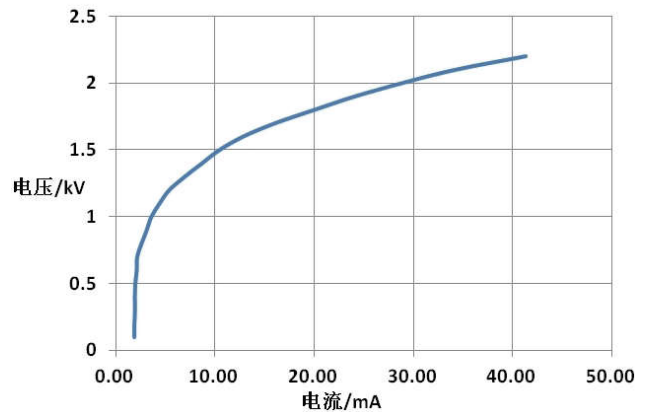


图7 消谐器伏安特性曲线

主要进行试验如下：

- 1.三相TV组中性点直接接地，10kV额定基波叠加相电压为0.57735kV的2-50次谐波；
- 2.三相TV组中性点经消谐器接地：（1）10kV额定基波电压叠加变幅值3次零序谐波电压；（2）10kV额定基波电压分别叠加相电压0.57735kV的单个正序、负序和零序谐波电压；（3）10kV额定基波电压同时叠加正序、负序和零序多次谐波电压。

4 试验结果分析

首先对三相TV组中性点直接接地方式下基波叠加单次谐波测试，测量结果如图8所示。输入谐波相电压为0.57735kV，TV二次侧测量理论值应为5.7735V。



图8 中性点直接接地时谐波电压的测量结果

从图8看出,中性点直接接地时,TV对谐波序电压测量影响都很小,且二次侧三相测量电压基本保持平衡,谐波次数增大时,误差虽然增大,但是基本保持在一个很小误差范围内。

将消谐器接入试验,输入10kV额定基波电压叠加变幅值3次零序谐波电压,各相TV测量结果与理论值比较如图9所示。

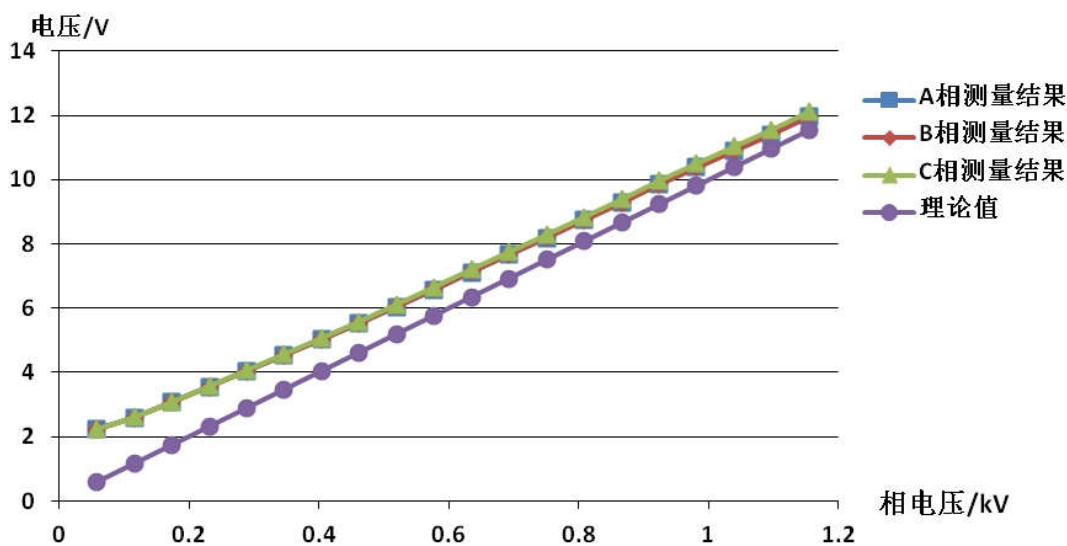
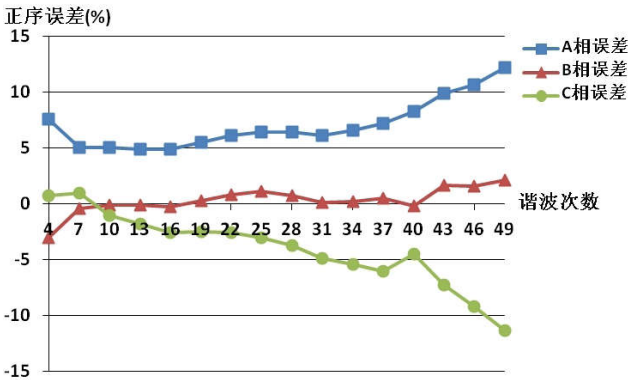


图9 三相TV3次谐波电压测量结果

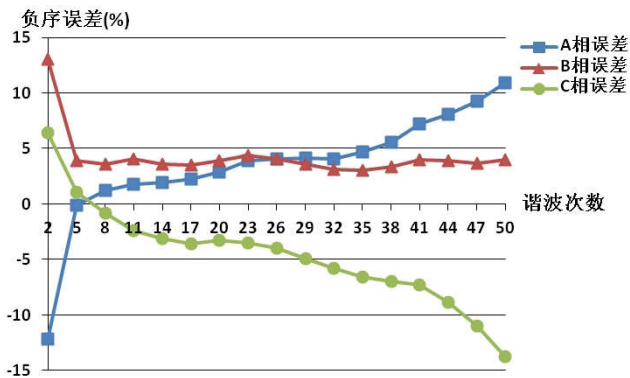
从图中看出,三相TV测量结果基本一致,与前文零序谐波电压测量分析相符合。由式(8),由于PT自身励磁特性的非线性产生的3次感应电动势 e_{23} ,导致TV二次侧测量的3次零序电压大于理论值;随着3次零序谐波电压增大,消谐器电阻变小,此时励磁3次零序电流的通路

阻抗变小, e_{23} 变小,TV测量结果与理论值之差变小,如图9所示。

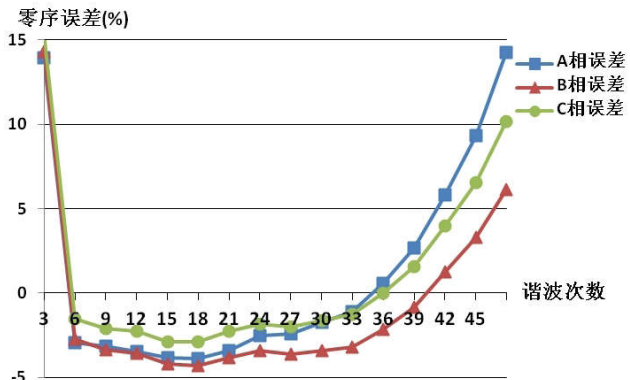
在输入10kV额定基波电压叠加相电压为0.57735kV的单个谐波序电压时,3只TV测量误差如图10所示。



(a) 正序谐波作用下三相TV误差



(b) 负序谐波作用下三相TV误差



(c) 零序谐波作用下三相TV误差

图10 三相TV谐波测量误差

由图 (a) 和图 (b) 看出, 在正序和负序谐波电压作用下, 三只单相TV的测量误差差异较大, 三相中出现正负不同的误差, 验证理论分析中的因三只TV的励磁特性差异造成正序、负序谐波二次侧三相测量电压不平衡; 从图 (c) 看出, 在低次零序谐波电压作用下, 三只TV测量误差基本保持一致, 与理论分析中三只TV的励磁特性差异对零序谐波电压测量影响的分析一致, 在高次零序性谐波时, 三只TV测量出现正误差, 这可能是由TV

杂散电容引起的。

输入10kV额定基波电压同时叠加线电压为800V3次零序谐波+600V5次负序谐波+400V7次正序谐波, 其测量误差如表2所示。

表2 三相TV同时叠加各序性质谐波电压测量误差

谐波次数	A相测量误差 (%)	B相测量误差 (%)	C相测量误差 (%)
3	20.273	20.285	21.315
5	-0.366	1.061	0.852
7	3.581	1.623	2.114

根据表2, 三相TV中3次零序谐波测量误差基本一致, 但因TV励磁特性非线性在二次侧产生的3次感应电势的影响, 误差仍比较大; 5次负序和7次正序谐波测量误差仍然出现较大差异, 验证了前文的理论分析。

5 结论

本文针对三相TV组在中性点经消谐器接地时对正序、负序、零序的谐波电压测量不同影响进行了理论分析与试验验证, 所得主要结论如下:

(1) 对于3只单相TV的励磁特性存在差异, 进行正序、负序谐波电压测量时, TV组的三相测量电压出现不平衡。进行零序谐波电压测量时, TV的三相测量电压基本保持一致;

(2) 由于TV励磁特性的非线性, 在TV原边中性点经消谐器接地时, 增大了TV励磁电流中的3次零序谐波通路阻抗, 磁通中产生3次谐波成份, TV二次侧出现较大的3次零序谐波电压, 影响二次电压测量。

参考文献

- [1]梁志瑞,董维,刘文轩,等.电磁式电压互感器的铁磁谐振仿真研究[J].高压电器,2012,48(11):18-23.
- [2]张玲,郝春娟.电压互感器铁磁谐振过电压及防止[J].电力自动化设备,2000,20(3):29-31.
- [3]葛栋,鲁铁成,王平.配电网铁磁谐振消谐机理仿真计算研究[J].高电压技术,2004,29(11):15-17.
- [4]黄伟东.10kV电压互感器中性点加装消谐器后电压不平衡原因及解决办法[J].电工技术,2011(6):2-2.
- [5]冯隆基.35kV、20kV计量电压不平衡故障分析[C].江苏省电机工程学会2010年学术年会暨第四届电力安全论坛论文集, 2010:315-317.
- [6]冉启鹏,代正元.电磁式电压互感器高压侧中性点加装消谐器后引起绝缘击穿的原因分析[J].变压器,2011,48(5):42-44.