

330 kV GIS 隔离开关操作过程中电磁干扰单脉冲波形特征规律研究

梅冰玉^{1,2}, 李振华^{1,2}, 李振兴¹, 李红斌³, 童悦⁴, 邱立¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌, 443002; 2. 智慧能源技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;
3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

摘要: 气体绝缘开关设备中隔离开关操作产生的特快速暂态过电压是威胁二次设备安全运行的重要因素。为掌握 VFTO 特征分布规律, 文中按照实际线路参数搭建 330 kV GIS 隔离开关模拟干扰源试验系统, 模拟现场 GIS 隔离开关分合操作时产生的电磁干扰过程, 通过核密度估计法对提取的 VFTO 单脉冲波形特征数据进行了全面的统计分析。结果表明, 合、分闸时单脉冲的最大峰值分布呈 3 峰分布, 最大峰值分别分布在 [25.98, 294.49] kV、[33.08, 305.91] kV; 合、分闸时的单脉冲的持续时间分布分别呈 2 峰分布和 3 峰分布, 持续时间一般为十几微秒; 合、分闸时单脉冲的上升时间分布呈单峰分布, 合闸时上升时间比分闸时短; 合、分闸单脉冲的间隔时间呈单峰分布, 分合闸时的间隔时间基本一致。研究结果可为变电站二次设备的安全运行、相关标准的制定以及电磁防护提供参考。

关键词: 特快速暂态过电压; 隔离开关; 单脉冲波形参数; 核密度估计法; 统计分析

Study on the Characteristics of Electromagnetic Interference Single Pulse Waveform During the Operation of 330 kV GIS Disconnecter

MEI Bingyu^{1,2}, LI Zhenhua^{1,2}, LI Zhenxing¹, LI Hongbin³, TONG Yue⁴, QIU Li¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: The very fast transient overvoltage generated by the operation of disconnecter in gas insulated switchgear is an important factor threatening the safe operation of secondary equipment. In order to grasp the distribution law of VFTO characteristics, a 330 kV GIS disconnecter simulation interference source test system is built according to the actual line parameters, and the electromagnetic interference process generated during the on-site GIS disconnecter switching operation is simulated. The extracted VFTO single pulse waveform characteristic data are comprehensively analyzed by kernel density estimation method. The results show that the maximum peak distribution of single pulse during closing and opening is three-peak distribution, and the maximum peaks are distributed at [25.98, 294.49] kV and [33.08, 305.91] kV, respectively. The duration distribution of single pulse at closing and opening is 2-peak distribution and 3-peak distribution respectively, and the duration is generally more than ten microseconds. The rise time distribution of single pulse during closing and opening shows a single peak distribution, and the rise time during closing is shorter than that during opening. The interval time of closing and opening single pulse is unimodal distribution, and the interval time of opening and closing is basically the same. The research results can provide reference for the safe operation of substation secondary equipment, the formulation of relevant standards and electromagnetic protection.

Key words: very fast transient voltage; disconnecter; single pulse waveform parameters; kernel density estimation method; statistical analysis

基金项目: 国家自然科学基金(52277012); 武汉强磁场学科交叉基金资助(WHMFC202202)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52277012), Supported by Wuhan High Magnetic Field Interdisciplinary Fund (WHMFC202202).

0 引言

隔离开关在气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 中的操作速度较慢, 动静触头之间会发生数十次甚至数百次的电弧燃弧、熄弧过程, 使隔离开关两端产生一个上升速度极快的电压陡波, 产生的电压陡波在 GIS 内来回传播并产生频率很高的特快速暂态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO)^[1-4]。随着电压等级的提高, VFTO 的高幅值、陡波形、高振荡频率等暂态特征的影响变得愈加显著, 对电力系统二次设备的正常运行形成一定的危害和威胁^[5-7]。因此, 掌握 GIS 隔离开关操作时产生的 VFTO 特征规律, 无论对设备的安全运行、电磁防护还是相关标准的制定都具有重要的参考意义^[8-9]。

在 20 世纪 80 年代初, 国际大电网会议组织 (CIGRE) 对 GIS 事故进行调查, 发现大部分的变电站事故是由隔离开关操作过程中产生的 VFTO 引起的, 进一步研究了 VFTO 可能对 GIS 变电站造成的危害^[10]。到 80 年代末, 对于 VFTO 的发展规律已经形成初步认知^[11-15]。标准 IEC 61000-4-18: 2011^[16]和 GB/T 17626.18—2016^[17]规定, 隔离开关操作产生的干扰波形推荐用阻尼振荡波来等效。然而变电站二次设备所受干扰的波形具有一定的分散性, 因此无法准确地重现实际端口上的干扰波形, 且这些干扰波的强度远超出当前电磁兼容试验标准所规定的干扰水平^[18-20]。

目前, 国内外进行了大量的 VFTO 特征试验来研究 GIS 中不同电压等级下的 VFTO 特征规律。文[21]统计了 110 kV 隔离开关操作过程中的暂态波形参数特征, 揭示了暂态干扰波形参数的分

布规律。但 VFTO 的各特征在受到残余电压、合闸电阻、击穿时刻等多个因素影响时具有很大的分散性^[22-26]。文[27]对 800 kV GIS 变电站中 VFTO 波形特征进行研究, 发现电磁干扰强度会受到单脉冲数量和击穿发生时刻的共同影响作用。文[28]建立了 252 kV GIS 研究平台, 分析获得了隔离开关操作产生的特快速暂态波形的全过程波形、单次击穿波形的特性规律。文[29]利用 1 100 kV GIS 中的 VFTO 测量数据统计分析了单次分合闸操作产生的干扰特征。以上研究主要是统计分析电磁干扰全过程波形的特征参数, 隔离开关操作时触头之间会发生数十甚至上百次放电击穿而形成的单脉冲波形却少有纳入考虑。但在电网的实际运行中, 设备的电磁抗干扰性和绝缘性会受所有单脉冲共同作用影响。

综上所述, 目前对于隔离开关操作过程电磁干扰特征研究主要是围绕 VFTO 全过程波形特征进行统计分析, 缺少对 VFTO 单脉冲波形进行特征提取及参数统计分析。因此, 文中按照实际线路参数搭建 330 kV GIS 隔离开关模拟干扰源试验系统, 模拟现场 GIS 隔离开关分合操作时产生的电磁干扰过程, 获得了 330 kV GIS 隔离开关操作时 VFTO 数据, 提取表征 VFTO 单脉冲特征的基本参数, 分析了 VFTO 单脉冲波形特征的分布规律, 本研究结果将为 330 kV GIS 设备的安全运行、电磁防护以及相关标准的制定提供重要依据。

1 快速暂态过电压数据获取和处理

1.1 VFTO 测量系统

为了防止隔离开关操作导致的强电磁干扰影响, 测量 VFTO 的探头和设备组成的测量系统必

须有很强的抗干扰能力，以免在测量过程中受到电磁干扰的影响并损坏数据采集设备，从而导致测量失败。330 kV GIS 隔离开关模拟干扰源试验系统是基于现场 GIS 中设备器件的布置方式，模拟现场 GIS 隔离开关分合操作时，所产生的电磁干扰过程，用于研究电磁干扰源的频率、幅值以及作用时间等参数，330 kV GIS 隔离开关模拟干扰源试验系统接线原理图见图 1。

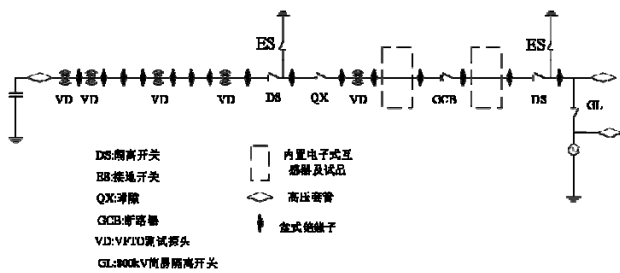


图 1 330 kV GIS 隔离开关模拟干扰源试验系统原理图

Fig. 1 The schematic diagram of 330 kV GIS disconnector simulation interference source test system

整个试验平台由全封闭试验管道组成，每个部分的管道间设置一定距离的间隔管道，额定电压设置为 $330/\sqrt{3}$ kV，额定电流为 3 000 A，开合容性电流能力为 2 A。系统由试验变压器成套装置、隔离开关、断路器、VFTO 测量探头、可变间距的放电球隙、GIS 母线导体、套管、绝缘套管等主要设备组成。其中，试验变压器用于模拟变电站现场的电源设备；隔离开关用于高压回路的通断控制；VFTO 测量探头采用宽带电压探头设计，用于接收并转换测量的电压信号并送至高速模数采集转换器转换为数字信号，再通过光电转换和通信模块传输至地面，地面接收后再经过光电转换转换为电信号，发送至计算机进行处理、显示和存储；断路器和放电球隙配合用于标准化的模拟隔离开关电磁干扰过程。

隔离开关操作机构可实现就地和远程操作，操作机构具有明显的分合闸指示器，分合闸位置信号可引至远方，并具备远程/就地切换的发信功能。在容性电流负载 2 A 下，5 min 开合一次隔离开关，共计带电运行时间每天不大于 20 min。330 kV GIS 隔离开关模拟干扰源试验系统测量记录的暂态电压试验数据为后面的 VFTO 单脉冲波形特征的统计分析奠定了基础。

1.2 VFTO 波形特征

隔离开关一次操作会产生多次间隙击穿放电过程，体现在 VFTO 波形上是含有多个单脉冲构成的宏脉冲。由于隔离开关在分合闸操作时，由于触头动作速度慢，没有设置灭弧装置，导致在整个分合闸操作过程中发生了多次的重复击穿，使得波形以阶梯状形式呈现，一个阶梯代表一次击穿。合闸过程中 VFTO 全过程波形见图 2，在隔离开关进行合闸操作时，两个触头距离较远，首次电弧击穿所需的电压较高，在断口处会形成高幅值的电磁干扰。随着两个触头距离逐渐缩小，电弧重燃所需的击穿电压也逐渐降低，导致电磁干扰的脉冲幅值减小。总体而言，在合闸初期，击穿现象相对分散，而在后半段则更为密集。整体上，波形呈现由疏到密、幅值由大到小的趋势。分闸操作产生的情况与合闸的相反。

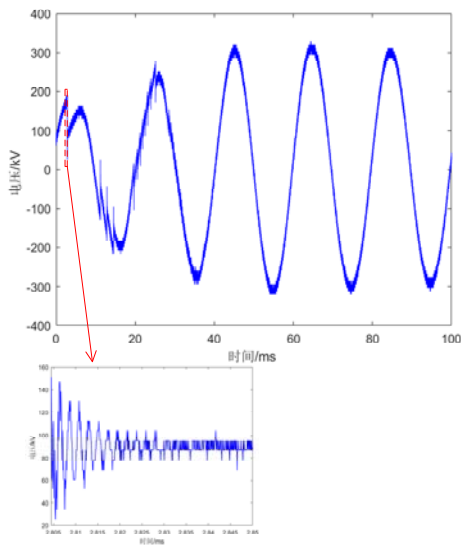


图 2 合闸操作时 VFOTO 波形

Fig. 2 VFOTO waveform during closing operation

1.3 VFOTO 单脉冲波形特征

由图 2 可知，VFOTO 全过程波形由多个单脉冲波形构成，GIS 隔离开关操作的特快速暂态波的持续时间不大于 50 ms，暂态波形单脉冲次数基本分布在 40~55 次。从 VFOTO 的全过程波形中剥离出其中一次的单脉冲波形，将单脉冲波形局部放大发现单脉冲波形呈衰减振荡的趋势。因此，在分析隔离开关操作过程中的暂态电磁干扰特征参数的分布规律时，应重点考虑单脉冲的波形特征。

在国际标准中，通常采用阻尼振荡波来等效开关操作引起的变电站二次设备端口所受的电磁干扰。在 IEC 6100-4-18: 2011 阻尼振荡波抗扰度测试标准中，明确定义了针对 GIS 开关操作引起的二次设备阻尼振荡波波形参数，此标准中隔离开关操作引起的单脉冲阻尼振荡波形特征见图 3。 U_{P1} 、 U_{P2} 为单脉冲的最大峰值与第二峰值，单脉冲从峰值处 10% 到 90% 之间的时间为单脉冲的上升时间 T_1 ，单脉冲波形振荡时间的长度为单脉冲的持续时间 T 。

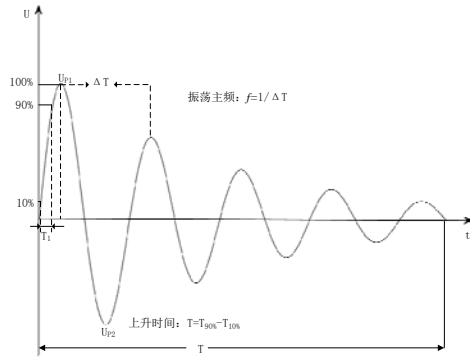


图 3 阻尼振荡波形参数定义

Fig. 3 Definition of damping oscillation waveform parameters

1.4 VFOTO 单脉冲波形特征参数提取方法

结合阻尼振荡波自身特点，利用 MATLAB 编制 VFOTO 波形参数的提取算法，定位 VFOTO 单脉冲位置并对试验波形数据进行参数提取。提取的参数主要有：VFOTO 单脉冲的上升时间、间隔时间、最大峰值、以及持续时间。参考 IEC 6100-4-18: 2011 中阻尼振荡波波形参数定义，见图 4，将特征参数在单脉冲波形图中表示。

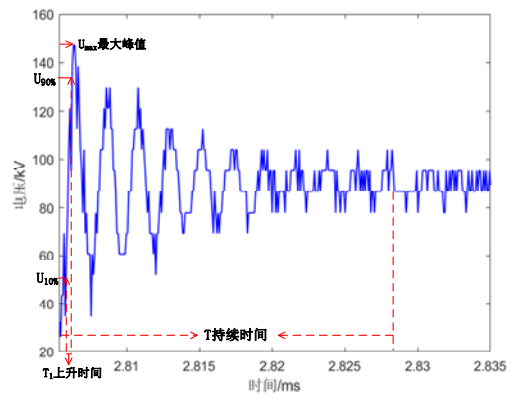


图 4 单脉冲波形特征参数

Fig. 4 Characteristic parameters of single pulse waveform

开关操作产生的 VFOTO 全过程波形中包含多个单脉冲波形，首先应寻找出所有符合条件的单脉冲序列。提取 VFOTO 的单脉冲波形具体思路如下：

1) 首先，搜索 VFOTO 全过程波形中的最大值，这个值对应着单脉冲的最大峰值点。然后，在以该

点为中心的范围内设置单脉冲开始和结束的区间，确保该范围包含整个单脉冲波形但又不与下一个单脉冲波形重叠。提取这个范围内的数据序列即可得到第一个 VFTO 单脉冲。

2)接着，将原始 VFTO 序列中第一个单脉冲所在位置的数据全部置零，然后重复上述步骤，提取幅值最大的单脉冲波形，即为第二个 VFTO 单脉冲。

3)继续重复上述步骤，直到所有大于设定噪声阈值的单脉冲波形被提取。此时停止循环，即可得到所有的 VFTO 单脉冲数据序列。

4)最后，对单脉冲数据序列进行去噪处理后，接着取每个单脉冲序列第一个数据和最后一个数据的绝对值，并与预先设定的噪声阈值进行对比，将超过阈值的部分筛选出并另存为新的序列。通过这一系列步骤，成功地从一组 VFTO 全过程波形数据中准确提取了所有的单脉冲序列。

完成单脉冲序列的准确提取后，就可以根据 GIS 开关操作引起的二次设备阻尼振荡波波形参数定义，提取需要分析的单脉冲特征参数。

2 VFTO 单脉冲波形特征统计分析

为了获得 330 kV GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 单脉冲统计特性，首先对 VFTO 波形提取单脉冲特征参数，通过统计分析，获得了每个特征参数的概率密度分布、均值和标准差。

隔离开关在操作过程中分散性较大，难以用标准的分布模型来描述 VFTO 单脉冲波形特征参数的分布变化规律。相比而言，核密度估计(kernel density estimation, KDE)可以根据样本数据的特征就可以得出其概率密度分布，不需要对样本数据分

布做出任何假设。而且即使样本数据有限，核密度估计法模拟出的概率密度分布也是呈现一条平滑曲线，与真实的概率分布十分接近。因此，采用核密度估计法来估计单脉冲特征的分布情况并得到 VFTO 单脉冲各特征的概率密度分布模型^[30-32]。对 330 kV GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 单脉冲特征统计分析流程见图 5。

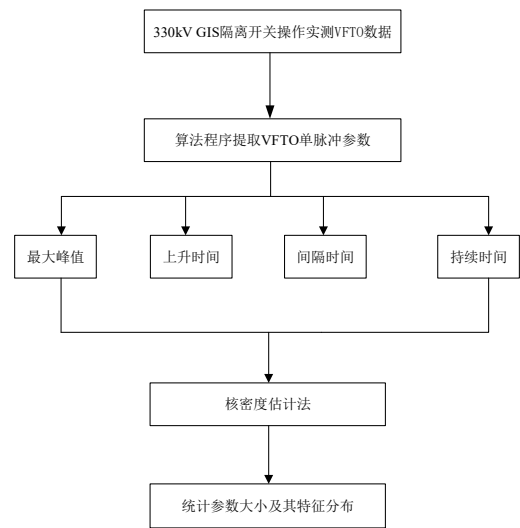


图 5 VFTO 单脉冲特征统计分析流程

Fig. 5 Statistical analysis process of VFTO single pulse characteristics

2.1 参数统计分布模型的选择和估计

采用核密度估计法来分析单脉冲波形特征参数的分布规律，核密度估计表达式为

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式(1)中： x_i 为序列样本中第 i 个数据； $K()$ 为核函数； h 为窗宽。

从式(1)可以看出，核函数和窗宽系数的选择会影响 $\hat{f}(x)$ 的精度。核函数的选择的种类繁多，鉴于一般情况下数据都服从高斯分布，因此核函数采用高斯函数

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} \quad (2)$$

窗宽 h 对运算的效果有着重要的影响，核密度估计 $\hat{f}(x)$ 能否对样本进行良好的估计，取决于窗宽 h 的值。如果 h 的取值太小，那么结果就会不稳定；如果 h 的取值太大，会导致结果的判别率很低。关于窗宽的选择，基于不同的误差公式计算最优窗宽的算法各不相同，在此采用渐进均方积分误差 AMISE(asymptotic mean integrated square error) 来求得最优窗宽，表达式为

$$AMISE = \frac{h^4}{4} \mu_2(K)^2 R(f'') + \frac{1}{nh} R(K) \quad (3)$$

式(3)中：

$$\mu_2(K) = \int t^2 K(t) dt \quad (4)$$

$$R(f) = \int f''(x)^2 dx \quad (5)$$

$$R(K) = \int K(x)^2 dx \quad (6)$$

通过对式(3)求解，AMISE 取最小值时可求最优窗宽 h^*

$$h^* = \left\{ \frac{R(K)}{n\mu_2(K)^2 R(f'')} \right\}^{\frac{1}{5}} \quad (7)$$

2.2 单脉冲最大峰值分布规律

电压单脉冲最大峰值是 VFTO 单次击穿绝对值的最大值。合、分闸操作时的单脉冲最大峰值统计结果见表 1。统计结果表明，分闸时的单脉冲最大峰值值略大于合闸情况。隔离开关合闸操作时的 VFTO 单脉冲峰值分布在 [25.98, 294.49] kV，均值为 160.93 kV。分闸操作时单脉冲峰值分布在 [33.08, 305.91] kV，均值为 174.56 kV。

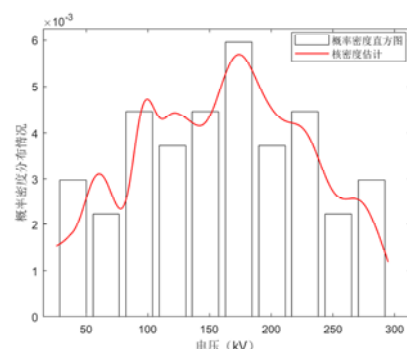
表 1 单脉冲最大峰值统计结果

Table 1 Single pulse maximum peak statistical results

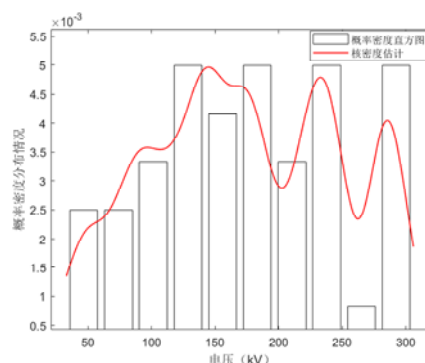
操作方式	最小值 /kV	最大值 /kV	均值/kV	标准差 /kV
合闸	25.98	294.49	160.93	69.20
分闸	33.08	305.91	174.56	75.38

基于渐进均方积分误差与高斯核函数，利用核密度估计法算出合、分闸操作下最优窗宽分别为 10.569 8、11.062 4 时的 VFTO 单脉冲最大峰值的概率密度分布模型。

隔离开关合、分闸的 VFTO 单脉冲波形最大峰值及最优核密度分布见图 6，合、分闸单脉冲波形的最大峰值的分布既不呈现正态分布，也不呈现单峰分布，而是分别呈 3 峰分布，合闸时分布区间分布在 [25.98, 77] kV、[82.37, 142] kV、[142, 294.49] kV；分闸时分布区间分别分布在 [34.37, 193] kV、[212.2, 248.6] kV、[263, 302.6] kV。



(a) 合闸操作时 VFTO 单脉冲波形最大峰值



(b) 分闸操作时 VFTO 单脉冲波形最大峰值

图 6 隔离开关合、分闸操作时 VFTO 单脉冲波形最大峰值及最优核密度分布

Fig. 6 The maximum peak value and optimal kernel density distribution of VFTO single pulse waveform during switching on and off operation of disconnector

为细化 VFTO 单脉冲电压峰值分布规律，将其划分为 6 个子区间，见表 2。由表 2 可看出，合、分闸操作时峰值分布在 $[51, 306)$ 的比例分别为 92%、93.2%，峰值分布在 50 kV 以内的概率为 8%、6.8%，其概率虽然极小，但也是影响电网设备安全运行的重要因素。

表 2 不同区间单脉冲最大峰值的分布概率

Table 2 The distribution probability of the maximum peak value of single pulse in different intervals

区间	合闸操作时区间概率/%	分闸操作时区间概率/%
$[0, 51)$	8.0	6.8
$[51, 102)$	17.8	13.6
$[102, 153)$	22.3	22.7
$[153, 204)$	25.6	18.2
$[204, 255)$	18.3	22.7
$[255, 306)$	8.0	16.0

2.3 单脉冲持续时间分布规律

单脉冲持续时间指的单次击穿波形振荡持续的时间。合、分闸操作时的单脉冲持续时间统计结果见表 3。统计结果表明，分闸时的单脉冲持续时间略大于合闸情况，根据表中标准差可看出持续时间离散程度较小。VFTO 单次击穿的持续时间一般为十几微秒，合闸操作下 VFTO 单脉冲波形的持续时间分布区间为 $[10.16, 13.12]$ μs ，平均值为 12.03 μs ；分闸操作下 VFTO 单脉冲波形的持续时间分布区间为 $[12.36, 14.21]$ μs ，平均值为 13.31 μs 。

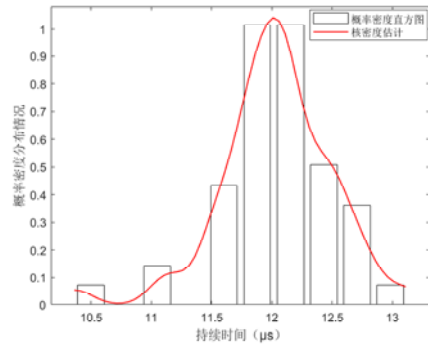
表 3 单脉冲持续时间统计结果

Table 3 Statistical results of single pulse duration

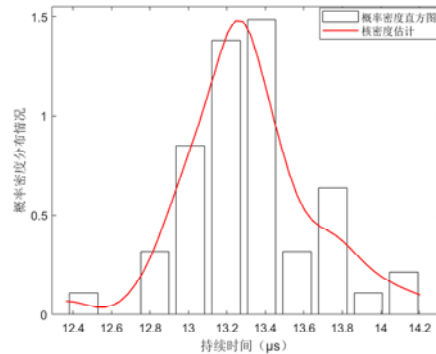
操作方式	最大值 / μs	最小值 / μs	平均值 / μs	标准差 / μs
合闸	13.12	10.16	12.03	0.47
分闸	14.21	12.36	13.31	0.33

基于渐进均方积分误差与高斯核函数，利用核密度估计法确定了 VFTO 单脉冲持续时间的概率密度分布模型，并得出合、分闸操作下的最优窗宽分别为 0.147 6 和 0.117 6。

隔离开关合、分闸的 VFTO 单脉冲波形持续时间及最优核密度分布见图 7，合、分闸单脉冲波形上升时间概率密度呈单峰分布，合闸时，单脉冲持续时间集中分布在 $[11.49, 12.81]$ μs ，所占频率为 92%；分闸时，单脉冲持续时间集中分布在 $[12.94, 13.82]$ μs ，所占频率为 86%。



(a) 合闸操作时 VFTO 单脉冲波形持续时间



(b) 分闸操作时 VFTO 单脉冲波形持续时间

图 7 隔离开关合、分闸操作时 VFTO 单脉冲波形持续时间及最优核密度分布

Fig.7 The duration of VFTO single pulse waveform and the optimal kernel density distribution during the on-off operation of disconnector

2.4 单脉冲上升时间分布规律

单脉冲上升时间是从峰值处 10%到 90%之间的时间。合、分闸操作时的单脉冲上升时间统计结果见表 4。统计结果表明，合闸操作时单脉冲上升时间较短，单脉冲波形的上升时间分布区间为 $[0.03, 9.18]$ μs ，平均值为 1.5 μs ；分闸操作时单脉冲上升时间较长，单脉冲波形的上升时间分布区

间为 $[0.4, 9.27] \mu\text{s}$ ，平均值为 $2.04 \mu\text{s}$ 。

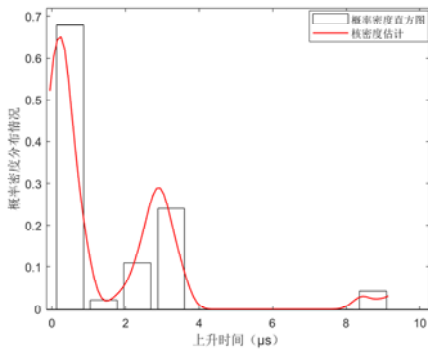
表 4 单脉冲上升时间统计结果

Table 4 Single pulse rise time statistical results

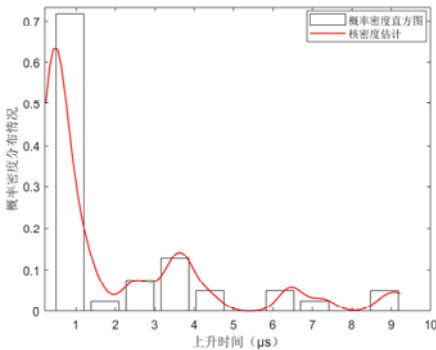
操作方式	最大值 / μs	最小值 / μs	平均值 / μs	标准差 / μs
合闸	9.18	0.03	1.50	1.95
分闸	9.27	0.40	2.04	2.40

基于渐进均方积分误差与高斯核函数，利用核密度估计法确定了 VFTO 单脉冲上升时间的概率密度分布模型，并得出合、分闸操作下的最优窗宽分别为 0.254 1 和 0.273 6。

隔离开关合、分闸的 VFTO 单脉冲波形上升时间及最优核密度分布见图 8，合闸单脉冲波形的持续时间呈 2 峰分布，分闸单脉冲波形的持续时间呈 3 峰分布。合闸操作时，VFTO 单脉冲上升时间集中分布在 $[0.03, 3.6] \mu\text{s}$ 之间，所占概率为 96%；分闸操作时，VFTO 单脉冲上升时间集中分布在 $[0.49, 4.75] \mu\text{s}$ 之间，所占概率为 88.7%。



(a) 合闸操作时 VFTO 单脉冲波形上升时间



(b) 分闸操作时 VFTO 单脉冲波形上升时间

图 8 隔离开关合、分闸操作时 VFTO 单脉冲波形上升时间

及最优核密度分布

Fig. 8 The rise time and optimal kernel density distribution of VFTO single pulse waveform during switching on and off of disconnecter

2.5 单脉冲间隔时间分布规律

单脉冲间隔时间是指两个相邻单脉冲之间的时间差值，隔离开关操作间隙击穿之间的时间间隔为 ms 级，可认为两次 VFTO 击穿之间无重叠过程。合、分闸操作时的单脉冲间隔时间统计结果见表 5，合、分闸时的 VFTO 单脉冲间隔时间基本相同。合闸操作时，VFTO 单脉冲波形的间隔时间分布区间为 $[0.03, 4.18] \text{ms}$ ，平均值为 0.72ms ；分闸操作时，VFTO 单脉冲波形的间隔时间分布区间为 $[0.06, 4.3] \text{ms}$ ，平均值为 0.59ms 。

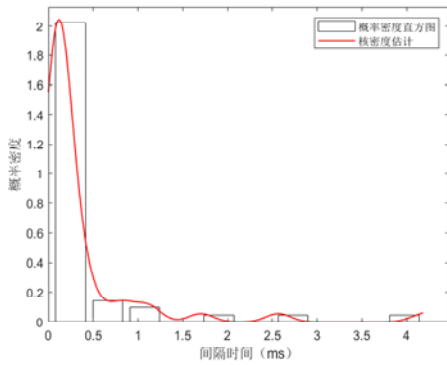
表 5 单脉冲间隔时间统计结果

Table 5 Statistical results of single pulse interval time

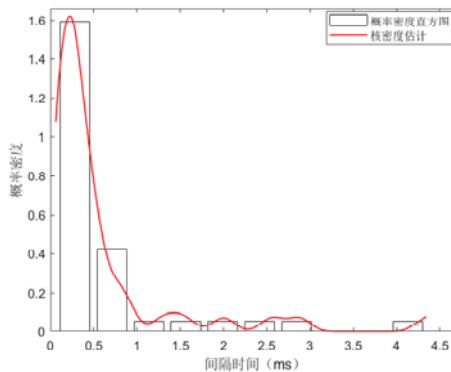
操作方式	最大值 /ms	最小值 /ms	平均值 /ms	标准差 /ms
合闸	4.18	0.03	0.38	0.72
分闸	4.30	0.06	0.59	0.84

基于渐进均方积分误差与高斯核函数，利用核密度估计法计算出 VFTO 单脉冲间隔时间的概率密度分布模型，并得到合、分闸操作下的最优窗宽分别为 0.136 5 和 0.125 0。

隔离开关合、分闸的 VFTO 单脉冲波形间隔时间及最优核密度分布见图 9，合、分闸单脉冲间隔时间呈单峰分布，单脉冲间隔时间分别集中在 $[0.03, 0.44] \text{ms}$ 、 $[0.11, 0.87] \text{ms}$ ，且占比均为 84%。



(a) 合闸操作时 VFTO 单脉冲波形间隔时间



(b) 分闸操作时 VFTO 单脉冲波形间隔时间

图 9 隔离开关合、分闸操作时 VFTO 单脉冲波形间隔时间及最优核密度分布

Fig. 9 VFTO single pulse waveform interval time and optimal kernel density distribution during switching on and off operation of disconnecter

3 结论

文中开展了 330 kV GIS 隔离开关分合闸操作时产生的 VFTO 单脉冲波形的特征研究。通过对 VFTO 单脉冲波形特征进行统计分析，得出以下结论：

1)VFTO 单脉冲最大峰值分闸时的值略大于合闸时。合、分闸单脉冲最大峰值分布呈 3 峰分布，合、分闸操作时峰值分布在 $[51, 306]$ kV 的比例分别为 92%、93.2%。合、分闸操作时，利用核密度估计法得到最优窗宽分别为 10.5698、11.0624 时的 VFTO 单脉冲最大峰值的概率密度分布模型。

2)VFTO 单脉冲的持续时间一般为十几微秒，

合、分闸单脉冲波形上升时间分布呈单峰分布。合闸时单脉冲持续时间集中分布在 $[11.49, 12.81]$ μs ；分闸时单脉冲持续时间集中分布在 $[12.94, 13.82]$ μs 。合、分闸操作时，利用核密度估计法得到最佳窗宽分别为 0.147 6 和 0.117 6 时的 VFTO 单脉冲持续时间的概率密度分布模型。

3)合闸时 VFTO 单脉冲上升时间比分闸时单脉冲的上升时间短，合、分闸单脉冲波形的持续时间分布分别呈 2 峰分布和 3 峰分布，合闸时单脉冲的上升时间分布区间为 $[0.03, 9.18]$ μs ；分闸时单脉冲上升时间分布区间为 $[0.4, 9.27]$ μs 。合、分闸操作时，利用核密度估计法得到最佳窗宽分别为 0.254 1 和 0.273 6 时的 VFTO 单脉冲上升时间的概率密度分布模型。

4)VFTO 单脉冲间隔时间在分合闸操作时基本一致，合、分闸单脉冲间隔时间呈单峰分布。合闸时单脉冲时间间隔主要集中在 $[0.03, 0.44]$ ms 之间；分闸时单脉冲时间间隔主要集中在 $[0.11, 0.87]$ ms 之间。合、分闸操作时，利用核密度估计法得到最优窗宽分别为 0.136 5、0.125 0 时的 VFTO 单脉冲间隔时间的概率密度分布模型。

5)利用核密度估计法对 330 kV GIS 隔离开关合、分闸操作下 VFTO 单脉冲特征的概率密度分布模型，揭示了 VFTO 单脉冲波形特征参数的分布规律，从而可以获得任意给定区间范围内 VFTO 单脉冲特征参数出现的数值范围及概率分布，可为变电站二次设备的安全运行、电磁防护以及相关标准的制定的研制提供参考依据。

参考文献:

- [1] 陈维江, 颜湘莲, 王绍武, 等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 1-11.
CHEN Weijiang, YAN Xianglian, WANG Shaowu, et al. Recent progress in investigations on very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 1-11.
- [2] 张一茗, 李少华, 金光耀, 等. 电磁干扰对智能高压开关二次设备的影响研究[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 191-198.
ZHANG Yiming, LI Shaohua, JIN Guangyao, et al. Study on the influence of electromagnetic interference on secondary equipment of intelligent high voltage switch[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 191-198.
- [3] 成林, 陶佳鑫, 吴涛, 等. 330 kV GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 电磁骚扰特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 11-19.
CHENG Lin, TAO Jiabin, WU Tao, et al. Research on VFTO electromagnetic disturbance characteristics of 330 kV GIS disconnector operation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 11-19.
- [4] 申萌, 丁登伟, 李强, 等. GIS 隔离开关开合短母线型式试验方式 1 中 VFTO 测量系统构建及波形解析[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 207-213.
SHEN Meng, DING Dengwei, LI Qiang, et al. Construction of VFTO measurement system and waveform analysis for switching test duty 1 of short busbar by GIS disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 207-213.
- [5] 段韶峰, 赵琳, 李志兵, 等. GIS 中 VFTO、VFCT 统计特性试验和仿真方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3634-3640.
DUAN Shaofeng, ZHAO Lin, LI Zhibing, et al. Experimental and simulation study on statistical characteristics of VFTO and VFCT in GIS[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3634-3640.
- [6] 王磊, 刘衍, 冯宇, 等. 特高压 GIS 变电站 VFTO 波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 45-51.
WANG Lei, LIU Yan, FENG Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 45-51.
- [7] 关永刚, 蔡元纪, 刘卫东, 等. GIS 隔离开关操作产生的壳体电位升高和 VFTO 关系[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4097-4104.
GUAN Yonggang, CAI Yuanji, LIU Weidong, et al. Relationship between transient enclosure voltage and very fast transient overvoltage generated during disconnector operations in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4097-4104.
- [8] 吴恒天, 焦重庆, 崔翔, 等. GIS 变电站开关操作引起的二次设备端口电磁骚扰模拟实验及分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3387-3395.
WU Hengtian, JIAO Chongqing, CUI Xiang, et al. Analysis and simulated experiment for port disturbance voltage due to switching operation in GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3387-3395.
- [9] 戴敏, 谷定燮, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备特快速瞬态过电压的试验回路研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 28-37.
DAI Min, GU Dingxie, SUN Gang, et al. Study on full-scale 1000 kV gas insulated switchgear test circuit for very fast transient overvoltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 28-37.
- [10] HARVEY S M, WONG P S, BALMA P M. Radio interference and transient field from gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 357-364.
- [11] FUJIMOTO N. Mechanism and analysis of short raise-time GIS transients[C]//CIGRE Symposium. Paris: CIGRE, 1987: 5-7.
- [12] SHIBUYA Y, FUJITA S, SHIMOMURA T. Effects of very fast transient overvoltages on transformer[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(5): 459-464.
- [13] WIGGINS C M, NICKEL F S, HANEY A J. Mobile transient measurement system[C]//1987 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. [S.l.]: IEEE, 1987: 1-13.
- [14] YANABU S, MURASE H, AOYAGI H, et al. Estimation of fast transient overvoltage in gas-insulated substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1875-1882.
- [15] MORCHED A, MARTI L, OTTEVANGERS J. A high frequency transformer model for the EMTP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1615-1626.
- [16] Electromagnetic compatibility(EMC), Part 4-18: Testing and measurement techniques-damped oscillatory wave

- immunity test: IEC 61000-4-18: 2011[S].2011.
- [17]电磁兼容 试验和测量技术 阻尼振荡波抗扰度试验: GB/T 17626.18—2016[S].2016.
Electromagnetic compatibility—Testing and measurement techniques—Damped oscillatory wave immunity test: GB/T 17626.18—2016[S].2016.
- [18]赵 军, 陈维江, 张建功, 等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1687-1695.
ZHAO Jun, CHEN Weijiang, ZHANG Jianguo, et al. Analysis on electromagnetic compatibility immunity requirements for secondary equipment during switching transient operations in intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1687-1695.
- [19]嵇建飞, 杨逸飞, 袁宇波, 等. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度试验分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 998-1007.
JI Jianfei, YANG Yifei, YUAN Yubo, et al. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 998-1007.
- [20]陈维江, 赵 军, 边 凯, 等. GIS 变电站开关操作瞬态电磁骚扰研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4935-4948.
CHEN Weijiang, ZHAO Jun, BIAN Kai, et al. Research progress on transient electromagnetic disturbance due to switching operations in GIS substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4935-4948.
- [21]李振华, 贾思琦, 童 悦, 等. 隔离开关动作过程特快速暂态电磁干扰变化特征及变化规律分析[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 38-50.
LI Zhenhua, JIA Siqi, TONG Yue, et al. Variation characteristics and law analysis of very fast transient electromagnetic interference during operation of disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 38-50.
- [22]王 森, 牛 博, 薛 军, 等. 官亭 750 kV GIS 隔离开关操作时的特快速暂态过电压实测研究[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 35-40.
WANG Sen, NIU Bo, XUE Jun, et al. Study on 750 kV GIS VFTO measurement technology[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 35-40.
- [23]陈维江, 李志兵, 孙 岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 38-47.
CHEN Weijiang, LI Zhibing, SUN Gang, et al. Experimental research on the characteristics of very fast transient overvoltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 38-47.
- [24]胡 榕, 崔 翔, 陈维江, 等. 特高压气体绝缘开关设备瞬态外壳电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5244-5258.
HU Rong, CUI Xiang, CHEN Weijiang, et al. Experimental research on the characteristics of transient enclosure voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5244-5258.
- [25]李振华, 廖星锐, 童 悦, 等. 基于动态重燃弧模型的 VFTO 与 VFTC 仿真及特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 79-88.
LI Zhenhua, LIAO Xingrui, TONG Yue, et al. Simulation and characteristic analysis of VFTO and VFTC based on a dynamic reignition arc model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 79-88.
- [26]李振华, 兰 芳, 钟 悦, 等. 基于双骨架共绕技术的测量保护一体化电流传感器[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4427-4436.
LI Zhenhua, LAN Fang, ZHONG Yue, et al. Measurement-protection-integrated current sensor based on double-bobbin co-winding technology[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4427-4436.
- [27]LI Yunge, SHANG Yong, ZHANG Lin, et al. Analysis of very fast transient overvoltages (VFTO) from onsite measurements on 800 kV GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2102-2110.
- [28]段韶峰, 李志兵, 詹花茂, 等. 252 kV GIS 中特快速瞬态过电压和特快速瞬态电流特性试验研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2046-2051.
DUAN Shaofeng, LI Zhibing, ZHAN Huamao, et al. Experimental study on the characteristics of VFTO and VFTC in 252 kV GIS[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2046-2051.
- [29]MA Guoming, LI Chengrong, LI Xiong, et al. Time and frequency characteristics of very fast transient overvoltage in ultra high voltage substation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2459-2468.
- [30]张子豪. 特快速暂态过电压统计规律与绝缘试验参考波

形的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

ZHANG Zihao. Research on statistical law of very fast transient overvoltage and reference waveform for insulation test[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[31]赵兴昌, 张宇献, 邢作霞. 基于最优窗宽核密度估计的短期负荷区间预测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(14): 56-61.

ZHAO Xingchang, ZHANG Yuxian, XING Zuoxia. Short-term load interval prediction based on kernel density estimation with optimal window width[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(14): 56-61.

[32]邓 飙, 于传强, 李天石, 等. 基于估计点的双窗宽核密度估计算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 615-

620.

DENG Biao, YU Chuanqiang, LI Tianshi, et al. Dual-bandwidth kernel density estimation algorithm based on estimate points[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 615-620.

梅冰玉(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为隔离开关操作时电磁干扰分析(E-mail: 1286761945@qq.com)。

李振华(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字化变电站状态监测、电磁兼容等(E-mail: lizhenhua1993@163.com)。

李振兴(1977—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制(E-mail : Lzx2007001@163.com)。