

基于多次谐波注入的 CVT 宽频传输特性测试研究

黄之笛¹, 武霁阳¹, 彭光强¹, 刘博涵², 韩金刚²

(1. 中国南方电网超高压输电公司电力科研院, 广州 510663; 2. 上海海事大学, 上海 201306)

摘要: 电能质量一直是用户和电力企业关注的热点。随着电网中设备注入谐波的增多, 电能质量问题愈发受到重视。电容式电压互感器(CVT)因其无法在非工频条件下准确传递谐波信号, 限制了对谐波的有效检测。针对生产厂家 CVT 型号众多, 如何提高 CVT 试品测试效率的问题, 本文提出了一种改进的 CVT 宽频传输特性测试方法, 通过一次性向 CVT 注入多次谐波的方式, 仅需较少的试验次数即可实现所需频率范围内传递函数的测试, 同时通过向 CVT 中压端注入多次谐波电压进行测试, 降低了对谐波源输出基波电压的幅值要求。

关键词: 电容式电压互感器(CVT); 多谐波注入; 宽频传输特性

Research on Wideband Harmonic Transmission Characteristics Test of CVT Based on Multi-harmonic Injection

HUANG Zhidi¹, WU Jiyang¹, PENG Guangqiang¹, LIU Bohan², HAN Jingang²

(1. Electric Power Research Institute, EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Power quality has always been a hot topic of concern for users and power enterprises. With the increase of injection harmonics into equipment in the power grid, the issue of power quality has received increasing attention. Capacitor voltage transformer (CVT) is limited in its effective detection of harmonics due to its inability to accurately transmit harmonic signals under non power frequency conditions. In response to the issue on how to improve the test efficiency of CVT sample for manufacturers with numerous CVT models, a kind of improved CVT wideband transmission characteristic testing method is proposed in this paper. By injecting multiple harmonics into the CVT at once, the required frequency range transfer function can be tested with fewer test cycles. At the same time, by injecting multiple harmonic voltages into the medium voltage end of the CVT for testing, the amplitude requirement for the fundamental voltage output by the harmonic source has been reduced.

Keywords: capacitor voltage transformers (CVT); multiple harmonic injection; wideband transmission characteristics

0 引言

在“双碳”目标的背景下, 随着可再生能源和电力电子变流技术的快速发展, 新能源开发规模不断增大, 电力系统引入了大量新型电力电子装备, 包括大规模接入电网的风电机组和光伏发电机组等, 给电力系统带来不容忽视的背景谐波问题^[1-3], 电网呈现明显的高渗透率、高电力电子化特征, 电网谐波问题不再是负荷侧的局部问题。新能源电网中的谐波将引起电力电子设备间的谐波振荡, 导致电

力电子设备或新能源发电并网不稳定甚至失败等。

为了提高电网供电能力与供电质量, 对电网谐波准确监测及管理成为电网电能质量监测亟需解决的问题。目前, 对于高电压等级电网中的电压监测大多数是利用电压互感器完成, 其作用是实现一次系统与二次系统的电气隔离, 并将一次侧高电压转换成二次侧设备运行所需的低电压, 实现电力系统的保护与计量。电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)由于其具有绝缘强度高、防铁磁谐振、性价比高等优点^[4]而广泛应用于 35 kV~1 000 kV

收稿日期: 2024-11-05

基金项目: 南方电网直流输电装备与海底电缆安全运行联合实验室开放基金项目(H20240360)。

电压等级的电力系统中。

由于设计 CVT 时参数是在工频频率下整定的,所以 CVT 对基波电压信号的测量满足要求,但 CVT 中包含的电容、电感等储能元件,其阻抗随着频率变化而变化,非工频条件下 CVT 中的补偿电抗器无法完全补偿或者欠补偿电容分压器^[5],导致谐振状态被破坏,CVT 对非工频谐波信号的变比会随着频率变化而改变,导致二次侧输出电压产生畸变,因此不推荐用 CVT 直接进行谐波监测^[6-7]。

基于 CVT 无法准确传递谐波的特性,科研工作者进行了许多关于 CVT 的研究,一部分研究主要围绕 CVT 谐波检测误差展开^[8-11],研究 CVT 谐波变比与其参数之间的关系;一部分研究围绕 CVT 铁磁谐振现象展开,分析产生铁磁谐振的因素并研究抑制铁磁谐振的方法^[12-15];还有一部分研究则围绕着 CVT 间接测量谐波技术展开,主要包括参数辨识法、末屏测试法、电容电流法、串接电容法等^[16-17]。文献[18-19]对电容电流法进行了详细的介绍与应用,在原理上电容电流法的测量结果只与 CVT 的高压电容器和中压电容器有关,具有良好的测量精度,通过测量结果可以得到 CVT 的谐波传递特性从而实现间接的谐波监测。文献[20]针对 CVT 谐波测量修正方法进行研究,利用粒子群算法结合 CVT 谐波传输特性实现。文献[21]针对扫频法存在的电源功率大、频带受限的问题,提出一种基于时域回归模型的 CVT 传递特性获取方法。

本文改进了适用于 CVT 宽频传输特性测试的测试方法,通过一次注入多次谐波的方式提高测试效率,例如在 CVT 50 Hz~2 500 Hz 的谐波传递特性测试中,通过基波叠加 5 次谐波注入,10 次测试即可满足所需频率范围内频率特性的测试。本方法满足 35 kV 及以上电压等级的 CVT 宽频传输特性的测试,对基于 CVT 的谐波检测有着重要意义。

1 CVT 谐波传递特性测试系统

为了计算从 CVT 一次侧高压端子看到的整体谐波传递特性,必须考虑正常工作条件下高压电容器 C_1 两端施加的电压。考虑到高压电容器是一个在所考虑的频率范围内,内部杂散效应最小的集总器件^[19],其电压可以通过对 CVT 中压单元进行多谐波测试时流过中压电容 C_2 的电流与高压电容 C_1 的容抗计算得出,这一电压值与 CVT 在高压端子处供电时施加的电压完全一致。这表明当在 CVT 中压端子处施加的电压是标称电压时,那么流过 CVT 中压电容 C_2 的电流将是标称电流。对于这个电流,根据高压电容容抗可以计算出对应于此时中压端子电压的一个高压端子电压,这种推理对于任何在中压端子处的施加电压都是有效的。

图 1 所示为 CVT 谐波传递特性测试系统,可以给 CVT 中压单元一次侧注入多谐波电压,实现 CVT 谐波传递特性测试,测试装置主要由上位机、低压谐波源、升压变压器、数据收集装置等组成。

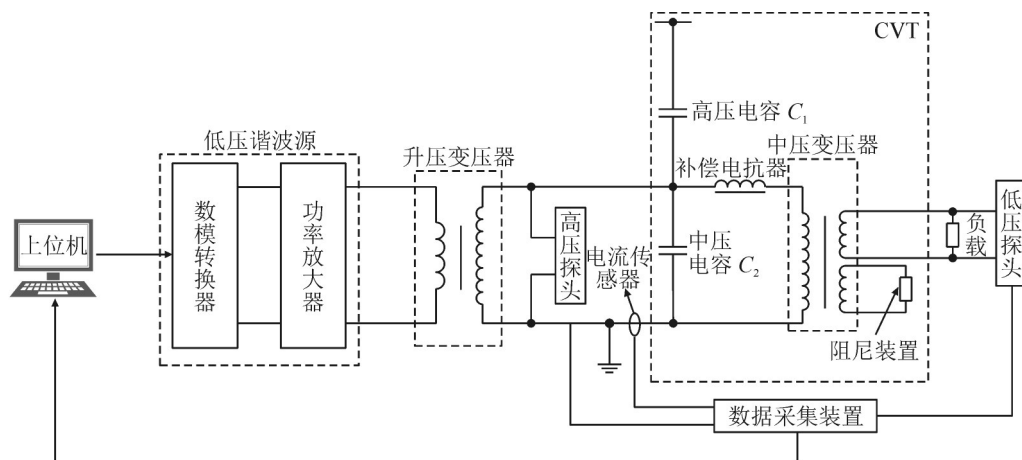


图 1 CVT 谐波传递特性测试系统图

Fig. 1 Test system diagram of harmonic transfer characteristic of CVT

2 谐波传递特性测试方法

2.1 CVT 基本结构与测试方法

CVT 由电容分压器与电磁单元组成,CVT 结构如图 2 所示。电容分压器包括高压电容器 C_1 及中压电容器 C_2 ,电磁单元包括补偿电抗器、中间变压

器、阻尼装置。CVT 在实际运行工况下,CVT 高压端子接电网高压端,电网电压经中压电容 C_2 分压后在 C_2 上的压降一般为十几千伏,该电压作为电磁式变压器的输入端电压,向二次侧测量、保护电路提供低电压信号。在宽频带条件下,正是由于电容和电感特性随频率变化的特性,导致 CVT 的传输误差

增大,其中 CVT 谐波传递特性内部影响因素主要包括补偿电抗器等杂散电容、一次侧绕组对地杂散电容、一次侧与二次侧绕组间耦合电容等^[22],杂散电容参数辨识则可根据 CVT 谐振变化实现^[23];外部影响因素主要包括温度变化以及频率偏移等^[24-28]。

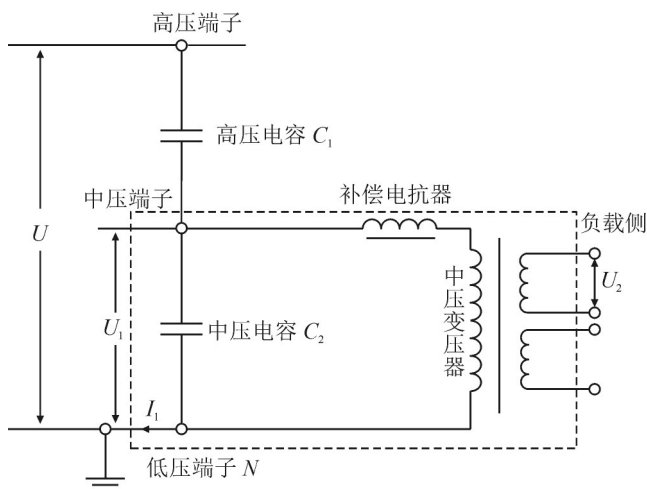


图2 CVT基本结构
Fig. 2 Basic structure of CVT

本测试方案通过给 CVT 中压单元一次侧输入基波与多次谐波叠加后的试验电压,从而模拟 CVT

在高压环境下正常运行时其中压单元所承受的谐波电压工况,根据同步检测得到的中压单元一次侧谐波试验电压 U_1 、谐波试验电流 I_1 ,再根据高压电容计算 CVT 高压端子对地的谐波电压 U ,将其与检测得到的中压单元二次侧谐波电压 U_2 进行比较,并通过计算幅值比和相位差得到 CVT 的谐波传递特性。

高频谐波源系统结构如图3所示,给 CVT 中压单元的施加试验电压时,首先,上位机确定被测装置所需注入的基波电流和谐波电流的幅值及相位,随后这些参数被送入谐波控制器。同时,谐波控制器检测被测装置上的电流,经过快速傅里叶变换(FFT)得到实测电流的谐波幅值及其相位,再与上位机输入的参数比较,然后进行自适应校正。控制后基波、谐波的幅值和相位经过快速傅里叶逆变换(IFFT)转化为时域信号,然后由高速数模转换器变换为模拟信号,该信号输入到功率放大器,再经过一个具有所需带宽和功率的升压变压器,最后输出试验电压达到所需幅值与功率。其中功率放大器本身通过电压和电流的实时控制,保证输出满足要求。

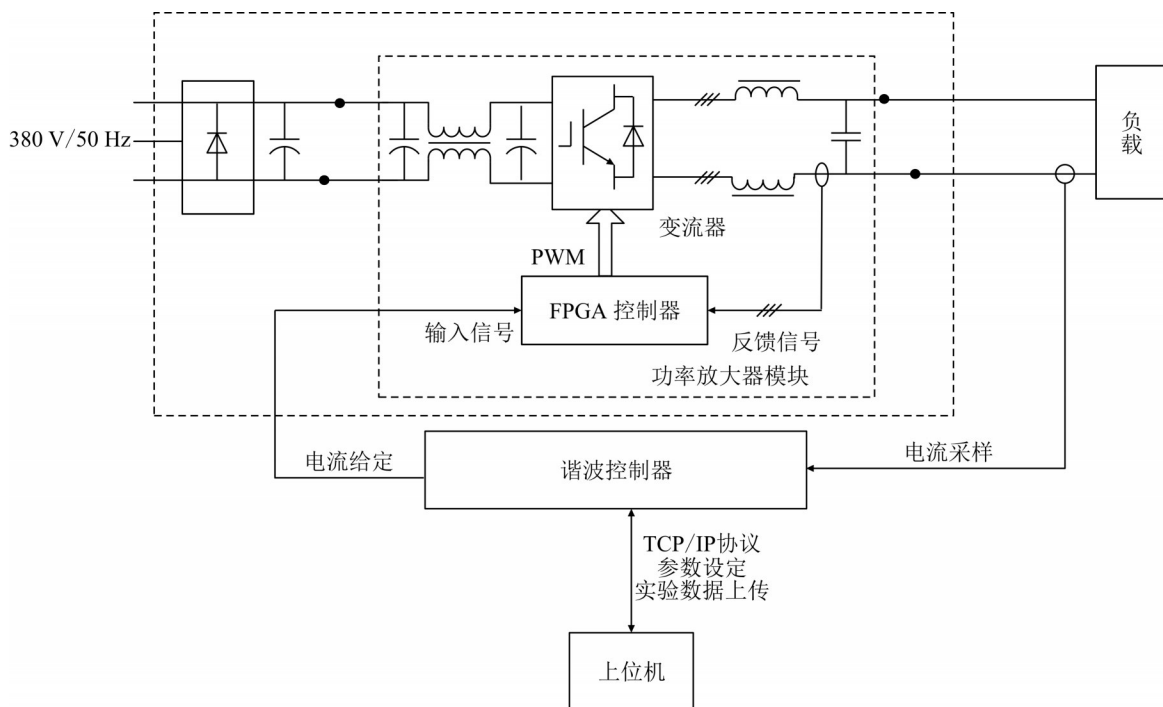


图3 高频谐波源系统结构图
Fig. 3 Structural diagram of high frequency harmonic source system

试验过程中对于 CVT 电压电流的测量,使用具有足够频率响应的高压探头(15 kV)来测量中压电容器 C_2 上的输入电压 U_1 ,通过电流传感器测量流经 CVT 中压电容 C_2 上的电流 I_1 ,通过电压传感器测量 CVT 二次侧负载电压 U_2 ,根据傅里叶变换在

频域内计算得出 CVT 传递函数的频率特性。

2.2 CVT频率响应特性计算

通过对试验过程中收集的数据实施快速傅里叶变换,可以获取各信号的频谱信息,并在频域内进一步计算,从而绘制出 CVT 的幅频特性曲线与相

频特性曲线。

CVT 的幅频特性被定义为输出电压幅度与输入电压幅度的比值,公式为

$$G(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U(j\omega)} \quad (1)$$

式中: $U_2(j\omega)$ 为 CVT 中压单元二次侧输出电压; $U(j\omega)$ 为 CVT 一次侧高压端子对地电压, $U(j\omega)$ 公式为

$$U(j\omega) = U_1(j\omega) + I_1(j\omega) \times X_{C1}(j\omega) \quad (2)$$

式中: $U_1(j\omega)$ 为中压电容 C_2 上电压; $I_1(j\omega)$ 为中压电容 C_2 上电流; $X_{C1}(j\omega)$ 为 C_1 在对应频率下的容抗,高压电容 C_1 的容值则可以通过测量获得。

CVT 的相频特性曲线通过各频点下输出谐波电压与输入谐波电压的相位差得到。

3 实际物理试验

3.1 多次谐波注入

谐波源使用 380 V 交流作为输入电源,具备同

时输出工频电压与 2~50 次单次或多次不同含量谐波电压的能力,满足 $0.2 \mu\text{F}$ 的带载能力。输出工频电压幅值为 5 kV~12 kV 连续可调,谐波输出电压幅值为 0.2 kV~0.5 kV 连续可调,且谐波电压相对于工频电压波形的相位可分别独立控制。试验装置容量不小于 20 kW,并满足在 50 次谐波下仍具备至少 1 kW 的输出能力,输出电压持续时间不短于 30 min。中频升压变压器能在宽频域范围内具备相近的电压变比,同时可带 $0.15 \mu\text{F}$ 负载的能力。

本试验谐波源可以实现工频电压与多次谐波电压同时注入被测 CVT,提高了 CVT 宽频传输特性测试的效率。谐波源上位机界面测试窗口见图 4。在向 CVT 中点注入 14 kV 工频电压与 5%工频电压幅值的 2~6 次谐波的同时,实时显示测量数据,图 4(a)为中压电容器 C_2 上的输入电压 U_1 的实时波形及其幅频曲线,图 4(b)为中压电容 C_2 上的电流 I_1 的实时波形及其幅频曲线,图 4(c)为二次侧负载电压 U_2 的实时波形及其幅频曲线。

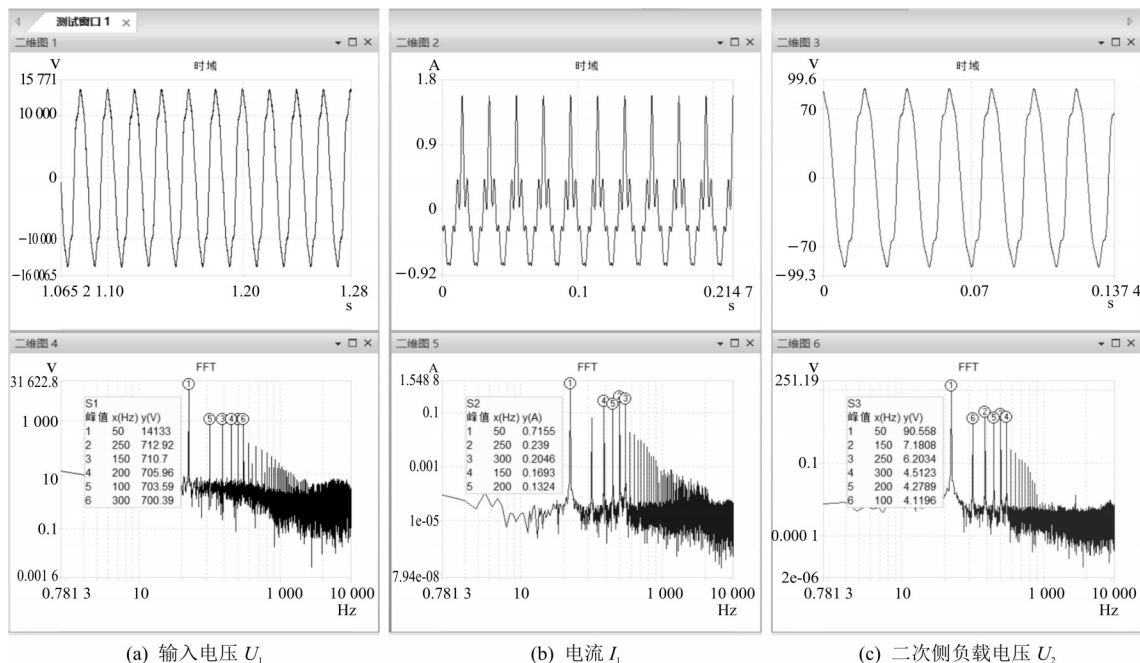


图4 谐波源上位机界面
Fig. 4 Upper computer interface of harmonic source

试验人员借助上位机界面进行交互,能直观查看并调整注入信号的各项参数,如各谐波的幅值与相位设置。在试验过程中,实时数据显示功能使试验人员能够清晰地监测测量电压和电流的即时幅值,确保试验条件符合预期。此外,该谐波注入系统允许同时控制多达 12 个谐波的幅值。这种多谐波同步控制的能力使试验人员能够灵活配置多频率谐波组合,以满足复杂试验需求,提高了试验的

精确度和可操作性。

3.2 试验结果

在试验部分,考察了两种不同额定电压(220 kV 和 500 kV)CVT 的宽频传输特性,试验对象为 TYD₄220/ $\sqrt{3}$ -0.005H 型和 TYD₄500/ $\sqrt{3}$ -0.005H 型电容式电压互感器。对 220 kV 的 CVT 分别使用了单次谐波注入和多次谐波注入的方法进行试验,对于 500 kV 的 CVT 进行带载与空载情况下的对比试验。通过

这些测试,不仅验证了多次谐波注入方法的可靠性,还揭示了 CVT 在不同条件下谐波传递特性和共振现象的显著特征。

1)220 kV CVT 单次谐波注入与多次谐波注入对比试验

本试验选用型号为 TYD,220/√3 -0.005H 的 CVT 作为试验对象,其主要参数如表 1。

表 1 220 kV CVT 主要参数
Table 1 Main parameters of 220 kV CVT

参数	数值
额定频率/Hz	50
额定一次侧电压/kV	220/√3
高压电容/μF	0.005 67
中压电容/μF	0.042 34
额定二次侧绕组电压/V	100/√3
额定负荷/VA	50

本次测试对 220 kV CVT 进行,旨在对比单次谐波注入和多次谐波同时注入情况下 CVT 的传输特性,验证多次谐波注入法的准确性和测试效率。

图 5 和图 6 分别为基波叠加单次谐波注入方式和基波叠加多次谐波注入方式下 220 kV CVT 空载运行试验得到的幅频特性与相频特性。

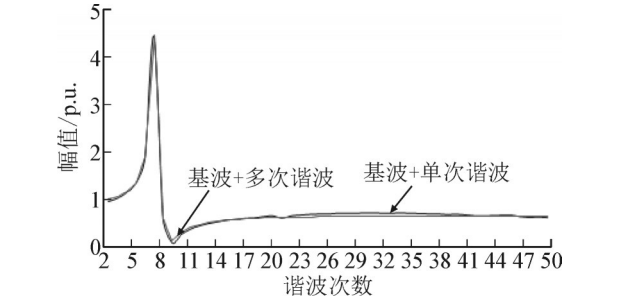


图5 220 kV CVT 幅频特性
Fig. 5 Amplitude frequency characteristic of 220 kV CVT

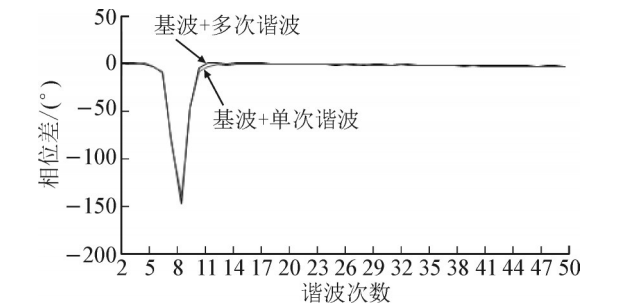


图6 220 kV CVT 相频特性
Fig. 6 Phase frequency characteristic of 220 kV CVT

在图 5 中,Y 轴为 CVT 各谐波次数下相对于基波变换比的归一化变换比。基波电压的大小约为 17 kV,在 CVT 的高压端对应于 220 kV。这确保了内部磁性元件被足够的 50 Hz 分量激发,以允许谐波通量

在接近标称的情况下变化。为了不过载,故保持最大基本电压在 17 kV,同时各频次的谐波电压幅值则保证在基波幅值 1%~5% 之间。

在基波叠加单次谐波试验与基波叠加多次谐波试验的幅频特性曲线中,7 次谐波附近观察到显著的变比增大,而从 8 次谐波开始变比明显减小,10 次谐波后变比的变化趋于平缓,基波叠加多次谐波试验下 CVT 的 2~15 次谐波测量误差根据下式^[29]计算

$$e_h\%=[U_2(j\omega)k_s-U(j\omega)]/U(j\omega)\times 100\%$$

(3)

式中: $e_h\%$ 为测量误差百分数; k_s 为标称变比; h 为谐波次数。根据式(3)和 CVT 一次侧和二次侧的实测电压数据,计算得到 CVT 各次谐波电压的测量误差见表 2-3。

表 2 220 kV CVT 单次谐波注入下 2~15 次谐波测量误差
Table 2 Measurement errors of the 2nd to 15th 2~15 harmonics under single harmonic injection of 220 kV CVT

谐波次数	测量误差/%	谐波次数	测量误差/%
2	-0.5	9	-90.0
3	6.0	10	-71.8
4	18.5	11	-60.0
5	38.0	12	-53.1
6	89.8	13	-47.9
7	355.6	14	-44.2
8	-37.8	15	-40.9

表 3 220 kV CVT 多次谐波注入下 2~15 次谐波测量误差
Table 3 Measurement errors of the 2nd to 15th harmonics under multiple harmonic injection of 220 kV CVT

谐波次数	测量误差/%	谐波次数	测量误差/%
2	3.6	9	-86.2
3	8.5	10	-67.9
4	20.8	11	-57.4
5	38.3	12	-51.3
6	92.8	13	-47.4
7	358.4	14	-44.6
8	-39.5	15	-42.2

根据表 2 和表 3 的数据,CVT 对 7 次谐波的测量误差最大,同时从 8 次谐波起,对谐波电压的测量值普遍偏低。

图 6 所示相频传输特性也在 7 次谐波附近开始出现较大失真,并在 8 次谐波处相位偏差达到最大。这一现象表明,在该频率附近存在谐振现象,而对应的频率增益和相位变化则进一步证实了 CVT 在此频段运行时可能产生的电压放大效应。这提示工程应用中应避免 7 次谐波影响,以保障设备的稳定运行。

对比表 2 和表 3 的数据,可以看出在采用多次谐波注入 CVT 的测试方法时,计算得出的 CVT 谐波测量误差不超过 5%。此外,基波叠加 5 次谐波注入 CVT 的试验与基波叠加单次谐波注入 CVT 的试验对比,幅频特性曲线与相频特性曲线基本一致,并且谐振峰值点与低谷点频率分布不会受到 CVT 谐振现象影响,在保证测试结果有效的前提下,仅需 10 次试验即可完成一台 CVT 50 Hz~2 500 Hz 频率范围内谐波传递特性测试。在实际测试中,用单次谐波注入的方式平均 60 min 才可以完成一台 CVT 的 2~50 次谐波传递特性测试,而多次谐波注入的方式平均 15 min 即可完成。

220 kV CVT 的试验结果表明,CVT 的幅频和相频特性在两种注入方法下表现出一致性,说明多次谐波注入测试法具有足够的准确性;传统的单次谐波注入方法需要逐一调整谐波频率,测试周期较长,而多次谐波同时注入大幅提高了测试效率,在保证准确性的同时大幅减少了试验次数。这对于大规模测试不同型号 CVT 时具有重要的实际应用价值。

2)500 kV CVT 空载与带载对比试验

本试验选用型号为 TYD_{500/√3}-0.005H 的 CVT 作为试验对象,其主要参数见表 4。

表 4 500 kV CVT 主要参数 Table 4 Main parameters of 500 kV CVT	
参数	数值
额定频率/Hz	50
额定一次侧电压/kV	500/√3
高压电容/μF	0.005 274
中压电容/μF	0.096 225
额定二次侧绕组电压/V	100/√3
额定负荷/VA	50

图 7 和图 8 分别为 500 kV CVT 带载和空载测试下幅频特性与相频特性的对比。

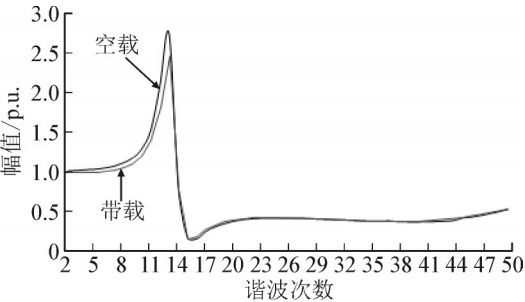


图 7 500 kV CVT 幅频特性
Fig. 7 Amplitude-frequency characteristic of 500 kV CVT

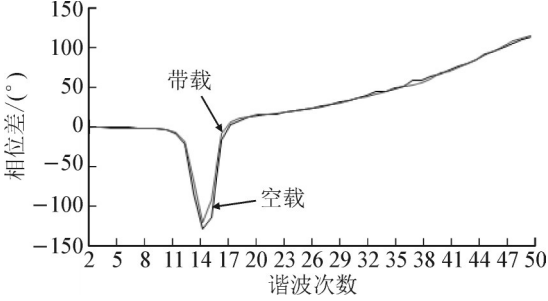


图 8 500 kV CVT 相频特性
Fig. 8 Phase frequency characteristic of 500 kV CVT

根据图 7、图 8 中 CVT 的幅频特性与相频特性曲线,可以观察到 CVT 二次侧带载与否对谐波传递特性有显著影响。CVT 在带载运行时的幅频特性曲线尖峰值相较于空载情况有所降低,意味着谐波幅值的放大倍数减小,尤其在谐振频段这一现象更为显著,随后向两侧逐渐衰减。在谐振频段内,带载 CVT 的相频曲线尖峰同样呈现减小趋势,即 CVT 在带载传变谐波时相角差变小,但总体而言,CVT 在带载与空载运行时的谐波相频特性曲线保持一致。

本试验通过基波叠加多次谐波同时注入的方式,对于空载和带载两个试验,在同时注入 5 组谐波的条件仅需 10 次试验即可得到所需试验数据;并且分别得出 CVT 空载与带载情况下的谐波传递特性,与传统方法得出的结论一致,即负载只影响 CVT 谐波传递幅频特性曲线的尖峰值和低谷值大小,并不影响其频率分布^[22],本试验方法的有效性与适应性进一步得到证明。

4 结语

基于试验分析,本文提出的基于多次谐波注入的宽频传输特性测试方法,不仅有效解决了 CVT 在测试周期长、试验电源输出电压要求高等问题,同时保证了测试的准确性和可行性。通过试验验证,得到以下结论:

1)多次谐波注入的测试效率和准确性:试验结果显示,相较于传统的单次谐波注入测试方法,多次谐波注入方法在减少测试次数和提升效率方面具有明显优势。在 50 Hz~2 500 Hz 的测试中,10 次试验即可覆盖所需频率范围,验证了该方法的高效性;

2)谐波传递特性在谐振频段的显著性:无论是 220 kV 还是 500 kV 的 CVT,试验均发现特定频率下的谐波传递特性会发生显著变化,尤其是在存在谐振现象的频率附近。本试验中 220 kV CVT 7 次谐波附近以及 500 kV CVT 13 次谐波附近的变比放大和相位偏移,说明不同 CVT 谐振点不同,获取谐

振频率点对 CVT 在实际工程应用中可以提供参数修正指导;

3)多次谐波注入对负载条件的适应性:500 kV CVT 试验中带载与空载对比显示,本方法对带载 CVT 的谐波传递特性测试有很好的适应性;

4)应用价值和未来研究方向:该方法在大规模 CVT 传输特性分析中具有广泛应用前景,未来研究可进一步优化谐波源控制算法,提高测试效率。

本研究通过详实的试验结果验证了多次谐波注入法的可行性,该方法不仅提升了测试效率,还降低了试验设备的成本和复杂性,在实际工程应用中对电容式电压互感器宽频传输特性的测试提供了可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 邵振国,许昊铂,肖颂勇,等. 新能源电网中的谐波问题[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(4):178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in a new energy power grid [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 178-187.
- [2] 何正友. 分布式新能源接入电网的谐波热点问题探讨[J]. 南方电网技术,2016,10(3):47-52.
HE Zhengyou. Discussion on harmonic hot issues of distributed new energy connected to power grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 47-52.
- [3] 林盛. 光伏系统中谐波问题的检测与实时监测技术研究[J]. 仪器仪表用户,2024,31(9):53-55.
LIN Sheng. Research on detection and real-time monitoring technology for harmonic issues in photovoltaic systems[J]. Instrumentation Customer, 2024, 31(9): 53-55.
- [4] 房金兰. 电容式电压互感器的技术发展[J]. 电力电容器,2007(2):1-4.
FANG Jinlan. Research on the technical development of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor, 2007(2): 1-4.
- [5] 王月琦. 电容式电压互感器谐波传递特性及测量方法研究[D]. 郑州:郑州大学,2021.
- [6] 电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S]. 1993.
Quality of electric energy supply harmonics in public supply network:GB/T 14549—1993[S]. 1993.
- [7] Standard for harmonic control in electric power systems: IEEE Std 519—2022[S]. 2022.
- [8] 柳永妍,乐健,李琼林,等. 电容式电压互感器谐波测量误差研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):167-174.
LIU Yongyan, LE Jian, LI Qionglin, et al. Research on harmonic measurement error of CVT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 167-174.
- [9] 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.
- [10] 梁纪峰,何瑞东,焦亚东,等. 多判据融合的 CVT 谐波测量误差现场验证方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(2):59-64.
LIANG Jifeng, HE Ruidong, JIAO Yadong, et al. Field verification method of harmonic measurement error of CVT based on multi-criteria fusion[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 59-64.
- [11] 陈宜皇,刘开培,乐健. 电容式电压互感器在谐波背景下测量误差的分析[J]. 电测与仪表,2015,52(24):89-95.
CHEN Yihuang, LIU Kaipei, LE Jian. Analysis on the capacitor voltage transformer measurement error under harmonic background[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(24): 89-95.
- [12] 李应宏,王贵山,何学敏. 谐振机理在 CVT 故障中的影响分析及防护措施[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(1):82-86.
LI Yinghong, WANG Guishan, HE Xuemin. Influence analysis of resonance mechanism in capacitor voltage transformer fault and protective measures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1): 82-86.
- [13] 李博文,贺达,杨智,等. CVT 铁磁谐振过电压的抑制与不同故障下二次电压特征分析[J]. 浙江电力,2023,42(7):38-46.
LI Bowen, HE Da, YANG Zhi, et al. Suppression of ferro-magnetic resonance overvoltage in CVT and feature analysis of secondary voltage under different faults[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(7): 38-46.
- [14] 张超,丁心志,王宾. 基于时域解析法的电容式电压互感器铁磁谐振分析与抑制[J]. 广东电力,2022,35(10):56-64.
ZHANG Chao, DING Xinshi, WANG Bin. Analysis and suppression of ferroresonance of capacitive voltage transformer based on time domain analytical method[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 56-64.
- [15] 宋守龙,廖斌,顾风彪. 电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(5):54-60.
SONG Shoulong, LIAO Bin, GU Fengbiao. Measurement and control device for ferro-resonance test of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 54-60.
- [16] 陈一棕,刘坤雄,冯雅琳,等. 电容式电压互感器谐波监测技术综述[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(5):70-75.

- CHEN Yicong, LIU Kunxiong, FENG Yalin, et al. Review on harmonic monitoring technology of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 70-75.
- [17] 王玲, 冯宇, 杨柳, 等. 电容式电压互感器谐波测量方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 95-100.
WANG Ling, FENG Yu, YANG Liu, et al. Study on harmonic measurement method of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 95-100.
- [18] ZHANG Xiaoqing, LIU Kunxiong, FENG Yalin, et al. Measurement method of harmonic voltage based on CVT capacitor current[C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC). [S. l.]: IEEE, 2021: 2738-2743.
- [19] GHASSEMI F, GALE P F, CLEGG B, et al. Method to measure CVT transfer function[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 915-920.
- [20] 郭成, 朱明星, 段锐敏, 等. CVT谐波测量修正方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(2): 57-63.
GUO Cheng, ZHU Mingxing, DUAN Ruimin, et al. Research on harmonic measurement and correction method of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2): 57-63.
- [21] 刘毅, 潘曦宇, 林福昌, 等. 基于时域回归模型的CVT传递特性获取方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1931-1938.
LIU Yi, PAN Xiyu, LIN Fuchang, et al. Method for acquiring CVT transfer characteristics based on time domain regression model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1931-1938.
- [22] 段晓波, 朱明星, 胡文平, 等. 影响电容式电压互感器谐波传递特性的关键参数[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3158-3164.
DUAN Xiaobo, ZHU Mingxing, HU Wenping, et al. Key parameters affecting harmonic transfer characteristics of capacitor voltage transformer[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3158-3164.
- [23] 刘坤雄, 张小庆, 赵铭, 等. 基于CVT宽频传递模型的杂散电容分步辨识方法[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 55-62.
LIU Kunxiong, ZHANG Xiaoqing, ZHAO Ming, et al. Step-wise identification method of stray capacitance based on wideband transfer model of CVT[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 55-62.
- [24] 王欢, 王忠东, 卢树峰, 等. 基于误差状态模糊分析的电容式电压互感器内绝缘状态评价方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 73-80.
- WANG Huan, WANG Zhongdong, LU Shufeng, et al. Internal insulation condition evaluation method for capacitor voltage transformer based on fuzzy analysis of error condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 73-80.
- [25] 宋守龙, 廖斌, 顾凤彪. 电容式电压互感器铁磁谐振试验测控装置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(5): 54-60.
SONG Shoulong, LIAO Bin, GU Fengbiao. Measurement and control device for ferro-resonance test of capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 54-60.
- [26] 刘彬, 邓小聘, 李建光, 等. 柔性直流光纤电流互感器阶跃响应特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 140-146.
LIU Bin, DENG Xiaopin, LI Jianguang, et al. Research on step response characteristics of flexible DC fiber-optic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 140-146.
- [27] 高树国, 孟令明, 张玉焜, 等. 高压并联电抗器振动疲劳分析与缺陷诊断研究[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 215-222.
GAO Shuguo, MENG Lingming, ZHANG Yukun, et al. Research on vibration fatigue analysis and defect diagnosis of high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 215-222.
- [28] 朱铁超, 聂一雄, 彭丹. 环境因素对CVT谐波传变特性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 123-128.
ZHU Tiechao, NIE Yixiong, PENG Dan. Study on the influence of environmental factors on harmonic transfer characteristics of CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 123-128.
- [29] 郇洪亮, 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(11): 3125-3130.
GAO Hongliang, LI Qionglin, YU Xiaopeng, et al. Harmonic transfer characteristic of capacitor voltage transformer[J]. Power System Technology, 2013(11): 3125-3130.

作者简介:

黄之笛(1997—),女,硕士,研究方向为高压直流输电控制保护技术、电磁暂态实时仿真技术。

武霖阳(1987—),男,高级工程师,从事直流输电控制与保护研究工作。

彭光强(1987—),男,高级工程师,从事直流输电控制与保护研究工作。

刘博涵(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术。E-mail: 202330210051@stu.shmtu.edu.cn。

韩金刚(1977—),男,副教授,研究方向为电力电子装置与应用。