第 52 卷 第 6 期：2738-2746 高电压技术 Vol.52, No.6: 2738-2746
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250315

抑制 VFTO 用阻尼母线设计与抑制效果验证

王　欢[1,2]，刁赢龙[2]，吴细秀[3]，李红斌[1]，杜博伦[2]
（1. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074；2. 中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074；
3. 武汉理工大学自动化学院，武汉 430070）

摘　要：特快速暂态过电压(very-fast-transient overvoltage，VFTO)具有波前时间短、幅值高、频率宽等特点，对电力设备的安全运行构成威胁，为此提出一种“电感+电阻”结构的阻尼母线设计方法，并建立了考虑杂散参数影响的宽频暂态电路模型，结合麦克斯韦电容矩阵完成杂散参数的计算，实现阻尼母线仿真模型的构建。通过仿真分析发现，采用宽频暂态模型时 VFTO 幅值抑制效果没有集中参数模型时好，这表明杂散参数影响了阻尼母线对 VFTO 的抑制效果，因此在阻尼母线设计时要尽量降低杂散参数的大小。在 550 kV 试验平台上对加装阻尼母线前后波形进行对比，结果显示加装阻尼母线后 VFTO 平均幅值下降 20.36%，击穿次数下降约 66.7%，安装阻尼母线后无明显高频频率，这表明阻尼母线对 VFTO 的幅值、击穿次数和频率均有很好的抑制效果。该技术为 VFTO 的抑制提供了一种新的途径，为电力系统的安全运行提供了技术支撑。

关键词：VFTO 抑制；阻尼母线；杂散参数；宽频暂态等效电路；试验分析

Design of Damping Bus for VFTO Suppression and Verification of Suppression Effect

WANG Huan[1,2], DIAO Yinglong[2] ,WU Xixiu[3], LI Hongbin[1], DU Bolun[2]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The very-fast-transient overvoltage (VFTO) is characterized by short wave front time, high amplitude and wide frequency, which poses a threat to the safe operation of power equipment. In order to suppress the propagation of VFTO, an “inductor + resistor” structure of damped busbar is designed, and a wide frequency transient circuit model of damped busbar considering spurious parameters is established. The Maxwell capacitance matrix is utilized to complete the calculation of the spurious parameters and to realize the construction of the damped bus simulation model. Through simulation analysis, it is found that the VFTO value by using the damped busbar wide frequency transient model is not superior to that modeled with the centralized parameter. This shows that the spurious parameters affect the damping busbar’s suppression effect on VFTO. Therefore, the size of the spurious parameter should be minimized when the damping bus is designed. Comparison of waveforms before and after the addition of damping busbar is made on a 550 kV test platform. The test results show that the average amplitude of VFTO decreases by 20.36% and the number of breakdowns decreases by about 66.7% after the installation of damping busbar, and there is no obvious high-frequency frequency after the installation of damping busbar. This shows that the damping bus has a good suppression effect on the amplitude, number of breakdowns and frequency of the VFTO. This technique provides a new way for VFTO suppression and provides technical supports for the safe operation of power systems.

Key words: VFTO suppression; damping bus; spurious parameters; broadband transient equivalent circuit; experimental analysis

0　引言

气体绝缘变电站(gas insulated substation，GIS)因其设备全部封闭在接地的金属壳体内，省去了传统敞开式变电站中设备之间的导线连接和相应的绝缘距离，从而大大减少了占地面积。该特点使得 GIS 特别适合在城市中心、工业区等土地资源紧张的地区使用，能够有效节省土地资源，降低变电站建设成本，因此被广泛应用。对 GIS 变电站而言，其绝

基金资助项目：国家自然科学基金智能电网联合基金(U1866201)。
Project supported by Joint Fund for Smart Grid of National Natural Science Foundation of China (U1866201).

缘配合水平由特快速暂态过电压(very-fast transient overvoltage，VFTO)决定。VFTO 具有波前时间短、幅值高、频率宽等特点，对电力设备的绝缘和运行安全构成较大威胁[1-6]。

日本东京电力公司和东芝公司在 1 000 kV 系统隔离开关上加装阻尼电阻，并对 VFTO 关键参数进行计算，发现电阻在 1 000 Ω 左右即可将 VFTO 抑制在 1.6 倍系统额定相电压峰值(1.6 pu)以下[7]。中国电科院对 1 000 kV 晋东南 GIS 隔离开关加装阻尼电阻进行计算，采用 500 Ω 的阻尼电阻 VFTO 幅值可下降至 1.6 pu[8]。浙江电力公司在 500 kV 系统的隔离开关加装阻尼电阻，调节电阻从 10 Ω 增加到 1 000 Ω，仿真发现随着电阻值的增大，VFTO 幅值和波前陡度都随之减小，当电阻值为 500 Ω 时 VFTO 幅值降低 45.4%，波前陡度降幅达 79%[9]。清华大学提出利用铁氧体磁环高频感抗效应和涡流损耗效应实现对 VFTO 的抑制，并对磁环法开展建模、仿真、试验等系列化研究，论证了该方法的可行性[10-13]。然而磁性材料易饱和特性制约了该方法的工程应用推广，国内研究机构对磁环抑制效果开展研究，如在磁环两端并联电阻以增加损耗来缓解磁环易饱等问题[14]。金属氧化物避雷器(metal oxide arrester，MOA)具有优异的非线性伏安特性和陡波响应特性，因此 MOA 是很好的过电压保护装置[15]。华东交通大学等科研院所对加装 MOA 后 VFTO 抑制开展研究，发现在 1 100 kV 电压等级加装 MOA 后，VFTO 的振荡幅值可降低至 0.8 pu，因此 MOA 对抑制 VFTO 幅值具有一定的效果，但其非线性特性阻抗受激励、周边运行环境以及冲击电流的残压影响，导致 MOA 对 VFTO 的波前陡度抑制效果不佳[16-22]。

针对现有 VFTO 抑制方法的不足，本文利用母线导体本身就是电感的特性，通过对 GIS 母线导体进行镂空，加工成螺旋管状空心线圈，增大其在高频下的电感，并在螺旋管状空心线圈内部串联电阻，使整个 GIS 母线导体成为“电感+电阻”阻尼元件，称该母线为“阻尼母线”。根据阻尼母线结构特点构建等效分析模型，开展阻尼母线参数设计与击穿电阻计算，并以 550 kV GIS 母线为改造对象，根据计算参数完成阻尼母线对 VFTO 抑制效果的仿真分析，最后对阻尼母线样机开展实测分析，验证阻尼母线对 VFTO 的抑制效果。

1　阻尼母线结构与参数设计

1.1　结构设计

阻尼母线结构如图 1 所示。将常规母线加工成螺旋状，从而形成多匝电感线圈如图 1(a)所示。电阻采用无感阻尼电阻，电阻与电感线圈并联连接[23]。阻尼母线是由常规 GIS 管状母线镂空而成，环状螺旋型的镂空结构会对原先管状母线的机械强度造成一定影响。因此，为保证阻尼母线的机械强度，在母线内部安装环氧支撑件，并在其周围设置多条放射状加工槽，阻尼母线内部结构如图 1(b)所示。

1.2　抑制原理

利用波穿过电感原理开展阻尼母线对 VFTO 抑制原理的分析[24]。VFTO 波经过阻尼母线时的等值电路如图 2 所示。

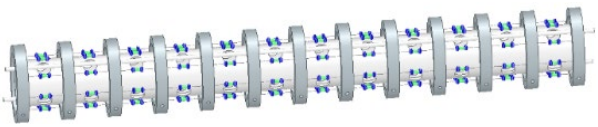
图 2 中，u_1 为输入 VFTO 波；u_2 为节点 A 的电压；i_L 和 i_2 分别为流经 L 和 Z_2 的入射电流；R、L 分别为阻尼母线的阻尼电阻和电感；Z_1 为隔离开关与阻尼母线之间线路的波阻抗；Z_2 为阻尼母线后线路的波阻抗。根据前文对波穿过电感的分析可知，电感 L 外侧等效阻抗 Z 可表示为：

$$Z=(Z_1+Z_2)//R=\frac{R(Z_1+Z_2)}{R+Z_1+Z_2} \tag{1}$$

$$\tau=\frac{L}{Z}=\frac{L(R+Z_1+Z_2)}{R(Z_1+Z_2)} \tag{2}$$



(a) 螺旋状线圈



(b) 内部剖面图

图 1　阻尼母线结构

Fig.1　Structure of damping busbar

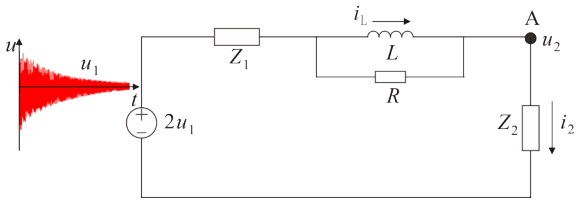


图 2　VFTO 波经过阻尼母线时的等值电路

Fig.2　Equivalent circuits for VFTO waves passing through damped buses

当 VFTO 波穿过阻尼母线后，电压幅值和波前陡度的变化表示为：

$$u_2'(t)=i_2'Z_2=\frac{2u_1'Z_2}{Z_1+Z_2}\left(1-\frac{R}{R+Z_1+Z_2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{3}$$

$$a=\frac{\mathrm{d}u_2'}{\mathrm{d}t}=\frac{2u_1'R^2Z_2}{L(R+Z_1+Z_2)^2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{4}$$

以 550 kV GIS 母线波阻抗 120 Ω 为例，将其分别代入式(3)和式(4)得到：

$$u_2'(t)=i_2'Z_2=\left(1-\frac{R}{R+Z_1+Z_2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right)u_1' \tag{5}$$

$$a=\frac{2u_1'R^2Z_2}{L(R+Z_1+Z_2)^2}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{240R^2}{L(R+240)^2}u_1'\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{6}$$

$$\tau=\frac{L}{Z}=\frac{L(R+240)}{240R}=\frac{L}{240}+\frac{L}{R} \tag{7}$$

采用分离变量法分析阻尼母线电阻和电感对 VFTO 幅值抑制和陡度抑制的影响分析。将不同电感和电阻代入式(5)、式(6)中，分析节点电压和波前陡度的变化，其变化趋势如图 3 所示。

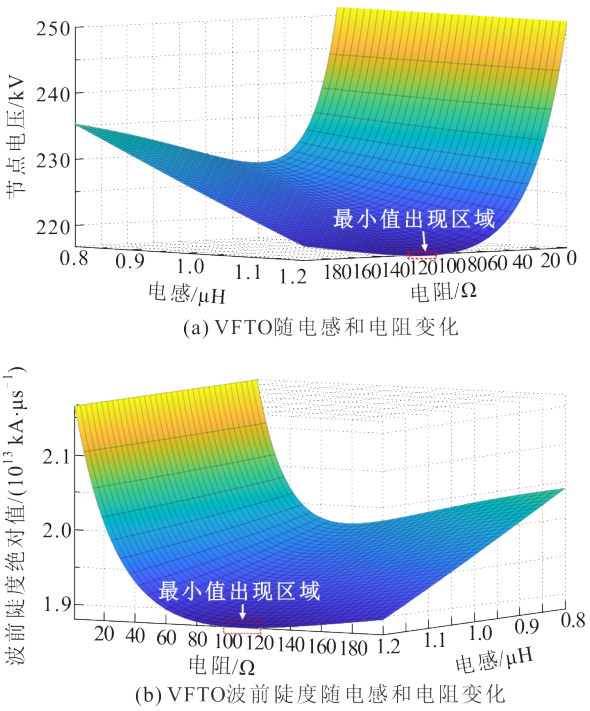


图 3 VFTO 波幅值、陡度随电阻和电感的变化规律

Fig.3 Variation rule of VFTO wave amplitude and steepness with resistance and inductance

由图 3 可知，VFTO 的幅值和陡度均会随着电感增加而降低，而电阻对 VFTO 幅值和陡度的影响则表现出非单调影响的特性，即存在一个取值区间可实现 VFTO 幅值和陡度抑制效果的最佳。本文计算的电阻区间为 0~300 Ω，计算表明电阻取值在 100~120 Ω 时抑制效果最佳。

1.3 阻尼母线电路特征分析

1.3.1 阻尼母线等效电路

未考虑壳体与母线之间、母线与盆式绝缘子之间的杂散电感和电容的阻尼母线集中参数等效电路如图 4 所示。当高幅值 VFTO 波通过阻尼母线时，镂空的间隙有可能被击穿形成弧道电阻。因此，当有 VFTO 波通过时，除了考虑无感阻尼电阻，还要考虑间隙击穿后的弧道电阻。

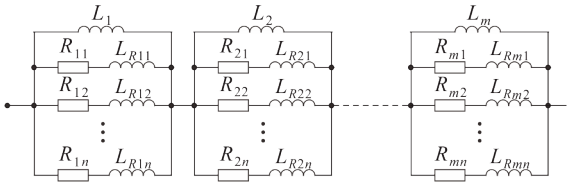


图 4 阻尼母线集中参数等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram of damping busbar

图 4 中，L_n 为每匝电感量。R_{1n}—R_{mn} 为阻尼电阻，一般情况下每匝并联后的电阻值一样，即 $R_{11}//R_{12}//\cdots//R_{1n}=R_{21}//R_{22}//\cdots//R_{2n}=\cdots=R_{m1}//R_{m2}//\cdots//R_{mn}$，$L_{Rn1}$—$L_{Rn6}$ 为每个匝间阻尼电阻串联的杂散电感。考虑杂散电感和电容后的阻尼母线宽频暂态等效电路如图 5 所示。

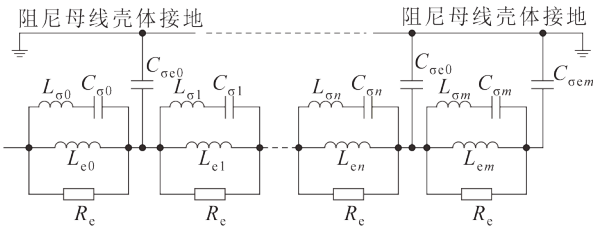


图 5 阻尼母线宽频暂态电路图

Fig.5 Diagram of damped bus wideband transient circuit

图 5 中，L_e 为每匝线圈等效电感，即 $L_{\sigma n}=L_{m1}//L_{m2}//\cdots//L_{mn}$。$R_e$ 为每一匝线圈并联电阻 $R_e=R_{m1}//R_{m2}//\cdots//R_{mn}$。均匀加工使加工出来的每匝线圈电感相等，即 $L_e=L_1=L_2=\cdots=L_n$。其中，$C_{\sigma n}$ 和 $L_{\sigma n}$ 分别为每匝间的杂散电容和杂散电感；L_{e0} 为阻尼母线两端连接盆式绝缘子部分的电感；L_{em} 为螺旋管状匝间电感。$C_{\sigma 0}$、$C_{\sigma m}$ 和 $L_{\sigma 0}$、$L_{\sigma m}$ 分别为母线连接盆式绝缘子两端的杂散电容和杂散电感；$C_{\sigma en}$ 为阻尼母线与壳体之间的杂散电容；$C_{\sigma e0}$、$C_{\sigma em}$ 为阻尼母线两端与壳体之间的杂散电感；R_g 为间隙击穿阻抗，由于 VFTO 条件下阻尼母线的间隙击穿情况不确定，因此图 5 中用虚线表示。

1.3.2　电路参数计算

电容定义为 $C=Q/(V_1-V_2)$，对于 n 个导体，由电位 V_i 叠加定理可得：

$$\begin{bmatrix}Q_1\\Q_2\\\vdots\\Q_n\end{bmatrix}=\boldsymbol{C}\begin{bmatrix}V_1\\V_2\\\vdots\\V_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11}&C_{12}&\cdots&C_{n1}\\C_{12}&C_{22}&\cdots&C_{n2}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\C_{1n}&C_{2n}&\cdots&C_{nn}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_1\\V_2\\\vdots\\V_n\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：Q_i 为第 i 个导体的带电量；$\boldsymbol{C}$ 为麦克斯韦电容矩阵，描述了第 i 个导体的电荷与系统中所有导体的电压之间的关系。对于 n 个导体，麦克斯韦电容矩阵可表示为：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}\sum_{i=1}^{n}C_{m1i}&-C_{m12}&\cdots&-C_{m1n}\\-C_{m21}&\sum_{i=1}^{n}C_{m1i}&\cdots&-C_{m2n}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\-C_{mn1}&-C_{mn2}&\cdots&\sum_{i=1}^{n}C_{mni}\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：C_{mni} 为第 m 匝的 n 导体与 i 导体电荷积累后产生的杂散电容。在求解阻尼母线的杂散电容时，将利用麦克斯韦电容矩阵与电容矩阵之间的关系进行求解。

低频条件下，通常忽略电流在导体截面上的分布不均匀性，此时电感值可表示为：

$$L=\frac{1}{i}\int\frac{1}{s}\left(\int B\mathrm{d}s\right)\mathrm{d}s \tag{10}$$

式中：i 为电流；s 为导体截面积；B 为磁感应强度。高频条件下，电流会完全集中于导体极薄的表层中，集中的厚度即为趋肤深度，即：

$$\delta_{sd}=\sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \tag{11}$$

式中：δ_{sd} 为趋肤深度，m；f 为激励频率，Hz；μ 为磁导率，H/m；σ为电导率，S/m。由于趋肤效应式无法直接计算得到，可由趋肤深度近似计算电流有效截面，并代入式(11)可得：

$$L=\frac{2\pi(a+1)}{i^2}\int\left(\int B\frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}}\mathrm{d}r\right)\mathrm{d}i \tag{12}$$

式中：r 为导体半径。由式(12)可知，高频条件下阻尼母线的电感 L 不仅与导体结构有关，激励特性也会对其产生影响，电感随着电流频率的增大而减小。由于 VFTO 作用时间极短，间隙 SF_6 击穿过程可看作是电弧放电过程。用指数模型描述阻尼母线间隙正发生击穿时电阻的变化情况如下：

$$R_{\mathrm{v}}=R_0\mathrm{e}^{-(t/\tau)}+R_{\mathrm{a}},\quad t\le t_0 \tag{13}$$

式中：R_{v} 表示间隙击穿电阻；t_0 表示击穿起始时刻。R_{a}=0.5 Ω 为静态燃弧电阻；R_0=10^{12} Ω 为隔离开关间隙绝缘时的高阻状态；τ为间隙击穿时间。SF_6 击穿时间很短通常在纳秒级，故 τ_{g} 也很小。即 SF_6 气体击穿时气隙电阻可取值为 0.5 Ω。

本文以 550 kV 电压等级为例，对 GIS 内部阻尼母线参数进行计算。假设阻尼母线加工为 25 匝，则具体计算参数如表 1 所示。

2　阻尼母线对 VFTO 抑制效果分析

2.1　仿真效果分析

以某 550 kV GIS 回路为例，如图 6 所示，分析阻尼母线对 VFTO 的抑制效果。

为分析阻尼母线电路参数对 VFTO 抑制效果的影响，本文对未安装阻尼母线、安装阻尼母线未考虑杂散电感和杂散电容以及考虑全部电路参数路模型 VFTO 的仿真结果进行对比，波形如图 7 所示。加装阻尼母线后 VFTO 被明显抑制，幅值均明显降低，击穿次数有所减少。

为进一步分析考虑杂散参数的宽频暂态模型对抑制效果的影响，对 VFTO 的幅值、最大波前陡度绝对值、击穿次数和 0.05 s 内波的能量进行计算，结果如表 2 所示。

表 2 中，pu 表示电压标幺值，即实际电压/基准电压值。通过 pu 的大小判断 VFTO 的幅值是额定电压幅值的倍数。根据表 2 数据可知，与将阻尼母线等效为集中参数模型相比，等效为宽频暂态模型时，电压幅值由 0.811 pu 增加到 0.922 pu，最大波前陡度绝对值由 1.327 kV/ns 降低到 0.686 kV/ns，击穿次数由 8 次降低到 7 次，0.05 s 内波的能量由 1.028 MJ 增加到 1.063 MJ。因此，在阻尼母线结构设计时，尽量使杂散参数小，以确保 VFTO 的抑制效果。

表 1　550 kV GIS 用阻尼母线参数

Table 1　Parameters of the damping busbar for 550 kV GIS

参数	$L_{\sigma 0}$	L_{e0}/pH	$L_{\sigma 1}$—$L_{\sigma 24}$	$C_{\sigma 0}$	$C_{\sigma e0}$	$C_{\sigma 1}$—$C_{\sigma 24}$	R_{e}	R_{g}
幅值	18.46	40.28	0.432	0.18	0.187	5.2	4	0.5

注：表中未注明的电感单位为 μH，电容单位为 nF，电阻单位为 Ω。R_{g} 是击穿后间隙的电阻，根据计算结果第 1、5、19、23、25 个间隙发生了击穿。

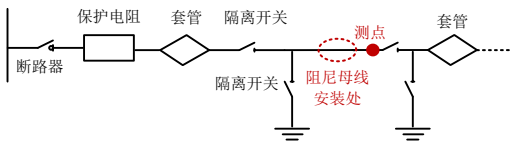
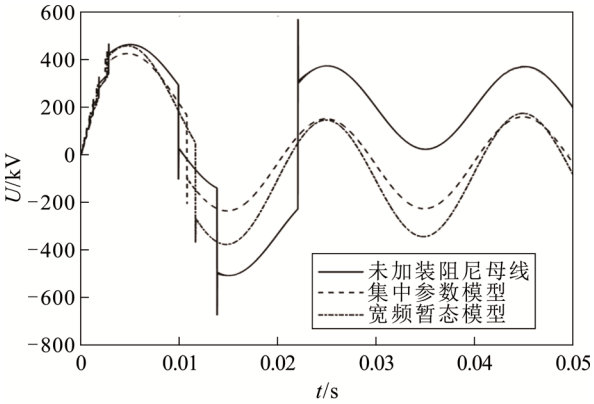
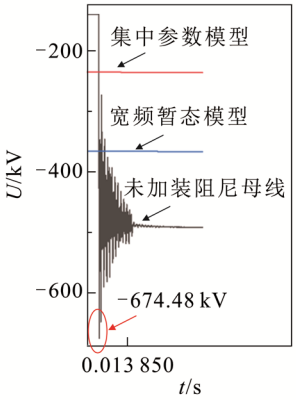


图 6　550 kV GIS 仿真回路

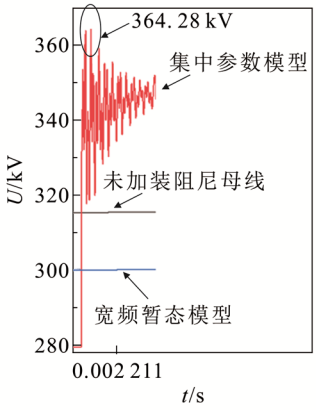
Fig.6　Simulation circuit of 550 kV GIS



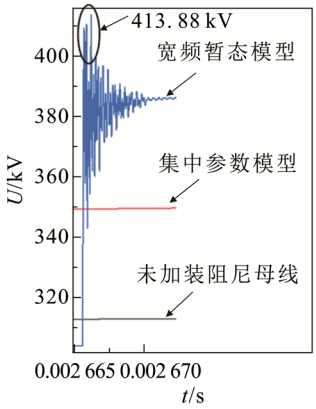
(a) VFTO波形图



(b) 未加装阻尼母线时VFTO峰值局部放大



(c) 采用集中参数模型时VFTO峰值局部放大



(d) 采用宽频暂态模型时VFTO峰值局部放大

图 7 VFTO 波形图

Fig.7 Waveform diagram of VFTO

2.2 实测效果分析

实际加工得到的 550 kV GIS 用阻尼母线，在 550 kV 验证平台上开展 VFTO 抑制试验，试验平台电气原理图如图 8 所示。图中，AC 是交流电源，DS 是隔离开关。

VFTO 测量系统主要包括 VFTO 测量传感器、同步触发装置、波形采集装置和远程测控计算机(波形记录)3 个部分。VFTO 测量采用基于电容分压原理的窗口式传感器，测量频带为 10 Hz~204 MHz，满足 VFTO 测量需求。测量系统采用同步触发装置以保证测量系统的稳定和同步性。VFTO 产生过程中的高频辐射信号控制同步触发装置产生触发信号，信号经光纤传输、光电转换，稳定同步触发每个测点的示波器记录波形。波形记录包括现场记录和远程计算机读取两部分。现场采集装置放在屏蔽箱中，采用独立电源供电，抗干扰性强。现场波形记录采用 DLM2054 示波器，示波器采样频率设置为 125 MHz，记录波形长度为 1 s。计算机经光纤传输通道控制示波器并远程读取示波器中暂存波形，以提高试验效率和安全性的效果。

试验首先对常规 GIS 上出现的 VFTO 进行测量，然后加装阻尼母线后在相同工况和观测点再次进行测试，观察阻尼母线对 VFTO 的抑制效果，用 Xviewer 软件读取记录的 VFTO 波形。因测量数据较多，这里仅选取隔离开关分闸操作的测量数据分析阻尼母线对 VFTO 的抑制效果。图 9 是加装阻尼母线前后 VFTO 全波波形图。

表 2 VFTO 暂态特性参数

Table 2 Transient characteristic parameters of VFTO

阻尼母线模型	电压幅值/pu	最大波前陡度绝对值/(kV·ns^{-1})	击穿次数	能量/MJ
未加装	1.502	7.194	11	5.587
集中参数模型	0.811	1.327	8	1.028
宽频暂态模型	0.922	0.686	7	1.063

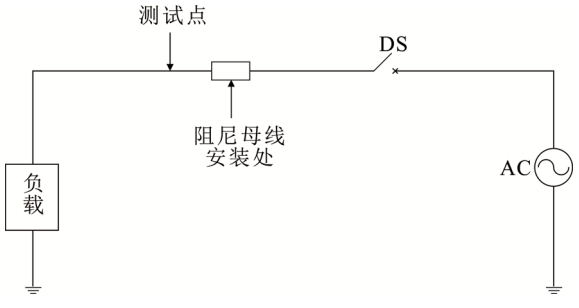
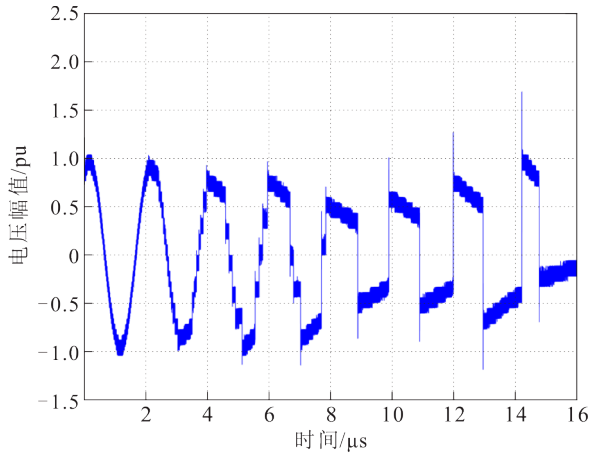
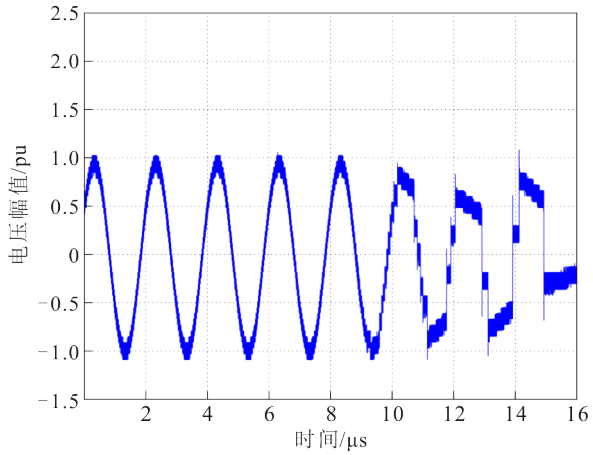


图 8 试验平台电气原理图

Fig.8 Electrical schematic diagram of test platform



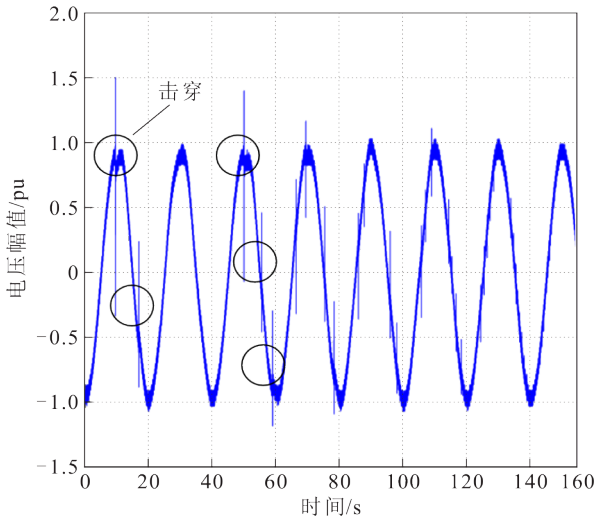
(a) 安装前波形图



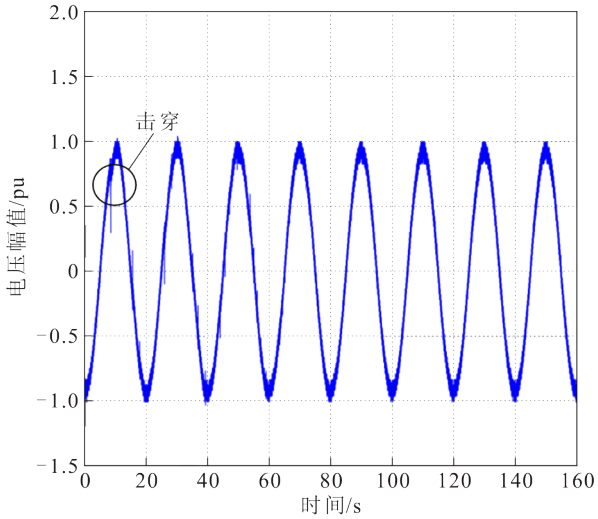
(b) 安装后波形图

图 9　加装阻尼母线前后 VFTO 全波波形图

Fig.9　Waveform before and after adding damping busbar



(a) 加装阻尼母线前



(b) 加装阻尼母线后

图 10　加装阻尼母线前后击穿次数对比图

Fig.10　Comparison of the number of breakdowns before and after the addition of damping busbar

图 10 是安装阻尼母线前后击穿次数的对比。对比图 9、图 10 可知，安装阻尼母线后 VFTO 的幅值和击穿次数明显得到抑制，具体的抑制效果如表 3 所示。

加装阻尼母线前后波形主频率如表 4 所示，单次击穿脉冲波形如图 11 所示。比较图 11(a)、11(b)可知，加装阻尼母线后单次击穿脉冲波的幅值得到明显抑制。对加装阻尼母线前后单次击穿的 VFTO 频谱进行比对，如图 11(c)所示。可见安装阻尼母线后 VFTO 的频率明显降低，数据见表 4 所示。

根据图 11 和表 4 数据可知，加装阻尼母线前后击穿次数及振荡幅值减少，且单次及整体暂态过程衰减加快。加装阻尼母线前 VFTO 高频分量主要为 7.5、14.5、46.5 MHz，安装阻尼母线之后则无明显的高频频率。即：阻尼母线通过增强电感效应，VFTO 波经过时高频分量波头和波尾被拉平，幅值降低。

试验统计了多次分闸操作条件下 VFTO 的抑制效果，绘制如图 12 所示。试验分闸操作次数对 VFTO 抑制效果的影响是随机的，不会随着操作次数的增

表 3　加装阻尼母线前后抑制效果统计表

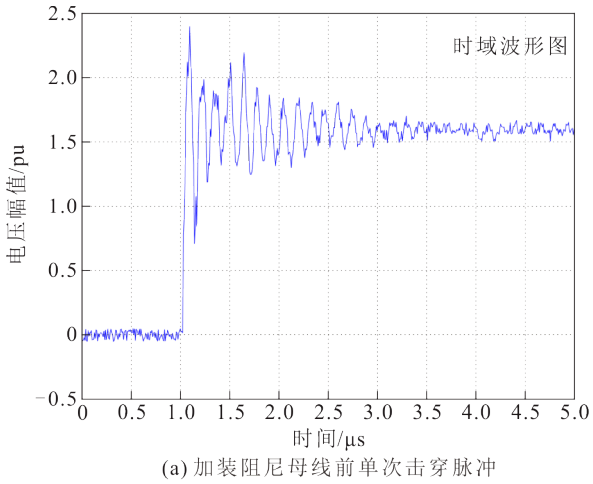
Table 3　Statistical table of suppression effect before and after adding damping busbar

安装状态	电压幅值/pu	击穿次数
安装前	1.57	18
安装后	1.19	6

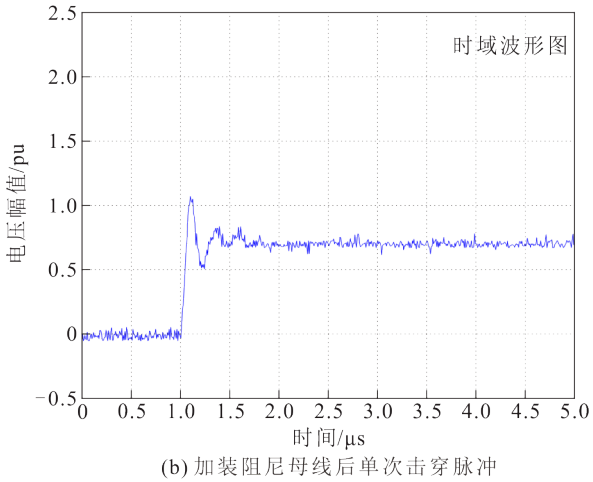
表 4　加装阻尼母线前后波形主频率统计结果

Table 4　Statistical results of the main frequency of the waveform before and after installing the damping busbar

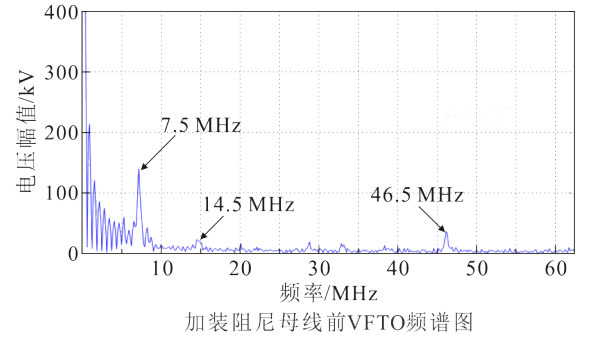
安装状态	加装阻尼母线前	加装阻尼母线后
主频率/MHz	0~7.5，46.5	0~5

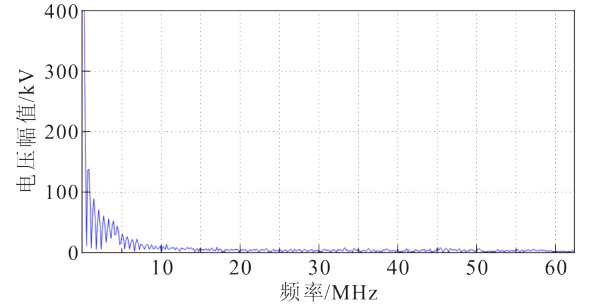


(a) 加装阻尼母线前单次击穿脉冲



(b) 加装阻尼母线后单次击穿脉冲





(c) 频谱对比图

图 11 加装阻尼母线前后 VFTO 频谱图

Fig.11 VFTO spectrum before and after adding damping busbar

加而抑制效果更加显著。根据图 12 数据可知，安装阻尼母线后 VFTO 幅值明显小于安装前。安装前 VFTO 平均幅值为 1.67 pu，安装后 VFTO 平均幅值下降为 1.33 pu。采用独立样本 t 检验进行方差分析后，p 值小于 0.001，均值差异非常显著，排除 VFTO 幅值随机性对统计结果的影响，阻尼母线使 VFTO 的平均幅值的降低 20.36%，结果如表 5 所示。

3 结论

本文提出了一种利用母线自身电感进行 VFTO 抑制的方法，该方法将传统母线镂空成螺旋管式空心线圈以增大电感，并在镂空导线内部每匝线圈匹配相应的电阻，组成“电感+电阻”结构实现 VFTO 的抑制。建立宽频暂态电路模型，对阻尼母线抑制效果进行分析，得到如下结论：

1）使用 550 kV GIS 平台的普通母线加工成螺旋式阻尼母线，加工后其杂散电感约为 0.4 μH，杂散电容约为 0.18 nF。

2）采用宽频暂态模型时 VFTO 幅值抑制效果没有集中参数模型时好，这表明杂散参数的存在对

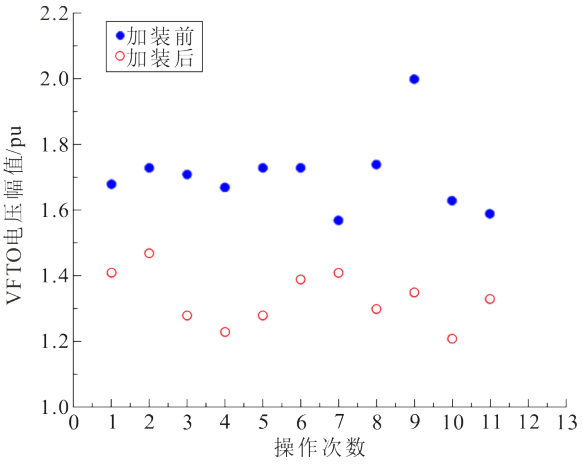


图 12 安装阻尼母线前后 VFTO 幅值统计图

Fig.12 Statistics of VFTO amplitude before and after installation of damping busbar

表 5 加装阻尼母线前后 VFTO 幅值抑制统计结果

Table 5 Statistical results of VFTO amplitude suppression before and after adding damping busbar

安装状态	VFTO 平均幅值/pu	标准差	t 检验的 F 值	幅值平均值降低程度/%
安装前	1.67	0.135	4.207**	20.36
安装后	1.33	0.067		

注：**代表 p<0.01。

VFTO 抑制是不利的，因此在阻尼母线加工时要尽量降低杂散参数的大小。

3）采用仿真计算与试验验证相结合的方法，对阻尼母线的 VFTO 抑制效果进行了系统性验证。试验数据显示，加装阻尼母线后 VFTO 平均幅值下降 20.36%，击穿次数下降约 66.7%，安装阻尼母线无明显高频频率，这表明阻尼母线对 VFTO 的幅值、击穿次数和频率均有很好的抑制效果。

参考文献　References

[1] 李云阁，尚勇，韩彦华，等. 关于极快速暂态过电压(VFTO)研究的现状[J]. 电网与清洁能源，2024，40(10)：1-12.
LI Yunge, SHANG Yong, HAN Yanhua, et al. Current progress in research on very fast transient overvoltage(VFTO)[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 1-12.

[2] 郭文波，汪文元，李寅伟. 550 kV GIS 隔离开关特快速瞬态过电压危害分析及其预防措施[J]. 水电站设计，2023，39(2)：67-70.
GUO Wenbo, WANG Wenyuan, LI Yinwei. Hazard analysis and protection measures for very fast transient overvoltage of 550 kV GIS isolated switch[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2023, 39(2): 67-70.

[3] 张文斌，胡洋. GIS 中快速暂态过电压 VFTO 的抑制研究进展[J]. 高电压技术，2023，49(1)：418-431.
ZHANG Wenbin, HU Yang. Research progress in suppression of fast transient overvoltage VFTO in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 418-431.

[4] 何顺，郑易谷，林川杰，等. 氧化铝掺杂量对环氧盆式绝缘子 VFTO 耐受能力的影响[J]. 高电压技术，2020，46(11)：4006-4013.
HE Shun, ZHENG Yigu, LIN Chuanjie, et al. Effect of alumina doping content on VFTO tolerance of epoxy resin cone-type insulators[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 4006-4013.

[5] 刘洋. GIS 中 VFTO 仿真分析及抑制方法研究[D]. 南昌：华东交通大学，2022.
LIU Yang. VFTO simulation analysis and suppression method research in GIS[D]. Nanchang, China: East China Jiaotong University, 2022.

[6] 李闯，廖星锐，余泉泉，等. VFTO 对电子电压互感器的传导干扰分析及其抑制措施研究[J]. 湖南电力，2024，44(2)：50-59.
LI Chuang, LIAO Xingrui, YU Quanquan, et al. Analysis of conducted interference and research of its suppression measures for VFTO on electronic voltage transformer[J]. Hunan Electric Power, 2024, 44(2): 50-59.

[7] YAMAGATA Y, TANAKA K, NISHIWAKI S, et al. Suppression of VFT in 1 100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnector[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.

[8] 项祖涛，丁扬，班连庚，等. 采用投切电阻抑制特高压 GIS 中特快速暂态过电压[J]. 中国电力，2007，40(12)：31-35.
XIANG Zutao, DING Yang, BAN Lian'geng, et al. Suppressing VFTO in UHV GISs with switching resistor[J]. Electric Power, 2007, 40(12): 31-35.

[9] 江学斌，梁樑，陈光，等. 500 kV GIS 变电站快速暂态过电压及防护措施仿真研究[J]. 能源工程，2010(3)：19-22，27.
JIANG Xuebin, LIANG Liang, CHEN Guang, et al. Simulation study on VFTO and its supressing methods in 500 kV GIS[J]. Energy Engineering, 2010(3): 19-22, 27.

[10] 刘卫东，金立军，钱家骊，等. 铁氧体磁环抑制 GIS 的 VFTO 的可能性[J]. 电工技术学报，2002，17(4)：22-25.
LIU Weidong, JIN Lijun, QIAN Jiali, et al. Possibility of suppressing VFTO in GIS by ferrite rings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 22-25.

[11] 王静. GIS 中氧化锌避雷器对快速暂态过电压影响的研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2012.
WANG Jing. Research on the influence of metal oxide arrester on VFTO in GIS[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2012.

[12] 周力行，刘家郡，钟笑拳，等. 架空线对 GIS 变电站 VFTO 抑制效果的分析[J]. 电力科学与技术学报，2015，30(1)：41-46.
ZHOU Lixing, LIU Jiajun, ZHONG Xiaoquan, et al. VFTO inhibitory effect analysis of overhead line in GIS substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 41-46.

[13] 黎斌. SF_6 高压电器设计[M]. 3 版. 北京：机械工业出版社，2010.
LI Bin. Design of SF_6 high voltage electrical equipment[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2010.

[14] 梁樑. 500 kV 钱江 GIS 变电站 VFTO 过电压研究[D]. 杭州：浙江大学，2009.
LIANG Liang. Disquisiton of very fast transient overvoltage in QianJiang substation[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2009.

[15] 胡洋，张文斌，欧阳娇，等. 铁氧体磁环加装位置对 VFTO 抑制效果研究[J]. 电气工程学报，2023，18(1)：258-264.
HU Yang, ZHANG Wenbin, OUYANG Jiao, et al. Research on the suppression effect of ferrite magnetic ring on VFTO[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(1): 258-264.

[16] 徐永生，傅明利，赵小军，等. 高频 PWM 波激励下纳米晶磁环动态磁滞和损耗特性模拟[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4419-4428.
XU Yongsheng, FU Mingli, ZHAO Xiaojun, et al. Simulation of dynamic hysteresis and loss characteristics of nanocrystal ring core under high-frequency PWM excitations[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4419-4428.

[17] 杨喜龙，穆双录，王浩，等. 特高压 GIS 用磁环型阻尼母线 VFTO 抑制性能试验研究[J]. 高压电器，2024，60(8)：77-84.
YANG Xilong, MU Shuanglu, WANG Hao, et al. Experimental study on VFTO suppression performance of magnetic ring damping bus for UHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 77-84.

[18] 薛宇航，张卫东，刘忠禄，等. 磁环抑制变电站二次电缆瞬态电磁骚扰模拟试验及分析[J]. 高电压技术，2023，49(12)：5302-5311.
XUE Yuhang, ZHANG Weidong, LIU Zhonglu, et al. Analysis and simulation test on suppressing transient electromagnetic disturbance of secondary cable in substation with magnetic rings[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5302-5311.

[19] 张桂红，郭洁，徐燕飞，等. 金属氧化物避雷器陡波下模型的准确性分析[J]. 高电压技术，2007，33(3)：83-86，120.
ZHANG Guihong, GUO Jie, XU Yanfei, et al. Accuracy of metal oxide surge arrester model under steep-front waves[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007, 33(3): 83-86, 120.

[20] JIANG Longyun. Research on fast transient overvoltage suppression measures in 750 kV GIS[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2025, 2993(1): 012062.

[21] LIN Xin, WANG Jing, XU Jianyuan. High frequency model of metal-oxide surge arrester for researching on VFTO[C]//2011 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching

Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China: IEEE, 2011: 577-581.

[22] 张金凤，陈昊，李朋飞，等. 500 kV HGIS 电站取消母线 MOA 对过电压抑制效果的影响[J]. 电瓷避雷器，2022(5)：53-58.
ZHANG Jinfeng, CHEN Hao, LI Pengfei, et al. The effect of cancelling bus MOA on overvoltage suppression in 500 kV HGIS power station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 53-58.

[23] WANG H, WU X X, FENG X T, et al. Calculation and analysis the dynamic breakdown characteristic of SF_6 discharge caused by GIS disconnector operation[J]. Physica Scripta, 2023, 98(2): 025005.

[24] 杨景刚，肖小龙，刘瑞煌，等. 光伏中压直流汇集系统双极短路特性分析及连锁过电压抑制[J]. 高电压技术，2021，47(1)：205-213.
YANG Jinggang, XIAO Xiaolong, LIU Ruihuang, et al. Characteristic analysis and chain overvoltage suppression for bipolar short circuit in photovoltaic MVDC collection and integration system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 205-213.



王　欢
1984—，女，博士，高工
主要从事互感器运维及测量方面的技术研究
E-mail: wanghuanwuhan@163.com

WANG Huan
Ph.D.
Senior engineer



李红斌
1967—，女，博士，教授，博导
主要从事电力高压设备运行性能检测与分析技术研究
E-mail: lihongbin@hust.edu.cn

LI Hongbin
Ph.D., Professor



刁赢龙
1988—，男，博士，高工
主要从事电力系统信息化技术研究
E-mail: diaoyinglong@126.com

DIAO Yinglong
Ph.D.
Senior engineer



杜博伦
1994—，男，博士，工程师
主要从事互感器在线监测与状态评价、计量大数据分析技术研究
E-mail: bolundu93@163.com

DU Bolun
Ph.D.



吴细秀(通信作者)
1976—，女，博士，副教授，博导
IEEE PES 中国区电力系统测量与仪器技术委员会委员，主要从事电气设备数字化仿真方面研究
E-mail: wuxixiu@whut.edu.cn

WU Xixiu
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2025-03-10　在线出版日期　2025-03-27　　编辑　卫李静