

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.015

冲击电压激励下的CVT宽频建模及传输特性研究

刘坤雄¹, 李楠², 张小庆¹, 李俊¹, 刘瑶¹, 任蔷¹, 曾翔君³

(1. 国网陕西电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049;

3. 西安交通大学仪器科学与技术学院, 西安 710049)

摘要: 基于CVT的物理结构和工作原理,文中提出一种适用于MHz级的CVT宽频等效模型;以典型110 kV CVT为研究对象,给出了宽频模型元件参数的测量方法;结合实测参数,通过对比雷电冲击电压仿真与试验波形,验证了所提模型的正确性;最后,分析了影响CVT传递特性的关键因素,并通过定量的方法研究杂散参数变化对CVT传输特性的影响规律。所述宽频模型对于CVT谐波电压和暂态电压的测量具有重要意义,为CVT参数辨识和故障诊断提供理论依据。

关键词: 电容式电压互感器;宽频模型;传输特性;杂散电容;暂态过电压

Research on Broadband Modeling and Transmission Characteristics of CVT Under Impulse Voltage Excitation

LIU Kunxiong¹, LI Nan², ZHANG Xiaoqing¹, LI Jun¹, LIU Yao¹, REN Qiang¹, ZENG Xiangjun³

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Instrument Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the physical structure and operating principle of CVT, a broadband equivalent model of CVT suitable for MHz level is proposed in this paper. The typical 110 kV CVT is taken as the research object, and the measurement method of the component parameters of the broadband model is given. Based on the measured parameters, the correctness of the proposed model is verified by comparing the lightning impulse voltage simulation and test waveforms. Finally, the key factors affecting the transmission characteristics of CVT are analyzed, and the influence of stray parameters on the transmission characteristics of CVT is studied by quantitative method. The above-mentioned broadband model is of great significance for CVT harmonic voltage and transient voltage measurement and provides theoretical bases for the parameter identification and fault diagnosis of CVT.

Key words: capacitor voltage transformer; broadband model; transmission characteristics; stray capacitance; transient overvoltage

0 引言

电容式电压互感器 (capacitor voltage transformer, CVT) 具有体积小、冲击绝缘强度高、维护工作量少等优点,为中国 35 kV 及以上电力系统的测量装置提供可靠的电压信号^[1-5]。然而, CVT 的结构参数基于工频设计,随着频率的升高, CVT 将呈现出较为明显杂散特性和频变效应^[6-9]。当电力系统产

生暂态过电压时,如雷电过电压, CVT 二次侧响应信号频率可达数 MHz, 其暂态响应的测量结果存在很大误差^[10-11]。 CVT 无法实现对谐波电压或暂态电压的准确测量, 国标 GB/T 14549—93^[12] 的附录 D 对此有明确规定: “电容式电压互感器不能用于谐波测量。” 针对此问题, 国内外学者提出了多种方法, 例如采用电容电流法来实现谐波准确测量^[13], 但电容电流法的适用频率范围并不明确, 需要通过对

收稿日期:2025-09-30; 修回日期:2025-11-24

基金项目:国家电网有限公司科技创新项目(5700-202132199A-0-0-00)。

Project Supported by State Grid Corporation of China Technology Innovation Project(5700-202132199A-0-0-00).

CVT的宽频模型进行研究来确定。同时准确的CVT宽频模型对CVT内部电气参数的优化设计以及基于参数辨识的故障诊断具有重要意义。因此,建立MHz频带范围的CVT宽频模型是必要的。

CVT的传统工频电路模型仅是针对低频段,但在高频电压作用下,杂散电容参数的影响不容忽视,因此传统的电路模型的宽频适应性较差^[14]。多篇文献针对CVT宽频模型进行了研究。文[15]在谐波条件下(1~5 kHz)建立了CVT的等效线性电路,得到了CVT电路参数变化对其谐波传变特性的影响规律。相较于CVT传统工频模型,该线性等值模型进一步考虑了变压器一次侧杂散电容以及阻尼器对CVT传递特性的影响。文[16]提出在高频环境中,电感元件的对地杂散电容以及耦合电容的影响越来越大,并建立了CVT谐波测量等效电路。该模型考虑的杂散参数更为全面,但仅针对2 kHz的频率范围进行研究,其模型在MHz频率下是否适用仍未可知。上述基于物理法的CVT宽频模型研究成果仅是针对谐波范围内的CVT进行建模,无法满足雷电电磁瞬态的分析,并且没有给出CVT宽频模型参数获取方法。目前具备宽频表征能力的CVT模型多为基于散射参数测量的黑盒模型,其基本思想是将测量获得的散射参数转换为开路阻抗参数和短路导纳参数,并利用矢量匹配进行拟合,最后等效拓扑电路,建立CVT的等效电路模型^[17-19]。但传统黑盒模型在建模过程中容易因出现负值电阻、电感或电容而影响模型的稳定性。文[20]将CVT黑盒模型分别与传统工频模型相结合,提出CVT宽频无源电路模型。重庆大学司马文霞团队提出将CVT宽频导纳子模型和工频非线性子模型进行导纳互差再并联耦合的方法,建立CVT宽频非线性模型^[21]。然而这些黑盒模型均具有计算复杂、物理意义不明确的缺点,不利于进行CVT参数优化以及寄生参数的补偿。

针对上述问题,文中依据CVT的物理结构提出一种电容式电压互感器宽频模型,在现有研究的基础上引入了CVT外回路引线电感、来源于补偿电抗器和变压器一部分漏感的中间回路寄生电感,有望更好地解释MHz频段内的CVT电磁暂态响应特性。文中提出的宽频模型包含两部分:一是CVT一次电压/电容电流传输模型,基于该模型可以对CVT电容电流法的适用范围进行界定;二是CVT一次电压/二次电压的传输关系,该模型主要描述在1MHz以下频率范围内CVT的不同谐振模态特征,以及引起这些谐振模态的主要因素,该研究可为CVT的宽频

特性设计优化、基于参数辨识的故障诊断提供理论依据。接下来文中首先对CVT宽频模型的结构进行介绍,其次对典型110 kV的CVT进行小信号扫频试验并进行模型构建,并通过雷电冲击试验对该模型的准确度进行了验证。最后建立了CVT传输模型,研究了CVT电路参数对电压传输特性的影响。

1 宽频模型的构成

典型CVT电气原理图见图1, CVT主要由电容分压器和电磁单元两部分组成^[22]。其中电容分压器由高压电容和中压电容共同组成,补偿电抗器、中间变压器及阻尼装置共同构成CVT的电磁单元。

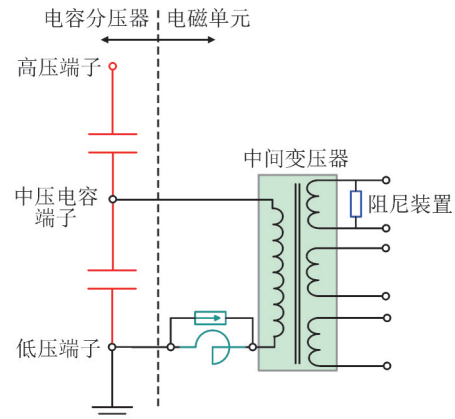


图1 CVT电气原理图

Fig. 1 Electrical schematic diagram of CVT

CVT在工频下工作时,补偿电抗器刚好可以抵消分压电容值,使得CVT二次电压不受这两个参数的影响。同时,工频条件下CVT补偿电抗器、中间变压器、阻尼器等内部部件的杂散电容的影响可以忽略。

但在高频环境中,电感元件的对地杂散电容以及耦合电容的影响越来越大。因此在高频环境中,需要充分考虑这些因素的影响。依据各组成部分的物理结构建立CVT等效电路宽频模型见图2。

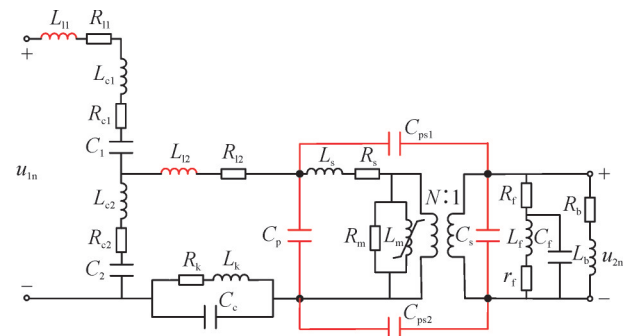


图2 CVT等效电路宽频模型

Fig. 2 Broad-band model of CVT equivalent circuit

图2中: u_{1n} 、 u_{2n} 、 N 分别为CVT输入电压、输出电压

压、中间降压变压器变比; L_{l1} 和 R_{l1} 分别为 CVT 外回路引线的等效电感和电阻; C_1 、 L_{c1} 、 R_{c1} 分别为 CVT 高压电容的固有电容、内部固有电感、等值串联电阻; C_2 、 L_{c2} 、 R_{c2} 分别为 CVT 中压电容的固有电容、内部固有电感、等值串联电阻; L_{l2} 和 R_{l2} 分别为 CVT 中间回路的电感和电阻; L_k 和 R_k 分别为补偿电抗器的电感和电阻; C_c 为补偿电抗器两端的杂散电容; L_s 和 R_s 分别为中间变压器一次侧绕组的漏抗和电阻; L_m 和 R_m 分别为励磁支路的电感和电阻; C_p 和 C_s 分别为一次侧等效杂散电容和二次侧等效杂散电容; C_{ps1} 和 C_{ps2} 为一二次侧间耦合杂散电容; C_r 、 R_r 、 L_r 、 r_l 分别为谐振型阻尼器的电容、电阻、电感、小电阻; R_b 、 L_b 分别为负荷电阻、电感。

相较于 CVT 传统工频模型, 本模型的特点在于综合考虑了 CVT 内外回路的电感和电阻、高频下杂散参数的影响和变压器励磁支路的非线性。其中, 在实验中表明其高频下 CVT 外回路引线电感和中间回路电感尤为重要。雷电冲击电压作用下, 外回路引线电感与 CVT 自身电容发生谐振, 对于 CVT 电容电流的响应特性不可忽略。并且 CVT 实验回路引线的长短影响很大, 现有 CVT 等效模型并未对其进行考虑。目前, 变压器等效模型多采用含有 3 个电容参数的 π 型等效模型。在高频下, 等效于中间变压器等效杂散电容与 CVT 中压电容并联, 该模型无法解释高频谐振点。中间回路电感来源于补偿电抗器和变压器的一部分漏感, 引入目的是将变压器等效杂散电容与 CVT 中压电容进行区隔。本模型可以进行暂态电压波形预测和分析, 对于满足电力系统暂态测量需求具有重要意义。

目前中国应用比较广泛的阻尼器有两种, 包括谐振型阻尼器和速饱和型阻尼器。文中实验用 CVT 采用的是谐振型阻尼器。工频情况下, 阻尼器处于高阻态, 而当电压频率改变时, 阻尼回路阻抗下降, 阻尼电阻对电路振荡产生衰减阻尼作用。 ω_0 为工频角频率, 阻尼器参数之间的关系为^[13]

$$\begin{cases} C_r = K_d(C_1 + C_2) & 0.07 \leq K_d \leq 0.3 \\ L_r = \frac{1}{\omega_0^2(C_1 + C_2)} \\ r_l = \frac{\omega_0 L_r}{\tan 88.3^\circ} \\ R_r = \frac{\omega_0 L_r}{\tan 56.7^\circ} \end{cases} \quad (1)$$

2 CVT 宽频模型试验测试

为了验证上述 CVT 宽频模型的有效性, 对一台

型号为 TYD110/ $\sqrt{3}$ -0.02H 的 CVT 建立其宽频模型, 其额定参数见表 1。

表 1 CVT 额定参数

Table 1 CVT rated parameters

准确级	额定电压 U_N/kV	额定变比 N_{CVT}	中间变压器变比 N
0.2/0.5/3P	110/ $\sqrt{3}$	1 100	100 $\times \sqrt{3}$

2.1 宽频模型元件参数的测量

为了建立不同频率下的 CVT 等效电路模型, 将 CVT 拆解为电容分压器、补偿电抗器和变压器 3 部分, 在 50 Hz~1 MHz 的宽频范围内进行小信号扫频来获得 CVT 各部分的参数。其中试验设备为高精度 HIOKI 日置 IM3536 阻抗分析仪。

1) 电容分压器宽频参数。分别对高、中压电容进行扫频实验, 在测量过程中应尽量减小测量线路的长度, 电容分压单元电容值的变化趋势见图 3。由图 3 可知, 电容分压器的测量电容值随着频率的升高逐渐增大, 当到达谐振频率后, 电容分压器呈感性, 与图 2 中的串联模型规律一致。根据低频时较为稳定的容值平均值及谐振频率可以得到图 2 中分压电容串联电路的具体参数。

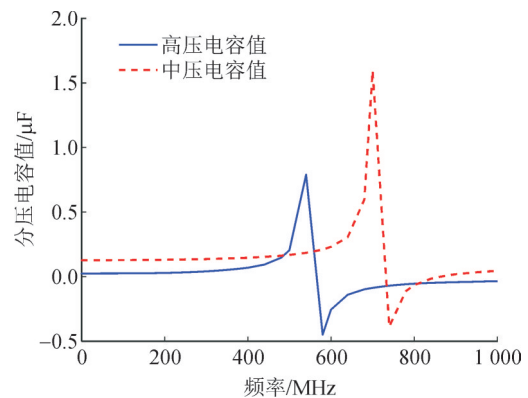


图 3 电容分压器测量电容值的变化趋势

Fig. 3 The change trend of capacitance value measured by capacitive voltage divider

2) 补偿电抗器宽频参数。对于补偿电抗器, LCR 测试仪选直流电阻档, 多次测量取平均值得到补偿电抗器直流电阻 R_k 为 2.2 k Ω 。在此基础上, 对补偿电抗器进行扫频实验, 补偿电抗器电感、电容的变化趋势见图 4。

由图 4 可知, 低频时补偿电抗器整体呈感性, 高频时补偿电抗器整体呈容性。补偿电抗器的测试电感值随着频率先增大后减小, 在 600 Hz 之前稳定在 32 H, 测试电容值在 300 kHz 后较为稳定, 在 600~700 pF 之间波动。谐振频率在 1 120~1 130 Hz 之间, 取谐振频率为 1 125 Hz, 则补偿电抗杂散电容 C_c 。

为 625 pF, 与图 4(b)中的结果相符合。

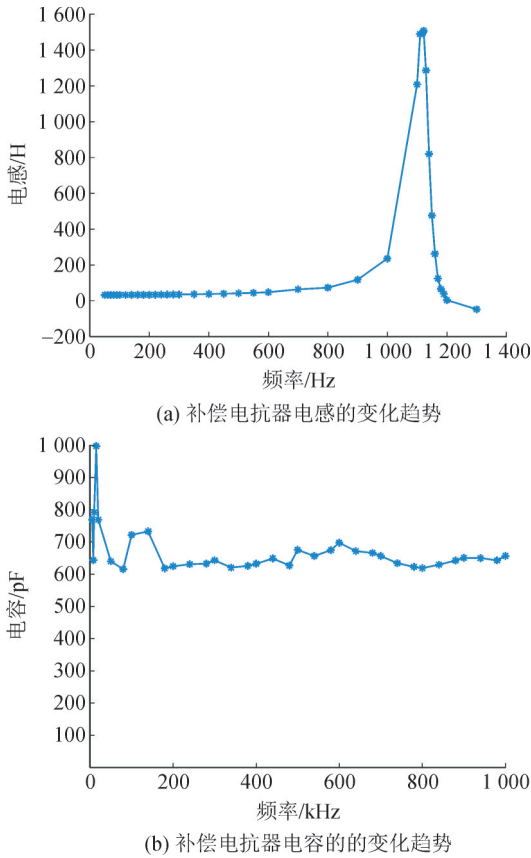


图 4 补偿电抗器电感、电容的变化趋势

Fig. 4 The variation trend of inductance and capacitance of compensation reactor

3) 变压器宽频参数。最后, 通过开路、短路扫频实验测得 CVT 宽频模型的关键参数。短路试验 LCR 测试仪的测试端子与在中间变压器的高压侧端子连接, 另一端低压绕组使用线径较粗的导线进行短接。在 50 Hz~1 MHz 的频率范围内扫频测试, 试验结果见图 5。

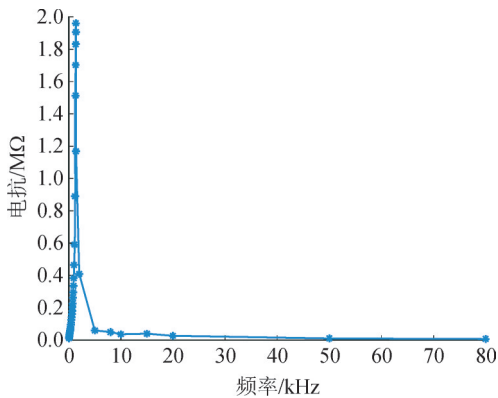


图 5 一次侧短路变压器二次侧电抗值的变化趋势

Fig. 5 The change trend of the secondary side reactance value of the primary side short circuit transformer

由图 5 可知, 变压器二次侧电抗值随着频率的增大呈现先增大后减小的趋势。在低频率时, 可以

认为中间变压器等效电路中除漏感以外的支路都开路了, 此时得到一次侧漏感 35 H, 一次侧漏电阻 6 kΩ, 谐振频率 1 365 Hz, 计算得到一次侧杂散电容 C_p 电容值为 388 pF。同理可测得 CVT 二次侧杂散电容 C_s 电容值为 23 nF。

将变压器一二次侧分别短接, LCR 测试仪测量端子接在变压器一二次侧, 得到变压器跨接电容 C_{ps} 随频率的变化曲线见图 6。

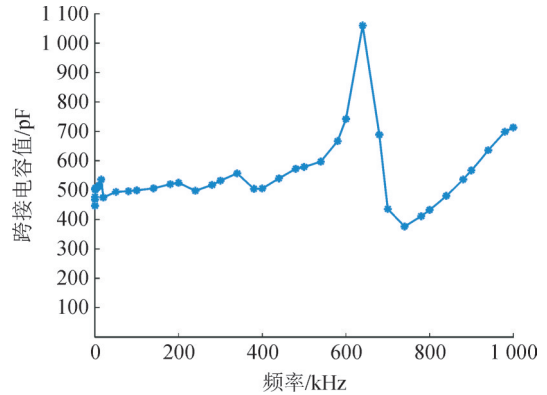


图 6 电容分压单元电容值的变化趋势

Fig. 6 The change trend of the capacitance value of the capacitor voltage dividing unit

由图 6 可知, 可知跨接电容 (C_{ps1}/C_{ps2}) 的容值在 500 Hz~300 kHz 较为稳定, 取其值为平均值 510 pF。默认 C_{ps1} 和 C_{ps2} 的值相同, 具体参数分配可以根据传输特性试验结果进行调整, 但二者的并联值应保持不变。

为了使模型更加准确, 需要考虑变压器铁心运行状态改变时等效励磁电感的变化。由于中间变压器的输入电压很高, 为 kV 级别, 这就导致了满足磁饱和时所需设备的功率大, 造成了高昂的试验成本。因此无法实施直接加交流励磁的试验方案。有学者提出了通过直流叠加交流电压源测量变压器类设备深度饱和特性的方法^[23-24]。通过调整不同的直流电压的大小来激励铁心工作于不同的状态。进而通过耦合的交流小信号来测量铁心的励磁过程。

首先需要明确中间变压器额定励磁电流的大小。变压器高压侧开路, 在低压侧绕组施加额定电压, 测量二次侧电流值。归算后得到变压器额定励磁电流为 1.3 mA。在此基础上开展变压器励磁试验, 测量设备仍然选用 IM3536 LCR 测试仪, 该设备可以在交流测量信号上叠加直流电压 (0~2.5 V) 进行测量。变压器励磁试验平台见图 7, 通过调节 LCR 测试仪, 改变直流偏置的幅值, 记录阻抗分析仪测量的励磁电感值, 得到励磁电感随励磁电流的变化

趋势见图8。

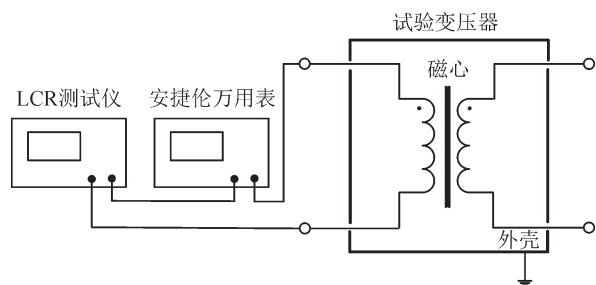


图7 变压器励磁试验示意图

Fig. 7 Transformer excitation test diagram

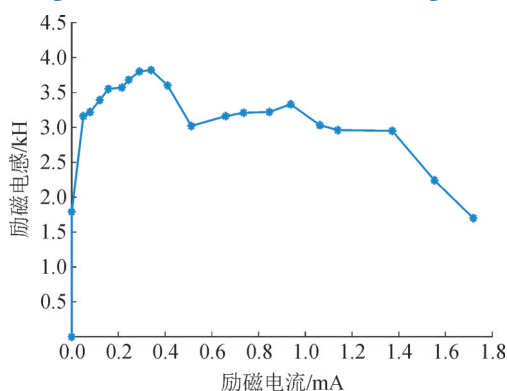


图8 励磁电感随励磁电流的变化趋势

Fig. 8 The variation trend of magnetizing inductance with excitation current

由图8可知,励磁电感随着励磁电流呈现先增大后减小的趋势,变压器饱和程度越大励磁电感越小。

由于文中所采用的110 kV CVT阻尼器安装于CVT内部,难以进行拆解,故不再对阻尼器单独进行测试。阻尼器具体参数可由式(1),并结合电容分压器等效电容计算得到。根据以上电容分压器、补偿电抗器和变压器参数测量试验,得到CVT宽频等效电路的实测参数见表2。CVT阻尼器具体参数为: $C_1=10.6\sim 45.3\text{ nF}$, $r_1=625.684\ 9\ \Omega$, $L_1=67.104\ 5\ \text{H}$, $R_1=13\ 847.971\ \Omega$ 。

表2 CVT宽频等效电路的实测参数

Table 2 The measured parameters of CVT circuit

参数	数值
电容分压器	$L_{c1}=2.0\ \mu\text{H}$, $R_{c1}=0.65\ \Omega$, $L_{c2}=0.4\ \mu\text{H}$, $R_{c2}=0.63\ \Omega$, $C_1=0.023\ 69\ \mu\text{F}$, $C_2=0.127\ 3\ \mu\text{F}$
补偿电抗器	$L_k=32\ \text{H}$, $R_k=2.2\ \text{k}\Omega$
中间变压器	$L_s=35\ \text{H}$, $R_s=6\ \text{k}\Omega$, $R_m=2.6\ \text{M}\Omega$, $L_m=3\ \text{kH}$
杂散电容	$C_s=625\ \text{pF}$, $C_p=388\ \text{pF}$, $C_i=23\ \text{nF}$, $C_{p1}=255\ \text{pF}$, $C_{p2}=255\ \text{pF}$

2.2 试验验证

为了检验上述所建立110kV CVT宽频模型的有效性,开展雷电冲击电压试验,试验接线示意图见图9。

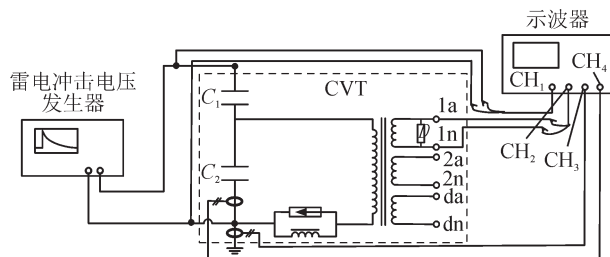


图9 CVT雷电冲击电压试验示意图

Fig. 9 The schematic diagram of CVT lightning impulse voltage test

使用型号为WVT 255的雷击浪涌发生器在被测CVT高压侧施加雷电冲击电压见图10,通过示波器分别记录CVT一次侧电压波形、二次侧电压波形以及电容电流波形。根据2.1节试验所测的模型参数,在MATLAB/Simulink中搭建110 kV CVT仿真模型。本仿真模型中的外回路引线参数由雷电冲击电压试验中的CVT外接引线决定,中间回路参数由二次侧电压波形的高频谐振频率计算得到, CVT仿真模型电路参数补充表见表3。

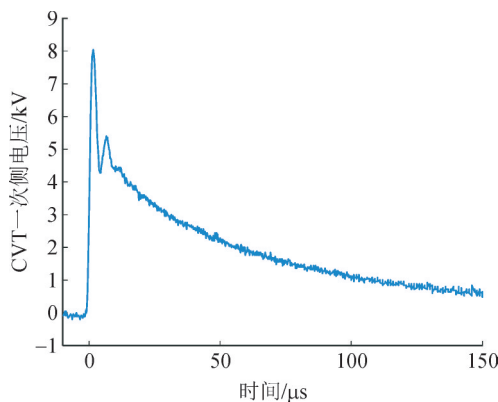


图10 CVT一次侧电压波形

Fig. 10 CVT primary side voltage waveform

表3 CVT仿真模型补充电路参数

Table 3 Supplemental circuit parameters for CVT simulation model

回路	数值
外回路	$L_{l1}=29\ \mu\text{H}$, $R_{l1}=20\ \Omega$
中间回路	$L_{l2}=1.5\ \text{mH}$, $R_{l2}=200\ \Omega$

将图10所示的雷电冲击电压作为仿真模型的输入信号,仿真模型中对CVT一次侧电压、二次侧电压、 C_2 中的电容电流进行采集,得到雷电冲击电压试验实测波形与仿真结果对比时域波形、CVT电容电流幅频特性曲线, CVT二次侧电压幅频特性曲线见图11。

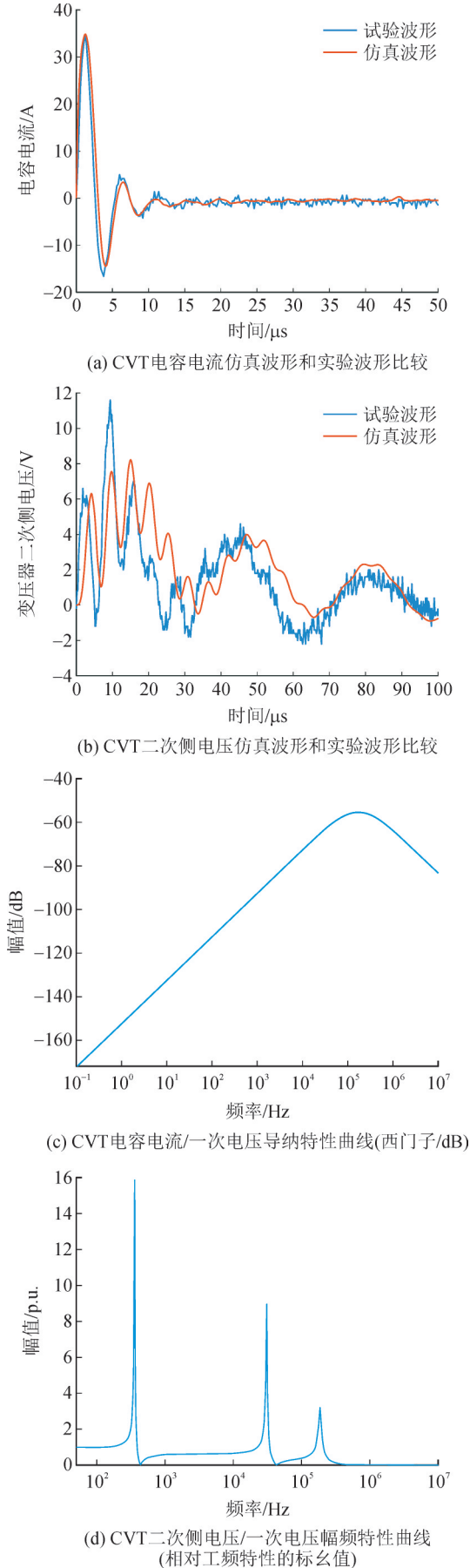


图 11 实测波形与仿真结果波形

Fig. 11 The measured waveform and simulation results of waveform

由图 11 可知, CVT 在雷电冲击信号的激励下体现复杂的高频响应特性。其中一次电压/电容电流表现出单模态谐振特性(典型值为 180 kHz 左右)。在该谐振频率点以下(50 Hz~180 kHz)频率范围内, 电容电流随着频率的增加而线性增加, 满足电容电流法的谐波测量原理。而一次电压/二次输出电压呈现多模态谐振特性, 在 MHz 的宽频范围内主要存在 3 个频率谐振点, 分别位于低频段(典型值为 400 Hz 左右)、中频段(典型值为 30 kHz 左右)和高频段(典型值为 250 kHz 左右)。对比实测波形与仿真结果可知, 文中方法所建立的 CVT 宽频模型的仿真结果与实测结果相符, 验证了该模型的有效性和建模方法的正确性。

3 CVT 传输模型的建立及杂散参数对传输特性的影响

3.1 CVT 传输模型的建立

3.1.1 一次电压/电容电流关系

为了便于分析, 对上述 CVT 宽频模型进行简化, 令:

$$Z_1 = R_{l1} + R_{c1} + L_{l1}s + L_{c1}s + \frac{1}{C_1s} \quad (2)$$

$$Z_2 = R_{c2} + L_{c2}s + \frac{1}{C_2s} \quad (3)$$

$$Z_3 = (L_k s + R_k) \parallel \frac{1}{C_c s} = \frac{L_k s + R_k}{L_k C_c s^2 + L_k C_c s + 1} \quad (4)$$

$$Z_4 = R_m \parallel L_m s \quad (5)$$

$$Z_6 = R_f + (L_f s + r_f) \parallel \frac{1}{C_f s} = R_f + \frac{L_f s + R_f}{L_f C_f s^2 + L_f C_f s + 1} \quad (6)$$

$$Z_5 = Z_6 \parallel \frac{1}{C_s s} \parallel (R_b + L_b) \quad (7)$$

得到 CVT 宽频线性电路见图 12。

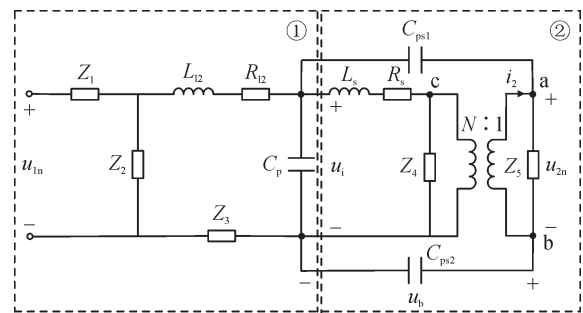


图 12 CVT 宽频等效电路

Fig. 12 CVT broadband equivalent circuit

将电路划分为如图 12 所示呈“级联”关系的 2 部分, 图 12 中: u_i 为电路第 2 部分的输入电压; u_b 为跨接电容 C_{ps2} 两端的电压差。由于跨接电容 C_{ps1} 和 C_{ps2} 的影响, 直接求取电路第二部分的传递函数较为

困难,对CVT第2部分电路单独进行分析。分别对图中的a、b、c三点列出节点电压方程有

$$\begin{cases} (u_i - u_b - u_{2n})C_{ps1}s + i_2 = \frac{u_{2n}}{Z_5} \\ \frac{u_{2n}}{Z_5} = i_2 + u_b C_{ps2}s \\ \frac{u_i - Nu_{2n}}{L_s s + R_s} = \frac{i_2}{N} + \frac{Nu_{2n}}{Z_4} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可求得

$$H_2 = \frac{u_{2n}}{u_i} = \frac{L_s C_{ps4}s^2 + R_s C_{ps4}s + NC_{ps3}}{L_s C_{ps4}s^2 + Z_8 C_{ps3}s + Z_9 C_{ps3}} \quad (9)$$

式(9)中:

$$C_{ps3} = C_{ps1} + C_{ps2} \quad (10)$$

$$C_{ps4} = C_{ps1} C_{ps2} \quad (11)$$

$$Z_8 = \frac{L_s}{Z_5} + R_s + L_s \frac{N^2}{Z_4} \quad (12)$$

$$Z_9 = N^2 + \frac{N^2}{Z_4} R_s + \frac{R_s}{Z_5} \quad (13)$$

设电路第2部分的等效阻抗为 Z_{10} ,得到CVT简化等效电路见图13。

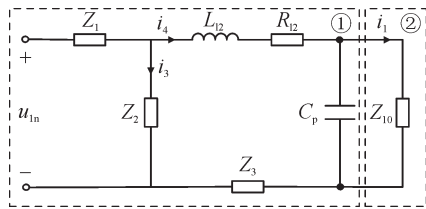


图13 CVT简化等效电路

Fig. 13 CVT broadband equivalent circuit

图13中: i_1 为电路第2部分的等效输入电流; i_2 为支路电容电流; i_3 为CVT电磁单元支路电流。

电路第2部分的等效输入电流 i_1 为

$$i_1 = \frac{u_i - Nu_{2n}}{L_s s + R_s} + \frac{u_{2n}}{Z_5} - i_2 \quad (14)$$

则电路第2部分的等效阻抗 Z_{10} 为

$$Z_{10} = \frac{(sL_s + R_s)Z_4 Z_5}{(1 - N)(1 - NH_2)Z_4 Z_5 + (sL_s + R_s)(Z_4 + N^2 Z_5)} \quad (15)$$

C_2 支路电流 i_3 为

$$i_3 = u_{1n} \frac{Z_2 \parallel Z_{11}}{(Z_1 + Z_2 \parallel Z_{11})Z_2} = u_{1n} \frac{Z_{11}}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{11} + Z_2 Z_{11}} \quad (16)$$

式(16)中

$$Z_{11} = L_{12}s + R_{12} + Z_3 + \frac{1}{C_p s} \parallel Z_{10} \quad (17)$$

CVT电磁单元支路电流 i_4 为

$$i_4 = u_{1n} \frac{Z_2 \parallel Z_{11}}{(Z_1 + Z_2 \parallel Z_{11})Z_{11}} = u_{1n} \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{11} + Z_2 Z_{11}} \quad (18)$$

由于传递函数表达式过于复杂,对其做简化分析。变压器励磁电感 L_m 为kH级别,因此 Z_{11} 远远大

于 Z_2 。由式(16)、(18)可知, C_2 支路电容电流 i_3 远远大于CVT电磁单元支路电流 i_4 。此时 $i_3 \approx u_{1n}/(Z_1 + Z_2)$,电容电流仅受 C_1 、 C_2 、 L_{l1} 、 L_{c1} 、 L_{c2} 3个参数的变化对电容电流影响相同。

3.1.2 一次电压/二次电压关系

由CVT简化等效电路可得, CVT电路第1部分的电压传递函数 H_1 为

$$H_1 = \frac{(Z_2 \parallel Z_{11})Z_{10}}{(Z_1 + Z_2 \parallel Z_{11})(Z_{10} C_p s + 1)Z_{11}} \quad (19)$$

则CVT的传递函数 H 为

$$H = \frac{u_{2n}}{u_{1n}} = H_1 H_2 = \frac{L_s C_{ps4}s^2 + R_s C_{ps4}s + NC_{ps3}}{L_s C_{ps4}s^2 + Z_8 C_{ps3}s + Z_9 C_{ps3}} \cdot \frac{(Z_2 \parallel Z_{11})Z_{10}}{(Z_1 + Z_2 \parallel Z_{11})(Z_{10} C_p s + 1)Z_{11}} \quad (20)$$

按照CVT产品的设计方法,分压器高压电容的额定值与其电压等级相对应。因此影响 H_1 的电路参数应该主要考虑CVT外回路引线等效电感 L_{l1} 、补偿电抗器电感 L_c 、补偿电抗器两端的杂散电容 C_c 和中间变压器一次侧等效杂散电容 C_p 。由式(9)可知, H_2 中包含的电路参数包括 L_s 、 R_s 、 C_{ps1} 、 C_{ps2} 、 R_m 、 L_m 、 C_s 、 Z_2 。 Z_2 为阻尼器支路,由式(1)可知,按照CVT产品的设计方法除了 C_r 外,其余3个参数是基本确定的。因此电路参数对 H_2 的影响应主要考虑中间变压器一次侧绕组的漏感 L_s 、中间变压器一二次侧间耦合杂散电容 C_{ps1} 和 C_{ps2} 、励磁支路电阻 R_m 、励磁支路电感 L_m 、中间变压器二次侧等效杂散电容 C_s 、谐振型阻尼器的电容 C_r ,其中 C_{ps1} 和 C_{ps2} 对 H_2 的影响完全相同。

通过上述推导得到的CVT的传递函数复杂且阶数很高,难以直接求得传递函数的零极点进而分析各个杂散参数对CVT传输特性的影响规律。然而结合CVT传递函数研究影响CVT宽频模型传输特性的关键参数,可以通过选取主元定量分析的方法具体分析,以寻找选取的110 kV CVT在1 MHz以内的频段主要存在的频率谐振点及影响谐振点的灵敏参数。

3.2 杂散电容参数变化对传输特性的影响

为了深入研究杂散电容参数变化对CVT传输特性的影响,基于Simulink仿真平台搭建CVT宽频等效电路模型,并进行仿真分析。基于定量分析的原理,设置110 kV CVT宽频等效模型的实测参数,控制单一变量,其他参数固定不变,逐个分析各个参数的影响规律,最后对整体规律进行总结,归纳出各个频段的主要影响因素。

3.2.1 补偿电抗器杂散电容 C_c 的影响

杂散电容 C_c 初始值和步长分别为300 pF和100 pF,设置模型中的元件参数均为测量值,只改变唯一变量 C_c ,得到 C_c 变化对CVT传递特性影响的幅频曲线见图14。

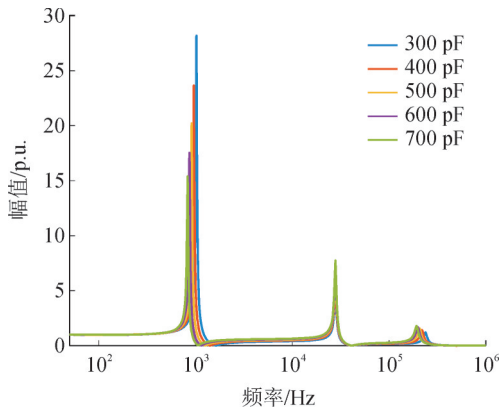


图14 杂散电容 C_c 变化的幅频特性

Fig. 14 Amplitude-frequency characteristics of stray capacitance C_c variation

由图14可知,110 kV CVT在1 MHz以内的频段出现3个频率谐振点,分别位于400 Hz、30 kHz、250 kHz范围内。当 C_c 值逐渐变大时,发生谐振的低频区域,频率变小,幅值也变小。然而发生谐振的中频区域,频率基本保持不变,幅值增大。发生谐振的高频区域,频率变小,且幅度变大。

3.2.2 变压器一次侧绕组杂散电容 C_p 的影响

设定 C_p 的初始值为200 pF,并在后续的迭代过程中,每次以100 pF的步长进行增加。在此过程中,确保其他影响参数保持不变,以单独评估 C_p 变化所带来的影响。为了直观地展示 C_p 值变化时CVT传递特性的变化,逐一绘制了不同 C_p 值下的幅频曲线,见图15。仿真结果表明,在当前研究条件下, C_p 的变化不是影响CVT传递特性的关键因素。

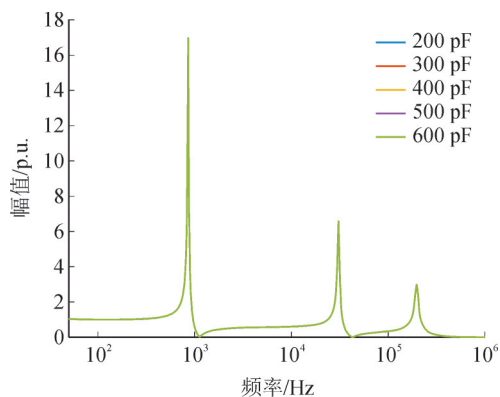


图15 杂散电容 C_p 变化的幅频特性

Fig. 15 Amplitude-frequency characteristics of stray capacitance C_p variation

3.2.3 变压器二次侧绕组杂散电容 C_s 的影响

杂散电容 C_s 初始值和步长分别为10 nF和5 nF,得到 C_s 变化的幅频曲线见图16。

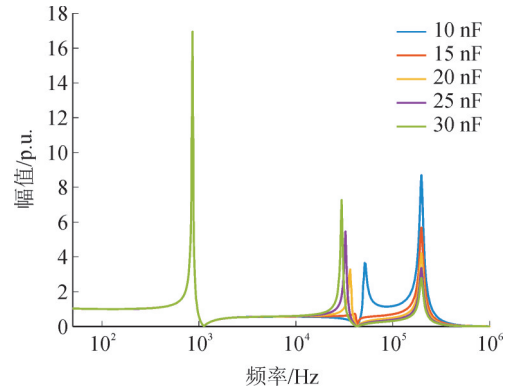


图16 杂散电容 C_s 变化的幅频特性

Fig. 16 Amplitude-frequency characteristics of stray capacitance C_s variation

由图16可知,随着 C_s 值的增加,低频段谐振点的谐振频率和幅值保持不变;中频段,CVT的谐波传递特性幅频特性最大值移向低频段,最小值不动,曲线的峰值随着 C_s 增大而增大减小。低谷点以后的一部分曲线随 C_s 的增大而增大;高频段谐振频率不变,幅值减小。

3.2.4 一二次绕组间的杂散电容 C_{ps1} 、 C_{ps2} 的影响

C_{ps1} 和 C_{ps2} 对 H_3 的影响完全相同,保持 C_{ps2} 的值为255 pF, C_{ps1} 初始值和步长分别为155 pF和100 pF,得到 C_{ps1} 变化的幅频特性曲线见图17。

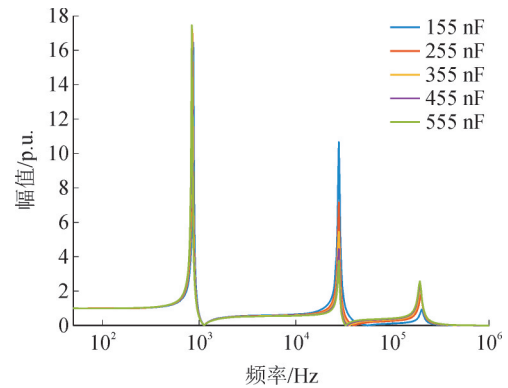


图17 杂散电容 C_{ps1} 变化的幅频特性

Fig. 17 The amplitude-frequency characteristics of the stray capacitance C_{ps1} variation

仿真结果表明,当 C_{ps1} 逐渐变大时,发生谐振的低频区域,频率变小,幅度则变大。然而发生谐振的中频区域,频率基本保持不变,幅值变小。发生谐振的高频区域,频率变小,幅值变大。

3.2.5 中间变压器一次侧绕组的漏感 L_s 的影响

当中间变压器一次侧绕组的漏感 L_s 变化时,设为参变量, L_s 初始值和步长分别为20 H和5 H,设置模型中的元件参数均为测量值,只改变唯一变量 L_s ,

得到 L_s 变化时的幅频曲线见图18。

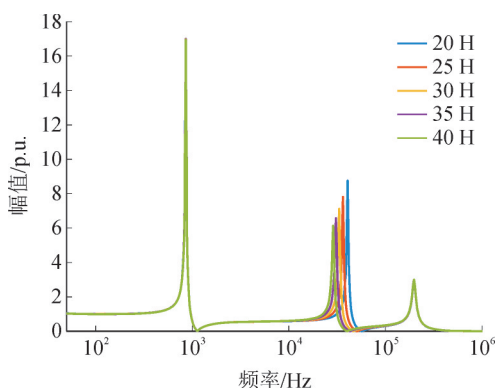


图18 漏感 L_s 变化的幅频特性

Fig. 18 The amplitude-frequency characteristics of the inductance L_s variation

仿真结果表明,漏感 L_s 取不同值对CVT的谐波传递特性的影响主要体现在中频段。低频段和高频段谐振点的谐振频率及幅值几乎不变;随着中间变压器一次侧绕组漏感 L_s 的增加,中频段谐振频率向低频移动,且幅值减小。

3.2.6 补偿电抗器电感 L_k 的影响

L_k 初始值和步长分别为20 H和5 H,设置模型中的元件参数均为测量值,只改变唯一变量 L_k ,得到 L_k 变化时的幅频曲线见图19。

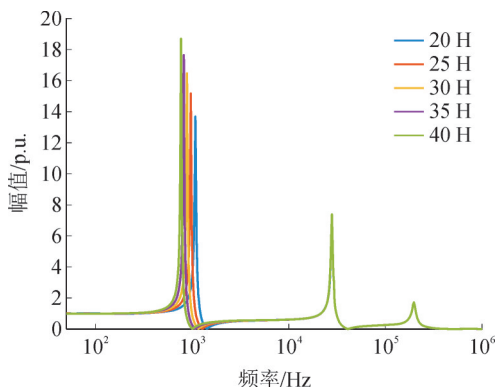


图19 补偿电抗器电感 L_k 变化的幅频特性

Fig. 19 The amplitude-frequency characteristics of the inductance L_k variation

仿真结果表明,补偿电抗器电感 L_k 取不同值对CVT的谐波传递特性的影响主要体现在低频段。随着CVT补偿电抗器电感 L_k 的增加,中频段和高频段谐振点的谐振频率及幅值几乎不变;低频段谐振频率向低频移动,且幅值增大。

3.2.7 阻尼器谐振电容 C_r 的影响

谐振电容 C_r 原则上会对高频下的CVT传输特性产生影响,不过由2.1节给出的参数值,把 C_r 折算到变压器一次侧后,其值仅约为1~4 pF,远远小于CVT一次侧等效杂散电容($C_p=388$ pF)和一二二次侧间耦合杂散电容($C_{ps1}=C_{ps2}=255$ pF),因此该参数对CVT

传输特性的影响很小,可以忽略。

根据以上分析可知,所选取的110 kV CVT在MHz以内的频段主要存在3个频率谐振点,第1个谐振点大概在400 Hz范围内,第2个谐振点大概在30 kHz范围内,第3个谐振点大概在250 kHz范围内。低频段主要受补偿电抗器电感、补偿电抗器杂散电容的影响,中频段主要受中间变压器一次侧绕组的漏感、变压器二次侧等效杂散电容、中间变压器一二次侧间耦合杂散电容的影响,高频段主要受引线电感、补偿电抗器等效杂散电容、中间变压器一二次侧间耦合杂散电容以及二次侧等效杂散电容的影响。总结影响CVT传输特性中不同振荡模态的主要影响因素见表4。

表4 CVT宽频模型传输特性影响因素

Table 4 Factors influencing CVT transmission characteristics

谐振模态	频率/kHz	影响因素
电容电流单模态谐振	180	电感: L_{A1}, L_1, J_2 ; 电容: C_1, C_2
二次侧电压的低频谐振	400	电感: L_k ; 电容: C_c
二次侧电压的中频谐振	30	电感: L_k ; 电容: C_s, C_{ps1}, C_{ps2}
二次侧电压的高频谐振	250	电感: L_{A1}, L_{A2} ; 电容: $C_c, C_{ps1}, C_{ps2}, C_s$

4 结论

CVT在雷电冲击信号的激励下体现复杂的高频响应特性。具体如下:

1)一次电压/电容电流表现出单模态谐振特性(典型值为180 kHz左右)。CVT外回路引线电感和CVT高压臂电容是电容电流谐振模态的主要影响因素。对用于谐波电压准确测量的电容电流法来说,该谐振频率点以下为电容电流法可以进行有效测量的频段范围。

2)一次电压/二次输出电压呈现多模态谐振特性,在MHz的宽频范围内主要存在三个频率谐振点,分别位于低频段(典型值为400 Hz左右)、中频段(典型值为30 kHz左右)和高频段(典型值为250 kHz左右)。低频段谐振点主要影响谐波传输特性,该谐振点主要受补偿电抗器电感、补偿电抗器杂散电容的影响。中频和高频谐振点主要影响操作过电压或者雷电冲击过电压引起的CVT响应特性。中频谐振点主要受中间变压器一次侧绕组的漏感、变压器二次侧等效杂散电容、中间变压器一二次侧间耦合杂散电容的影响。高频谐振点主要受外回路引线等效电感、补偿电抗器等效杂散电容、中间变压器一二次侧间耦合杂散电容以及二次侧等效杂散电容的影响。

文中提出的宽频模型在现有研究的基础上引入了CVT外回路引线电感和中间回路寄生电感,更好的解释了MHz频段内的CVT电磁暂态响应特性。通过对影响CVT主要谐振模态的参数进行补偿和设计可以实现对CVT宽频特性的优化。同时,通过检测CVT传输特性谐振模态的漂移可以实现对主要影响参数的辨识,进而实现对CVT内部故障隐患的诊断,文中的研究结果为此提供了必要的理论指导依据。

参考文献:

- [1] 陈东明, 王建伟, 李 旸, 等. 电容式电压互感器典型故障及缺陷分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(6): 36-43.
CHEN Dongming, WANG Jianwei, LI Yang, et al. Analysis of typical faults and defects of capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 36-43.
- [2] 田 浩, 杨 敏, 陈小龙, 等. 500 kV 电容式电压互感器异常发热原因分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 106-113.
TIAN Hao, YANG Min, CHEN Xiaolong, et al. Analysis on abnormal heating and preventive measures of 500 kV capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 106-113.
- [3] 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.
- [4] 邢 宇, 徐云武, 翟晓卉, 等. 计及一次电压波动影响的CVT内绝缘状态在线评估方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(6): 102-110.
XING Yu, XU Yunwu, ZHAI Xiaohui, et al. On-line evaluation method of CVT internal insulation state considering the influence of primary voltage fluctuation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(6): 102-110.
- [5] 赵彦林, 周志新, 何 亮, 等. 一起电容式电压互感器二次电压异常故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 114-120.
ZHAO Yanlin, ZHOU Zhixin, HE Liang, et al. Analysis of an abnormal secondary voltage of capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 114-120.
- [6] 刘朗旭, 李振华, 李振兴, 等. 电容式电压互感器谐波传递特性及预测方法[J/OL]. 南方电网技术: 1-11[2025-09-30]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/zh/debutDetail.html?serialNum=20250516001>.
LIU Langxu, LI Zhenhua, LI Zhenxing, et al. Harmonic transfer characteristics and prediction method of capacitive voltage transformer[J/OL]. Southern Power System Technology: 1-11[2025-09-30]. <https://nfdwjs.csg.cn/gateway-web/en/debutDetail.html?serialNum=20250516001>.
- [7] 朱铁超, 聂一雄, 李 哲, 等. 基于改进粒子群优化算法的CVT杂散电容参数估计方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 178-186.
ZHU Tiechao, NIE Yixiong, LI Zhe, et al. Parameter estimation method of stray capacitance of capacitive voltage transformer based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 178-186.
- [8] 黄之笛, 武霁阳, 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(3): 69-76.
HUANG Zhidi, WU Jiyang, PENG Guangqiang, et al. Research on wideband harmonic transmission characteristics test of CVT based on multi-harmonic injection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 69-76.
- [9] 钟立华, 潘 峰, 李金莉, 等. 10 kV 宽频直流电压互感器设计[J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 31-37.
ZHONG Lihua, PAN Feng, LI Jinli, et al. Design of 10 kV wide frequency DC voltage transformer[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(11): 31-37.
- [10] 姚锡钦. 一起110 kV电容式电压互感器二次电压异常的故障分析[J]. 变压器, 2024, 61(6): 67-70.
YAO Xiqin. Fault analysis of secondary voltage anomaly of 110 kV capacitive voltage transformer[J]. Transformer, 2024, 61(6): 67-70.
- [11] 赵文华, 王子乐, 李秋阳, 等. 一起35 kV CVT电容分压器爆炸原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 77-84.
ZHAO Wenhua, WANG Zile, LI Qiuyang, et al. Analysis on explosion of capacitor divider of 35 kV CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 77-84.
- [12] 电能质量 公用电网谐波: GB/T 14549—93[S]. 1994.
Quality of electric energy supply harmonics in public supply network: GB/T 14549—93[S]. 1994.
- [13] 陈一惊, 刘坤雄, 张小庆, 等. 基于电容电流的谐波电压在线监测系统研制[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 67-74.
CHEN Yicong, LIU Kunxiong, ZHANG Xiaoqing, et al. Development of voltage harmonics online measurement system based on capacitor current[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 67-74.
- [14] 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 Weilun, HUANG Zhiwei, LIU Xiaopei. Study on the processing method of influence of stray capacitance on CVT harmonic measurement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 59-63.
- [15] 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 Yu, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. Influences of circuit parameters of capacitor voltage transformer on grid harmonic voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4968-4975.
- [16] 王 佼. 电容式电压互感器主要参数对谐波传递特性的影响仿真分析[J]. 广西电力, 2023, 46(1): 81-86.

- WANG Jiao. Simulation analysis of the influence of main parameters of CVT on harmonic transmission characteristics[J]. Guangxi Electric Power, 2023, 46(1): 81-86.
- [17] 吴茂林, 崔翔. 电压互感器宽频特性的建模[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 1-5.
- WU Maolin, CUI Xiang. Modeling of wide frequency characteristic of potential transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 1-5.
- [18] 陈少伟, 崔翔, 由建, 等. 互感器宽频传递特性的散射参数测量法[J]. 电气应用, 2006(2): 22-24.
- CHEN Shaowei, CUI Xiang, YOU Jian, et al. Scattering parameter measurement for broadband transfer characteristics of transformers[J]. Electrical Applications, 2006(2): 22-24.
- [19] 张广勇. 1 000 kV 电容式电压互感器宽频等效电路建模和应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHANG Guangyong. Research on wideband equivalent circuit modeling and application of 1 000 kV capacitive voltage transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [20] 梁贵书, 杜欣宇, 谢宇廷, 等. 电容式电压互感器的宽频无源电路模型[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 179-185.
- LIANG Guishu, DU Xinyu, XIE Yuting, et al. Broadband passive circuit model of capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 179-185.
- [21] 司马文霞, 王惠, 杨鸣, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 5034-5043.
- SIMA Wenxia, WANG Hui, YANG Ming, et al. Wideband and nonlinear model of capacitive voltage transformer considering the saturation of intermediate transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 5034-5043.
- [22] 陈一惊, 赵壮民, 李军浩. 冲击电压下 CVT 传递特性及其缺陷故障检测研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 89-94.
- CHEN Yicong, ZHAO Zhuangmin, LI Junhao. CVT voltage transfer characteristics under impulse voltage & its fault detection[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 89-94.
- [23] STUMBERGER G, POLAJZER B, STUMBERGER B, et al. Evaluation of experimental methods for determining the magnetically nonlinear characteristics of electromagnetic devices[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 4030-4032.
- [24] 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: 重庆大学, 2021.
- WANG Hui. Wideband nonlinear model of capacitive voltage transformer considering the saturation characteristics of the intermediate transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- 刘坤雄(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事互感器在电能质量测量中的应用研究(E-mail: liukunxiong123@163.com)。
- 曾翔君(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电气工程(通信作者)(E-mail: zengxj@xjtu.edu.cn)。

~~~~~

(上接第 112 页)

- tion comparison between composite insulators and standard disc suspension insulators in Zhejiang province and environmental factor effects on the contamination differences[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 221-229.
- [18] 卢明, 刘泽辉, 向玲, 等. 不同电压等级下绝缘子积污特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 186-191.
- LU Ming, LIU Zehui, XIANG Ling, et al. Study on contamination depositing characteristics of insulators under different voltage degrees[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 186-191.
- [19] 万小东, 南敬, 徐涛, 等. 人工积污试验系统及绝缘子积污特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1861-1869.
- WAN Xiaodong, NAN Jing, XU Tao, et al. Artificial contamination test system and contamination characteristics of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1861-1869.
- [20] 宋云海. 基于表面电导的绝缘子积污在线监测系统[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- SONG Yunhai. The study based on the insulator pollution deposit on-line monitoring of surface conductance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [21] 刘刚, 胡倩楠, 陈锡阳. 由表面电导实现绝缘子污秽程度监测的可行性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1321-1326.
- LIU Gang, HU Qiannan, CHEN Xiyang. Feasibility analysis of monitoring the insulator surface contamination based on surface conductivity[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1321-1326.
- [22] 刘宇, 李光茂, 朱晨, 等. 湿热环境异常发热复合绝缘子电
- 热耦合仿真分析[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 31-39.
- LIU Yu, LI Guangmao, ZHU Chen, et al. Electrothermal coupling simulation analysis of composite insulators with abnormal heat in humid and hot environment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 31-39.
- [23] 刘云鹏, 张凯元, 付炜平, 等. 不同湿度下低值瓷质绝缘子的发热特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1741-1749.
- LIU Yunpeng, ZHANG Kaiyuan, FU Weiping, et al. Heating characteristics of deteriorated porcelain insulator under different humidities[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1741-1749.
- [24] 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验: GB/T 4585—2024[S]. 2025.
- Artificial pollution tests for high-voltage insulators to be used on AC systems: GB/T 4585—2024[S]. 2025.
- [25] 张志劲, 张东东, 袁超, 等. 污秽成分对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1970-1976.
- ZHANG Zhijin, ZHANG Dongdong, YUAN Chao, et al. Effect of contamination component on AC flashover performance of insulator string XP-160[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1970-1976.
- 王胜辉(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断方面的研究工作(E-mail: hdwsh@ncepu.edu.cn)。
- 买佳敏(1999—), 女, 硕士, 主要从事瓷绝缘子劣化机理及检测方法研究(通信作者)(E-mail: 960080540@qq.com)。