

考虑多源杂散参数的 110 kV 电容式电压互感器谐波传递特性分析

周 原¹, 张 忠², 彭向阳¹, 吕嘉琦², 范亚洲¹

(1. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广州 510080; 2. 输变电装备技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 针对电容式电压互感器(CVT)在谐波及宽频条件下频率响应不平坦的问题, 建立了一种考虑多源杂散参数的 110 kV CVT 宽频等效电路模型。模型在传统 CVT 等效电路基础上, 引入电容分压器宽频参数、补偿电抗器杂散电容、中间变压器一次和二次绕组对地电容、层间等效电容、绕组间耦合电容以及二次负载参数。采用 1 Hz~2 MHz 扫频仿真分析了不同杂散参数对 CVT 频率响应的影响规律。结果表明, 补偿电抗器杂散电容和一次侧层间电容对低频及谐波附近峰谷影响较明显; 绕组间耦合电容主要改变中频段幅值分布; 二次侧杂散电容、电容分压器等效串联电感和负载参数主要影响高频响应。多源杂散参数是影响 CVT 宽频传递特性的重要因素, 建立宽频等效模型时应予以考虑。

关键词: 电容式电压互感器; 多源杂散参数; 频率响应; 宽频等效模型; 参数敏感性分析

Analysis of Harmonic Transfer Characteristics of a 110 kV Capacitor Voltage Transformer Considering Multi-Source Stray Parameters

ZHOU Yuan¹, ZHANG Zhong², PENG Xiangyang¹, LV Jiaqi², FAN Yazhou¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability (Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: To analyze the frequency-response characteristics of a capacitor voltage transformer (CVT) under harmonic and broadband voltage conditions, a broadband equivalent circuit model of a 110 kV CVT considering multi-source stray parameters is established. On the basis of the conventional CVT equivalent circuit, the model incorporates the broadband parameters of the capacitive divider, stray capacitance of the compensation reactor, winding-to-ground capacitances of the intermediate transformer, equivalent interlayer capacitances, interwinding coupling capacitance, and secondary burden parameters. A frequency sweep from 1 Hz to 2 MHz is carried out to investigate the influence of different stray parameters on the CVT transfer characteristics. The results show that the stray capacitance of the compensation reactor and the primary-side interlayer capacitance of the intermediate transformer have significant effects on resonance peaks and valleys in the low-frequency and harmonic ranges. The interwinding coupling capacitance mainly changes the amplitude distribution in the middle-frequency range, while the secondary-side stray capacitances, equivalent series inductances of the capacitive divider, and secondary burden mainly affect the high-frequency response. The results indicate that multi-source stray parameters are important factors influencing the broadband transfer characteristics of CVTs and should be considered in broadband equivalent modeling.

Key words: capacitor voltage transformer; multi-source stray parameters; frequency response; broadband equivalent model; parameter sensitivity analysis

1 引言

电容式电压互感器(Capacitor Voltage Transformer, CVT)具有绝缘性能好^[1]、耐受电压能力强、不易出现铁磁谐振等优势^[2], 能够为电网运行监测、继电保护、计量和电能质量分析提供工频电压信号^[3-6], 在 110 kV 及以上电压等级电网中得到了广泛应用。CVT 在工频条件下通常通过电容分压器和补偿电抗器的参数配合实现较高的电压传递精度, 满足计量和保护装置对二次电压的要求。

随着新能源发电^[7]、电力电子设备^[8-9]和非线性负荷大量接入电网^[10], 电力系统中的频率污染加剧且日益严重^[11]。宽频电压包含多个频率分量, CVT 内部的电容、电感和电阻参数会随频率变化表现出不同阻抗特性^[12], 尤其是补偿电抗器绕组杂散电容、中间变压器绕组对地电容、绕组间耦合电容和层间电容等高频寄生参数, 在高频时不再能够忽略。这些杂散参数与补偿电抗器电感、中间变压器漏感以及二次负载之间相互耦合, 会引起 CVT 幅频特性和相频特性的畸变, 二次电压不能准确反映一次侧电压^[13], 测量误差可达 150%^[14]。因此, IEEE 1159-2019^[15]、GB/T 14549-1993^[16]和 IEC 61869-5:2011^[17]等电压互感器相关标准均指

基金项目: 广东电网公司科技项目(GDKJXM20222625)。

作者简介: 周原(1983-), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电网暂态监测与分析、输电线路状态感知与故障诊断技术。; 张忠(2003-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电容式电压互感器宽频建模、谐波传递特性分析及电压互感器谐波测量技术。; 彭向阳(1971-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为输电线路运行及故障诊断、智能输变电、电网防灾减灾及新型绿色电工材料与装备。; 吕嘉琦(2002-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电容式电压互感器宽频建模与失真还原。; 范亚洲(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力装备可靠性、电力设备状态监测与输变电装备运维技术。

出, CVT 仅能用于工频电压测量, 不能直接用于测量电网宽频电压。

已有研究针对 CVT 谐波传递特性开展了大量建模和仿真工作^[18], 通常将 CVT 等效为由电容分压器、补偿电抗器、中间变压器、阻尼器和负载构成的电路模型^[19], 并分析部分关键参数对谐波传递特性的影响。相关研究表明, 补偿电抗器杂散电容和中间变压器一次侧绕组杂散电容对 CVT 幅频、相频曲线影响较明显^[20], 而绕组间耦合电容和阻尼器电阻在部分参数范围内影响相对较小^[21]。然而, 现有模型中对杂散参数的考虑仍然存在一定简化: 多数模型重点考虑补偿电抗器杂散电容和一次侧绕组对地电容, 对二次绕组对地电容、绕组间耦合电容和层间等效电容的综合影响考虑不足。

近年来, 为进一步提升高频段的建模精度, 学者们在等效模型与误差校正方面进行了深入拓展。在建模方面, 有研究结合宽频阻抗测量与矢量匹配法, 实现了对 CVT 多端口杂散参数的精确辨识^[22]。在误差校正方面, 除了改进硬件结构的物理模型外, 基于软件算法的 CVT 宽频传变误差补偿与波形复原程序^[23], 正逐渐成为替代硬件改造的重要非侵入式解决方案^[24]。然而, 现有宽频物理等效模型对多源杂散电容的耦合考虑仍存在一定局限: 多数模型仅侧重于补偿电抗器自身杂散或一次侧绕组对地电容, 而对二次绕组对地电容、高低压绕组间的复杂耦合电容, 以及多层绕组端口的层间等效综合电容缺乏系统性的量化分析与协同建模。这些内部多源杂散参数与现场接地回路、二次电缆分布参数等外部因素的耦合, 往往是导致实验室标定与现场实测频响存在偏差的根源。因此, 亟需在宽频等效模型中对上述多源杂散参数加以全面考虑。

基于上述问题, 本文以 110 kV CVT 为对象, 建立考虑多源杂散参数的宽频等效电路模型。与已有主要关注补偿电抗器杂散电容和中间变压器一次侧杂散参数的 CVT 等效模型相比, 本文在传统 CVT 等效电路基础上, 进一步引入电容分压器等效串联电感、中间变压器一、二次绕组层间等效电容、一二次绕组间耦合电容以及二次负载参数, 形成面向 110 kV CVT 的多源杂散参数宽频等效模型。通过 1 Hz~2 MHz 扫频仿真, 分析补偿电抗器杂散电容、中间变压器杂散参数、电容分压器宽频参数和负载条件对 CVT 频率响应的影响, 并对不同参数的主要影响频段和作用方式进行分类总结, 为 CVT 谐波传递特性分析和宽频等效建模提供参考。

2 CVT 多源杂散参数等效模型

2.1 CVT 基本结构

电容式电压互感器(CVT)主要由电容分压单元和电磁单元组成, 其结构如图 1 所示。电容分压单元由一系列电容器串联构成^[25], 分为高压电容和中压电容, 其作用是将一次侧母线上的电压进行一次降压输入电磁单元; 电磁单元包含补偿电抗器、中间变压器、阻尼支路和负载等部分。补偿电抗被设计为与电容分压等效电容谐振^[26], 补偿其容抗下的压降, 保证 CVT 的工频测量精度; 中间变压器进一步将中压电容上的电压转换为标准的二次电压; 阻尼支路用以改善电磁单元的振荡特性^[27]。

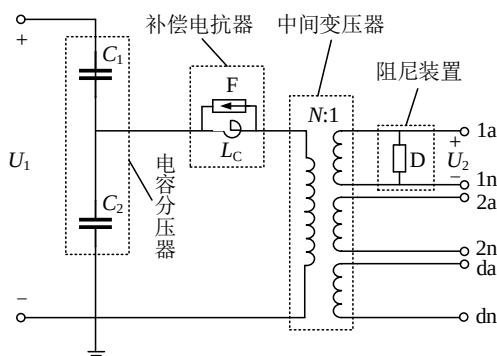


图 1 110 kV CVT 基本结构示意图

Fig. 1 Basic Structure of the CVT

在工频等效分析中, CVT 通常可简化为电容分压器、补偿电抗器和中间变压器的串联组合。然而, 在谐波及宽频条件下, CVT 内部各元件的杂散参数开始参与电压传递^[28], 使二次输出电压不再与一次输入电压保持理想的比例关系。特别是补偿电抗器绕组端子间的杂散电容、中间变压器绕组对地电容、绕组层间电

容以及一、二次绕组间的耦合电容,电容分压器连接引线和电容单元内部结构引入的等效串联电感、都可能与回路中的电容电感参数形成局部谐振^[29],导致幅频特性出现明显的峰值或谷值^[30]。

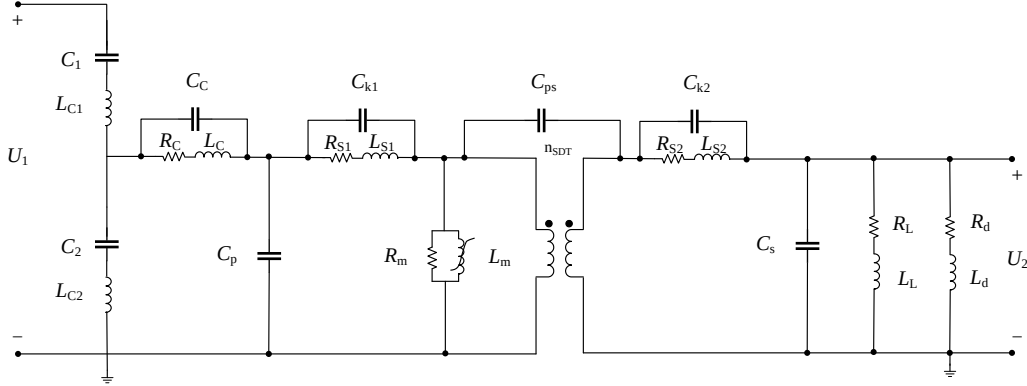


图 2 110 kV CVT 多源杂散参数宽频等效模型拓扑

Fig. 2 Wideband Equivalent Model Topology of a 110 kV CVT Considering Multi-Source Stray Parameters

为此,本文以 110 kV CVT 为对象,建立了计及多源杂散参数的宽频等效电路模型。模型包含电容分压器、补偿电抗器、中间变压器、励磁支路、二次侧漏感、阻尼支路和二次负载等基本环节,考虑其影响频率响应的高频寄生参数,模型拓扑如图 2 所示。

图 2 中, C_1 和 C_2 分别为电容分压器的高压电容和中压电容; L_{C1} 和 L_{C2} 为高压电容单元等效串联电感; R_c 、 L_c 分别为补偿电抗器的等效电阻和电感, C_c 为补偿电抗器杂散电容; R_{s1} 、 R_{s2} 和 L_{s1} 、 L_{s2} 分别为一、二次绕组等效电阻与漏感; C_p 和 C_s 分别为一、二次绕组的对地等效电容; C_{k1} 和 C_{k2} 分别为一、二次绕组的层间等效电容; R_m 和 L_m 分别为励磁支路电阻和励磁电感; C_{ps} 为一二次绕组间等效电容; R_d 和 L_d 为阻尼支路等效参数; R_L 和 L_L 为二次负载。

表 1 所列参数为本文 110 kV CVT 基准模型参数。其中,电容分压器、补偿电抗器、中间变压器和阻尼支路等工频主参数主要依据 110 kV CVT 产品说明书,并参考已有 CVT 等效电路模型进行设置^[31];中间变压器绕组对地电容、层间等效电容和绕组间耦合电容,则根据绕组典型结构尺寸、绝缘介质参数及绕组电压分布估算其等效电容量级;电容分压器等效串联电感依据电容单元内部电极、连接片及引线结构的典型参数进行设置。由于不同生产商、不同型号 CVT 的电容分压器结构、补偿电抗器绕制方式、中间变压器绝缘结构及二次回路配置存在差异,表中参数不代表所有 110 kV CVT 的固定取值,而是用于建立基准模型并开展参数敏感性分析。

实际设备中,电容分压器、补偿电抗器及中间变压器的工频主参数可由铭牌资料和常规试验获得;绕组杂散电容、电容分压器等效串联电感等宽频参数,则可通过端口阻抗测量或频率响应试验,并结合矢量匹配、最小二乘优化等方法进行辨识^[32]。本文主要研究多源杂散参数的影响规律,暂未针对某一特定样机开展参数辨识,表 1 参数作为 110 kV CVT 基准模型参数使用。

3 多源参数对 CVT 频率响应的影响分析

3.1 CVT 基准模型频率响应

本文在 MATLAB/Simulink 中建立了图 2 所示的 CVT 宽频等效电路模型,并提取模型的线性状态空间参数,在 1 Hz~2 MHz 范围内计算频率响应。通过一次侧和二次侧电压测量结果获得电压传递函数,并以 50 Hz 下的幅值进行归一化。参数扫描时仅改变待分析参数,其余参数保持不变。为表征 CVT 在宽频范围内的传递特性,本文以一次侧输入电压 $U_1(f)$ 为输入量,二次侧输出电压 $U_2(f)$ 为输出量,定义频域传递函数:

$$H(f) = \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \quad (1)$$

为便于比较不同频率下的传递特性,采用 50 Hz 下的传递函数幅值作为归一化基准,定义归一化幅

表1 110 kV CVT 多源杂散参数宽频等效模型基准参数

Table 1 Baseline parameters of the broadband equivalent model of 110 kV CVT considering multi-source stray parameters

参数	设置值	参数	设置值
C_1/nF	24.599	L_{-c1}/uH	0.900
C_2/nF	119.280	L_{-c2}/uH	0.300
L_c/H	50.06	C_p/pF	350
R_c/Ω	515	C_s/pF	350
C_c/nF	1.25	C_{ps}/nF	1
L_{s1}/H	22.12	L_{s2}/mH	0.278
R_{s1}/Ω	1939	R_{s2}/Ω	0.056
C_{k1}/nF	1	C_{k2}/pF	600
L_m/H	38825	L_d/H	26.26
$R_m/\text{M}\Omega$	6.168	R_d/Ω	1556
L_L/H	0.64	R_L/Ω	266

值为:

$$A_N(f) = \frac{|H(f)|}{|H(50\text{Hz})|} \quad (2)$$

式中, f 为频率, $H(f)$ 为传递函数, $A_N(f)$ 为归一化幅值。

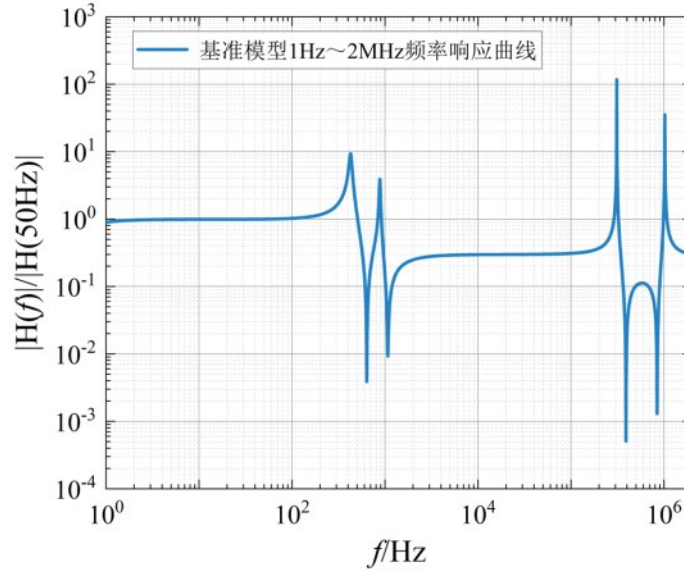


图3 基准模型1 Hz~2 MHz 频率响应曲线

Fig. 3 Frequency Response Curve of the Benchmark Model from 1 Hz to 2 MHz

由图3可见,基准模型在宽频范围内存在明显的峰谷变化,说明CVT的频率响应受内部电容、电感及杂散参数共同影响,导致其频响曲线出现多个谐振峰谷。后续将在此基础上进一步分析各结构参数变化对频率响应的影响。

3.2 CVT多源杂散参数对频率响应的影响

3.2.1 补偿电抗器杂散电容 C_c 对频率响应的影响

补偿电抗器支路由等效电阻 R_c 、电感 L_c 和其余杂散电容 C_c 组成。其中, C_c 用于表征补偿电抗器绕组端间、层间及对地耦合形成的等效电容。为分析其影响,保持其他参数不变,仅改变 C_c 的取值进行扫频计算。

补偿电抗器电感与其杂散电容可能形成局部谐振,其近似谐振频率为:

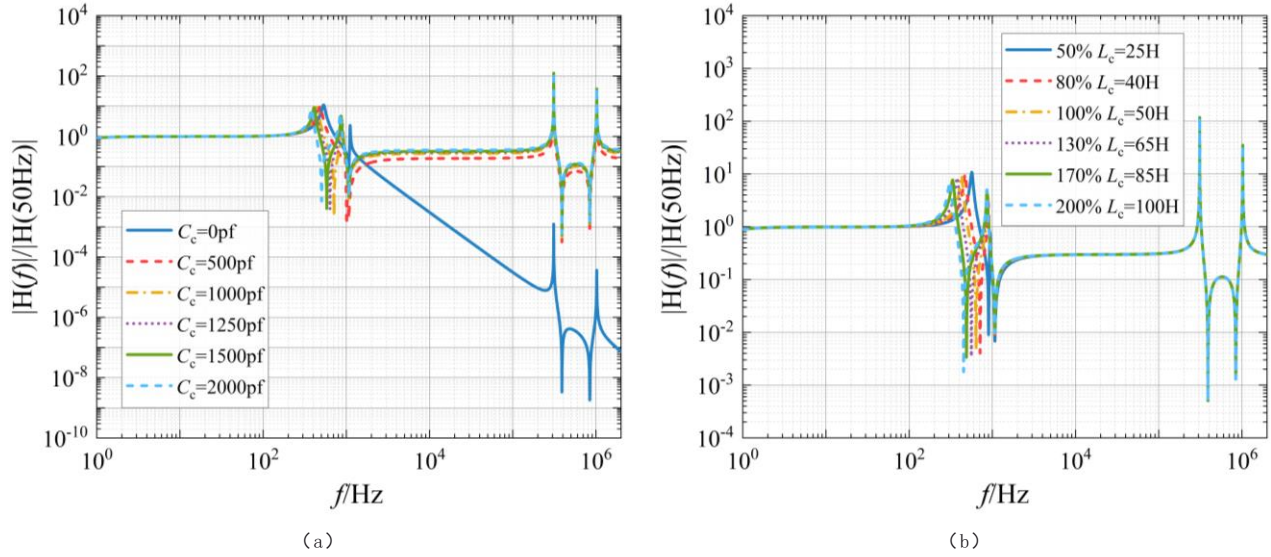


图 4 补偿电抗器杂散参数对 CVT 频率响应的影响:(a) 补偿电抗器杂散电容 C_c 对 CVT 频率响应的影响, (b) 补偿电抗器电感 L_c 对 CVT 频率响应的影响

Fig. 4 Influence of Compensation Reactor Stray Parameters on the CVT Frequency Response: (a) Effect of the stray capacitance C_c , (b) Effect of the inductance L_c

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (3)$$

由图 4 可见, C_c 的变化会明显改变频率响应曲线中的峰谷位置和幅值。当 C_c 增大时, 补偿支路谐振频率降低, 响应峰谷整体向低频方向移动; 当 C_c 减小时, 谐振频率升高。

补偿电抗器的主要功能在工频下补偿电容分压器容抗上的压降, 从而保证工频电压的测量精度, 其感抗值根据不同电压等级通常在几十亨到百亨。由于感抗较大, 补偿电抗器电感与其杂散电容会构成较低频率的谐振, 从而极大影响 CVT 的谐波测量精度。

3.2.2 中间变压器一次侧杂散参数对频率响应的影响

中间变压器一次侧主要包括一次绕组电阻 R_{s1} 、一次侧漏感 L_{s1} 、一次绕组对地电容 C_p 和一次绕组层间等效电容 C_{k1} 。其中 C_p 主要表征一次绕组与铁心、夹件、油箱及屏蔽结构等接地部件之间的电场耦合; C_{k1} 则表征一次绕组内部相邻绕组层之间分布电容在端口处的等效作用。CVT 中间变压器需要将电容分压器输出的中间电压进一步变换为二次标准电压, 通常具有较大的变比, 一次绕组匝数较多。为满足绝缘距离、窗口尺寸和绕组布置要求, 一次绕组通常采用多层连续绕制结构。该结构下, 相邻绕组层之间具有较大的有效重叠面积, 且层间由绝缘纸、油隙等介质隔开, 因此会形成不可忽略的层间寄生电容。多层绕组沿径向和轴向连续分布后, 这些分布电容会在绕组端口表现为等效层间电容, 并与一次侧漏感及其他杂散参数共同作用, 改变中间变压器在谐波和宽频条件下的电压传递特性。

由图 5(a) 可见, 在低频段, 不同 C_p 取值下的频率响应曲线基本重合, 随着频率升高, C_p 主要改变中高频段峰谷的幅值, 而对主要谐振点频率的影响相对有限。相比之下, 图 5(b) 中 C_{k1} 对频率响应的影响更加明显。随着 C_{k1} 增大, 一次侧漏感与层间等效电容之间的耦合作用增强, 使数百 Hz 附近的谐振峰频率向低频方向移动, 同时峰值幅度也有所降低。

3.2.3 一、二次绕组间耦合电容对频率响应的影响

中间变压器一次绕组和二次绕组之间由主绝缘介质隔开, 两者在空间上具有一定的重叠面积, 因此会形成绕组间寄生耦合电容 C_{ps} , 该电容本质上反映一次、二次绕组之间的电场耦合关系。为分析该参数的影响, 保持其他参数不变, 仅改变 C_{ps} 进行扫频计算。

由图 6 可见: C_{ps} 增大不会显著改变主要谐振点的位置, 但会明显改变各频段幅值水平: 低频段基本不受

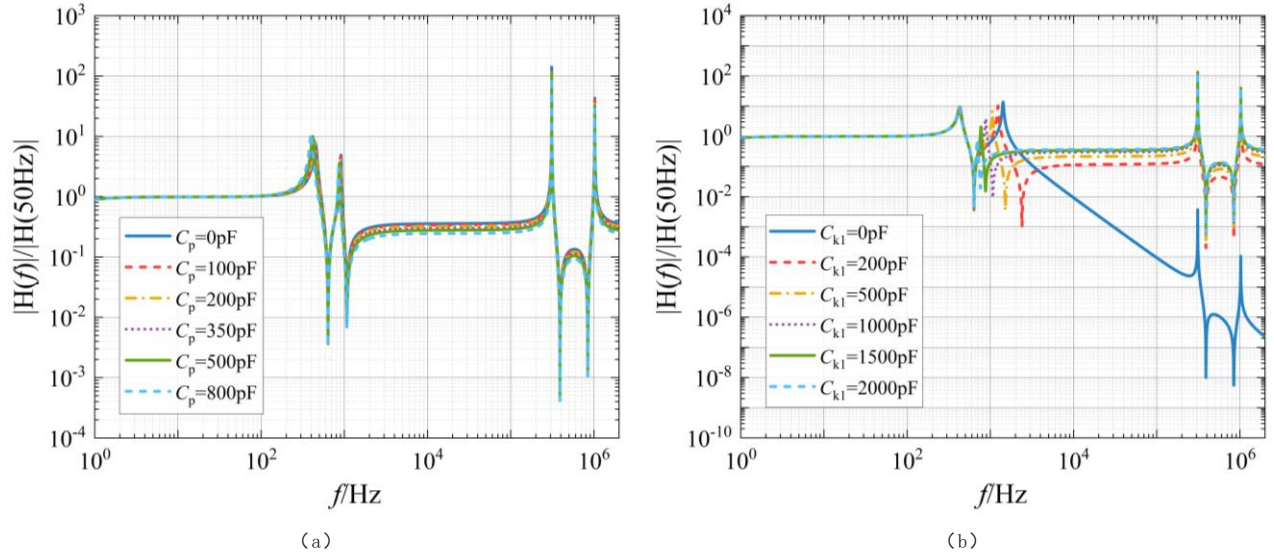


图 5 中间变压器一次侧杂散参数对 CVT 频率响应的影响:(a) 一次绕组对地电容 C_p 对 CVT 频率响应的影响,(b) 一次绕组层间等效电容 C_{kl} 对 CVT 频率响应的影响

Fig. 5 Influence of Primary-Side Stray Parameters of the Intermediate Transformer on the CVT Frequency Response: (a) effect of the primary-winding-to-ground capacitance C_p , (b) effect of the equivalent interlayer capacitance C_{kl} of the primary winding

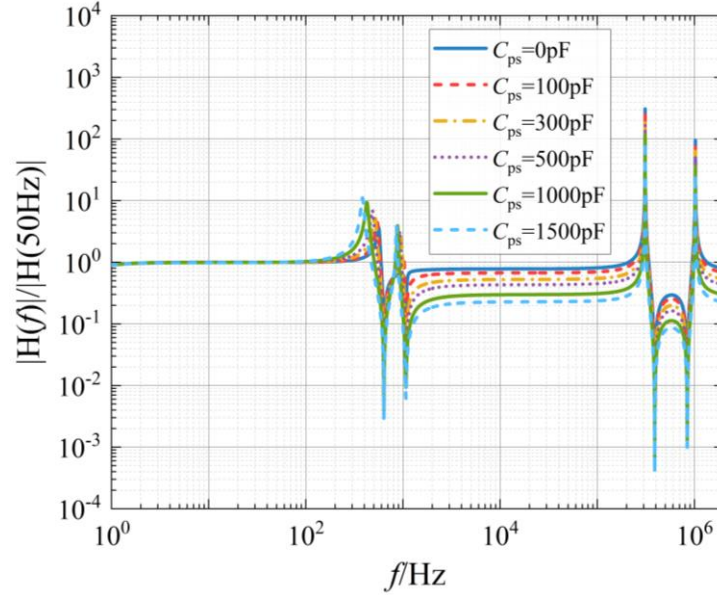


图 6 中间变压器一、二次绕组间耦合电容 C_{ps} 对 CVT 频率响应的影响

Fig. 6 Effect of the Primary-Secondary Winding Coupling Capacitance C_{ps} of the Intermediate Transformer on the CVT Frequency Response

影响;数百 Hz 附近谐振峰随 C_{ps} 增大而升高; $10^3 \sim 10^5$ Hz 中频段幅值随 C_{ps} 增大而整体降低;高频段峰谷位置基本保持稳定,但谷值深度发生变化。因此, C_{ps} 更主要影响频响曲线的幅值分布,而不是决定谐振频率。

3.2.4 中间变压器二次侧杂散参数对频率响应的影响

中间变压器二次绕组电压等级较低,但其绕组、铁心以及接地结构之间仍然存在寄生电容。其中,二次侧对地电容 C_s 主要来源于二次绕组对铁心、外壳和接地部件之间的电场耦合;二次侧层间电容 C_{k2} 则来源于二次绕组相邻层或相邻线段之间的电容耦合。由于二次绕组层数通常少于一次绕组,相邻层之间的电位差

占二次绕组端电压的比例可能较大,因此其端口等效层间电容不一定小于一次侧层间电容。在宽频条件下,这些二次侧杂散电容会改变二次侧高频电流分布,并与二次侧漏感、负载支路共同影响输出端频率响应。

图7中分别给出了二次侧对地电容 C_s 和二次侧层间电容 C_{k2} 对CVT频率响应的影响。可以看出,二者对 $1\sim 10^5$ Hz范围内的响应影响均较小,说明二次侧杂散电容不是低频和主要谐波频段响应的畸变的主导因素。其影响主要集中在 10^5 Hz以上的高频段。对于二次侧对地电容 C_s ,随着电容值增大,高频谐振峰值和反谐振谷值发生明显变化,但主峰位置变化相对有限,主要表现为改变高频幅值。相比之下,二次侧层间电容 C_{k2} 对高频谐振频率的影响更加明显:随着 C_{k2} 增大,高频谐振峰频率降低,同时峰谷深度发生变化。这说明 C_s 主要通过改变二次侧对地泄放通道影响高频幅值,而 C_{k2} 直接与二次侧漏感形成高频谐振。因此,在二次侧杂散参数中, C_{k2} 对高频响应的敏感性强于 C_s ,但二者对工频和低频谐波频段影响均较弱。

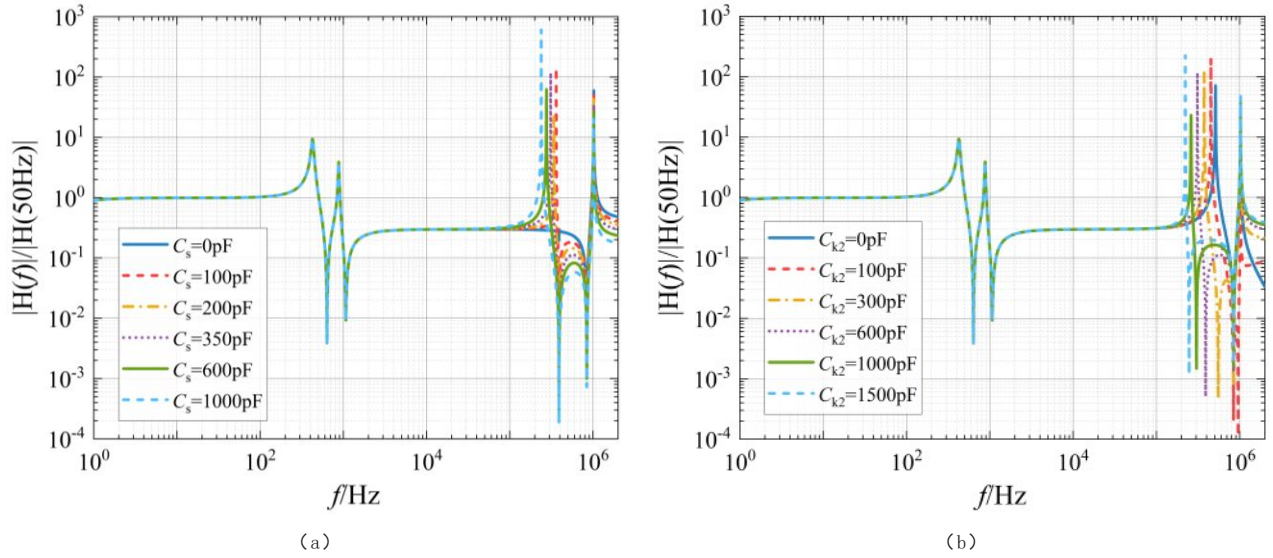


图7 中间变压器二次侧杂散参数对CVT频率响应的影响:(a) 二次侧对地电容 C_s , (b) 二次侧层间电容 C_{k2}
Fig. 7 Influence of Secondary-Side Stray Parameters of the Intermediate Transformer on the CVT Frequency Response: (a) effect of the secondary-to-ground capacitance C_s ; (b) effect of the interlayer capacitance C_{k2}

3.2.5 电容分压器宽频参数对高频响应的影响

实际CVT电容分压器并非理想电容。高压电容和中压电容由多个电容单元、金属电极、连接片、引线和端部连接结构组成,电流在这些导体中流动时会形成一定的寄生电感。因此,在宽频模型中,可将电容支路表示为主电容 C 及等效串联电感 L_c 的组合。其中, L_{c1} 和 L_{c2} 分别表征高压电容支路和中压电容支路中由内部连接导体、端子引线和电极结构引起的等效串联电感。该电感在工频下感抗很小,不影响分压单元变比;但随着频率升高,其感抗逐渐增大,可能与电容支路主电容形成自谐振。

图8中分别给出了 L_{c1} 和 L_{c2} 变化时CVT频率响应的变化规律。可以看出,在 10^5 Hz以下,各曲线基本重合,因为在该频段内 L_c 的感抗相对于电容容抗仍较小,电容支路整体仍主要表现为容性特征。随着频率升高到 10^5 Hz以上,高频段的峰值和谷值位置随 L_c 的变化发生明显移动。当 L_c 增大时,高频谐振峰和反谐振谷整体向低频方向移动。因此,无论是 L_{c1} 还是 L_{c2} ,其变化主要影响 10^5 Hz以上的高频响应。

3.2.6 二次负载对频率响应的影响

本文采用 R_L 和 L_L 表征二次侧负载的等效阻抗,主要反映测量仪表、保护装置或试验负载在二次侧形成的集中参数负荷。实际变电站中,CVT二次电压回路通常还包含较长的控制电缆,电缆长度可达数十米甚至上百米,其分布电容、分布电感和线芯电阻也可能影响高频段响应。为突出CVT本体多源杂散参数的影响,本文未单独考虑二次控制电缆的分布参数。对于较长的二次电缆,后续可采用分布参数线路或多段 π

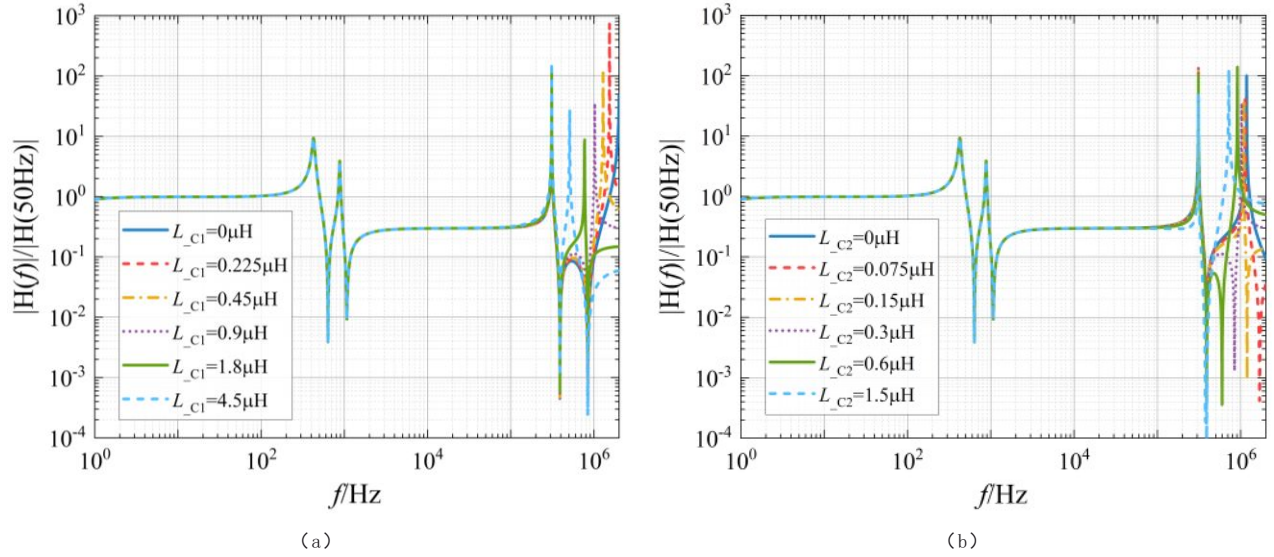


图 8 电容分压器宽频参数对 CVT 频率响应的影响:(a) 等效串联电感 L_{C1} , (b) 等效串联电感 L_{C2}

Fig. 8 Influence of the Wideband Parameters of the Capacitive Divider on the CVT Frequency Response: (a) effect of the equivalent series inductance L_{C1} , (b) effect of the equivalent series inductance L_{C2}

型网络进行建模,以提高现场频响计算精度。

由图 9 可见,在 10^3 Hz 以下,不同负载工况下的频率响应曲线基本重合。随着频率升高,负载影响逐渐增强,在 $10^5 \sim 10^6$ Hz 频段,不同负载容量和功率因数下的峰谷幅值差异明显。空载或轻载时,高频谐振峰值较高;负载容量增大后,高频幅值整体降低,说明较重负载增强了二次侧阻尼作用。功率因数由 1 变为 0.8 后,高频段峰谷形态也发生变化,表明感性负载会进一步影响二次侧高频阻抗。

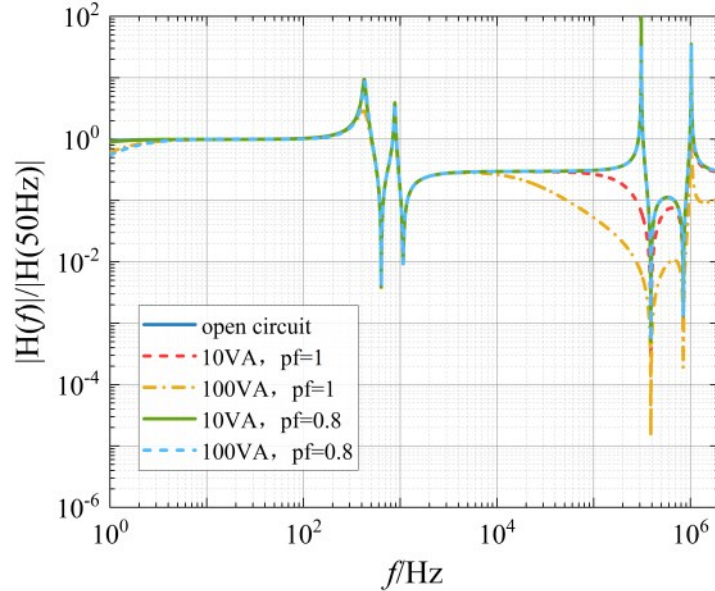


图 9 二次负载对 CVT 频率响应的影响

Fig. 9 Effect of the Secondary Burden on the CVT Frequency Response

3.3 参数影响规律总结

通过上述参数扫描可以看出,不同参数对 CVT 频率响应的影响频段和作用方式存在明显差异。补偿电抗器电感 L_c 及其杂散电容 C_c 对数百 Hz 至数千 Hz 范围内的频率响应影响最为显著。随着 L_c 和 C_c 增大,补偿

电抗器与其杂散电容形成的谐振频率降低,频响曲线中的峰谷整体向低频方向移动。

中间变压器一次侧杂散参数主要影响数百 Hz 至中高频段响应。其中,一次绕组对地电容 C_p 主要改变中高频峰谷幅值,对主要谐振点位置影响相对有限;一次绕组层间电容 C_{k1} 与一次侧漏感之间的耦合作用更强,随着 C_{k1} 增大,数百 Hz 附近的谐振峰频率向低频方向移动,峰值幅度也发生变化。

一、二次绕组间耦合电容 C_{ps} 不明显改变主要谐振点位置,但会改变不同频段的幅值水平。随着 C_{ps} 增大,数百 Hz 附近谐振峰升高,而 $10^3 \sim 10^5$ Hz 范围内的幅值整体降低。

二次侧对地电容 C_s 和二次侧层间电容 C_{k2} 主要影响 10^5 Hz 以上的高频响应。其中, C_s 主要改变高频峰谷幅值,而 C_{k2} 会使高频谐振峰频率发生移动。

电容分压器等效串联电感 L_{C1} 、 L_{C2} 主要影响 10^5 Hz 以上的高频段,随着串联电感增大,电容支路自谐振频率降低,高频峰谷向低频方向移动。

综合来看,影响 CVT 频率响应的参数可分为三类:第一类是补偿电抗器杂散电容和一次侧层间电容,主要影响谐波及中低频峰谷;第二类是一、二次绕组间耦合电容和一次侧对地电容,主要改变中高频幅值分布;第三类是二次侧杂散电容、电容分压器串联电感和负载参数,主要影响高频段响应。各参数影响规律如表 2 所示。

表 2 多源杂散参数对 CVT 频率响应的影响规律

Table 2 Influence of Multi-Source Stray Parameters on the CVT Frequency Response

参数	主要影响频段	主要影响形式	影响程度
C_c	数百 Hz~数 kHz	改变中低频段谐振频率和峰值幅值	强
C_p	中高频	改变一次侧对地泄放通道,主要影响中高频幅值	中
C_{k1}	数百 Hz~中高频	与一次漏感耦合,改变谐振频率和幅值	强
C_{ps}	数百 Hz~高频	改变一、二次侧电容耦合通道,主要影响幅值	中
C_s	10^5 Hz 以上	改变二次侧对地旁路通道,影响高频响应幅值	弱
C_{k2}	10^5 Hz 以上	与二次漏感耦合,影响高频谐振位置	中
L_{C1} 、 L_{C2}	10^5 Hz 以上	改变电容支路自谐振频率	中
二次负载	高频段	改变二次侧阻尼和输出电压分配	中

4 结论

本文围绕 CVT 在谐波及宽频条件下频率响应不平坦的问题,建立了考虑多源杂散参数的 110 kV CVT 宽频等效电路模型。模型在传统 CVT 等效电路基础上,引入了电容分压器宽频参数、补偿电抗器杂散电容、中间变压器绕组对地电容、层间电容、绕组间耦合电容以及二次负载等因素,并通过 1 Hz~2 MHz 扫频仿真分析了不同参数对频率响应的影响。

仿真结果表明,CVT 的宽频传递特性受多种电容、电感和负载参数共同影响,频率响应曲线在谐波及高频范围内会出现明显峰谷。其中,补偿电抗器杂散电容和中间变压器一次侧杂散参数对低频及谐波附近的响应影响较明显;绕组间耦合电容、二次侧杂散电容、电容分压器等效串联电感和二次负载主要影响中高频及高频段响应。说明在分析 CVT 宽频传递特性时,仅采用工频主参数模型是不充分的,有必要将多源杂散参数纳入宽频等效模型。

需要说明的是,本文以 110 kV CVT 为对象开展参数建模和扫频分析,所得规律主要适用于结构和参数量级相近的 110 kV CVT。对于其他电压等级或不同厂家、不同型号的 CVT,电容分压器参数、补偿电抗器结构、中间变压器绕组布置和二次回路条件可能存在差异,需结合具体设备参数重新辨识和校核。后续可结合现场扫频试验、宽频阻抗测量和二次电缆分布参数建模,对模型参数进行修正。所建模型可为 CVT 谐波测量误差分析与校正、电网谐波准确评估提供依据,并为评估 CVT 宽频传递特性对行波保护和故障测距信号的影响提供建模参考。

参考文献:

- [1] 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(05): 54-60.
Song S L, Liao B, Gu F B. Ferroresonance test measurement and control device for capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 54-60.
- [2] 朱鸿吉, 侯成革, 李洪臣. 电容式电压互感器铁磁谐振产生机理及其抑制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(2): 43-46.
Zhu H J, Hou C G, Li H C. Mechanism and suppression method of ferroresonance in capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(2): 43-46.
- [3] Ajaei F B, Sanaye-Pasand M, Rezaei-Zare A, et al. Analysis and suppression of the coupling capacitor voltage transformer ferroresonance phenomenon[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1968-1977.
- [4] Abu Bakar A H, Khan S A, Kwang T C, et al. A review of ferroresonance in capacitive voltage transformer[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2015, 10(1): 28-35.
- [5] Graovac M, Irvani R, Wang X, et al. Fast ferroresonance suppression of coupling capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 158-163.
- [6] 周峰. 谐波电压比例标准关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Zhou F. Research on key technologies of harmonic voltage ratio standards[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [7] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
Xie X R, He J B, Mao H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewable energy and power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [8] Inci M, Biyik M, Demir M H, Ibey G, et al. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110648.
- [9] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
Li Z X, Gao F Q, Zhao C, et al. Review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [10] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731.
Ma N N, Xie X R, He J B, et al. Review of wideband oscillation in power systems with high proportion of renewable energy and power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.
- [11] 刘桓瑞, 李昊, 甘国晓, 等. 南方电网谐波排查专项工作总结[R]. 广州: 南方电网科学研究院, 2020.
Liu H R, Li H, Gan G X, et al. Summary of the special investigation on harmonics in China Southern Power Grid[R]. Guangzhou: Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, 2020.
- [12] 谢伟伦, 黄志威, 刘小沛. 杂散电容对 CVT 谐波测量影响的处理方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 59-63.
Xie W L, Huang Z W, Liu X P. Study on the treatment method for the influence of stray capacitance on CVT harmonic measurement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 59-63.
- [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 J, Liu Y Y, Li Q L, et al. Test technology for harmonic measurement errors of capacitor voltage transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 108-113.
- [14] Instrument Transformer Application guide[R]. ABB Report, 2015.
- [15] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE 1159-2019 IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.
- [16] 国家标准化管理委员会. GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
Standardization Administration of China. GB/T 14549-1993 Power quality—Harmonics in public supply network[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.

- [17] International Electrical Commission. IEC 61869-5: 2011 Instrument transformers—Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers[S]. Geneva: International Electrical Commission, 2011.
- [18] 黄之笛, 武舜阳, 彭光强, 等. 基于多次谐波注入的 CVT 宽频传输特性测试研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(03): 69-76.
- Huang Z D, Wu J Y, Peng G Q, et al. Test study on wideband transmission characteristics of CVTs based on multi-harmonic injection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 69-76.
- [19] 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): 4968-4975.
- Feng Y, Wang X Q, Chen X M, et al. Influence of circuit parameters of capacitor voltage transformers on harmonic voltage measurement in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4968-4975.
- [20] 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 C, Ding X Z, Wang B. Ferroresonance analysis and suppression of capacitor voltage transformers based on the time-domain analytical method[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 56-64.
- [21] 胡广富. 基于电容式电压互感器的谐波电压测量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- Hu G F. Research on harmonic voltage measurement based on capacitor voltage transformers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [22] Mingotti A, Costa F, Pasini G, et al. Modeling Capacitive Low-Power Voltage Transformer Behavior over Temperature and Frequency [J]. Sensors, 2021, 21(5).
- [23] W. Sima, B. Zou, M. Yang, P. Duan, Y. Zhou, D. Peng, K. Cheng, and F. de León, “Reconstructing primary voltages across inductive VTs—Part I: Methodology,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 2, pp. 1353 - 1362, Apr. 2023.
- [24] B. Zou, W. Sima, M. Yang, P. Duan, Y. Li, X. Luo, Y. Qiu, and F. de León, “Reconstructing primary voltage across inductive VTs—Part II: Validation, application, and analysis,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, no. 2, pp. 1363 - 1374, Apr. 2023.
- [25] 张耀. 基于局部谐振峰特征参数的 CVT 内部典型故障分层诊断研究[D]. 重庆大学, 2022.
- Zhang Y. Hierarchical diagnosis of typical internal faults in CVTs based on characteristic parameters of local resonance peaks [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [26] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 90-91.
- Ling Z S. Technical handbook of high-voltage instrument transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 90-91.
- [27] 肖耀荣, 高祖绵. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2003: 247.
- Xiao Y R, Gao Z M. Principles and design fundamentals of instrument transformers[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2003: 247.
- [28] 赵铭. 考虑 CVT 宽频传递特性的杂散电容辨识及操作过电压分类识别研究[D]. 西安理工大学, 2024.
- Zhao M. Research on stray capacitance identification and switching overvoltage classification and recognition considering the wideband transfer characteristics of CVTs[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [29] 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 L, Feng Y, Yang L, et al. Research on harmonic measurement method of capacitor voltage transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 95-100.
- [30] 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.
- [31] 张文超, 张婧. 一起 110 kV 电容式电压互感器二次计量电压异常案例分析[J]. 电工技术, 2026, 47(3): 180-182.
- ZHANG W C, ZHANG J. Case analysis of abnormal secondary metering voltage of a 110 kV capacitor voltage transformer [J]. Electric Engineering, 2026, 47(3): 180-182.
- [32] 王惠. 考虑中间变压器饱和特性的电容式电压互感器宽频非线性模型[D]. 重庆大学, 2020.
- WANG H. Wideband nonlinear model of a capacitor voltage transformer considering the saturation characteristics of the intermediate transformer[D]. Chongqing University, 2020.