

电容式电压互感器谐波测量误差研究

柳永妍¹, 乐 健¹, 李琼林², 余晓鹏², 刘开培¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网河南省电力公司科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 依据电容式电压互感器(CVT)的结构和工作原理,建立了采用谐振型和速饱和型阻尼器的 CVT 谐波等效电路,给出了等效电路中元件参数的计算方法;通过对等效电路的分析,研究了 CVT 固有的多种谐振模式,给出了谐振频率的计算方法,得到 CVT 谐波测量误差的来源;对比分析了不同类型阻尼器对 CVT 测量误差的影响;仿真和物理实验验证了所得结论的正确性和有效性,为进一步量化分析 CVT 的谐波测量误差提供了理论依据。

关键词: 电容式电压互感器; 谐波; 测量误差; 阻尼器; 谐波等效电路; 谐振

中图分类号: TM 451

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.027

0 引言

电容式电压互感器(CVT)具有体积小、重量轻、维护工作量少、电场强度裕度大等优点,被广泛应用于中性点直接接地高压系统的电压测量、高频通信和继电保护中^[1-3]。国外 72.5 kV 及以上电压等级的电压互感器几乎全部采用 CVT,且已有较长时间的运行经验,我国 35 kV 及以上电压等级的发电厂升压站和变电站母线以及出线均将逐步采用 CVT。

目前对 CVT 的相关研究多集中于对其稳态测量精度和暂态过程的分析^[4-6]。随着电力系统谐波污染的日益严重,CVT 在谐波条件下的测量精度问题引起了越来越多的关注^[7]。相关标准^[8]中明确规定“电容式电压互感器不能用于谐波测量”。文献^[9-10]对利用 CVT 进行谐波电压测量存在的问题进行了讨论,定性分析了引起测量误差的机理。文献^[11]对 CVT 的谐波测量精度进行了理论研究,建立了谐波等效电路并给出了参数计算方法,研究了二次侧负载和阻尼器对 CVT 谐波测量精度的影响,但文中结论仅适用于采用谐振型阻尼器的 CVT,缺少对应用逐步增多的采用速饱和型阻尼器 CVT^[12]的谐波测量误差的研究。文献^[13]从系统传递函数角度分析了杂散电容和耦合电容对 CVT 测量误差的影响。文献^[14]考虑杂散电容对 35 kV 速饱和型阻尼器的谐波传递特性进行了实验分析。文献^[15]通过仿真分析确定 CVT 测量误差主要来源于 CVT 的励磁阻抗和电容分压器额定电容,但未能明确找出影响 CVT 测量误差的全部因素。文献^[16]在电能质量扰动装置的基础上,对含谐振型阻尼器和速饱和型阻尼器的 CVT 谐波测量误差进行分析,考虑杂

散电容对 CVT 幅频曲线的影响,但文中并未涉及各误差峰值点来源的定量分析。文献^[17]给出了含谐振型阻尼器 CVT 的谐波等效模型,并基于该模型给出了 CVT 谐波测量误差的定义,但未对误差产生机理进行深入分析。文献^[18]对 CVT 谐波测量误差进行了试验研究,分析了其内部的谐振模式。

综上所述,目前对 CVT 谐波条件下测量误差的分析和研究中,定性的分析较多,对谐波条件下 CVT 测量误差产生机理的研究尚不深入,因而不利于进一步量化分析 CVT 的谐波测量误差。

本文就 CVT 谐波测量误差来源的机理展开研究。首先分别建立了采用速饱和型和諧振型阻尼器 CVT 的谐波等效电路,给出了等效电路元件参数的获取方法;在对谐波等效电路进行等效变换的基础上,分析了等效电路中存在的多种谐振模式,给出了谐振频率的计算方法,为分析谐波测量误差的来源提供了依据;仿真和物理实验验证了所得结论的正确性和有效性。

1 CVT 谐波等效电路

CVT 的系统结构如图 1 所示,其主要由电容分压器(包括高压电容 C_1 和中压电容 C_2)、电磁单元(包括补偿电抗器 L_c 、中间变压器 T 和阻尼器 Z_t ,其中阻尼器可接入任一个二次绕组)、负载(包括测量

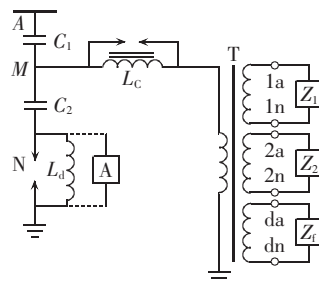


图 1 CVT 系统的结构

Fig.1 Structure of CVT system

收稿日期:2016-05-11;修回日期:2016-12-30

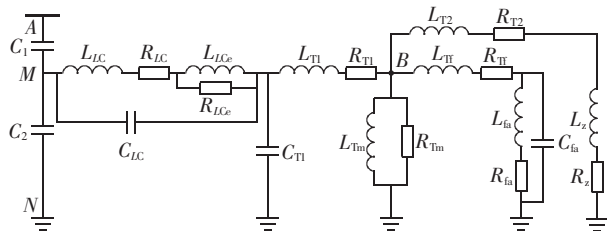
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307127)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307127)

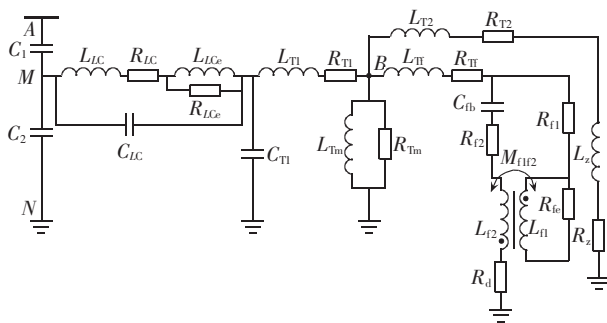
绕组负载 Z_1 和保护绕组负载 Z_2) 以及保护间隙 N 、避雷器 A 和载频漏线圈 L_d 组成。

工频条件下补偿电抗器与分压电容器发生串联谐振,使得 CVT 在工频条件下表现出恒压源形式,二次输出电压不受负载大小的影响。因此,工频条件下的 CVT 等效模型无需考虑补偿电抗器铁芯、中间变压器铁芯、阻尼器内部结构以及各部分杂散电容。

忽略图 1 中载波抽取线圈,并将二次侧参数折算至一次侧,建立 CVT 的谐波等效电路如图 2 所示。



(a) 采用速饱和型阻尼器的 CVT



(b) 采用谐振型阻尼器的 CVT

图 2 CVT 的谐波等效电路

Fig.2 Harmonic equivalent circuits of CVT

图 2 中, C_1 和 C_2 分别为电容分压器的高压和中压电容; L_{1C} 和 R_{1C} 、 L_{1Cg} 和 R_{1Cg} 以及 C_{1C} 分别为补偿电抗器线圈的电感和电阻、铁芯的电感和电阻以及杂散电容; L_{1T} 和 R_{1T} 、 L_{2T} 和 R_{2T} 以及 L_{1T} 和 R_{1T} 分别为中间变压器一次侧、测量和保护用绕组以及接入阻尼器绕组的漏感和电阻,其中测量和保护用绕组由于容量和输出电压一般相同而进行了等效合并; L_{1m} 和 R_{1m} 分别为中间变压器的励磁电感和电阻; L_{1f} 和 R_{1f} 分别为速饱和型阻尼器的电感和电阻; C_{1f} 为速饱和型阻尼器对地杂散电容; R_{1f} 、 R_{2f} 为阻尼电路中变压器绕组电阻; R_{1f} 为阻尼电路中变压器的铁芯损耗电阻; L_{1f} 和 L_{2f} 为阻尼电路中变压器绕组的自感; M_{1d2} 为阻尼器、变压器绕组之间的互感; C_{1b} 为阻尼电路的电感; R_{1d} 为阻尼电路的非线性电阻; L_{1z} 和 R_{1z} 分别为测量和保护用绕组等效负载的电感和电阻。由于中间变压器二次侧绕组匝数少,模型中忽略了二次侧各绕组的对地杂散电容。

图 2 所示等效模型将 CVT 视为补偿电抗器、中间变压器、阻尼器和负载 4 个部分,考虑补偿电抗器

自身的杂散电容和阻尼器内部电路结构,依据 CVT 各组成部分的物理结构建立等效电路,该模型适用于稳态条件下 CVT 内部谐振点的分析计算。

2 谐波等效电路中元件的参数计算

2.1 补偿电抗器参数计算

补偿电抗器谐波模型的元件参数可通过对补偿电抗器进行相应的实验得到,参数测量等效电路如图 3 所示。

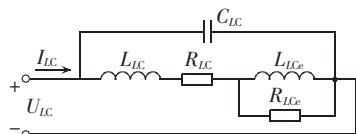


图 3 补偿电抗器元件参数测量等效电路

Fig.3 Equivalent circuit for measuring component parameters of compensation reactor

补偿电抗器绕组电阻 R_{1C} 可通过注入直流电流,测量电压 U_{1C} 后计算得到,该直流电流的大小等于中间变压器一次绕组的额定电流。

分别向补偿电抗器注入有效值为中间变压器一次绕组的额定电流、频率为 50 Hz 和 100 Hz 的交流电流,记录 2 次测试得到的电流、电压有效值和有功损耗。则补偿电抗器铁芯的损耗等效电阻 R_{1Cg} 可由式(1)计算。

$$R_{1Cg} = P_{1C(50)} / I_{1C(50)}^2 - R_{1C} \quad (1)$$

其中, $P_{1C(50)}$ 和 $I_{1C(50)}$ 分别为注入频率为 50 Hz 电流时测量得到的补偿电抗器的有功损耗和电流有效值。

在得到注入频率为 50 Hz 和 100 Hz 电流时的电压和电流有效值后,可分别计算出 L_{1C} 和 L_{1Cg} 的值。

利用 Ansoft 软件根据补偿电抗器的实际参数建立模型,选择材料属性并指定边界条件后对杂散电容 C_{1C} 进行求解,得到其预估值。

根据 C_{1C} 的预估值和其他已知补偿电抗器元件参数计算出谐振频率 f_{1C} 。在中间变压器二次侧开路时,注入频率为 f_{1Cg} ($f_{1Cg} > 10f_{1C}$) 的电流,根据测量得到的电压和电流有效值可以得到:

$$C_{1C} = \frac{I_{1Cg}}{2\pi f_{1Cg} U_{1Cg}} \quad (2)$$

其中, U_{1Cg} 和 I_{1Cg} 分别为频率是 f_{1Cg} 的电压和电流有效值。

2.2 中间变压器参数计算

中间变压器各绕组的漏感和绕组损耗电阻,以及励磁电感和铁芯损耗电阻可通过厂家给出的数据得到,也可通过常规的开路和短路实验得出。

同样在 Ansoft 软件中建立中间变压器的模型,对杂散电容 C_{1T} 、 C_{1T2} 和 C_{1Tf} 进行求解,得到其预估值。

根据 C_{1T} 的预估值和励磁电感 L_{1m} 计算谐振频率 f_{1T} ,在中间变压器二次侧开路时,注入频率为 f_{1T}

($f_{T1r} > 10f_{T1}$) 的电流,类似式(2)即可得到杂散电容 C_{T1} 的值。

将中间变压器二次侧短路,等效电路如图 4 所示。

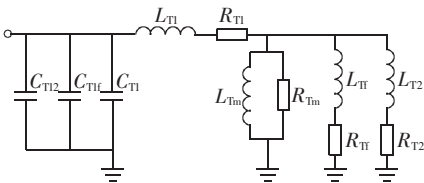


图 4 中间变压器元件参数测量等效电路

Fig.4 Equivalent circuit for measuring component parameters of intermediate transformer

同样利用杂散电容 C_{T1r} 、 C_{T12} 的预估值和其他已知元件参数,可计算图 4 所示电路的谐振频率 f_{T2} 。注入频率为 f_{T2r} ($f_{T2r} > 10f_{T2}$) 的电流,根据测量得到的一次绕组电压和电流有效值,类似式(2)即可得到杂散电容 C_{T1r} 和 C_{T12} 的和,其中 C_{T1r} 取该和值的 1/3, C_{T12} 取该和值的 2/3。

2.3 阻尼器参数计算

速饱和型阻尼器在正常运行条件下电抗器的电感值很大,通过阻尼器的电流仅为几十 mA,其功率损耗及储能均很小。阻尼器电感 L_{in} 和电阻 R_{in} 可根据制造厂家给出的数据,并结合中间变压器一次侧绕组对剩余绕组的开路变比 k_f 得到。

谐振型阻尼器中,阻尼电路中变压器绕组的电阻 R_{f1} 、 R_{f2} 可以通过四点测量法得到,即对单个线圈注入与中间变压器一次侧额定电流值相同的直流电流。阻尼器电容 C_{in} 的值可以从铭牌得到。阻尼电路中变压器铁芯损耗电阻 R_{fe} 和变压器绕组的自感 L_{f1} 、 L_{f2} 的值可分别根据常规的短路、开路实验数据计算得到。

2.4 等效负载参数计算

图 2 中将保护和测量用绕组负载进行了合并,则等效负载的电阻和电感的计算式分别为:

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{U_{zN}^2}{\eta S_{zN}} k_z^2 \cos \varphi \tag{3}$$

$$L_z = \frac{1}{2} \frac{1}{2 \pi f_1} \frac{U_{zN}^2}{\eta S_{zN}} k_z^2 \sin \varphi \tag{4}$$

其中, U_{zN} 为保护和测量用绕组二次侧额定电压,一般为 $100/\sqrt{3}$ V; S_{zN} 为这 2 个绕组的额定容量,一般为 $100 \text{ V} \cdot \text{A}$; η 为这 2 个绕组的负载率; φ 为负载功率因数角,一般取功率因数 0.8 滞后或 1; f_1 为工频频率 (50 Hz); k_z 为中间变压器一次侧绕组对这 2 个绕组的开路变比。

2 种型号分别采用速饱和型和谐振型阻尼器的 400 kV CVT,谐波等效电路除阻尼器外的参数如下^[6]:分压电容等效电容 C 为 57.18 nF;补偿电抗器绕组电阻 R_{LC} 为 766 Ω ,补偿电抗器铁芯电阻 R_{LCe} 为

9.288 M Ω ,补偿电抗器绕组电感 L_{LC} 为 24.71 H,补偿电抗器铁芯电感 L_{LCe} 为 148.9 H,补偿电抗器铁芯电容 C_{LC} 为 61.17 pF;测量和保护用绕组电阻 R_{T2} 为 1054 Ω ,测量和保护用绕组电感 L_{T2} 为 6.95 H;中间变压器一次侧绕组电阻 R_{T1} 为 1403 Ω ,中间变压器一次侧绕组电感 L_{T1} 为 1.27 H,中间变压器励磁电阻 R_{Tm} 为 1070 Ω ,中间变压器励磁电感 L_{Tm} 为 53 kH,中间变压器一次侧对地杂散电容 C_{T1} 为 267 pF。根据上述参数计算方法得到的阻尼器等效电路参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 速饱和型阻尼器等效电路元件参数

Table 1 Component parameters of equivalent circuit of instant-saturation-type damper

元件	参数
阻尼器绕组漏抗电阻 R_{Tf}/Ω	5904
阻尼器绕组漏抗电感 L_{Tf}/H	6.18
阻尼电路对地杂散电容 C_{in}/pF	30
阻尼电路的变压器绕组电阻 R_{in}/Ω	2725
阻尼电路变压器绕组自感 L_{in}/H	3002

表 2 谐振型阻尼器等效电路元件参数

Table 2 Component parameters of equivalent circuit of resonance-type damper

元件	参数
阻尼器绕组漏抗电阻 R_{Tf}/Ω	5904
阻尼器绕组漏抗电感 L_{Tf}/H	6.18
阻尼电路电容 C_{in}/nF	15.4
阻尼电路的变压器绕组电阻 R_{f1}/Ω	2731
阻尼电路的变压器绕组电阻 R_{f2}/Ω	240.6
阻尼电路变压器绕组自感 L_{f1}/H	529
阻尼电路变压器绕组自感 L_{f2}/H	5.2
阻尼变压器绕组之间的互感 M_{f1f2}/H	42.3
阻尼电路变压器的铁芯损耗电阻 $R_{\text{fe}}/\text{M}\Omega$	13.8
阻尼电路非线性电阻 R_{d}/Ω	37.5

3 谐波测量误差产生机理分析

CVT 测量的准确性取决于工频条件下补偿电抗器与分压电容器的串联谐振,使得 CVT 在工频条件下展现出恒压源的特性,二次输出电压不受负载的影响。然而,计及 CVT 内部的杂散电容、中间变压器和阻尼器,在谐波情况下将可能出现谐振导致 CVT 的测量出现误差。

现对采用速饱和型阻尼器和谐振型阻尼器的 2 种 CVT 等效电路进行分析,确定引起谐波测量误差的谐振点。

3.1 采用速饱和型阻尼器的 CVT

对图 2(a)所示采用速饱和型阻尼器的 CVT 等效模型进行分析,获得 3 组谐振电路如图 5 所示。

图 5 中 $C = C_1 + C_2$ 为分压电容器的戴维南等效电容。根据图 5(a)所示谐振电路及相关元件参数,可计算得到其谐振频率为:

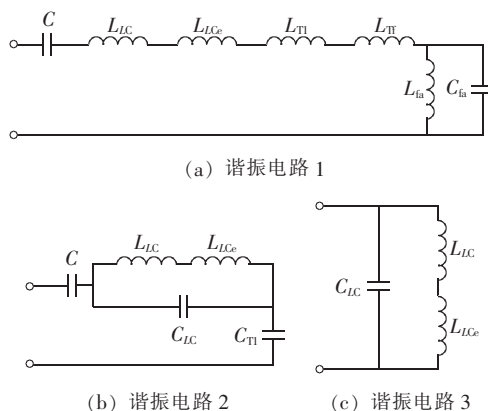


图 5 采用速饱和型阻尼器的 CVT 谐振电路

Fig.5 Resonant circuits of CVT with instant-saturation-type damper

$$f_1 = \frac{\omega}{2\pi} = 11.8(\text{Hz})$$

$$X_{C1} = \frac{1}{57.18 \times 10^{-9} \times \omega} (\Omega)$$

$$X_{L1} = \frac{3000 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 9 \times 10^{-8}} + 181.06 (\Omega)$$

其中, ω 为谐振点的角频率(rad/s)。

该谐振为串联谐振,由分压电容器等效电容、补偿电抗器线圈和铁芯电感以及阻尼器共同引起。

根据图 5(b)所示谐振电路及相关元件参数,可计算得到其谐振频率为:

$$f_2 = \frac{\omega}{2\pi} = 668(\text{Hz})$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2.6576 \times 10^{-10} \times \omega} (\Omega)$$

$$X_{L2} = \frac{173.61 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 1.06197 \times 10^{-8}} (\Omega)$$

该谐振为串联谐振,由分压电容器等效电容、补偿电抗器线圈和铁芯电感与其杂散电容和中间变压器一次侧对地杂散电容共同引起。

根据图 5(c)所示谐振电路及相关元件参数,可计算得到其谐振频率为:

$$f_3 = \frac{\omega}{2\pi} = 1544.4(\text{Hz})$$

$$X_{C3} = \frac{1}{61.17 \times 10^{-12} \times \omega} (\Omega)$$

$$X_{L3} = 173.61 \times \omega (\Omega)$$

该谐振为并联谐振,由补偿电抗器线圈和铁芯电感与其他杂散电容共同引起。

3.2 采用谐振型阻尼器的 CVT

对于图 2(b)所示采用谐振型阻尼器的 CVT 等效模型而言,其内部含有耦合电路,对耦合电路进行解耦和简化后可得等效电路如图 6 所示。

对图 6 所示电路进行分析,获得 5 组谐振电路如图 7 所示。

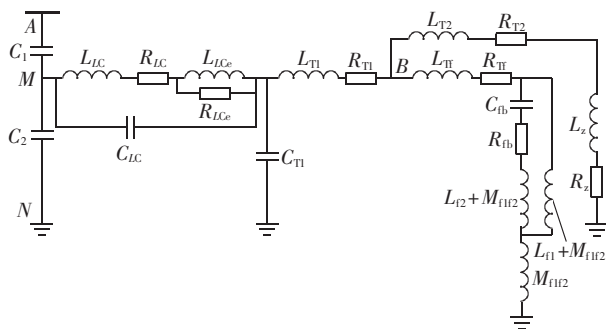
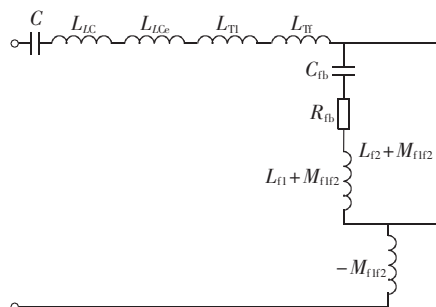
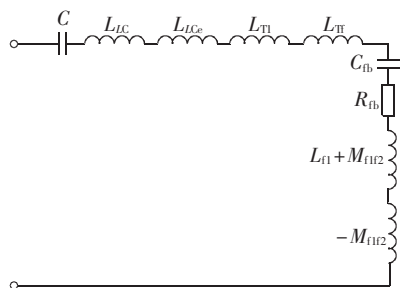


图 6 简化的采用谐振型阻尼器的 CVT 等效电路

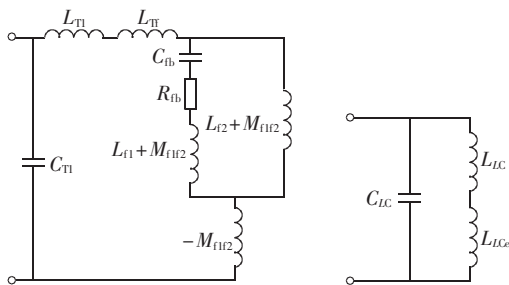
Fig.6 Simplified equivalent circuit of CVT with resonance-type damper



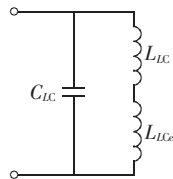
(a) 谐振电路 1



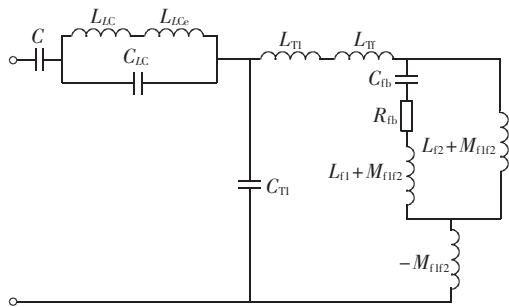
(b) 谐振电路 2



(c) 谐振电路 3



(d) 谐振电路 4



(e) 谐振电路 5

图 7 采用谐振型阻尼器的 CVT 谐振电路

Fig.7 Resonant circuits of CVT with resonance-type damper

根据图 7(a)所示谐振电路及相关元件参数,可计算得到其谐振频率为:

$$f_1 = \frac{\omega}{2\pi} = 22.96(\text{Hz})$$

$$X_{L1} = \frac{573.1 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 9.52952 \times 10^{-6}} + \omega \times 138.76(\Omega)$$

$$X_{C1} = \frac{\omega^3 \times 4.179 \times 10^{-4}}{1 - \omega^2 \times 9.52952 \times 10^{-6}} \frac{1}{\omega \times 57.18 \times 10^{-9}}(\Omega)$$

该谐振为串联谐振,由 CVT 的分压电容器等效电容、补偿电抗器和阻尼器共同引起。

根据图 7(b)所示谐振电路及参数,可计算得到其谐振频率为:

$$f_2 = \frac{\omega}{2\pi} = 105.88(\text{Hz})$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega \times 12.13 \times 10^{-9}}(\Omega)$$

$$X_{L2} = 186.26 \times \omega(\Omega)$$

该谐振为串联谐振,由 CVT 的分压电容器等效电容、补偿电抗器和阻尼器一次侧共同引起。

根据图 7(c)所示谐振电路及参数,可计算得到其谐振频率为:

$$f_3 = \frac{\omega}{2\pi} = 398.46(\text{Hz})$$

$$X_{L3} = \frac{536.45 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 9.52952 \times 10^{-6} + \omega^4 \times 2.29076 \times 10^{-14}}(\Omega)$$

$$X_{C3} = \frac{\omega^3 \times 8.579623 \times 10^{-5}}{1 - \omega^2 \times 9.52952 \times 10^{-6} + \omega^4 \times 2.29076 \times 10^{-14}}(\Omega)$$

该谐振为并联谐振,由中间变压器一次侧对地杂散电容和阻尼器共同引起。

由图 7(d)所示电路及参数,可得其谐振频率为:

$$f_4 = \frac{\omega}{2\pi} = 1544.4(\text{Hz})$$

$$X_{C4} = \frac{1}{61.17 \times 10^{-12} \times \omega}(\Omega)$$

$$X_{L4} = 173.61 \times \omega(\Omega)$$

该谐振为并联谐振,由补偿电抗器线圈和铁芯电感及其杂散电容共同引起。

由图 7(e)所示电路及参数,可得其谐振频率为:

$$f_5 = \frac{\omega}{2\pi} = 3235.57(\text{Hz})$$

$$X_{L5} = \frac{536.45 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 9.52952 \times 10^{-6} + \omega^4 \times 2.29076 \times 10^{-14}} + \frac{173.61 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 1.06197 \times 10^{-8}}(\Omega)$$

$$X_{C5} = \frac{\omega^3 \times 8.579623 \times 10^{-5}}{1 - \omega^2 \times 9.52952 \times 10^{-6} + \omega^4 \times 2.29076 \times 10^{-14}} + \frac{1}{\omega \times 57.18 \times 10^{-9}}(\Omega)$$

该谐振为串联谐振,由 CVT 的分压电容器等效电容、补偿电抗器、中间变压器一次侧对地杂散电容

和阻尼器共同引起。

3.3 谐振模式的分析与比较

由以上分析可知,由于频率的变化以及杂散电容等的存在,谐波情况下 CVT 存在多种谐振电路,造成二次侧输出无法反映一次侧谐波的真实状况,出现了较大的误差。同时,由于存在串联和并联谐振,使得二次侧输出的幅值和相角较真实值偏大或偏小。

对采用 2 种阻尼器的 CVT,由图 5(c)和图 7(d)可知,这 2 个并联谐振电路由补偿电抗器线圈和铁芯电感与其他杂散电容构成,与阻尼电路无关。由上述分析可知谐振频率约为 1550 Hz。2 种 CVT 都存在阻尼器与分压电容器等效电容和补偿电抗器构成的串联谐振电路,由于阻尼器参数的不同,采用速饱和型阻尼器的 CVT 的谐振频率为 12 Hz,而采用谐振型阻尼器的 CVT 的谐振频率为 23 Hz。由于这 2 个谐振频率均低于工频频率,对于谐波测量没有影响。

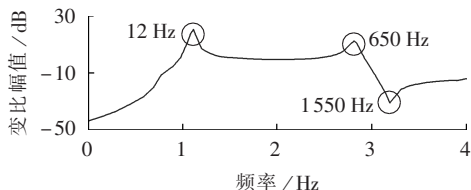
采用速饱和型阻尼器的 CVT 存在如图 5(b)所示的由分压电容器等效电容、补偿电抗器和中间变压器一次侧对地杂散电容构成的 650 Hz 串联谐振电路,由于在该频率下中间变压器一次侧对地杂散电容阻抗远小于阻尼器阻抗,可忽略阻尼器的影响。对于采用谐振型阻尼器的 CVT 而言,由于阻尼器的存在使中间变压器和阻尼器组成的电路呈电感性,不能忽略阻尼器对该谐振模式的影响。因此,在高频条件下阻尼器和中间变压器一次侧对地杂散电容并联后与分压电容器和补偿电抗器构成 3200 Hz 的串联谐振电路。由采用速饱和型阻尼器的 CVT 的 3 个谐振频率的计算结果可以看出,谐振频率的计算仅需考虑分压电容器等效电容、补偿电抗器和中间变压器一次侧对地杂散电容,无需考虑阻尼器。

对采用谐振型阻尼器的 CVT 等效电路,存在如图 7(b)所示谐振频率为 110 Hz,由阻尼器一次侧与分压电容器等效电容、补偿电抗器构成的串联谐振电路。对于等效电路相对复杂的谐振型阻尼器,CVT 内部的并联谐振电路不可能只有一条。同时阻尼器与中间变压器一次侧对地杂散电容构成如图 7(c)所示的 400 Hz 并联谐振电路。由以上分析可以看出,采用谐振型阻尼器的 CVT 的阻尼器对谐振频率的求解影响很大。

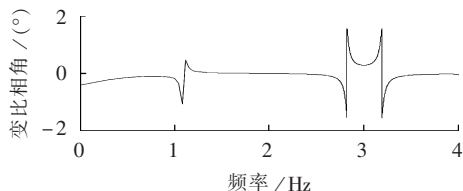
对比分析采用 2 种阻尼器的 CVT 的谐振点可明显看出,采用速饱和型阻尼器的 CVT 的谐振频率的分析比采用谐振型阻尼器的 CVT 的更为简单,同时速饱和型阻尼器对谐振频率的影响远小于谐振型阻尼器。

4 仿真验证

利用 PSCAD 建立如图 2 所示采用 2 种阻尼器的 CVT 的仿真模型,其变比-频率响应特性幅频曲线与相频曲线分别如图 8、9 所示。图中横、纵坐标均已取为对数。

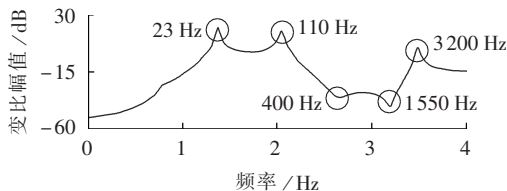


(a) 幅频响应曲线

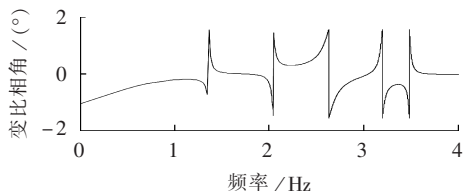


(b) 相频响应曲线

图 8 采用速饱和型阻尼器的 CVT 响应特性曲线
Fig.8 Response characteristic curves of CVT with instant-saturation-type damper



(a) 幅频响应曲线



(b) 相频响应曲线

图 9 采用谐振型阻尼器的 CVT 响应特性曲线
Fig.9 Response characteristic curves of CVT with resonance-type damper

由图 8 可以看出,在 12 Hz、650 Hz 和 1550 Hz 处变比幅值存在局部极值,变比相角发生突变,说明电路发生谐振,变比幅值极值处和变比相角突变处的频率与理论分析获得的谐振点 11.8 Hz、668 Hz 和 1 544.4 Hz 基本一致。同时,11.8 Hz 和 668 Hz 处发生串联谐振,二次侧测量值较实际值偏大,相角由负突变为正;1 544.4 Hz 处发生并联谐振,二次侧测量值较实际值偏小,相角由正突变为负。

由图 9 可以看出,在 23 Hz、110 Hz、400 Hz、1550 Hz 和 3 200 Hz 处变比幅值存在局部极值,变比相角发生突变,说明电路发生谐振,变比幅值极值处和相角

突变点的频率与理论分析获得的谐振点 22.96 Hz、105.88 Hz、398.46 Hz、1 544.4 Hz 和 3 235.57 Hz 基本一致。同时,22.96 Hz、105.88 Hz、和 3 235.57 Hz 处发生串联谐振;398.46 Hz 和 1 544.4 Hz 处发生并联谐振。

对比采用 2 种阻尼器的 CVT 的变比响应特性曲线还可以看出,采用谐振型阻尼器的 CVT 的应用带宽为 43~60 Hz,远小于采用速饱和型阻尼器的 CVT 的应用带宽 37~240 Hz。说明采用谐振型阻尼器的 CVT 更不适用于谐波测量场合。

5 实验验证

CVT 谐波测量误差的实验以一台大功率 10 kV (线电压)三相谐波电压源装置通过升压变压器升压至 35 kV,实验过程中控制谐波功率发生器产生额定基波电压,并分别叠加 2~31 次的 1 kV (线电压)谐波电压,相应的实验原理接线如图 10 所示。

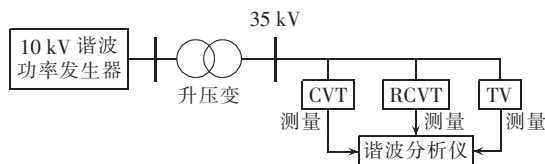


图 10 CVT 谐波测量误差测试试验接线图
Fig.10 Wiring diagram for CVT harmonic measurement error experiment

图 10 中,升压变 35 kV 侧的一相并联了一台采用谐振型阻尼器的试品 CVT、一台用作标准测量装置的阻容式电压互感器(RCVT)和一台试品电磁式电压互感器(TV),实验的目的是同时对 CVT 和 TV 的谐波测量误差进行测试。二次侧输出同时接入一台电能质量分析仪,以 RCVT 的输出作为基准,同时对 CVT 和 TV 的谐波测量误差进行分析。35 kV CVT 等效电路的元件参数如下:电容分压器等效电容为 57.18 nF;补偿电抗器绕组电阻为 766 Ω,补偿电抗器铁芯电阻为 9.288 MΩ,补偿电抗器绕组电感为 14.7 H,补偿电抗器铁芯电感为 109.4 H,补偿电抗器铁芯电容为 500 pF;测量与保护用绕组电阻为 1054 Ω,测量与保护用绕组电感为 6.95 H;中间变压器一次侧绕组电阻为 1 403 Ω,中间变压器一次侧绕组电感为 1.27 H,中间变压器励磁电阻为 10.7 MΩ,中间变压器励磁电感为 53 kH,中间变压器一次侧对地杂散电容为 240 pF;阻尼器绕组电阻为 5 Ω,阻尼器绕组电感为 4.5 H。

通过计算获得 35 kV 的 CVT 存在 3 个谐振电路,其谐振频率分别为:

$$f_1=\frac{\omega}{2\pi}=2.89(\text{Hz})$$

$$X_{L1}=53\,125.37\times\omega(\Omega)$$

$$X_{C1} = \frac{1}{57.18 \times 10^{-9} \times \omega} (\Omega)$$

$$f_2 = \frac{\omega}{2\pi} = 525.55 (\text{Hz})$$

$$X_{L2} = \frac{124.1 \times \omega}{1 - \omega^2 \times 6.205 \times 10^{-8}} (\Omega)$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega \times 2.39 \times 10^{-10}} (\Omega)$$

$$f_3 = \frac{\omega}{2\pi} = 638.92 (\text{Hz})$$

$$X_{L3} = 124.1 \times \omega (\Omega)$$

$$X_{C3} = \frac{1}{500 \times 10^{-12} \times \omega} (\Omega)$$

实验所得到的谐波测量误差如图 11 所示。

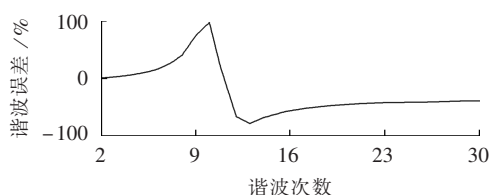


图 11 CVT 谐波测量误差

Fig.11 Harmonic measurement error of CVT

由图 11 可以看出,测量误差在 10 次谐波和 13 次谐波时达到局部极值,即表明 CVT 在约 500 Hz 和 650 Hz 时电路发生谐振。因 2.89 Hz 远小于工频频率而未进行相应的实验。实验结果与计算所得的谐振频率 525.55 Hz 和 638.92 Hz 基本相符,验证了谐振电路分析的正确性。

6 结论

本文通过建立采用不同阻尼器的 CVT 的谐波等效电路,并进行谐振电路分析,通过计算谐振点频率来分析 CVT 的变比幅频特性,得出如下主要结论。

(1)谐波频率下 CVT 测量误差主要来源于内部电路的谐振,通过对 CVT 谐波等效电路的分析,计算了采用不同阻尼器的 CVT 的谐振频率,分析了影响该谐振频率的元件,利用 PSCAD 仿真和物理实验进行了验证。

(2)通过对比采用速饱和型阻尼器和采用谐振型阻尼器的 CVT 的谐振频率可以发现,前者带宽要大于后者,且前者谐振频率的求解基本与阻尼器无关,而后者谐振频率的求解受阻尼器影响很大。因此采用速饱和型阻尼器的 CVT 较采用谐振型阻尼器的 CVT 更适宜应用于谐波电压测量。

参考文献:

[1] 王晓琪,叶国雄,郭克勤,等. 1000 kV 柱式 CVT 的设计要点及检测[J]. 高电压技术,2007,33(11):37-42.

WANG Xiaoqi, YE Guoxiong, GUO Keqin, et al. Design points and test of 1000 kV column-type capacitive voltage transformer [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 37-42.

[2] 孙建涛,文习山,王晓琪,等. 绝缘在线监测中电容式电压互感器的误差校正[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):61-65.

SUN Jiantao, WEN Xishan, WANG Xiaoqi, et al. Error correction of capacitor voltage transformers for insulation on-line monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 61-65.

[3] 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.

[4] 文明浩. 基于虚拟电容式电压互感器的能量平衡保护[J]. 中国电机工程学报,2007,27(24):11-16.

WEN Minghao. A new protection scheme based on energy balance with virtual CVT[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 11-16.

[5] 李一泉,何奔腾. 基于 Prony 算法的电容式电压互感器暂态基波辨识[J]. 中国电机工程学报,2005,25(14):30-34.

LI Yiquan, HE Benteng. Identification of fundametal wave in CVT transient process based on expand Prony algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 30-34.

[6] VERMEULEN H J, DANN L R, VAN ROOIJEN J. Equivalent circuit modeling of a capacitive voltage transformer for power system harmonic frequencies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1743-1749.

[7] 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(15A):1-9.

WANG Xin, SHEN Xin, CAO Min, et al. Research on capacitive voltage transformer harmonic measurement-features [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15A): 1-9.

[8] IRAVANI M R, WANG X, POLISHCHUK I, et al. Digital time-domain investigation of transient behaviour of coupling capacitor voltage transformer [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2): 622-629.

[9] KEZUNOVIC M, ABUR A, KOJOVIC L J, et al. DYNA-TESET simulator for relay testing part I: design characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1423-1429.

[10] KEZUNOVIC M, ABUR A, KOJOVIC L J, et al. DYNA-TESET simulator for relay testing part I: performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1097-1103.

[11] KOJOVIC L J, KEZUNOVIC M, FROMEN C W. A new method for the CCVT performance analysis using field measurements, signal processing and EMTP modeling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1907-1915.

[12] SELJESETH H, SAETHRE E A, OHNSTAD T, et al. Voltage transformer frequency response. Measuring harmonics in Norwegian 300 kV and 132 kV power systems [C]//The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece: IEEE, 1998: 820-824.

[13] 刘观起,李琳. 谐波对电容式电压互感器运行特性的影响研究 [J]. 黑龙江电力, 2014, 36(2): 100-103.

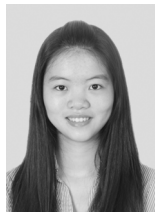
LIU Guanqi, LI Lin. Research on the influence of harmonic on

- the operation characteristics of capacitor voltage transformers [J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(2): 100-103.
- [14] 邵洪亮, 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 transformers [J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3125-3130.
- [15] 孟庆亮, 赵伟. 谐波条件下电容式电压互感器测量影响因素分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 8-12.
- MENG Qingliang, ZHAO Wei. Analysis about influencing factors of capacitor voltage transformer measurement in the harmonic conditions [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 8-12.
- [16] 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]. 高电压技术, 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.
- [17] 杨金涛, 乐健, 汪妮, 等. 谐波背景下电能计量系统的计量误差分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 144-150.
- YANG Jintao, LE Jian, WANG Ni, et al. Analysis of measurement error for electric energy metering system under harmonic conditions [J]. Automation of Electric Power Systems,

2015, 39(13): 144-150.

- [18] 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 capacity voltage transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 108-113.

作者简介:



柳永妍

柳永妍(1992—), 女, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量控制技术;

乐健(1975—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为柔性输电技术与电能质量控制技术 (E-mail: lej01@mails.tsinghua.edu.cn);

李琼林(1980—), 男, 湖北英山人, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为电能质量分析与控制、FACTS等;

余晓鹏(1974—), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电网规划和电能质量分析等方面的工作;

刘开培(1962—), 男, 湖北荆门人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力电子技术。

Research on harmonic measurement error of CVT

LIU Yongyan¹, LE Jian¹, LI Qionglin², YU Xiaopeng², LIU Kaipei¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The harmonic equivalent circuit of CVT (Capacitive Voltage Transformer) with resonance-type damper and that of CVT with instant-saturation-type damper are established according to the structure and working principle of CVT and the methods for calculating the component parameters of circuits are presented. The equivalent circuits are analyzed, several inherent resonance modes of CVT are studied, the method for calculating the resonance frequencies is given, and the causes of CVT harmonic measurement error are found. The influence of damper on the error is analyzed and compared between different damper types and the results of simulation and physical experiment show the correctness and effectiveness of the obtained conclusions, which provides the theoretical basis for the further quantitative analysis of CVT harmonic measurement error.

Key words: capacitive voltage transformer; harmonic; measurement error; damper; harmonic equivalent circuits; resonance