

采用套管传感器测量 变压器线端快速暂态过电压的方法

马国明¹, 李成榕¹, 全江涛¹, 蒋建¹, 印永华², 赵红光², 晁晖²

(1. 高电压与电磁兼容北京市重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Measurement of VFTO on Transformer Entrance With Transformer Bushing Sensor

MA Guoming¹, LI Chengrong¹, QUAN Jiangtao¹, JIANG Jian¹, YIN Yonghua², ZHAO Hongguang², CHAO Hui²

(1. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC (North China Electric Power University),

Changping District, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: The switching operation of disconnectors in gas insulated switchgear (GIS) systems may cause very fast transient overvoltages (VFTO), which brings about dielectric stress to other apparatus in the substation. A technique for measuring VFTO on transformer entrance with a developed bushing sensor is presented. A capacitor bank was connected with the transformer bushing to construct the bushing sensor. Convolution model based on square wave response experiment was applied to gain the frequency response of the bushing sensor. In order to solve the frequency limitation problem, deconvolution algorithm based on the incremental Wiener filter was used to reconstruct the input transient voltage. A fast transient simulation platform was built in laboratory. Results of the laboratory experiments demonstrate that the measurement system can be used for VFTO measurement. Disconnector switching operations were measured with the developed measuring system in an UHV substation, and the output waveforms from the sensor were recovered with the reconstructed method. Results of the measurement in field imply that the measuring system based on the test tap of transformer bushing can be applied in disconnector operation measurement.

KEY WORDS: very fast transient overvoltage; transformer bushing; square wave response; incremental Wiener filter; transducer

摘要: 全封闭气体绝缘组合开关内隔离开关操作产生的快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)给变电站内其他运行设备的安全带来严重危害,提出了一种利用变压器套管传感器测量变压器引线端电压的测量方法。将传感器低压臂部分接到变压器套管末屏上,与套管电容构成 VFTO

套管传感器;采用卷积模型法处理方波响应结果,获得了传感器响应特性;基于增量 Wiener 反卷积滤波器的波形还原方法,解决了套管引起的传感器高频响应频率失真问题。在实验室建立了一个快速暂态过程实验平台,在此平台上验证了套管传感器 VFTO 测量系统的有效性。在某超高压变电站用套管传感器测量了隔离开关操作时高压电抗器处的 VFTO,并对测量结果进行了波形还原。测量结果表明,基于变压器套管传感器的 VFTO 测量系统可以满足现场测量的需要。

关键词: 快速暂态过电压; 变压器套管; 方波响应; 增量 Wiener 反卷积; 传感器

0 引言

全封闭气体绝缘组合开关电器具有占地面积小、不受大气环境影响、运行可靠性高、维护量小等优点,在电力系统中得到了广泛应用。由于全封闭气体绝缘组合开关(gas insulated switchgear, GIS)中隔离开关触头移动较慢,动静触头间在分闸操作时会产生多次重击穿,在合闸操作时会有多次预击穿,一次操作会产生上百次的电弧重燃。此外,由于被隔离开关开断、闭合的引线一般都较短,波的折、反射很快,隔离开关操作中将会产生频率极高、波头极陡的快速暂态过电压现象^[1-2]。VFTO 的峰值一般低于 2.0 pu,极端情况下最大值可达到 3.0 pu^[3],所有与隔离开关相连的设备都要承受较强的过电压冲击。1992 年广东大亚湾核电工程在进行 500 kV 系统调试切合空载变压器的例行操作时, VFTO 导致 3×350 MVA 主变压器一相主绝缘被击穿; 1990 年江门变电系统调试中 VFTO 导致 2 台发电机断路

器(generator circuit breaker, GCB)损毁^[4]。目前国内外对 VFTO 的研究主要集中在仿真和测量 2 方面。由于存在电弧模型不准确,变电站结构复杂,频域内非线性和时域内频变效应等问题, VFTO 的仿真计算误差较大,很难给设备生产商和变电站设计者提供有价值的建议^[5]。因此研究 VFTO 测量方法,通过测量获得隔离开关操作时的 VFTO 情况显得尤为重要。

20 世纪 80 年代以来,日本东芝公司,印度 IIT 大学,德国西门子公司以及国内的西安交通大学、华北电力大学、沈阳高压开关有限公司等研究机构都对 VFTO 的模型和测量进行了一些研究^[2,6-14],研究主要集中在对 GIS 内部的 VFTO 进行测量,对与 GIS 相连的设备处的 VFTO 测量涉及较少。加拿大 Malewski 等^[7]曾利用在套管末屏处接电流互感器的方法测量开关操作产生的高频波,但因受限于套管频率特性,其有效测量频带不到 1 MHz。德国西门子公司将电极板内置在变压器套管内,通过电容分压的方法测量 VFTO^[8],取得较好的测量效果,但其缺点是必须在设备内放置测量电极,因而不方便在已运行的电气设备上测量。

为能够对现有运行设备的 VFTO 进行测量,本文提出了一种利用变压器套管传感器,测量套管顶端 VFTO 波形的测量方法。

1 套管传感器

套管传感器是 VFTO 测量的关键环节,其性能与系统测量精度直接相关。套管传感器采用电容分压原理,高压臂为套管导杆与末屏间的电容 C_1 ,低压臂部分安装在套管末屏处,分压电容 C_2 位于传感器低压臂部分内部。传感器原理如图 1 所示。

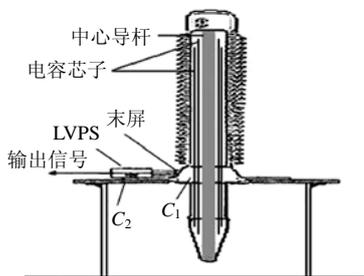


图 1 VFTO 套管传感器原理图
Fig. 1 Structure of VFTO sensor

在传感器低压臂部分(low voltage part of sensor, LVPS)设计中,为使 C_2 高频特性保持稳定,电容量不能过大;而套管内导杆到末屏电容 C_1 的容量通常为 200~800 pF,因此传感器的分压比

$(C_2+C_1)/C_1$ 较小,在测量高电压等级 VFTO 时,为将信号降到示波器可测量范围内,需要在示波器前增加衰减器。测量系统如图 2 所示,图中: C_1 为套管内导杆到末屏的电容, C_2 为 VFTO 传感器低压臂部分内的电容; R_1 为同轴电缆的匹配电阻。

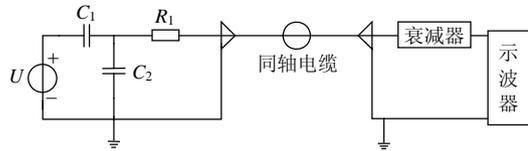


图 2 VFTO 测量系统原理图
Fig. 2 Simplified equivalent circuit of VFTO measuring system

传感器的低压臂部分采用同轴结构,多个电容并联构成低压臂电容,通过减小电容的寄生电感,多点接地,缩小传感器体积等方法,减少了杂散参数影响,提高了传感器高频性能。

该传感器主要用于测量套管顶端的 VFTO 波形,对于进入变压器绕组的 VFTO 波形,可结合套管模型和高频绕组模型进行进一步的分析^[15-16]。

2 基于 Wiener 增量反卷积的波形还原

2.1 波形还原原因与流程

套管导杆到末屏的电容 C_1 作为 VFTO 传感器的高压臂电容,其性能的好坏对传感器输出响应特性有重要影响。电容式套管具有内绝缘和外绝缘,内绝缘为一圆柱形电容芯子,外绝缘为瓷套。电容极板一般采用铝箔卷制成同心圆柱形结构。电容芯子由 0.08~0.12 mm 厚的绝缘纸和 0.01 mm 厚的铝箔加压力交替卷在中心铜管上。因此电容式套管是一个含有电位悬浮导体的电极系统,其电路模型为一个电阻、电容、电感构成的复杂网络^[17]。这种混合网络导致套管的谐振频率较低,进而造成 VFTO 传感器的高频响应变差,因此需要对实际测量得到的波形进行波形还原,以获得进入变压器的准确的 VFTO 波形。

本文采用的波形还原方法为:将传感器系统作为一个二端口网络,首先获得该二端口网络的频域特性,然后基于 Wiener 滤波器函数,用增量 Wiener 反卷积算法对传感器输出信号的频域形式进行还原,从而得到套管顶端准确的 VFTO 波形。图 3 为波形还原算法的流程图。

1) Wiener 滤波器的获得。利用卷积模型法处理系统方波响应结果,得到 VFTO 传感器的单位冲击响应 $H(n)$,对 $H(n)$ 进行 FFT 变换得到传感器系

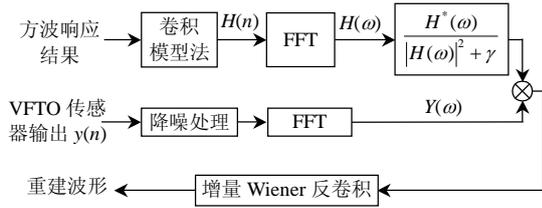


图3 波形还原算法流程

Fig. 3 Flowchart of signal recovery

统的频域响应特性 $H(\omega)$ ，基于 $H(\omega)$ 按照 Wiener 反卷积算法构造 Wiener 滤波器 $\frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma}$ ， γ 为信号和噪声功率谱决定的一个正常数。

2) 传感器输出信号频域形式的获得。对传感器输出信号进行降噪处理，对处理结果进行 FFT 变换获得信号的频域形式 $Y(\omega)$ 。

3) 增量反卷积还原。用 Wiener 滤波器处理 $Y(\omega)$ 得到的初次还原结果，将其代入 Wiener 增量反卷积算法中，计算获得进入传感器的 VFTO 波形。

2.2 Wiener 滤波器获得方法

构造 Wiener 滤波器是 VFTO 波形还原的前提，为构造 Wiener 滤波器，需要首先获得 VFTO 传感器系统的频域响应特性 $H(\omega)$ 。通过对传感器方波响应结果进行卷积模型法辨识，可方便地获得传感器频域响应特性。基于方波响应试验，利用卷积模型获得传感器频域响应特性的方法^[18]如下。

设 VFTO 测量传感器的方波输入和方波响应输出序列分别为 $x(n)$ 、 $y(n)$ ，单位冲击响应序列为 $h(n)$ ，误差序列为 $u(n)$ ，系统的卷积模型可表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{H} + \mathbf{U} \quad (1)$$

式中： $\mathbf{Y} = [y(p), y(p+1), \dots, y(p+m)]^T$ ； $\mathbf{U} = [u(p), u(p+1), \dots, u(p+m)]^T$ ； $\mathbf{H} = [h(0), h(1), \dots, h(p)]^T$ ；

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x(p) & x(p-1) & \cdots & x(0) \\ x(p+1) & x(p) & \cdots & x(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(p+m) & x(p+m-1) & \cdots & x(m) \end{bmatrix}。其中：p$$

为设定的传感器冲击响应序列长度； m 为进行误差分析的点数，为保证方程个数大于未知数个数， $m > p$ 。

定义误差矢量 $\mathbf{U} = \mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{H}$ ，为使误差指标 $\mathbf{J} = \mathbf{U}^T \mathbf{U}$ 相对于 \mathbf{H} 最小，需要 \mathbf{J} 对 \mathbf{H} 求偏导为零，即 $\partial \mathbf{J} / \partial \mathbf{H} |_{\mathbf{H} = \hat{\mathbf{H}}} = \mathbf{0}$ ，得到如下正则方程： $(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) \hat{\mathbf{H}} = \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ ，因此最小二乘估计为

$$\hat{\mathbf{H}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (2)$$

调整参数 p 、 m ，使 $\hat{\mathbf{H}}$ 和输入 $x(n)$ 卷积结果与

输出 $y(n)$ 的误差在允许范围内，即可得到正确的 $\hat{\mathbf{H}}$ 。对 $\hat{\mathbf{H}}$ 进行 FFT 变换，得到传感器的频域响应特性 $H(\omega)$ ，按照 Wiener 反卷积算法即可构造波形还原所需的 Wiener 滤波器 $\frac{H^*(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma}$ 。

2.3 Wiener 增量反卷积还原

用 Wiener 滤波器处理传感器输出信号的频域形式 $Y(\omega)$ ，得到 VFTO 的初次还原结果

$$X_{\text{old}}(\omega) = \frac{H^*(\omega)Y(\omega)}{|H(\omega)|^2 + \gamma} \quad (3)$$

式中： $X_{\text{old}}(\omega)$ 为 VFTO 的初次还原结果； $Y(\omega)$ 为传感器输出的频域形式； $H(\omega)$ 为传感器的响应特性； γ 为信号和噪声功率谱决定的一个正常数。

为最小化误差，采用增量 Wiener 反卷积算法对初次还原结果进行进一步处理^[19]，在增量 Wiener 反卷积中，误差定义为

$$S(\omega) = Y(\omega) - X_{\text{old}}(\omega)H(\omega) \quad (4)$$

滤波器对新输入的估计为

$$X_{\text{new}}(\omega) = X_{\text{old}}(\omega) + [H^*(\omega)S(\omega)] / (|H(\omega)|^2 + \gamma) \quad (5)$$

假设旧的误差为

$$S_1(\omega) = Y(\omega) - X_{\text{old}}(\omega)H(\omega) \quad (6)$$

新的误差为

$$S_2(\omega) = Y(\omega) - X_{\text{new}}(\omega)H(\omega) \quad (7)$$

可以得到

$$S_2 = (\gamma S_1) / (|H(\omega)|^2 + \gamma) \quad (8)$$

由于 $\gamma > 0$ 且 $|H(\omega)|^2 \geq 0$ ，因此

$$\|S_2\|^2 \leq \|S_1\|^2 \quad (9)$$

因此增量 Wiener 反卷积可以减少求得的 VFTO 套管传感器输入波形的误差。图 4 为 Wiener 反卷积算法流程。

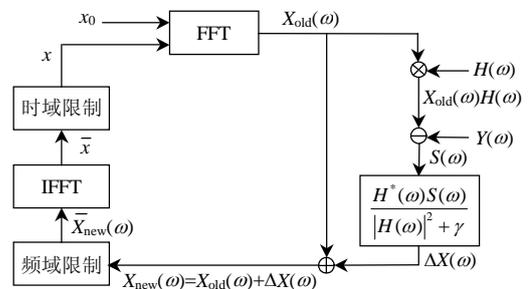


图4 增量 Wiener 反卷积流程

Fig. 4 Flowchart of incremental Wiener filter

3 实验室验证

3.1 快速暂态过程模拟平台

为检验传感器是否满足 VFTO 测量要求，在实

验室内基于 110kV 套管, 建立了一个如图 5 所示的快速暂态过程模拟平台。

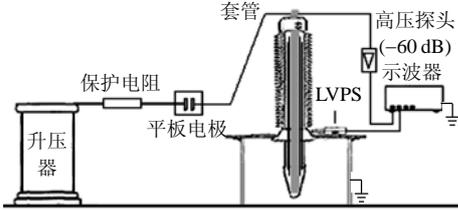


图 5 快速暂态过程实验平台

Fig. 5 Schematic diagram of the fast transient process experiment setup

试验工频变压器和保护电阻构成高压工频交流源, 平板电极的击穿产生快速暂态过程, 快速暂态波沿一段高压引线传递到套管上。将 Tektronix P6015A 高压探头接在套管顶端, 用来测量输入波, 高压探头测量信号和套管传感器输出信号分别经同轴电缆传递到示波器上。

实验平台通过较长的高压引线模拟实际中 GIS 与变压器通过架空线连接的接线方式, 形成的模拟 VFTO 波形的主频带为 3 MHz 左右, 波头部分有上升沿为 20 ns 的分量, 与实际隔离开关操作产生的 VFTO 类似^[9]。

3.2 110kV 套管传感器响应特性的获得

为得到正确的快速暂态波形, 需要对测量结果进行波形还原, 因此需要在暂态过程测量前先获得套管传感器的响应特性。对 110kV 变压器套管传感器进行了方波响应试验, 方波响应试验布置如图 6 所示。用 Agilent33250A 函数发生器发出的上升沿为 5 ns, 幅值为 10 V 的方波作为输入信号, 将输入信号接在套管顶端, 因套管电容和引线的影响, 输入到套管顶端的方波波头将变缓, 但由于变压器套管处 VFTO 的频率较低^[7], 该方波源仍可满足标定要求, 用一个分压比为 100:1 的高频探头测量套管顶端输入的方波信号, 将 VFTO 传感器的输入信号和输出信号分别接入示波器。

套管传感器方波响应试验结果如图 7 所示, 图

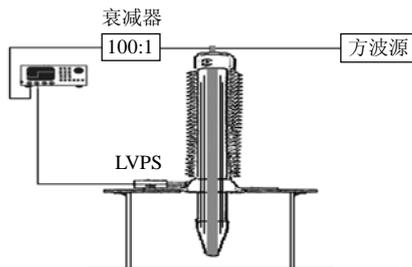


图 6 VFTO 传感器方波响应试验布置

Fig. 6 Schematic diagram of the square wave response experiment setup

中: u_{in} 为高频探头测量到的传感器输入信号, u_{out} 为传感器输出信号。对传感器方波响应结果进行卷积模型法辨识, 得到了传感器系统的单位冲击响应。传感器输入信号和单位冲击响应的卷积结果与传感器输出信号有比较好的一致性(如图 8 所示), 证明了卷积模型法得到的 VFTO 套管传感器单位冲击响应的正确性, 对单位冲击响应进行 FFT 变换即可得到传感器的响应特性, 图 9(a)为传感器的幅频响应特性(U_{Δ} 为增益), 图 9(b)为传感器的相频响应特性(α_{Δ} 为相移)。

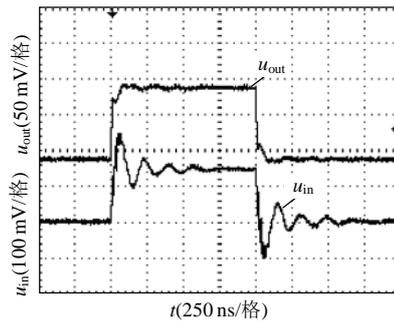


图 7 VFTO 传感器方波响应结果

Fig. 7 Result of square wave response experiment

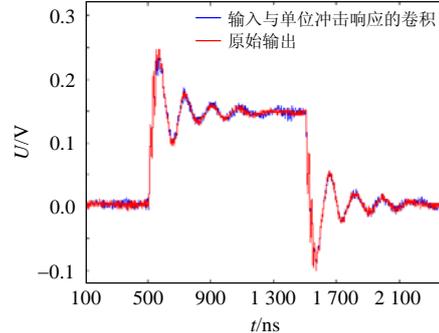
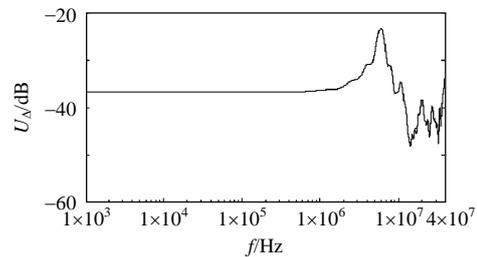
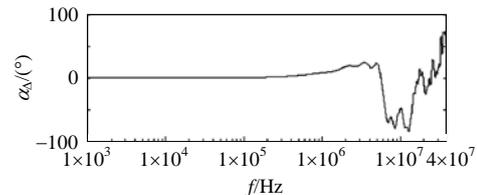


图 8 传递函数结果验证

Fig. 8 Comparison of original output waveform with convolution result



(a) 传感器幅频响应特性



(b) 传感器相频响应特性

图 9 VFTO 传感器频域响应特性

Fig. 9 Frequency transfer characteristic of VFTO sensor

3.3 测量结果与分析

在实验平台上进行了大量暂态过程测量试验，得到了传感器输入输出波形，典型结果如图 10 所示，图 10(a)为快速暂态过程全波测量结果，图 10(b)为波头部分测量结果。图中： u_s 为 P6015A 高压探头测量结果， u_b 为套管传感器测量结果。两者的主要振荡频率波形相同，但两者波头部分的高频分量有所区别，这是由前文所述的套管内部结构复杂，传感器高频响应变差引起的。因此需要对测量得到的波形进行进一步的波形还原。

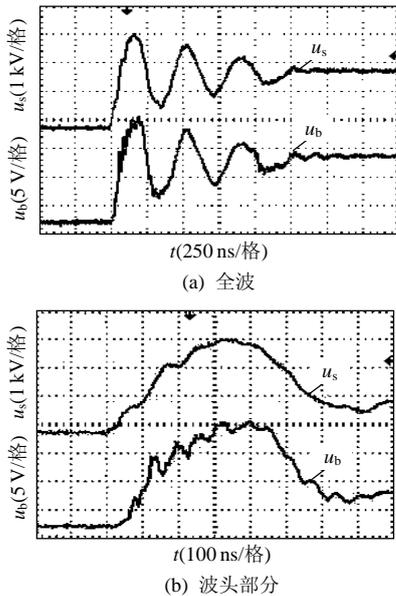
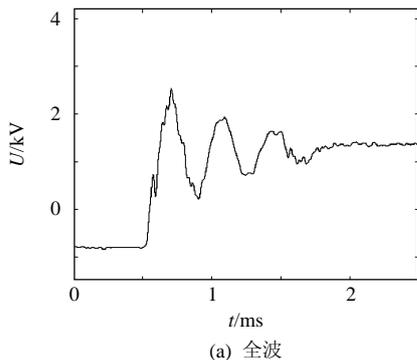


图 10 快速暂态过程测量结果

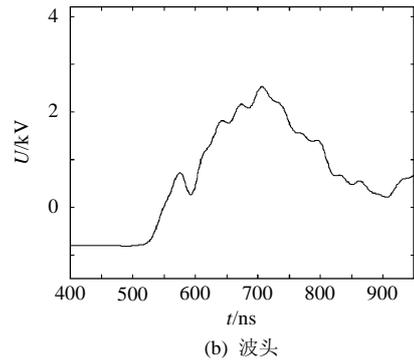
Fig. 10 Measurement results of the fast transient waveform

利用传感器响应特性，用波形还原算法对输入波形进行还原，得到的还原结果如图 11 所示。还原的波形与 TektronixP6015A 探头测量的波形振荡频率一致，最大值相差较小，波头部分高频分量相符，可见反卷积还原得到的波形与进入套管顶端的实际波形一致。

实验室试验结果表明，套管传感器 VFTO 测量系统对模拟的快速暂态过电压测量准确。



(a) 全波



(b) 波头

图 11 反卷积还原结果

Fig. 11 Waveforms reconstructed by the incremental Wiener filter

4 现场隔离开关操作 VFTO 测量结果

为验证套管传感器测量系统对隔离开关操作产生的 VFTO 测量的有效性，在某超高压变电站进行了现场实测试验。套管传感器 VFTO 测量系统现场布置如图 12 所示，套管传感器低压臂部分通过同轴电缆、衰减器与示波器直接相连，示波器由变电站检修电源通过 UPS 供电。示波器采用高记录长度的 Tektronix7354 示波器，示波器频带为 3.5 GHz，存储深度为 200M 个点，为完整记录整个隔离开关操作时产生的 VFTO，示波器设置的采样率为 10 MS/s，记录时间 20 s。

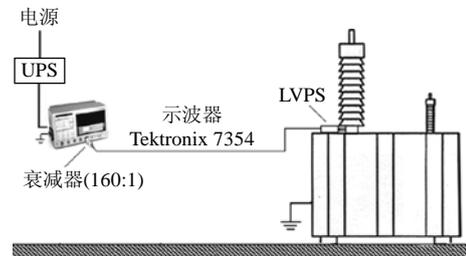


图 12 套管传感器现场布置

Fig. 12 Setup of VFTO measuring system in substation

该变电站采用的是敞开式隔离开关，研制的 VFTO 传感器低压臂部分安装在高压电抗器套管末屏上，传感器安装位置如图 13 所示。

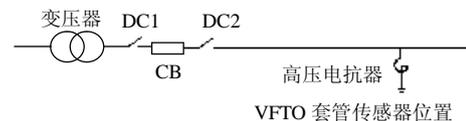


图 13 传感器安装位置

Fig. 13 Location of the sensor

为准确地还原 VFTO 波形，需首先获得现场用套管传感器的响应特性。对与现场相似的变压器套管传感器进行了方波响应试验，运用卷积模型法处理传感器方波响应结果，得到了传感器的幅频响应特性和相频响应特性(如图 14 所示)。

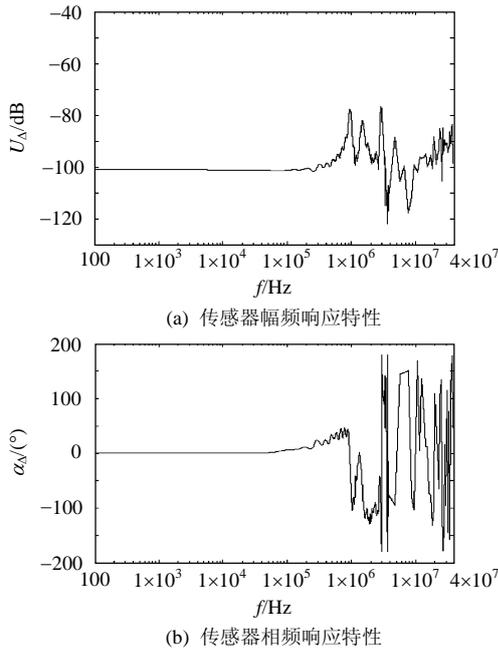


图 14 现场用 VFTO 传感器频域响应特性
Fig. 14 Frequency transfer characteristic of VFTO sensor used in the substation

在该超高压变电站分别测量了隔离开关开合操作产生的 VFTO，其中 DC2 隔离开关分闸操作时，套管传感器测量到的 VFTO 波形如图 15 所示。

从图 15(a)中可以看出，在隔离开关分闸操作过程中发生了多次 VFTO 现象，总持续时间为 3.12 s，VFTO 的分布特点是前期击穿密集，后期击穿稀疏。图 15(b)显示，在 1 个工频周期内可以有 4 次 VFTO

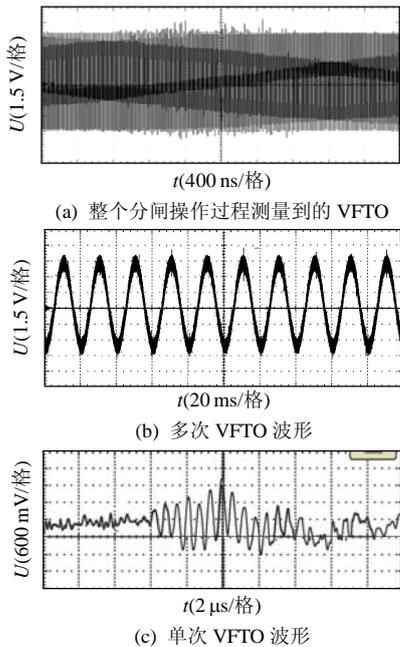


图 15 分闸操作 VFTO 传感器测量结果
Fig. 15 Measurement results of VFTO induced by disconnector open operation in an UHV substation

现象，且 VFTO 发生的相位不确定。图 15(c)给出了单次 VFTO 的测量结果，为获得进入电抗器套管的实际 VFTO 波形，需要对测量结果进行波形还原。

基于图 14 中的传感器频域响应特性，用增量 Wiener 反卷积的方法对图 15(c)所示的单次 VFTO 测量结果进行波形还原，还原前后 VFTO 波形对比如图 16 所示，幅频特性对比如图 17 所示(加 Hamming 窗 FFT 变换结果)。

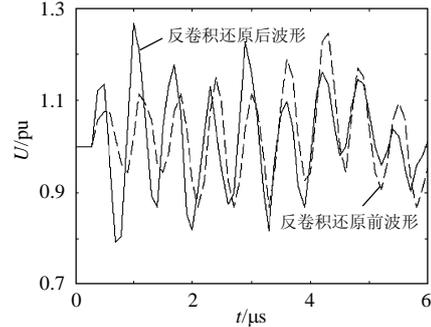


图 16 反卷积还原前后波形比较
Fig. 16 Comparison of original output waveform with convolution result (time domain)

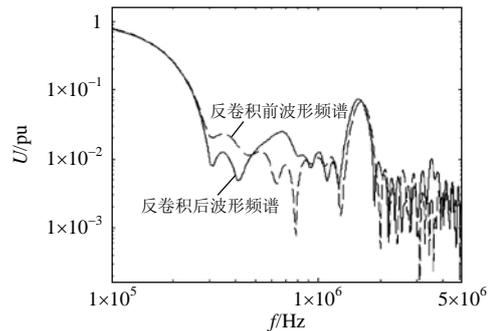


图 17 反卷积还原前后幅频特性比较
Fig. 17 Comparison of original output waveform with convolution result (frequency domain)

图 16 显示此次传递到电抗器套管顶端的 VFTO 上升时间为 200 ns，与隔离开关处的 VFTO 上升时间相比，电抗器处 VFTO 的上升时间明显增大，造成这种情况的原因是现场隔离开关和电抗器通过架空线连接，且距离较远，高频波在传播过程中衰减严重，电压陡度降低。图 17 的还原前后幅频特性的对比表明，反卷积还原算法有效地拓展了测量系统带宽。此次传递到电抗器套管顶端的 VFTO 的基本振荡频率为 650 kHz，并叠加了 1.6 和 3.5 MHz 的高频振荡。测量结果与国外相关仿真测量结果一致^[20]，表明基于套管传感器的 VFTO 测量系统满足现场测量需要。

5 结论

1) 提出了基于变压器套管传感器的 VFTO 测

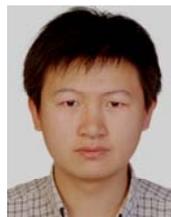
量方法。通过采用多电容并联和多点接地的方法可显著提高所研制的传感器低压臂部分的性能。

2) 基于卷积模型的传感器标定算法可准确获得传感器频率响应特性。基于增量 Wiener 滤波器的反卷积算法可有效减小因传感器高频特性较差造成的测量误差。

3) 实验室试验结果证明了利用开发的套管传感器和波形还原算法可有效测量快速暂态波。现场测量试验表明所研制的传感器使用方便、抗干扰能力强、可以测量隔离开关操作产生的 VFTO。

参考文献

- [1] Meppelink J, Diederich K, Feser K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 14(1): 223-233.
- [2] 史保壮. 用微积分系统测量快速暂态过电压的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
Shi Baozhuang. Studies on measurement of very fast transient overvoltages by differentiating integrating systems[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1997(in Chinese).
- [3] IEC. IEC62271-102—2002 High-voltage switchgear and controlgear part102 : alternating current disconnectors and earthing switches[S]. Geneva: IEC, 2002.
- [4] 何善庆. GIS 中的快速暂态现象[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-46.
He Shanqing. Fast transient phenomenon in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(2): 41-45(in Chinese).
- [5] 张重远. 气体绝缘变电站开关操作产生的电磁干扰问题研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
Zhang Zhongyuan. Research on the electromagnetic interference due to switching operation in gas insulated substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004(in Chinese).
- [6] Nojima K, Nishiwaki S, Okubo H, et al. Measurement of surge current and voltage waveforms using optical-transmission techniques [J]. IEE Proceedings, 1987, 134(6): 415-422.
- [7] Malewski R, Douville J, Lavallee L. Measurement of switching transients in 735 kV substations and assessment of their severity for transformer insulation[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(4): 1380-1390.
- [8] Christian J, Xie J. Very fast transient oscillation measurement at three gorges left bank hydro power plant[C]/International Conference on Power System Technology. Chongqing, China: IEEE, 2006: 1-7.
- [9] 尹晓芳, 于力, 刘广维. 封闭式组合电器隔离开关产生的过电压[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 111-114.
Yin Xiaofang, Yu Li, Liu Guangwei. Overvoltage from gas insulated switchgear disconnector[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 111-114(in Chinese).
- [10] Kumar V V, Thomas J. Capacitive sensor for the measurement of VFTO in GIS[C]/Eleventh International Conference on High Voltage Engineering Symposium. London, UK: IET, 1999: 156-159.
- [11] 张喜乐, 梁贵书, 孙海峰, 等. VFTO 作用下变压器绕组的过电压计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 4-6, 26.
Zhang Xile, Liang Guishu, Sun Haifeng, et al. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 4-6, 26(in Chinese).
- [12] 康宁, 邹建华, 杨兰均, 等. 三相同壳结构 GIS 快速暂态过程模型构建和参数计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 112-117.
Kang Ning, Zou Jianhua, Yang Lanjun, et al. Transient parameters and numerical calculation model on VFTO in three-phase enclosed GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 112-117(in Chinese).
- [13] 王赞基. 变压器线圈中特快速暂态仿真的建模[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(5): 299-306.
Wang Zanji. Modeling for simulating very fast transient in transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(5): 299-306(in Chinese).
- [14] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压的模拟试验和仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 101-105.
Xiang Zutao, Liu Weidong, Qian Jiali, et al. Simulation test and computation of suppressing very fast transient overvoltage in GIS by magnetic rings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 101-105(in Chinese).
- [15] 杨钰, 王赞基, 邵冲. 电力变压器的宽频带建模及阻抗分析[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(1): 11-15.
Yang Yu, Wang Zanji, Shao Chong. Modeling of power transformer in wide frequency range and analysis of the impedance characteristic [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(1): 11-15(in Chinese).
- [16] 梁贵书, 张喜乐, 王晓晖, 等. 特快速暂态过电压下变压器绕组高频电路模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 144-148.
Liang Guishu, Zhang Xile, Wang Xiaohui, et al. Research on high-frequency circuit model of transformer windings in VFTO [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 144-148(in Chinese).
- [17] 司马文霞, 兰海涛, 林杜, 等. 套管末屏电压传感器响应特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 172-176.
Sima Wenxia, Lan Haitao, Du Lin, et al. Study on response characteristic of voltage sensor mounted at the tap of transformer bushing [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 172-176(in Chinese).
- [18] 夏天长, 熊光镛, 李芳芸. 系统辨识最小二乘法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1983: 42-49.
Xia Tianchang, Xiong Guangleng, Li Fangyun. Least square method for system identification[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1983: 42-49(in Chinese).
- [19] Zou Mouyan, Rolf U. New algorithms of two-dimensional blind deconvolution[J]. Optical Engineering, 1995, 34(10): 2945-2956.
- [20] Carsimamovic S, Bajramovic Z, Ljevak M, et al. Very fast electromagnetic transients in air insulated substations and gas insulated substations due to disconnector switching[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Chicago: IEEE, 2005: 382-387.



马国明

收稿日期: 2009-09-30。

作者简介:

马国明(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为图像处理、快速暂态波测量以及输电线路覆冰状态监测, maguoming@ieec.org;

李成榕(1957), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统动态安全防护与电气设备状态检测、高电压新技术及其应用、电气绝缘理论及新材料、气体放电等方面的研究工作, lcr@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)