第 52 卷 第 7 期：3302-3314 高电压技术 Vol.52, No.7: 3302-3314
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250155

500 kV 电容式电压互感器的高频等效电路模型与参数影响

赵丹丹[1]，管　硕[2]，肖　嵘[1]，王黎明[1]，贺　林[1]，刘亚坤[3]
（1. 国网上海市电力公司电力科学研究院，上海 200437；2. 国网上海市电力公司直流分公司，上海 201105；
3. 上海交通大学电气工程学院，上海 200240）

摘　要：电容式电压互感器(capacitor voltage transformer，CVT)的等效电路存在高频响应误差大、结果偏离度高的问题。为此，以 500 kV CVT 为研究对象，通过试验和仿真方法，开展了 CVT 各组件和结构的高频等值电路参数化研究，建立计及寄生参数下 CVT 的高频等效电路模型，计算 CVT 的传递函数，分析 CVT 暂态耦合电容的传递特性，讨论寄生参数对暂态耦合电容频响特性的影响。研究得到，所提高频等效电路模型使得 CVT 频响幅值和相角在高频激励下误差分别减小了 106.2%和 49.4%，CVT 暂态耦合电容寄生电感增大会使得传递曲线尖峰值和低谷值频率降低但幅值增大，相位点频率分布误差出现低频化。研究结果有助于认识雷电和操作过电压下 CVT 的高频响应特性。

关键词：电容式电压互感器；高频等效电路模型；暂态耦合电容；频响特性；寄生参数

High Frequency Equivalent Circuit Model and Parameter Influence of 500 kV Capacitive Voltage Transformer

ZHAO Dandan[1], GUAN Shuo[2], XIAO Rong[1], WANG Liming[1], HE Lin[1], LIU Yakun[3]
(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China;
2. DC Branch of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201105, China;
3. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The equivalent circuit for capacitive voltage transformer (CVT) exhibits significant high-frequency response errors and substantial deviation in results. To address this issue, a comprehensive study was conducted on a 500 kV CVT, utilizing both experimental and simulation methods. This study involved parameterizing the equivalent circuit of each component and structure of CVT, developing a high frequency equivalent circuit model that includes parasitic parameters. The transfer function of the CVT was calculated, and the transient coupling capacitance was analyzed for its transfer characteristics. The impact of parasitic parameters on the frequency response characteristics of the transient coupling capacitance was also discussed. The research findings indicate that the proposed high frequency equivalent circuit model reduced the amplitude and phase angle errors of the CVT frequency response under high-frequency excitations by 106.2% and 49.4%, respectively. It was also observed that an increase in the parasitic inductance of the CVT's transient coupling capacitance leads to a decrease in the frequency of the peaks and troughs of the transfer curve, while increasing their amplitude. Additionally, the frequency distribution error of the phase points shifts to lower frequencies. The results help to understand the high frequency response characteristics of CVT under lightning and operating overvoltage.

Key words: capacitive voltage transformer; high frequency equivalent circuit model; transient coupling capacitance; frequency resonance characteristics; parasitic parameter

0　引言

电压互感器通过对电网中重要节点的电压、电流等信息进行采集、传递、监测等，为保护和控制等提供所需参数[1-3]。可主要分为电容式电压互感器(capacitor voltage transformer，CVT)和电磁式电压互感器(electromagnetic potential transformer，PT)[4-6]。其中，CVT 利用电容器串联分压的原理实现电压测

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(520940230035)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (520940230035).

量，PT 基于电磁感应原理传递电压信息[7-9]。近年来，CVT 在响应速度、运行可靠性以及安全性等多方面得到了显著提升，相较于 PT 具有体积小、易于维护、耐久性强、成本低以及可用于载波通信等方面的优势，被广泛应用于 110 kV 及以上电压等级的电网中[10-12]。

在 CVT 物理性能研究方面，已有工作主要围绕 CVT 制造工艺[13-14]、铁磁谐振抑制[15-16]、集成化制造[17]、新材料的开发应用[18]、安全性能提升等方面开展。通过研究，CVT 的生产制造技术、防腐性、绝缘性、耐压能力以及可靠性等方面得到了较大提升[19-20]。在 CVT 测量精度研究方面，文献[21]针对工频范围内 CVT 误差频率特性开展理论分析研究，但未考虑 CVT 的非线性特性和环境变化等因素的综合影响。文献[22]通过建立典型耦合影响下的 CVT 电路模型对频率误差进行修正以提升电网工频信号测量精度。文献[23-25]基于主成分分析法、支持向量机回归等误差评估方法开展线上 CVT 测量精度评估以期为电网长期投运的 CVT 测量准确度提供参考。此外，研究认识了 CVT 谐波信号传递特性的定量规律和测量误差[26-28]，开发了谐波测量和阻尼装置等，有效提升了 CVT 的测量精度。

近年来随着电网对高频暂态响应能力要求的提高[29-31]，国内外研究以现行 IEC 标准为框架[32-33]，聚焦 CVT 高频传变特性分析，探索不同方法扩宽 CVT 的测量频率，期望在准确测量工频电压的基础上增加对雷电、操作等过电压的测量能力[34-35]。文献[36-37]通过在 500 kV CVT 内置串联低压电容 C_3 的方法初步实现了过电压波形的测量，并进一步研发了暂态过电压触发监测功能，在 500 kV 练塘站中记录到了过电压波动过程。然而，现有新增电容 C_3 方案的等效电路模型存在高频幅值衰减大、相位响应不足等问题，难以满足兆赫兹级暂态信号准确表征的需求[38-40]，同时，现有 CVT 等值电路模型存在高频响应误差大、结果偏离度高的问题，在高频范围内的等效电路模型构建和频响特性分析等方面还需要研究。

为此，以 500 kV CVT 为研究对象，开展 CVT 各组件和结构的高频等值电路参数化分析，建立计及寄生参数下 500 kV CVT 的高频等效电路模型，并开展了试验验证。进而计算高频下 500 kV CVT 的传递函数，分析 CVT 暂态耦合电容的传递特性。并讨论 CVT 中寄生参数对暂态耦合电容频响特性的影响，为进一步提升 CVT 的高频测量能力提供参考。

1　500 kV CVT 结构与试验分析

以国网上海电力公司基于暂态电压耦合技术研制的 500 kV 电容式电压互感器为研究对象开展传变特性试验分析。试验系统集成信号发生器、标准分压器、示波器以及待测 CVT 等重要设备，如图 1 所示为 CVT 传变特性试验模型架构图。图 1 中方形虚线框为 CVT 整体装置，由具备降压功能的电容分压器以及实现电压变换的电磁单元构成；圆形虚线框为 500 kV CVT 底端结构，包含串接的无感电容(型号 930C12W3-3K-F)。无感电容的单个容值为 3 μF，绝缘电阻为 2 000 MΩ，交流耐压为 500 V。

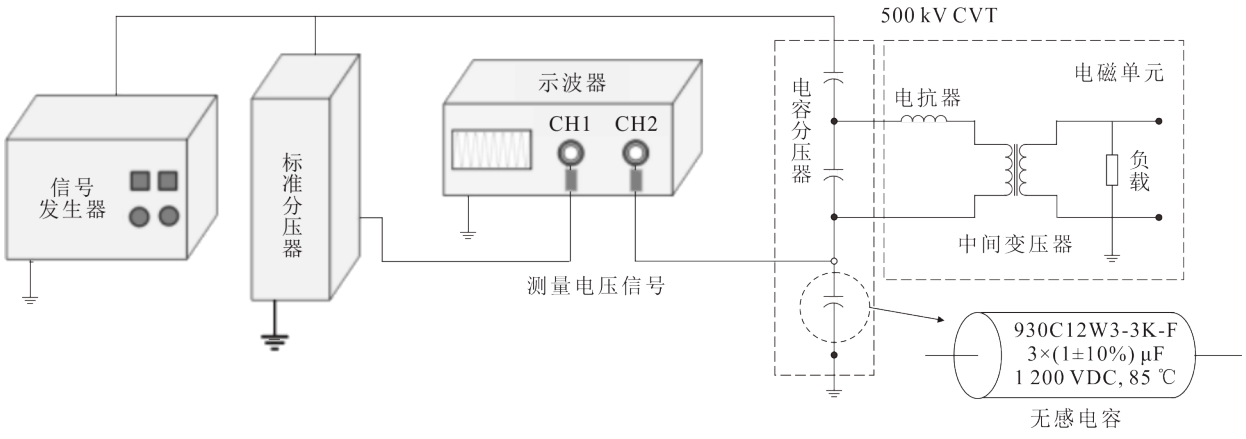


图 1　CVT 传变特性试验模型架构图

Fig.1　Model architecture diagram of CVT transmission characteristic test

首先通过工频试验系统对 500 kV CVT 进行工频试验，即输入不同电压峰值的频率为 50 Hz 的正弦交流电。利用数字式多功能交流峰值电压表获取波形峰值参数，利用 Tektronix 示波器记录源输入电压波形和暂态耦合电容输出电压波形。工频试验下，500 kV CVT 源输入与暂态耦合电容输出测量波形如图 2 所示。对比可知，CVT 暂态耦合电容输出测量波形与源输入波形相符，误差<0.1%。

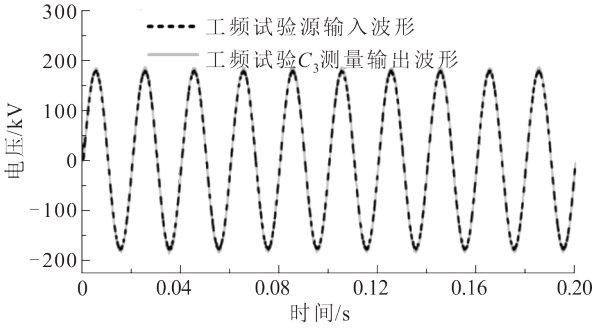


图 2 CVT 工频试验结果

Fig.2 Industrial frequency test result of CVT

其次，采用 3 000 kV 冲击电压发生器对 CVT 开展多工况雷电冲击试验，包括覆盖多电压等级正、负 2 种极性的雷电压模拟波形的重复性测试。试验中同步记录源输入电压波形和 CVT 暂态耦合电容输出电压波形，以负极性雷电压波形为例，模拟雷电压源输入波形与 500 kV CVT 输出测量波形，如图 3 所示。对比可知，CVT 输出测量波形相较于源输入测量波形在波前时间、幅值以及波尾时间等方面存在误差，分别达 17.4%、9.1%以及 8.9%。

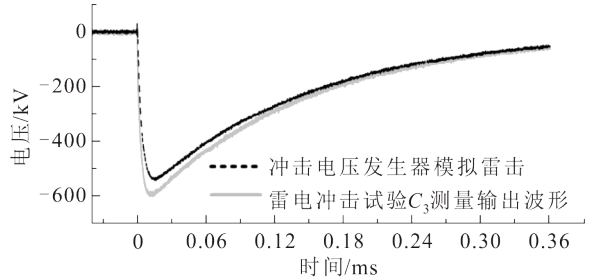


图 3 CVT 雷电冲击试验

Fig.3 Lightning shock test of CVT

然后，对 500 kV CVT 开展多工况操作冲击试验，包括覆盖多电压等级正、负 2 种极性的操作过电压模拟波形的重复性测试，并记录源输入电压波形和 CVT 暂态耦合电容输出电压波形。以负极性操作冲击波形为例，操作电压源输入与 500 kV CVT 输出测量波形如图 4 所示。对比可知，在操作冲击电压波形激励下，CVT 测量波形在波前时间、幅值以及波尾等方面存在误差，分别达 9.2%、6.9%以及 3.9%。

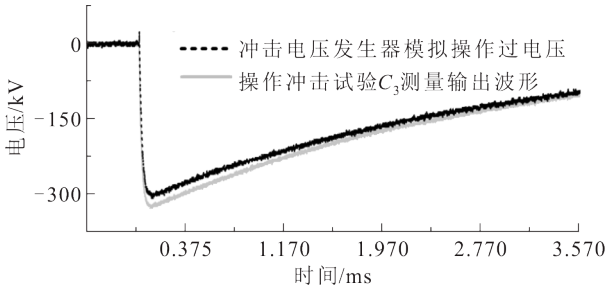


图 4 CVT 操作冲击试验

Fig.4 Operating shock test of CVT

2 500 kV CVT 建模与传递特性分析

2.1 500 kV CVT 工频等值电路建模

基于暂态电压耦合技术研制的 500 kV CVT 的具体结构与传统 CVT 不同之处在于电容分压器，即在中压电容 C_2 低压端及接地端子之间接入无感电容 C_3，用以提高电力系统电压测量的精度，其电气原理图如图 5 所示。

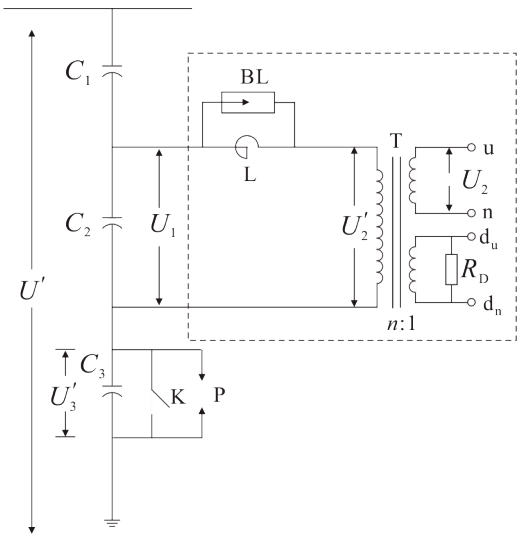


图 5 CVT 电气原理图

Fig.5 Electrical schematic of CVT

其中，图 5 中 C_1、C_2、C_3 组成电容分压器，主要功能是将一次侧高压分压至较低电压并馈入中间变压器。图 5 右侧虚线框内部分为电磁单元，中间变压器 T 将获得的较低电压进一步转换为可供测量装置、继电保护装置等适用的电压范围；分压回路中补偿电抗器 L 的加入能够调节其感抗与容抗的大小，降低整体阻抗以减小对电压测量精度的影响。

CVT 二次侧加设阻尼装置(R_D为其电阻)，从而抑制励磁电流以及铁芯温度增长过快，降低中间变压器 T 铁芯饱和时激发大电流和铁磁谐振过电压幅值，避免二次继电器的误动作。K 为接地闸刀，CVT 正常运行时处于其闭合状态。U'是一次侧电压，U_1是中间电压，U_2'是中间变压器的一次侧输入电压，U_2是二次侧电压，U_3'是测量电压；P 为对地保护间隙；BL 为避雷器；u、n 为二次绕组端子，可供电压的测量使用；d_u、d_n为剩余电压绕组端子。

依据图 5 电气原理图可知，经过电容分压器后所形成的电压满足：

$$\boldsymbol{U}_1=\frac{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_2}\boldsymbol{U}'}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_2}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_3}}=\frac{C_1C_3\boldsymbol{U}'}{C_1(C_2+C_3)+C_2C_3} \tag{1}$$

工频电压激励下，CVT 装置的传变特性满足：

$$n\boldsymbol{U}_2=\boldsymbol{U}_2'=\frac{C_1C_3}{C_1(C_2+C_3)+C_2C_3}\boldsymbol{U}' \tag{2}$$

由式(2)进一步可得：

$$K_\mathrm{m}=(1+\frac{C_2}{C_1}+\frac{C_2}{C_3})\,n \tag{3}$$

根据分压原理可得电压$\boldsymbol{U}_3'$满足：

$$\boldsymbol{U}_3'=\frac{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_3}\boldsymbol{U}'}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_1}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_2}+\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C_3}}=\frac{C_1C_2\boldsymbol{U}'}{C_1(C_2+C_3)+C_2C_3} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{U}_1$、$\boldsymbol{U}_2$、$\boldsymbol{U}'$、$\boldsymbol{U}_2'$和$\boldsymbol{U}_3'$为电压相量；n 为中间变压器的变比；K_m为装置的额定变比。

稳态运行下的 CVT 工频等值电路模型如图 6 所示。其中，L_k表示 L 的电感，L_{T1}、R_{T1}分别为 T 一次侧的电阻和漏感，R_m、L_m分别为励磁电阻和电感，R_D、L_D 分别表示阻尼器的电阻、电感，L_{T2}、R_{T2}分别为 T 二次侧与阻尼器串联的电阻和漏感，R_Z、L_Z分别表示负载的电阻、电感，L_{T3}、R_{T3}分别为 T 二次侧与负载串联的电阻和漏感。

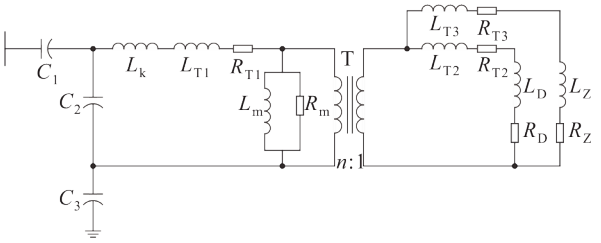


图 6　CVT 工频等值电路模型

Fig.6　Equivalent circuit model of CVT under industrial frequency condition

为分析 CVT 的传递特性，须计算输入输出端口的传递函数，令$Z_1'=X_{C1}$，$Z_2'=X_{C2}$，$Z_3'=X_{C3}$，$Z_4'=X_{Lk}$，$Z_5'=R_{T1}+X_{LT1}$，$Z_6'=R_{T2}+X_{LT2}$，$Z_7'=R_{T3}+X_{LT3}$，$Z_8'=R_D+X_{LD}$，$Z_9'=R_Z+X_{LZ}$。其中：X_{C1}、X_{C2}、X_{C3} 表示电路中 C_1、C_2、C_3 的容抗值；X_{Lk}表示补偿电抗器的感抗值，X_{LT1}、X_{LT2} 分别表示中间变压器一次侧和二次侧的漏感抗值，X_{LD}表示负载的感抗值，X_{LZ}表示二次回路感抗值，忽略 T 的励磁回路，得到 CVT 的等效阻抗模型，如图 7 所示。

基于电路理论分析可得：

$$\begin{cases}\boldsymbol{U}'=\boldsymbol{i}_1Z_1'+\boldsymbol{i}_2Z_2'+\boldsymbol{i}_3Z_3'\\ \boldsymbol{i}_2Z_2'=\boldsymbol{i}_4(Z_4'+Z_5')+\boldsymbol{u}_{\mathrm{T1}}\\ \boldsymbol{i}_6(Z_6'+Z_8')=\boldsymbol{i}_7(Z_7'+Z_9')=\boldsymbol{u}_{\mathrm{T2}}\\ \boldsymbol{i}_1=\boldsymbol{i}_2+\boldsymbol{i}_3\\ \boldsymbol{i}_5=\boldsymbol{i}_6+\boldsymbol{i}_7\\ \boldsymbol{i}_3=\boldsymbol{i}_2+\boldsymbol{i}_4\\ \boldsymbol{u}_{\mathrm{T1}}=n\boldsymbol{u}_{\mathrm{T2}}\\ n\boldsymbol{i}_4=\boldsymbol{i}_5\end{cases} \tag{5}$$

由式(5)可得源输入与 C_3 输出端口传递函数$G_{U'U_3'}$为关于阻抗Z_1'—Z_9'的函数。即：

$$G_{U'U_3'}=Z_3'(n^2+(Z_2'+a)(b+c)/(bc))/(n^2(Z_1'+Z_2'+Z_3')+(aZ_3'+Z_1'(Z_2'+a)+Z_2'(Z_3'+a))(b+c)/(bc)) \tag{6}$$

式中：$a=Z_4'+Z_5'$；$b=Z_6'+Z_8'$；$c=Z_7'+Z_9'$。

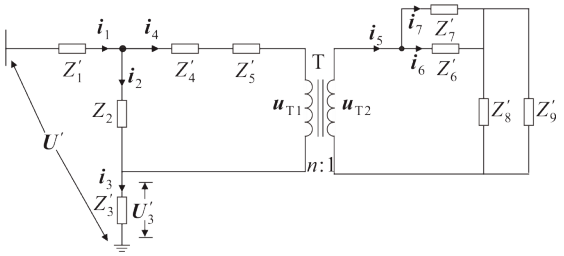


图 7　CVT 工频等效阻抗模型

Fig.7　Impedance model of CVT under industrial frequency condition

为验证所得传递函数的有效性，搭建了 500 kV CVT 的工频等效阻抗模型，计算 CVT 输入输出端口的传递特性曲线，并对比数值分析与仿真结果。同时开展了工频、高频冲击下的试验研究，并利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)将时域信号转换为离散频域信号，其结果如图 8 所示。

如图 8 结果所示，对于 CVT 传递幅频特性曲线，在低频段 CVT 对于电压信号的传递幅值计算

值和试验值误差≤2%，波动幅度较小，而在(1~700 kHz)频谱范围内存在较大误差，最高达35.9%。对于CVT传递相频特性曲线，计算值和试验值在低频段CVT电压信号的传递相位偏移幅度较小，但对高频段同样存在误差，达47.2%。分析结果表明该等值电路模型无法有效呈现高频情况下CVT的暂态过程，这是由于CVT中的杂散参数和耦合参数在高频下阻抗值变化较大，引起其高频传递特性失真。

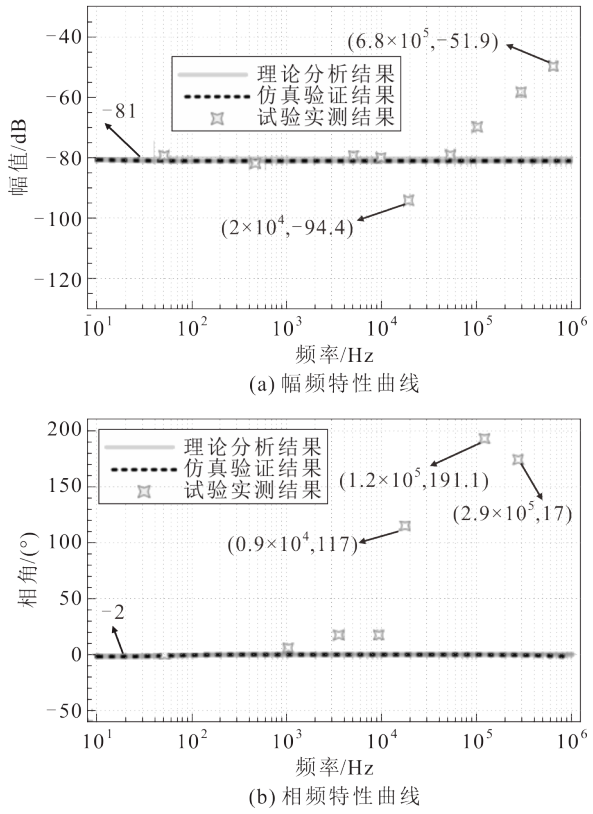


图8 CVT传递特性曲线

Fig.8 Transmission characteristic curve of CVT

2.2 500 kV CVT高频等效电路建模

为此，需要考虑CVT内部杂散参数和耦合参数，开展CVT各组件和结构的等值电路参数化分析，建立计及寄生参数下CVT的高频等效电路模型，改善CVT高频传递特性失真的问题。

CVT结构中引线、封装以及电极结构中会产生寄生参数，主要表现为与等效电路串/并联的寄生电感、电容等形式。其中，寄生电感与电容器串联后总阻抗与频率的关系满足式(7)，低频下$1/(\omega C_i)$较大，电容值主导电路阻抗，而在高频下ωL_i较大，寄生电感的影响增强。此时，考虑寄生电感下电容器的等效电路模型如图9所示。

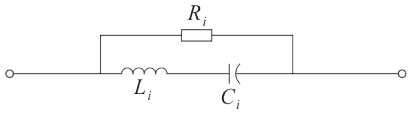


图9 高频下电容器等效电路模型

Fig.9 Equivalent circuit model of capacitor at high frequency

$$Z_{L_iC_i}=\mathrm{j}\omega L_i+\frac{1}{\mathrm{j}\omega C_i}=\mathrm{j}(\omega L_i-\frac{1}{\omega C_i}) \tag{7}$$

另一方面，补偿电抗器物理结构和材料特性会在高频情况下出现电阻效应和电容效应，趋肤效应和邻近效应也影响电抗器绕组电阻，高频激励下导体内部会产生涡流，导致导体横截面上电流分布逐步趋向于表面，降低了中心处电流密度，使得有效电阻会随着频率的增加而增加。电抗器绕组和引线等部分也存在寄生电容，高频情况下寄生电容与电感间的电容效应不可忽略。同时，寄生电容与电感并联作用下总阻抗与频率的关系是满足式(8)，考虑寄生参数下绕组的等效电路模型如图10所示。

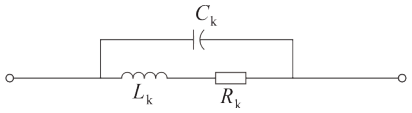


图10 高频下补偿电抗器等效电路模型

Fig.10 Equivalent circuit model of compensating reactor at high frequency

$$Z_{L_kC_k}=\frac{\mathrm{j}\omega L_k}{1-\omega^2 L_kC_k} \tag{8}$$

对于CVT的中间变压器，其一、二次侧绕组与大地之间存在对地电容，主要由绕组绝缘层与大地之间的电容效应产生。一次侧与二次侧之间还有由绝缘介质或结构引起的耦合效应而存在的耦合电容。这些杂散和耦合电容在高频信号下会显著影响变压器二次侧输出端的频率响应，需要考虑绕组间或绕组与大地间的耦合电容和杂散电容，其等效电路模型如图11中虚线框图所示。

在考虑了高频情况下CVT内部结构寄生参数(如暂态耦合电容的寄生电感、补偿电抗器的寄生电容、中间变压器各导体间的杂散电容等)的高频等效电路模型如图11所示，图11中各参数物理意义如表1所示。

为验证所提出模型的准确性和实用性，本研究基于ATP-EMTP电磁暂态分析平台开展包括操作冲击、雷电冲击多激励仿真-试验对比分析。以700 kV正极性雷电冲击为例，如图12所示，分析2

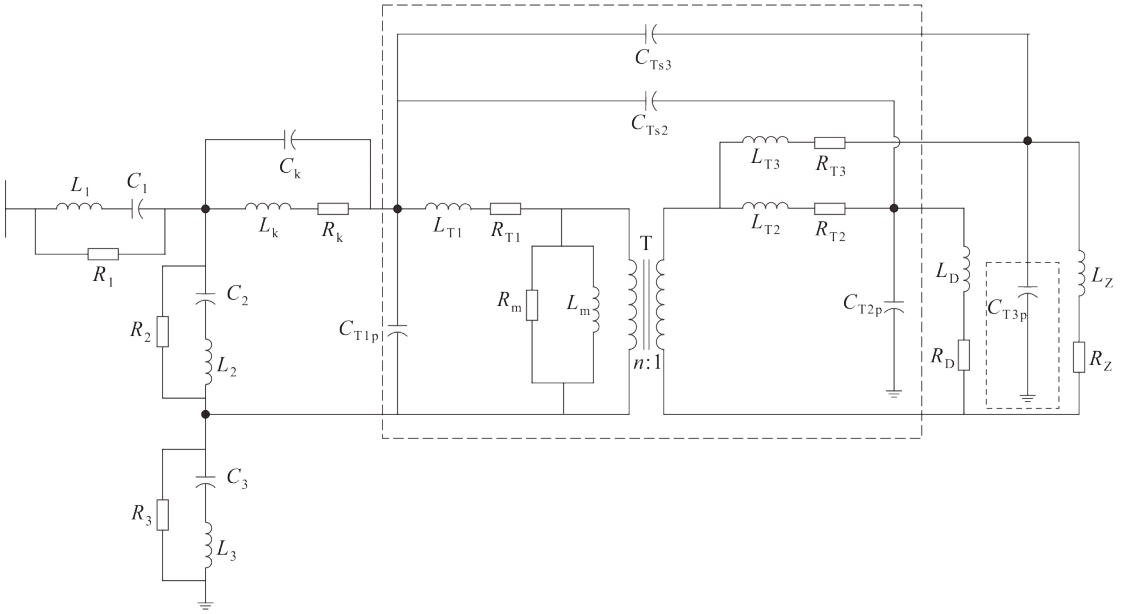


图 11　CVT 高频等效电路模型

Fig.11　High frequency equivalent circuit model curve of CVT

表 1　高频等效电路模型中参数的物理意义

Table 1　Physical significance of parameters in broadband equivalent circuit model

元件	物理意义	元件	物理意义
C_1	高压电容	$C_{T1p}/C_{T2p}/C_{T3p}$	变压器杂散电容
C_2	中压电容	C_{Ts2}/C_{Ts3}	变压器耦合电容
C_3	暂态耦合电容	$R_1/R_2/R_3$	并联电阻
L_{T1}	一次侧绕组漏感	R_{T1}	一次侧绕组电阻
L_{T2}	二次侧绕组漏感	R_{T2}	二次侧绕组电阻
L_{T3}	剩余绕组漏感	R_{T3}	剩余绕组电阻
L_k	补偿电抗器电感	R_k	补偿电抗器电阻
L_m	变压器励磁电感	R_m	变压器励磁电阻
L_D	阻尼器等效电感	L_Z	负载电感
R_D	阻尼器等效电阻	R_Z	负载电阻

组输出波形数据可知，波前时间 $T_{1\text{-}C3}$ 误差为 7.08%，波尾时间 $T_{2\text{-}C3}$ 为 2.9%；以 700 kV 正极性操作冲击为例，如图 13 所示，波前时间误差为 9.9%，波尾时间误差为 3.6%；上述结果验证了所提出高频等效电路模型的准确性和实用性。

2.3　计及寄生参数下 CVT 的传递特性

依据所提 CVT 高频等效电路模型，计算 CVT 高频等效电路模型的传递函数。如图 14 所示，令 $Z_1=(X_{C1}+X_{L1})//R_1$，$Z_2=(X_{C2}+X_{L2})//R_2$，$Z_3=(X_{C3}+X_{L3})//R_3$，$Z_4=(R_k+X_{Lk})//X_{Ck}$，$Z_5=X_{CT1p}$，$Z_7=X_{CTs2}$，$Z_8=X_{CTs3}$，$Z_9=R_{T1}+X_{LT1}$，$Z_{11}=R_{T3}+X_{LT3}$，$Z_{12}=R_{T2}+X_{LT2}$，$Z_{13}=X_{CT2p}$，$Z_{14}=R_D+X_{LD}$，$Z_{15}=X_{CT3p}$，$Z_{16}=R_Z+X_{LZ}$。其中 X_{L1}、X_{L2}、X_{L3} 分别表示 C_1、C_2、C_3 寄生电感的感抗值，X_{Ck} 表示补偿电抗器的容抗值，X_{CTs2}、X_{CTs3} 分别表示中间变压器耦合电容的容抗值，X_{CT1p}、X_{CT2p}、X_{CT3p} 分别表示中间变压器杂散电容的容抗值。

基于电路分析理论可得：

$$\begin{cases}
\boldsymbol{U}'=\boldsymbol{i}_1Z_1+\boldsymbol{i}_2Z_2+\boldsymbol{i}_3Z_3\\
\boldsymbol{i}_2Z_2=\boldsymbol{i}_4Z_4+\boldsymbol{i}_5Z_5\\
\boldsymbol{i}_5Z_5=\boldsymbol{u}_{T1}+\boldsymbol{i}_9Z_9\\
\boldsymbol{i}_{12}Z_{12}+\boldsymbol{i}_{14}Z_{14}=\boldsymbol{i}_{11}Z_{11}+\boldsymbol{i}_{16}Z_{16}=\boldsymbol{u}_{T2}\\
\boldsymbol{i}_8Z_8+\boldsymbol{i}_{16}Z_{16}=\boldsymbol{i}_7Z_7+\boldsymbol{i}_{14}Z_{14}\\
\boldsymbol{i}_8Z_8+\boldsymbol{i}_{15}Z_{15}=\boldsymbol{i}_7Z_7+\boldsymbol{i}_{13}Z_{13}\\
\boldsymbol{i}_8Z_8+\boldsymbol{i}_{15}Z_{15}=\boldsymbol{i}_5Z_5+\boldsymbol{i}_3Z_3\\
\boldsymbol{i}_1=\boldsymbol{i}_2+\boldsymbol{i}_4\\
\boldsymbol{i}_4=\boldsymbol{i}_5+\boldsymbol{i}_6\\
\boldsymbol{i}_6=\boldsymbol{i}_7+\boldsymbol{i}_8+\boldsymbol{i}_9\\
\boldsymbol{i}_{10}=\boldsymbol{i}_{11}+\boldsymbol{i}_{12}\\
\boldsymbol{i}_{12}+\boldsymbol{i}_7=\boldsymbol{i}_{13}+\boldsymbol{i}_{14}\\
\boldsymbol{i}_8+\boldsymbol{i}_{11}=\boldsymbol{i}_{15}+\boldsymbol{i}_{16}\\
\boldsymbol{i}_{14}+\boldsymbol{i}_{16}=\boldsymbol{i}_{10}\\
\boldsymbol{i}_3=\boldsymbol{i}_2+\boldsymbol{i}_5+\boldsymbol{i}_9\\
\boldsymbol{u}_{T1}=n\boldsymbol{u}_{T2}\\
n\boldsymbol{i}_9=\boldsymbol{i}_{10}
\end{cases}\tag{9}$$

计算得到源输入与 C_3 输出端口传递函数 $G_{U'U_3'}$

的关系如式(10)所示。

$$G_{U'U_3'}=\frac{U_3'}{U'}=f(Z_1,Z_2,Z_3,Z_4,Z_5,Z_7,Z_8,Z_9,Z_{11},Z_{12},Z_{13},Z_{14},Z_{15},Z_{16}) \tag{10}$$

在电路仿真平台中搭建了 CVT 高频等效电路模型，计算其暂态耦合电容传递特性曲线。并对比数值分析与仿真结果，同时开展了工频、高频下的试验研究，所得结果如图 15 所示。

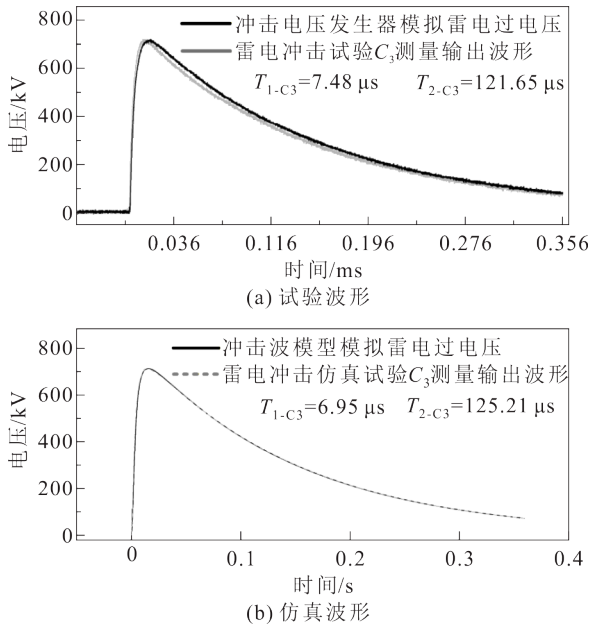


图 12 700 kV 正极性雷电冲击电压

Fig.12 700 kV positive lightning shock voltage

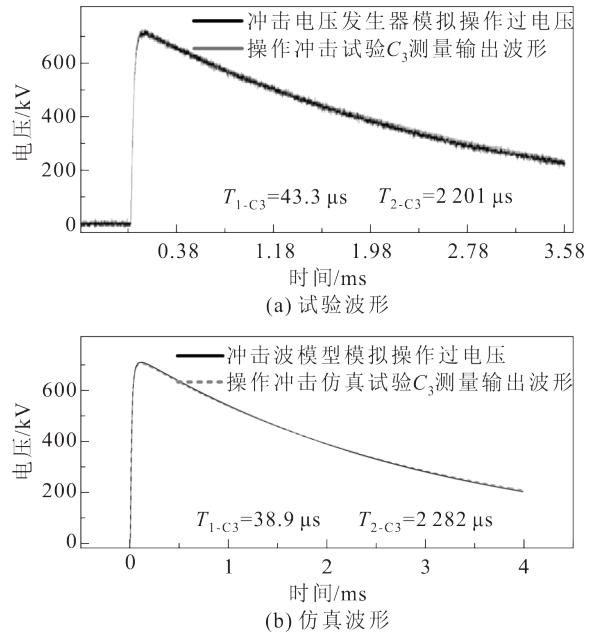


图 13 700 kV 正极性操作冲击电压

Fig.13 700 kV positive operating shock voltage

对于CVT传递幅频特性曲线，寄生参数对CVT传递特性影响明显，其在 40 kHz 和 1 MHz 附近出现了明显的低谷和尖峰，如图 15 中理论分析结果和仿真验证结果所示。对于 CVT 传递相频特性曲线的影响与幅频特性曲线类似，也在该频率范围内出现了明显相位变化。而试验过程由于实际内部元件的寄生参数与仿真参数设定存在偏差，其结果表明

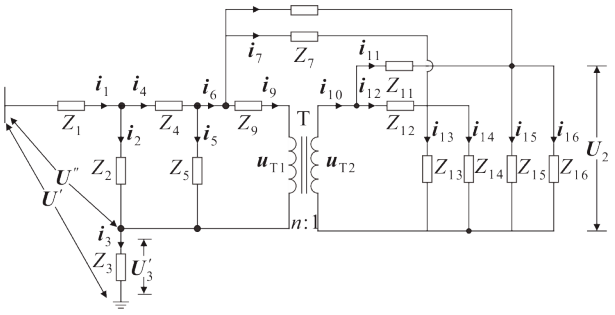


图 14 计及寄生参数下 CVT 的等效阻抗模型

Fig.14 Equivalent impedance model of CVT with parasitic parameters

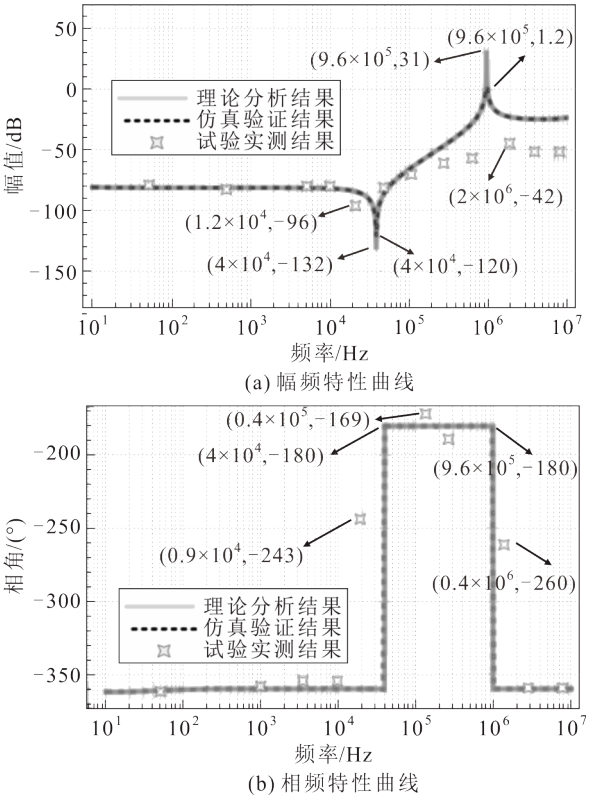


图 15 500 kV CVT 数值分析、仿真验证与试验实测传递特性曲线

Fig.15 Transmission characteristic curve of 500 kV CVT with numerical analysis, simulation verification and experimental measurement

在 2.1×10⁴ Hz 和 1.8×10⁶ Hz 附近出现了明显的低谷和尖峰。从图中能够发现通过试验结果获取的 CVT 传递函数与数值理论分析和仿真验证得到的基本相符，验证了理论分析和所构建的高频等效电路模型的正确性。在高频激励下，计及寄生参数的高频等效电路模型相比于工频等值模型，CVT 的频响幅值和相角误差分别减小了 106.2%和 49.4%(见图 15)。

在此基础上，为明确有无电容 C_3 对 CVT 传递特性的影响差异，本研究采用相同方法构建对比模型，分别获取其传递特性曲线，如图 16 所示。对比模型仅在 1.9×10³ Hz 附近出现 1 处谐振峰，对兆赫兹级暂态信号的传递存在衰减且相位灵敏度不足，而引入 C_3 使得谐振频率发生了迁移，同时降低了电磁单元电容耦合效应对响应特性的影响。

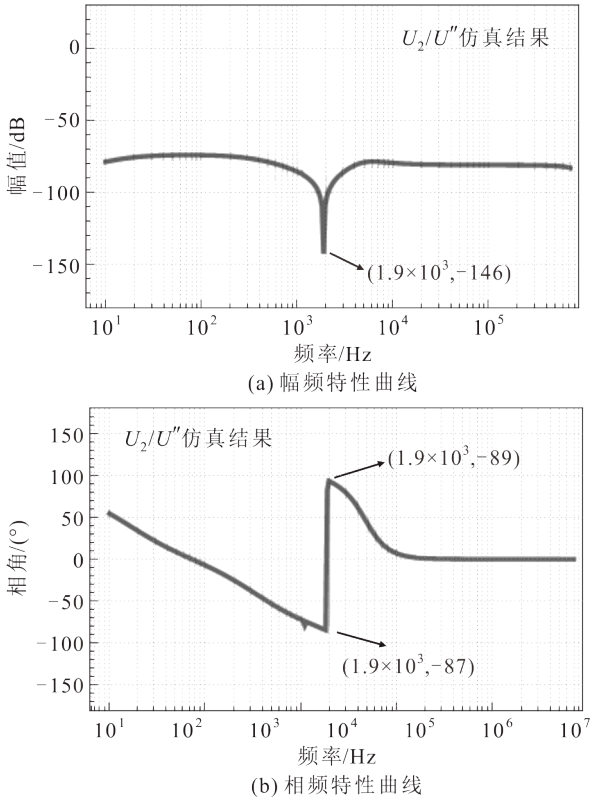


图 16　对比模型传递特性曲线

Fig.16　Transmission characteristic curve of contrasting model

3　寄生参数对传递曲线的影响

通过 2.2 节的分析可知，高频等效电路模型有助于提升 CVT 高频响应特性的分析能力，其中，寄生参数是影响 CVT 高频等效电路模型有效性的重要因素。因此，有必要分析寄生参数对 CVT 暂态耦合电容传递特性的影响，并通过单一变量控制分析方法，深入探讨不同寄生参数对 CVT 传递特性的影响规律。

利用 LCR 测量仪对 CVT 内部的电容、寄生电感以及电阻进行了测量。结合 500 kV CVT 的高电压承受能力、大电容特性以及高频暂态响应等特点，经过仿真分析与试验对比，CVT 主要回路元件的仿真参数如表 2 所示。

表 2　高频等效电路模型中主要回路元件的仿真参数

Table 2　Simulation parameters of the main loop elements in high frequency equivalent circuit model

回路元件	仿真数值	回路元件	仿真数值
C_1/nF	5.036	L_1/μH	4.97
C_2/nF	79.5	L_2/μH	0.38
C_3/μF	54	L_3/μH	0.31
L_{T1}/mH	24.59	R_{T1}/Ω	2.336
L_{T2}/μH	0.032	R_{T2}/μΩ	7.03
L_{T3}/μH	0.074 9	R_{T3}/μΩ	30.6

3.1　中间变压器杂散电容与耦合电容的影响

首先分别分析 CVT 中间变压器杂散电容 C_{T1p}、C_{T2p}、C_{T3p} 对 CVT 传递曲线的影响，改变 C_{T1p}、C_{T2p}、C_{T3p} 分别为 100、500、1 000 和 2 000 pF，得到 CVT 的传递特性曲线如图 17 所示。

其次，分别分析 CVT 中间变压器耦合电容 C_{Ts2}、C_{Ts3} 对 CVT 传递曲线的影响，改变 C_{Ts2}、C_{Ts3} 分别为 100、500、1 000 和 2 000 pF，得到的 CVT 的传递特性曲线如图 18 所示。

分析可知，随着 CVT 中间变压器杂散电容和耦合电容的增大，CVT 传递曲线的尖峰值和低谷值频率分布变化较小，但尖峰值变化大于低谷值变化；相位差和相位点频率分布变化也较小。这表明 CVT 中间变压器杂散电容 C_{T1p}、C_{T2p}、C_{T3p} 和耦合电容 C_{Ts2}、C_{Ts3} 对其传递曲线的影响较小。

3.2　补偿电抗器寄生参数的影响

然后分析补偿电抗器的寄生电容 C_k 和等值电阻 R_k 对 CVT 传递曲线的影响，改变 C_k 分别为 100、500、1 000 和 2 000 pF，R_k 分别为 10、100、200 和 500 Ω，不同参数下 CVT 的传递特性曲线如图 19 所示。

分析可知，随着寄生电容 C_k 和等值电阻 R_k 的增大，CVT 传递曲线的尖峰值和低谷值及其频率分布变化较小，CVT 传递相频特性曲线的相位点频率分布和相位差也变化较小。这表明 CVT 补偿电抗器的寄生电容 C_k 和等值电阻 R_k 对其传递曲线的影响较小。

3.3 暂态耦合电容寄生参数的影响

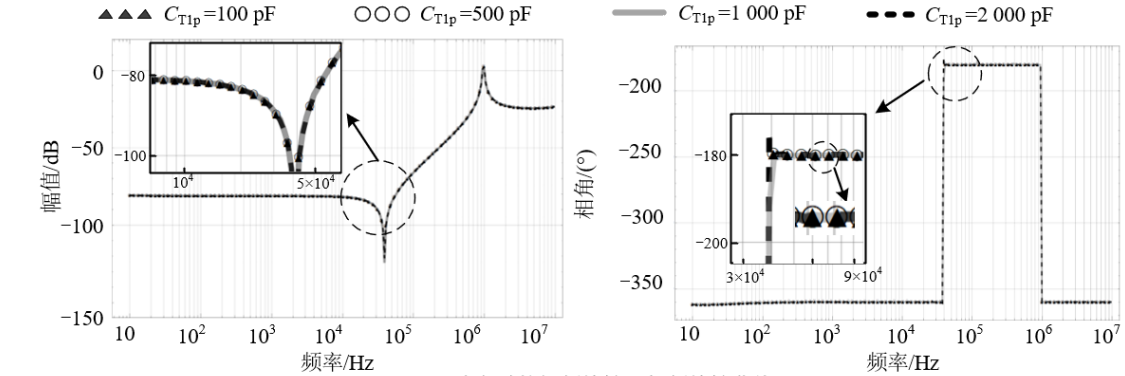
最后，分析暂态耦合电容的并联电阻 R_3 和寄生电感 L_3 对 CVT 传递曲线的影响，R_3 取值分别为 1、10、100 和 1 000 kΩ，L_3 分别为 0.1、0.5、1 和 2 μH，不同参数下 CVT 的传递特性曲线如图 20 所示。

分析可知，不同暂态耦合电容寄生电感 L_3 和并联电阻 R_3 下 CVT 的传递特性曲线变化较大。其中，在并联电阻 R_3 阻值过小的情况下，CVT 传递曲线低频段的误差会出现增大的趋势，但不会对相位点其他频率分布产生影响。对比可得，随着暂态耦合电容寄生电感 L_3 的增大，CVT 传递曲线的尖峰值和低谷值对应的频率点均向低频段移动，导致谐振频率逐渐低频化；同时峰值和低谷值幅值也逐步增大。CVT 传递相频特性曲线表明增大寄生电感 L_3 会使得相位点频率分布向低频段移动，误差出现的频率降低。

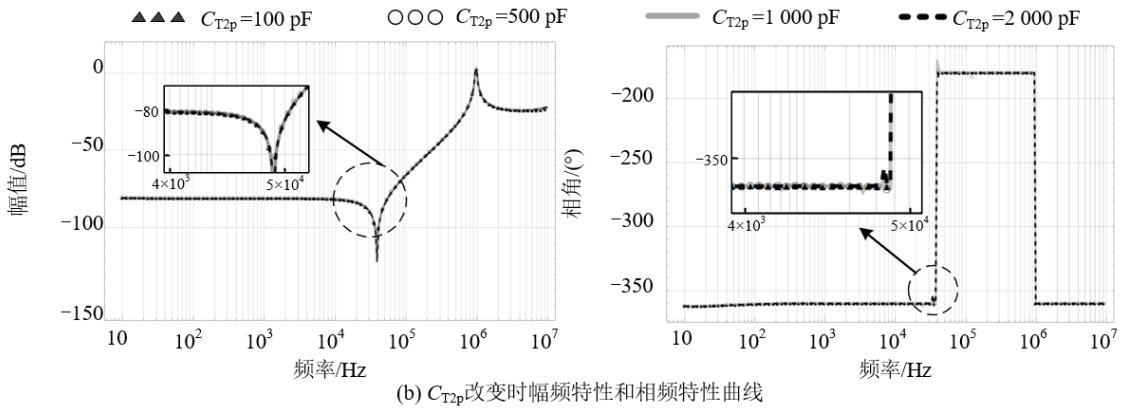
4 结论

论文建立了计及寄生效应的 500 kV CVT 高频等效电路模型，分析了 CVT 暂态耦合电容的传递特性，讨论了寄生参数对暂态耦合电容频响特性的影响，得到结论如下所述。

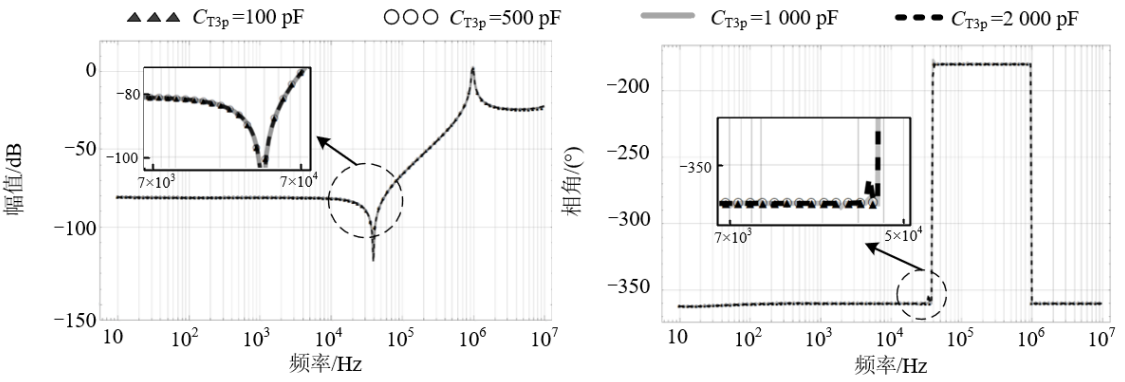
1）考虑串/并联寄生参数的高频等效电路模型提高了高频下 CVT 传递曲线的分析能力，高频激励下 CVT 的频响幅值和相角误差分别减小了 106.2%和 49.4%。



(a) C_{T1p}改变时的幅频特性和相频特性曲线



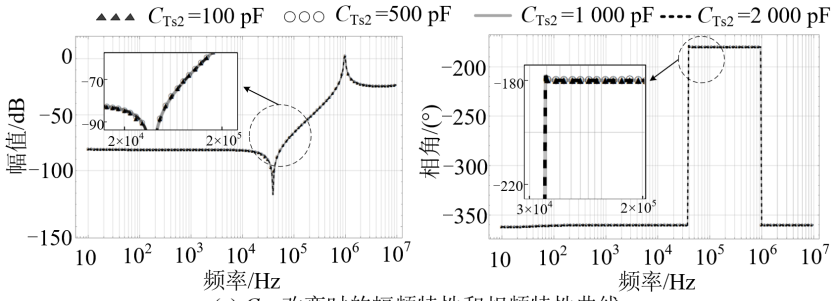
(b) C_{T2p}改变时幅频特性和相频特性曲线



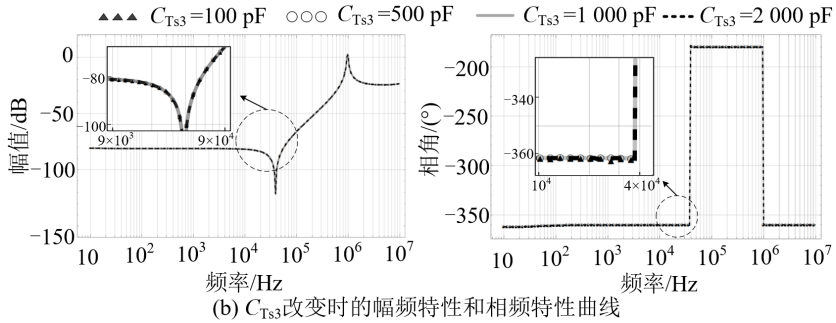
(c) C_{T3p}改变时幅频特性和相频特性曲线

图 17 杂散电容改变时的 CVT 传递特性曲线

Fig.17 Transfer characteristic curve of CVT when stray capacitance varies



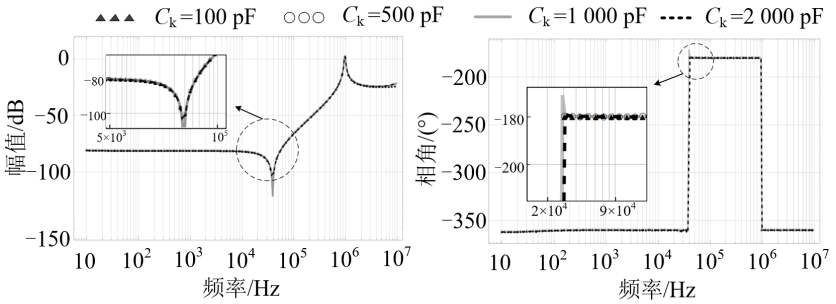
(a) C_{Ts2}改变时的幅频特性和相频特性曲线



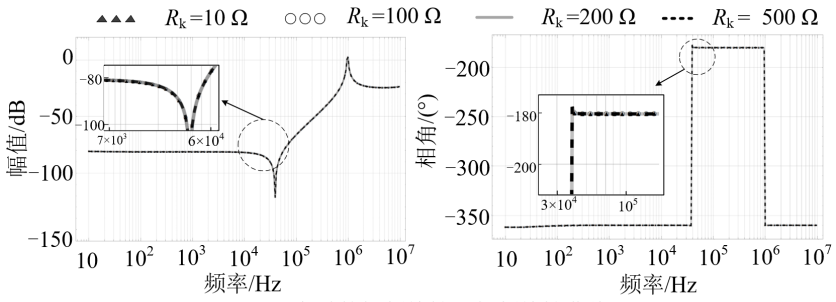
(b) C_{Ts3}改变时的幅频特性和相频特性曲线

图 18　耦合电容改变时的 CVT 传递特性曲线

Fig.18　Transfer characteristic curve of CVT when coupling capacitance varies



(a) C_k改变时的幅频特性和相频特性曲线

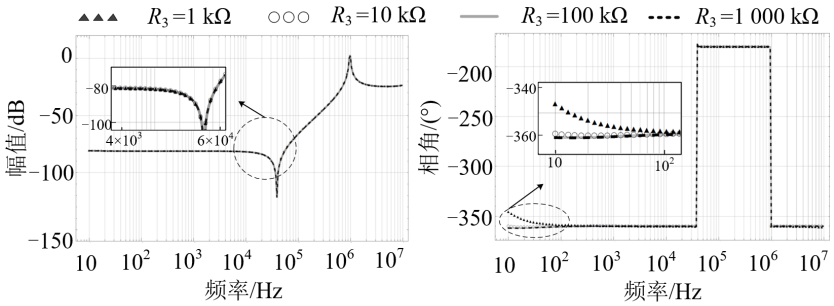


(b) R_k改变时的幅频特性和相频特性曲线

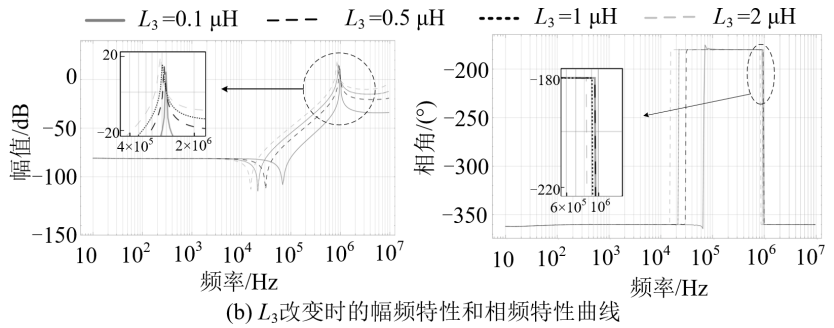
图 19　补偿电抗器的寄生电容和等值电阻分别改变时的 CVT 传递特性曲线

Fig.19　Transfer characteristic curve of CVT when the parasitic capacitance and equivalent resistance of the compensation reactor varies respectively

2）暂态耦合电容的寄生电感对 CVT 传递特性曲线影响明显，其值增大会使得其频响特性传递曲线尖峰值和低谷值频率点均向低频段移动，峰值和低谷值幅值增大，导致谐振频率低频化，相位点频率分布误差出现频率降低。寄生电感从 0.1 μH 增至 2 μH 会使得尖峰值频率从 1×10^6 Hz 降低至 8.5×10^5 Hz，幅值增益约由 10 dB 增长至 20 dB；低谷值频率从 7×10^4 Hz 降低至 1.7×10^4 Hz，幅值增益约由 –106 dB 降低至–113 dB；此外，寄生电感的增加使得相位转折区间的宽度增加，相位特性随频率变化



(a) R_3改变时的幅频特性和相频特性曲线



(b) L_3改变时的幅频特性和相频特性曲线

图 20 暂态耦合电容的并联电阻和寄生电感分别改变时的 CVT 传递特性曲线

Fig.20 Transfer characteristic curve of CVT when the parallel resistance and parasitic inductance of the transient coupling capacitor varies respectively

的过渡区域更加平缓。

3）并联电阻阻值降低会使得 CVT 传递相频特性曲线低频段出现相位增大的趋势，当阻值低于临界阈值(约 1 kΩ)时，容性效应会增强。

参考文献 References

[1] LU B X, HUANG W X, XIONG J, et al. Study on a new power frequency capacitive voltage transducer for gas insulated substations based on capacitive voltage division[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1010309.

[2] LINDSKOG A, THIRINGER T, LINDQUIST T. A data driven approach for monitoring puncture events in capacitor voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 2153-2162.

[3] YU K, LIU S Q, ZENG X J, et al. A novel insulation parameter online measuring technique based on two voltage transformers for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3383-3392.

[4] 应希纯，王建华，张保会. 保护装置内电磁式电压互感器高频传输特性分析[J]. 西安交通大学学报，2006，40(12)：1467-1469.
YING Xichun, WANG Jianhua, ZHANG Baohui. Analysis for the high-frequency transmission characteristics of electromagnetic voltage transformer in protection equipment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(12): 1467-1469.

[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.
WANG Yueqi. Research on harmonic transmission characteristics and measurement methods of capacitor voltage transformer[D]. Zhengzhou, China: Zhengzhou University, 2021.

[6] 张传计. 电容式电压互感器运行误差在线实时评估方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2020.
ZHANG Chuanji. Research on online and real-time evaluation method for the measurement error or capacitor voltage transformer[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[7] 李璿，李辉，毕建刚，等. 低频条件下标准电压互感器误差特性分析[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3719-3729.
LI Xuan, LI Hui, BI Jiangang, et al. Analysis of error characteristics of standard voltage transformers under low frequency conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3719-3729.

[8] 冯迪，刘灏，李嘉贤，等. 基于电场传感器阵列的输电线路电压非接触式测量方法[J]. 高电压技术，2024，50(1)：292-301.
FENG Di, LIU Hao, LI Jiaxian, et al. Non-contact voltage measurement method of transmission line based on electric field sensor array[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 292-301.

[9] 周峰，殷小东，葛得辉，等. 电力量子计量技术的进展与趋势[J]. 高电压技术，2023，49(2)：618-635.
ZHOU Feng, YIN Xiaodong, GE Dehui, et al. Progress and trend of power quantum metrology technology[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 618-635.

[10] 黄嘉鹏，陈贤顺，张福州，等. 电容式电压互感器绝缘在线监测系统设计与应用[J]. 电测与仪表，2016，53(增刊 1)：33-37.
HUANG Jiapeng, CHEN Xianshun, ZHANG Fuzhou, et al. Design and application of on-line monitoring system for capacitor voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(Supplement 1): 33-37.

[11] 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)：3153-3159.
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): 3153-3159.

[12] 李璿，丁嘉靖，刘西超，等. 具有电压自动调整功能的供电型电压互感器误差来源分析及补偿[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2554-2560.
LI Xuan, DING Jiajing, LIU Xichao, et al. Error source analysis and compensation of power voltage transformer with automatic voltage regulation function[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2554-2560.

[13] 卢有盟，王增文，李小燕. 1 000 kV 特高压电容式电压互感器的研制[J]. 电力建设，2009，30(9)：25-27.
LU Youmeng, WANG Zengwen, LI Xiaoyan. Development of 1 000 kV UHV capacitance voltage transformer[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(9): 25-27.

[14] 刘少波，李文婷，龙兆芝，等. 500 kV 集中式标准电容分压器的研制[J]. 高压电器，2019，55(1)：197-202.
LIU Shaobo, LI Wenting, LONG Zhaozhi, et al. Development of 500 kV centralized standard capacitive voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 197-202.

[15] 罗立波，朱咏明，杨振，等. 基于 ATP-EMTP 的铁磁谐振过电压影响因素灵敏度仿真与分析[J]. 西安科技大学学报，2020，40(6)：1088-1095.
LUO Libo, ZHU Yongming, YANG Zhen, et al. Simulation and analysis of sensitivity of factors affecting ferroresonance overvoltage based on ATP-EMTP[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 1088-1095.

[16] 邓万婷. 某 500 kV 线路电容式电压互感器二次回路铁磁谐振分析[J]. 电力电容器与无功补偿，2011，32(1)：63-65.
DENG Wanting. Secondary circuits ferro resonance analysis of 500 kV line capacitor voltage transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(1): 63-65.

[17] 龙兆芝，李文婷，刘少波，等. 基于标准电容器的工频、冲击两用型分压器的研制[J]. 高电压技术，2018，44(6)：1836-1843.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, LIU Shaobo, et al. Development of power-frequency and impulse-voltage Voltage divider based on standard capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1836-1843.

[18] 龙兆芝，李文婷，姚高龙，等. 基于电光调制的小型化三维雷击脉冲电场测量装置[J]. 高电压技术，2024，50(11)：4961-4970.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, YAO Gaolong, et al. Compact three-dimensional lightning impulse electric field measuring device based on electro-optic modulation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4961-4970.

[19] 杨庆，柯锟，胡军，等. 电力系统中的雷电暂态感知、监测和应用[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3303-3323.
YANG Qing, KE Kun, HU Jun, et al. Lightning transient sensing, monitoring and applications in power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3303-3323.

[20] 龙兆芝，李文婷，周峰，等. 基于高压标准电容器的 1 200 kV 宽频电容分压装置[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1826-1835.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, ZHOU Feng, et al. Device of 1 200 kV wideband capacitive divider based on high-voltage standard capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1826-1835.

[21] 王德忠，王季梅. 电容式电压互感器误差频率特性的研究[J]. 高电压技术，2001，27(2)：66-68.
WANG Dezhong, WANG Jimei. The study of error characteristic changing with frequency for the capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(2): 66-68.

[22] 李宾宾，罗沙，黄杰，等. 典型因素耦合影响下电容式电压互感器频率特性分析与仿真研究[J]. 电工技术，2023(7)：60-63.
LI Binbin, LUO Sha, HUANG Jie, et al. Analysis and simulation of frequency characteristics of capacitor voltage transformer under the influence of typical factor coupling[J]. Electric Engineering, 2023(7): 60-63.

[23] 李朝阳，杨健维，王玘，等. 基于主元分析的牵引变电所互感器二次量异常故障在线识别方法[J]. 电力自动化设备，2015，35(8)：103-109.
LI Zhaoyang, YANG Jianwei, WANG Qi, et al. Online identification of secondary measurement abnormality based on PCA for instrument transformers of traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 103-109.

[24] 于海波，王春雨，袁晓蕾，等. 基于 PCA-SVR 的电能计量装置误差评估算法[J]. 电测与仪表，2020，57(19)：140-145.
YU Haibo, WANG Chunyu, YUAN Xiaolei, et al. Error assessment algorithms for electric energy metering devices based on PCA-SVR[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(19): 140-145.

[25] 昌云松，王义平，武艳萍，等. 基于 WMPCA 的 CVT 计量误差评估方法[J]. 电力电容器与无功补偿，2021，42(3)：79-83.
CHANG Yunsong, WANG Yiping, WU Yanping, et al. Assessment method of CVT metering error based on WMPCA[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 79-83.

[26] 肖嵘，赵丹丹，张嘉旻，等. 基于改进 CVT 的暂态电压扰动监测技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2023，44(5)：58-66.
XIAO Rong, ZHAO Dandan, ZHANG Jiamin, et al. Study on transient voltage disturbance monitoring technology based on improved CVT[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 58-66.

[27] 杨永鑫. 电容式电压互感器谐波传递特性及宽频准确测量技术研究[D]. 济南：山东大学，2022.
YANG Yongxin. Research on harmonic transfer characteristics and wideband accurate measurement technology of capacitive voltage trans formers[D]. Jinan, China: Shandong University, 2022.

[28] 代双寅，李琼林，唐旭，等. 基于迭代加权改进 BP 神经网络的电容式电压互感器变比幅频特性拟合方法[J]. 电测与仪表，2022，59(11)：42-47.
DAI Shuangyin, LI Qionglin, TANG Xu, et al. A fitting method of the transformation ratio magnitude-frequency characteristic of capacitive voltage transformer based on iterative weighted improved BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 42-47.

[29] 盛戈皞，钱勇，罗林根，等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.

[30] 李振华，崔九喜，卢和平，等. 电力系统宽频宽动态电流量测技术研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3421-3439.
LI Zhenhua, CUI Jiuxi, LU Heping, et al. Review of wideband and wide-dynamic-range current measurement techniques in power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3421-3439.

[31] WU W J, XU Y, XIAO X, et al. Research on proximity effect in measuring error of active electronic voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(1): 78-87.

[32] International Electrotechnical Commission. Instrument transformers-the use of instrument transformers for power quality measurement: IEC TR 61869-103: 2012[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2012.

[33] International Electrotechnical Commission. High-voltage test techniques-part 2: measuring systems: IEC 60060-2: 2025[S]. Geneva Switzerland: IEC, 2010.

[34] MENDES É E B, ASSIS A C S, PINTO M H M, et al. Inductive volt-

age transformer model for high-frequency studies[C]//2023 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). Brasilia, Brazil: IEEE, 2023, 1-7.

[35] LIU Y, PAN X Y. CVT lightning impulse voltage inversion based on high-frequency wavelet entropy and low-frequency signals[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China: IEEE, 2020, 1-4.

[36] 司文荣，贺林，金珩，等. 500 kV CVT 内置低压电容 C_3 测量过电压波形的试验研究[J]. 电工电能新技术，2013，32(2)：43-47.
SI Wenrong, HE Lin, JIN Hang, et al. Testing research on overvoltage waveshape measurements using capacitor element C_3 in series connection within 500 kV CVT[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 43-47.

[37] 傅晨钊，刘兆林，杨凌辉，等. 基于 500 kV CVT 内置低压电容 C_3 的暂态过电压在线监测[J]. 高压电器，2015，51(9)：77-84，90.
FU Chenzhao, LIU Zhaolin, YANG Linghui, et al. Transient over-voltage online monitoring technology based on 500 kV capacitive voltage transformer with interior low-voltage capacitor C_3[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 77-84, 90.

[38] 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)：95-100，107.
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, 107.

[39] 陈一悰，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.

[40] 王玲，冯宇，顾风彪，等. 增设电容 C3 的新型 CVT 的误差性能优化设计[J]. 高压电器，2026，62(1)：112-119.
WANG Ling, FENG Yu, GU Fengbiao, et al. Error performance optimization design of a novel CVT with added capacitor C3[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(1): 112-119.



赵丹丹
1985—，女，硕士，教授级高工
主要从事电力系统过电压仿真与测量方面的工作
E-mail: zhaodd_xjtu@163.com

ZHAO Dandan
Professor



刘亚坤(通信作者)
1992—，男，博士，副教授，博导
主要研究雷电机理、防护方法及其试验验证技术、风光储系统防护与储能安全
E-mail: liuyakunhv@163.com

LIU Yakun
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-02-07 修回日期 2026-04-02 编辑 曾文君