

# 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

陈维江<sup>1</sup>, 李志兵<sup>2</sup>, 孙岗<sup>1</sup>, 戴敏<sup>3</sup>, 刘卫东<sup>4</sup>, 李成榕<sup>5</sup>, 王磊<sup>3</sup>, 王浩<sup>2</sup>, 陈国强<sup>1</sup>,  
姚涛<sup>3</sup>, 王森<sup>6</sup>, 卢江平<sup>6</sup>, 吴军辉<sup>7</sup>, 张希捷<sup>8</sup>, 李文艺<sup>7</sup>, 李心一<sup>8</sup>

(1. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;  
3. 国网电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430074; 4. 清华大学, 北京市 海淀区 100084; 5. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206; 6. 陕西电力科学研究院, 陕西省 西安市 710054; 7. 河南平高电气股份有限公司, 河南省 平顶山市 467001; 8. 西安西电开关电气有限公司, 陕西省 西安市 710077)

## Experimental Research on the Characteristics of Very Fast Transient Overvoltage in Ultra High Voltage Gas Insulated Switchgear

CHEN Weijiang<sup>1</sup>, LI Zhibing<sup>2</sup>, SUN Gang<sup>1</sup>, DAI Min<sup>3</sup>, LIU Weidong<sup>4</sup>, LI Chengrong<sup>5</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>,  
CHEN Guoqiang<sup>1</sup>, YAO Tao<sup>3</sup>, WANG Sen<sup>6</sup>, LU Jiangping<sup>6</sup>, WU Junhui<sup>7</sup>, ZHANG Xijie<sup>8</sup>, LI Wenyi<sup>7</sup>, LI Xinyi<sup>8</sup>

(1. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 4. Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 5. North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 6. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China; 7. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, Henan Province, China; 8. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Very fast transient overvoltage(VFTO) generated during switching of disconnecter in gas insulated switchgear (GIS) may threaten the safety operation of electric equipment, the influence is more serious with the increase of power system voltage and it is preminent in ultra high voltage (UHV) system. To master the characteristics of VFTO in UHV GIS, lots of experiments by switching of GIS disconnectors were carried out in two VFTO test circuits of UHV GIS and the test results of VFTO were statistically analyzed in this paper. The waveform characters, striking numbers, frequency components and residual voltage distribution of full VFTO waveforms, the waveform characters and oscillation factor distribution of single striking waveform, the characteristics of VFTO magnitudes were proposed. The suppression of VFTO by damping resistor in GIS disconnecter was illustrated. The

achieved characteristics of VFTO in UHV GIS have been the basis for further VFTO study on simulation and insulation coordination etc.

**KEY WORDS:** ultra high voltage (UHV); gas insulated switchgear (GIS); very fast transient overvoltages (VFTO); waveform performance; statistical property; damping resistor

**摘要:** 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中隔离开关操作产生的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)会影响电气设备的安全运行, 随着系统电压等级的提高, 该影响会越来越严重, 在特高压系统中尤为突出。为掌握特高压 GIS 的 VFTO 特性, 在特高压 GIS 设备的 VFTO 试验回路进行了大规模 GIS 隔离开关操作试验, 并对 VFTO 测量结果进行了统计分析。研究得到了 VFTO 全过程波形的波形特征、击穿次数、频率成份和残余电压分布, 单次击穿波形的波形特征和振荡系数分布, 及预充/不预充直流电压下的 VFTO 幅值特性, 揭示了隔离开关加装阻尼电阻对 VFTO 的抑制作用。所获得的特高压 GIS 中的 VFTO 特性为进一步研究 VFTO 仿真和绝缘配合等提供了依据。

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2011CB209405); 国家电网公司科技项目(SGKJJSKF[2009]776)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB209405); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGKJJSKF[2009]776).

**关键词:** 特高压; 气体绝缘开关设备; 特快速瞬态过电压; 波形特性; 概率特性; 阻尼电阻

## 0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中隔离开关操作产生的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO),对 GIS 设备、外部连接设备以及二次设备的安全运行有重要影响,且随着系统电压等级的提高,这种影响越来越显著,在特高压系统中尤为突出。VFTO 特性是 VFTO 仿真和绝缘配合等研究的基础,也是 GIS 隔离开关设计的重要影响因素。目前研究 VFTO 特性主要有仿真和试验 2 种手段,而试验研究更能反映 VFTO 实际情况并直接获取 VFTO 特性,是 VFTO 研究的重要手段。

Siemens、ABB 和 Toshiba 等国外公司,结合 GIS 产品试验和工程调试,主要针对超高压系统,采用模拟试验的方法在试验室研究了 GIS 的 VFTO 特性,进行了少量的 VFTO 现场实测,但较少涉及特高压系统,只有日本对 1100kV 隔离开关产生的 VFTO 特性进行了一些试验研究<sup>[1-6]</sup>。国内的研究单位在 252kV GIS 上开展了 VFTO 的试验研究,结合 750kV 输电工程的调试对 VFTO 进行了现场实测<sup>[7-19]</sup>。

目前,在世界范围内,由于试验条件和测量手段的限制,尚缺乏特高压 GIS 中 VFTO 特性的大量试验研究。因此,为满足中国特高压工程及设备设计和运行等的需要,有必要对特高压 GIS 中的 VFTO 特性开展大规模的试验研究,为此,国家电网公司于 2009 年初立项开展了“特高压 GIS/HGIS 设备的 VFTO 实测及仿真研究”,在武汉特高压交流试验基地建立了特高压 GIS 设备的 VFTO 试验回路,并开展了大规模 VFTO 特性的试验研究。

基于统计分析上述试验的结果,本文研究了 VFTO 全过程波形的整体特征、击穿次数、频率成份和残余电压分布,单次击穿波形特征及其振荡系数分布,以提取表征 VFTO 特性的基本参量,给出预充/不预充直流电压下的 VFTO 最大值及其概率特性,分析隔离开关加装阻尼电阻对 VFTO 的抑制作用,目的是探索 VFTO 现象和规律,为 VFTO 仿真建模、绝缘配合和抑制手段等研究提供依据。

## 1 VFTO 特性试验

### 1.1 VFTO 试验回路

参考 IEC62271-102:2001<sup>[20]</sup>对隔离开关的试验

要求,结合中国特高压交流试验示范工程(简称特高压示范工程)的实际情况,国家电网公司在武汉特高压交流试验基地建立了能产生相对严重 VFTO 的特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路,接线示意图如图 1 所示。图 1 中:虚线框代表试验 GIS;AS、DS 分别为试验用交流电源和直流电源;BG1、BG2 为套管;BS1、BS2 为母线;DS2 为操作隔离开关;DS1 为辅助隔离开关;数字 1—4 代表 VFTO 的测量位置。试验时,通过 BG1 引入特高压交流电压源(相电压  $1100/\sqrt{3}$  kV)=635 kV),需要时通过 BG2 引入特高压直流电源(相电压峰值 900kV)经 DS1 给 BS2 预充直流电压,通过 DS2 合分操作 BS2 产生的 VFTO 用于研究。

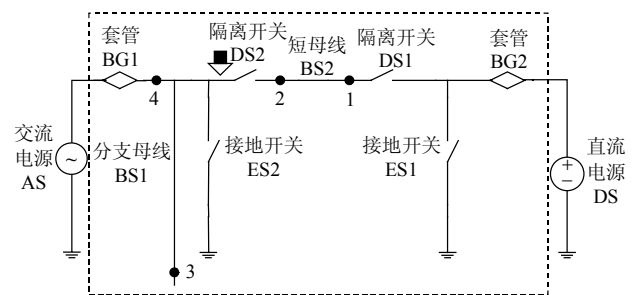


图 1 特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路接线示意图

Fig. 1 Diagram of test circuit for VFTO in UHV GIS

特高压示范工程中 GIS 隔离开关电源侧带有母线,所以本试验回路与 IEC62271-102:2001 推荐的试验回路相比,增加了长度可调的分支母线 BS1,用于研究电源侧母线对 VFTO 特性的影响。特高压示范工程应用了快速和慢速 2 种 GIS 隔离开关,所以本试验回路采用这 2 种技术路线的 GIS 隔离开关,用于分析隔离开关操作速度对 VFTO 的影响。快速 GIS 隔离开关(以下简称快速开关)采用河南平高电气股份有限公司(以下简称平高)产品,可加装阻尼电阻抑制 VFTO;慢速 GIS 隔离开关(以下简称慢速开关)是西安西电开关电气有限公司(以下简称西开)产品。不同 GIS 隔离开关的技术参数列于表 1。图 2 为应用 2 种试验 GIS 在特高压交流试验基地建立的 VFTO 试验回路的现场布置。

表 1 GIS 隔离开关技术参数

Tab. 1 Technical parameters of GIS disconnectors

隔离开关类型	阻尼电阻值/ $\Omega$	分闸速度/(m/s)	合闸速度/(m/s)
快速不带电阻	—	1.70	2.50
慢速	—	0.54	0.54
快速带电阻	500	1.70	2.50

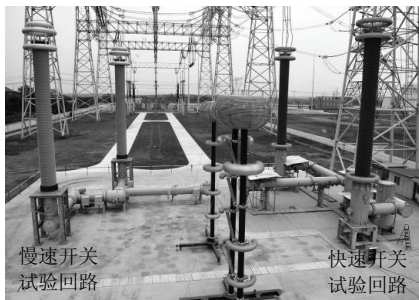


图2 特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路布置  
Fig. 2 Test circuit layout for VFTO in UHV GIS

### 1.2 VFTO 测量系统

图1中,测点1和2分别位于BS2的末端和首端,测点3位于BS1的末端,测点4位于BG1的下方。每个测点都成对布置了清华大学和华北电力大学研制的手孔式电容传感器 VFTO 测量系统,试验中进行比对测量,以确保测量结果的准确性。

测量系统在试验室进行了频响特性标定,并在用专门研制的试验装置上,采用幅值为300kV、上升时间小于5ns的高压陡波进行了高频性能检验,测量系统频带可以达到0.1Hz~100MHz。测量系统在试验现场分别采用工频电压、雷电冲击电压和直流放电电压进行了分压比标定。标定结果表明,传感器分压比稳定,没有寄生振荡和明显干扰,能够很好地满足VFTO测量需要。

测量系统采用专门研制的高速触发系统。触发系统利用VFTO产生过程中的高频辐射信号控制,产生同步触发信号并采用光纤传输,因此能同时触发各测点的示波器,并实现多测点VFTO的同步测量,为分析VFTO传播过程创造了条件,并有利于充分利用示波器存储深度记录VFTO的全过程测量数据。

### 1.3 VFTO 试验内容

针对平高和西开的试验GIS,在预充直流电压情况下分别进行了120次有效合分隔离开关试验,在不预充直流电压的情况下分别进行了450次有效合分隔离开关的试验,以研究不同技术路线隔离开关的VFTO特性。

针对平高的试验GIS,采用带阻尼电阻隔离开关,在预充直流电压情况下进行了120次有效合分试验,研究阻尼电阻对VFTO的抑制作用。

在上述1300多次VFTO试验中,对每个测点都测量了VFTO全过程波形。通过对大量测试数据进行处理,统计分析了VFTO波形特征、概率特性

和阻尼电阻的影响,为VFTO仿真建模及绝缘配合等研究提供了依据和指导。

## 2 VFTO 波形特征

### 2.1 全过程波形

#### 1) 典型波形特征。

测量系统记录了VFTO产生和发展的全过程,电源侧与负载侧的VFTO波形具有不同的特征。

隔离开关操作过程中,触头间隙两端电压超过击穿电压时,触头间隙击穿。击穿电压波在GIS内部传播过程中,负载侧短母线电压围绕击穿时刻工频电源电压高频振荡,产生过电压。波过程和高频振荡过程结束后,负载侧短母线上的残余电荷形成残余电压,电源侧电压则继续按照工频规律变化。触头间隙电压变化到再次超过击穿电压时,触头间隙会再次击穿,直到合闸过程中触头接触,或分闸过程中触头间隙较大,间隙击穿过程才会停止,VFTO过程结束。所以,VFTO是一个连续多次的击穿过程,合闸过程中的总持续时间取决于预击穿时间,分闸过程中的总持续时间取决于燃弧时间。VFTO波形负载侧有明显的台阶,而电源侧则没有。VFTO的全过程测量波形如图3—5所示。

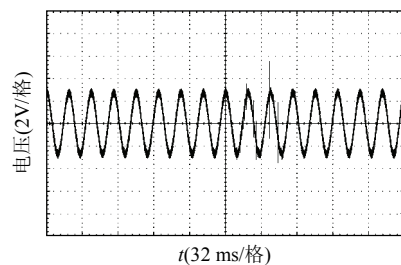


图3 隔离开关合闸在电源侧产生的VFTO波形

Fig. 3 VFTO generated at source side during closing of disconnect

#### 2) 击穿次数。

分析VFTO波形,可知波形形状和击穿次数受隔离开关的操作速度影响较大。

在隔离开关合闸过程中,随着触头间隙距离减小,间隙击穿的时间间隔缩短,VFTO波形的击穿体现为前疏后密,如图4所示。分闸过程则相反,VFTO波形的击穿体现为前密后疏,如图5所示。

快速开关操作时,合闸过程预击穿时间和分闸过程燃弧时间短,触头间隙击穿次数较少,VFTO持续时间稍短。对比分析图4(a)与图4(b)、图5(a)与图5(b)可知,与慢速开关相比,快速开关

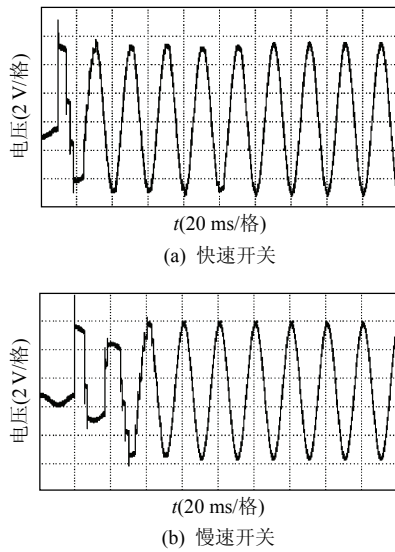


图 4 隔离开关合闸在负载侧产生的 VFTO  
 Fig. 4 VFTO generated at load side during closing of disconnector

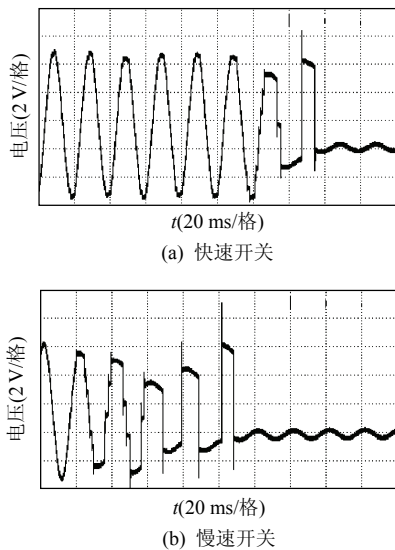


图 5 隔离开关分闸在负载侧产生的 VFTO  
 Fig. 5 VFTO generated at load side during opening of disconnector

击穿次数较少。对 VFTO 波形中击穿电压超过 0.3 pu 的击穿次数进行了统计，结果如图 6 所示，快速开关分、合闸产生的平均击穿次数分别为 5 次和 6 次，约为慢速开关的一半。

3) 频率成份。

隔离开关操作产生的 VFTO 波形中包含非常丰富的频率成份，这取决于 GIS 试验回路的结构和参数。

VFTO 由触头间隙击穿后的电气振荡过程和击穿电压波的传播过程叠加组成，主要包含 3 种频率成份。第 1 种频率成份是负载侧残余电荷形成的直

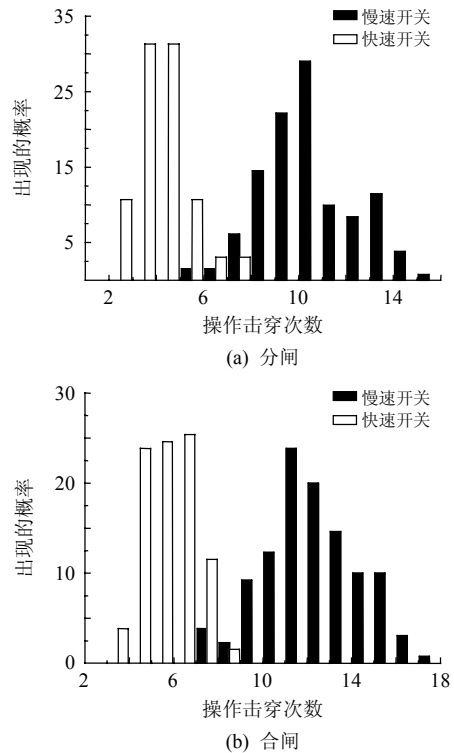


图 6 隔离开关操作产生的 VFTO 击穿次数分布  
 Fig. 6 Distribution of striking numbers in VFTO during switching of disconnector

流电压和电源侧的工频电压分量；第 2 种频率成份是试验回路中电容和电感产生的低频电气振荡频率，一般为 1 MHz 以下；第 3 种频率成份为击穿电压波在 GIS 内部传播发生折反射的频率，达数 MHz 以上。第 3 种频率成份中，波在空载短母线上的折反射频率约几 MHz，幅值较高，为主要频率分量，波在 GIS 波阻抗变化或不连续处产生的折反射频率高达上百 MHz，但幅值较低。以快速开关在测点 3 产生较严重 VFTO 的波形为例，第 3 种频率成份的频谱分析如图 7 所示。可知，VFTO 波形频率范围为准直流至近百 MHz，这对测量系统测量带宽提

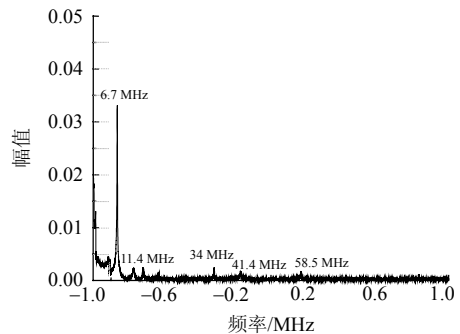


图 7 隔离开关操作产生的 VFTO 频谱图  
 Fig. 7 Frequency spectrum of VFTO during switching of disconnector

出了很高的技术要求。

#### 4) 残余电压分布。

隔离开关操作在负载侧产生的残余电压分布对 VFTO 特性也有重要影响,这与隔离开关的触头结构和机械特性等有关。

隔离开关操作产生 VFTO 过程中,每次触头间隙击穿后,负载侧会形成残余电压,影响下次击穿的初始条件,进而影响下次击穿产生的 VFTO。其中,分闸末次残余电压对下次合闸首次击穿初始条件影响较大,而通常合闸首次击穿容易产生较严重的 VFTO,所以分闸末次残余电压分布需要重点关注。

分闸末次残余电压由隔离开关操作时刻和机械特性决定的分闸末次击穿相位决定,受隔离开关击穿特性影响,具有一定的随机性。以快速、慢速开关分闸在测点 1 产生的 VFTO 波形为例,统计分闸末次残余电压分布,结果如图 8 所示。隔离开关的动触头(曲率大的电极)在电源侧,受 GIS 中击穿电压极性效应的影响,曲率大的电极在负极性时击穿电压较低,所以分闸末次残余电压为负的概率较大。另外,慢速开关出现高幅值残余电压的概率明显低于快速开关。

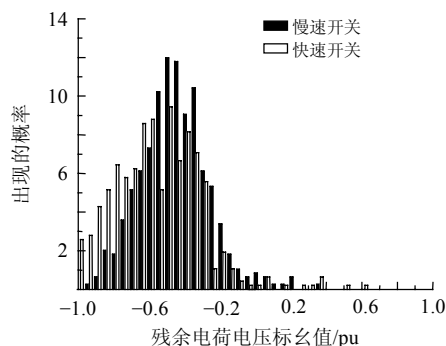


图 8 隔离开关分闸末次击穿残余电压分布

Fig. 8 Distribution of trapped charge voltage at the last striking during opening of disconnector

## 2.2 单次击穿波形

### 1) 典型波形特征。

VFTO 是一个连续多次击穿过程,波形由多个单次击穿波形组成。单次击穿波形能提供 VFTO 的具体细节信息,如幅值、陡度和持续时间等。

图 9 为 VFTO 单次击穿的典型波形,通过观察分析同一试验 GIS 各测点的多组 VFTO 波形发现,各次合、分闸及其各次击穿波形都是基本相似的,这主要是由试验 GIS 的结构和参数决定。

隔离开关触头间隙击穿产生 VFTO,间隙击穿

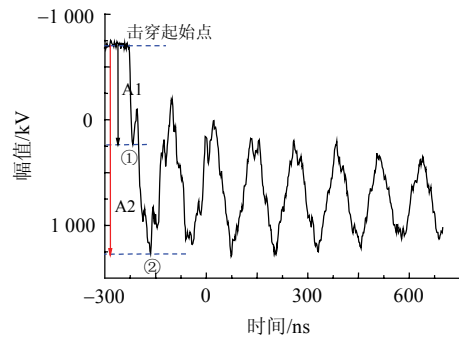


图 9 VFTO 单次击穿典型波形

Fig. 9 Typical single striking waveform of VFTO

电压越高, VFTO 幅值越大。由于合闸的前几次击穿和分闸的末几次击穿,触头间隙距离较大,击穿电压较高,易产生较严重的 VFTO。但是, VFTO 存在随机性,不一定在合闸首次或分闸末次击穿时产生最严重的 VFTO。同时,隔离开关触头间隙为稍不均匀电场, SF<sub>6</sub> 为电负性气体,间隙放电时延短,击穿电压波在 GIS 内部传播距离较短,衰减减少,所以导致 VFTO 具有较大的陡度。

基于快速、慢速开关在观测点 1 产生最大幅值 VFTO 的 10 次合闸操作中的单次击穿波形,以图 9 中为例,统计分析击穿电压波在第 1 上升沿(图 9 中 ①点)和最大峰值(图中 ②点)处相对于击穿起始点得到 A1、A2 的幅值及其上升时间、击穿持续时间和最大陡度的平均值,结果见表 2。可知, VFTO 单次击穿波形具有陡度大和击穿持续时间短的特点。

表 2 VFTO 单次击穿波形的统计参数

Tab. 2 Statistical parameters of single striking waveform of VFTO

隔离开关类型	击穿波形位置	幅值/pu	上升时间/ns	击穿持续时间/ $\mu$ s	最大陡度/(kV/ns)
快速	第一上升沿 A1	0.77	8.8	9.7	78.6
	最大峰值 A2	2.38	366.0		
慢速	第一上升沿 A1	0.99	6.4	5.6	138.9
	最大峰值 A2	2.64	298.0		

### 2) 振荡系数分布

VFTO 波形的振荡系数由试验回路参数、GIS 结构和参数及测点位置决定,并受隔离开关电弧特性的影响,呈现出概率分布特性,与分合闸操作及是否预充直流电压关系较小,分析振荡系数可预估最大幅值的 VFTO。

图 10 为 VFTO 单次击穿的原理图。图中,  $U_0$  为工频电压峰值;  $U_1$ 、 $U_2$  分别为触头间隙击穿时电源侧的工频电压和负载侧的残余电压;  $U_s$  为 VFTO 幅值。触头间隙两端电压超过放电电压时,触头间



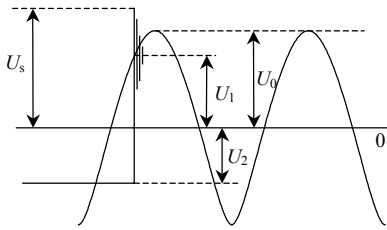


图 10 VFTO 单次击穿波形原理图

Fig. 10 Sketch of single striking waveform of VFTO  
 隙会击穿，产生幅值为  $U_s$  的 VFTO。VFTO 围绕  $U_1$  高频振荡衰减，最后稳定至  $U_1$ ，形成触头间隙下次击穿的残余电压。

振荡系数的定义如下：

$$k = (U_s - U_1) / (U_1 - U_2) \quad (1)$$

则有：

$$U_s = U_1 + k(U_1 - U_2) \quad (2)$$

当发生最严重击穿情况，即峰峰值击穿 ( $U_1 = U_0, U_2 = -U_0$ ) 时，有最大的 VFTO 幅值：

$$U_{smax} = (1 + 2k)U_0 \quad (3)$$

试验结果表明，快速开关在测点 3，慢速开关在测点 1 时产生最严重的 VFTO。以上述 2 个测点 VFTO 波形为例，统计分析所有分闸过程中各次击穿的振荡系数分布，结果如图 11 所示。

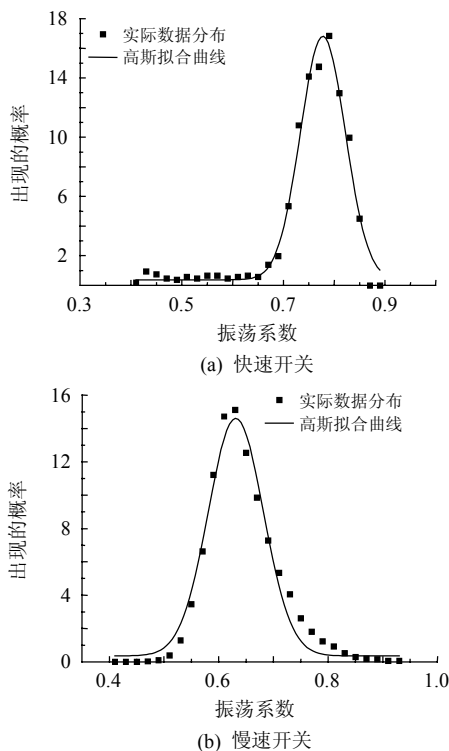


图 11 隔离开关分闸产生的 VFTO 振荡系数分布  
 Fig. 11 Distribution of oscillation factor in VFTO during opening of disconnector

用通用概率函数对振荡系数分布进行拟合，得到快速、慢速开关振荡系数分布表达式如下：

$$f = 0.004\ 05 + 0.164\ 34e^{-\frac{(k-0.777\ 65)^2}{2 \times (0.044\ 24)^2}} \quad (4)$$

$$f = 0.002\ 6 + 0.142\ 58e^{-\frac{(k-0.631\ 35)^2}{2 \times (0.050\ 5)^2}} \quad (5)$$

式中  $f$  为出现的概率。由拟合结果可知，振荡系数具有高斯分布的特征。

### 3 VFTO 幅值特性

#### 3.1 预充直流电压情况

为了模拟隔离开关合闸时，触头间隙在工频电压与残余电压反相峰值时击穿，产生最严重 VFTO 的情形，IEC 62271-102 提出了在负载侧预充等于最大相电压幅值的直流电压等效残余电压影响的方法<sup>[12]</sup>。本试验通过 DS1 对短母线 BS2 预充直流电压，考虑到 VFTO 的随机性，进行了 120 次有效合分操作试验以得到最严重的 VFTO。

在预充正极性直流电压下，对快速、慢速开关操作产生的最大幅值 VFTO 进行了统计分析，测量数据见表 3。可知，快速开关在分支母线 BS1 末端测点 3 产生 VFTO 最高，慢速开关在短母线 BS2 末端测点 1 产生 VFTO 最高，最高 VFTO 值基本相同。

表 3 隔离开关在预充直流电压下操作产生的最大幅值 VFTO

Tab. 3 Maximum of VFTO magnitudes during switching of disconnector with pre-charging DC voltage pu

测点编号	快速开关	慢速开关
1	2.01	2.20
2	1.98	2.17
3	2.27	1.86
4	1.47	1.30

当 GIS 结构及其参数一定时，各测点最大幅值 VFTO 的概率分布大体相似。以快速、慢速开关操作分别在测点 3 和测点 1 产生的 VFTO 为例，统计得到最大幅值 VFTO 的概率分布如图 12 所示。结果表明，分合闸产生的最大幅值 VFTO 基本接近，这是由于分闸过程中也可能出现最高残余电压，并且工频电源电压与残余电压反相峰值附近时触头间隙击穿，这种与合闸时产生最严重 VFTO 相同的工况。另外，在分布规律上，分闸产生的最大幅值 VFTO 呈现一定的正态分布特性，高幅值 VFTO

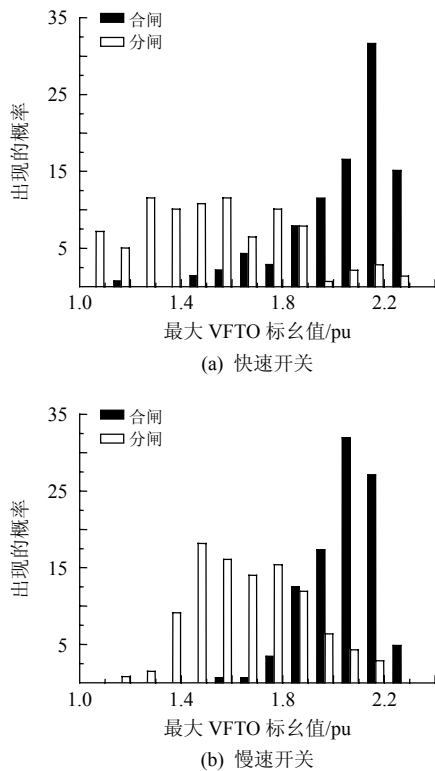


图 12 隔离开关在预充直流电压下产生的最大幅值 VFTO 概率分布

Fig. 12 Probability distribution for maximum of VFTO magnitudes during switching of disconnecter with pre-charging DC voltage

出现的概率较小；受预充直流电压的影响，合闸产生的最大幅值 VFTO 中高幅值出现的概率较大。

### 3.2 不预充直流电压情况

为了模拟隔离开关分闸后残余电压自然分布的工况，进行了不预充直流电压情况下的试验。考虑残余电压自然分布情况下 VFTO 的随机性更强，为了得到最严重的 VFTO，进行了 450 次有效分合闸操作试验。统计分析快速、慢速开关操作产生的最大幅值 VFTO 和测量数据见表 4。

比较表 3 与表 4 中的结果，发现 2 种情况下的各测点最大幅值 VFTO 相对于预充直流电压时变化

表 4 隔离开关在不预充直流电压下操作产生的最大幅值 VFTO

Tab. 4 Maximum of VFTO magnitudes during switching of disconnecter without pre-charging DC voltage pu

测点编号	快速开关	慢速开关
1	2.01	2.03
2	2.00	1.92
3	2.23	1.86
4	1.33	1.33

较小。这是由于不预充直流电压下，试验次数较多，试验中可能出现最严重的残余电压，并且在工频电源电压与残余电压在反相峰值附近时触头间隙击穿，与预充直流电压下产生最严重 VFTO 相同的工况。

以快速、慢速开关合闸产生最严重 VFTO 的波形为例，2 种情况下的最大幅值 VFTO 概率分布比较如图 13 所示。可知，合闸产生的最大幅值 VFTO 概率分布变化较大，预充直流电压下的合闸最大幅值 VFTO 中高幅值出现概率较高；不预充直流电压下，残余电压为自然分布，合分闸产生的最大幅值 VFTO 概率分布接近，呈现出一定的正态分布特性，高幅值 VFTO 出现的概率降低。

隔离开关操作产生的 VFTO 频率高、陡度大，使得在 GIS 内部距离很近的位置，电压波形也相差较大。各测点最大幅值 VFTO 在 GIS 内部的空间分布如图 14 所示。图 14 中，由于快速开关试验回路的测点 3 和慢速开关试验回路的测点 1 位于母线开路端，波在此处会发生全反射导致电压升高，所以这 2 个测点产生的 VFTO 幅值最高。同时，快速、慢速开关试验回路的 GIS 结构及参数存在差异，致

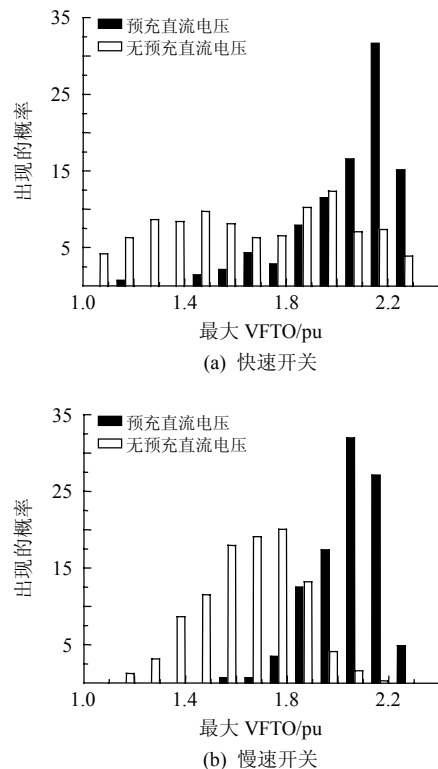


图 13 隔离开关合闸产生的最大幅值 VFTO 概率分布  
Fig. 13 Probability distribution for maximum of VFTO magnitudes during closing of disconnecter

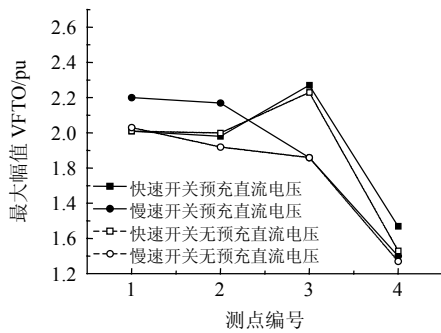


图 14 隔离开关操作产生的最大幅值 VFTO 空间分布

Fig. 14 Spatial distribution for maximum of VFTO magnitudes during switching of disconnector

使 VFTO 在 2 种试验 GIS 内部的空间分布不同。快速、慢速开关在不预充直流电压下操作产生最大幅值 VFTO 的空间分布与预充直流电压的结果接近，这是因为空间分布主要取决于 GIS 结构参数和测点位置，与预充/不预充直流电压的关系不大。

#### 4 阻尼电阻对 VFTO 的抑制

图 15 为一种加装阻尼电阻的特高压 GIS 隔离开关结构。隔离开关合闸过程中，动触头会与阻尼电阻触头先放电；隔离开关分闸过程中，动、静触头间电弧被拉长后，电弧会转移到动触头与阻尼电阻触头间；阻尼电阻被串入放电回路后，对 VFTO 幅值及其振荡产生明显抑制<sup>[4-6]</sup>。

对快速开关加装阻尼电阻在预充直流电压情况下进行了 120 次分合闸操作试验，对产生的最大幅值 VFTO 进行了统计，结果如表 5 所示，加装阻尼电阻后，VFTO 最大幅值从 2.27 pu 降到了 1.33 pu，受到了明显抑制。快速开关合闸操作产生的 VFTO 波形如图 16 所示。从图中可以看出加装阻尼电阻

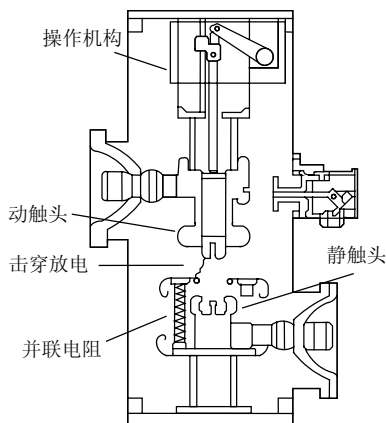


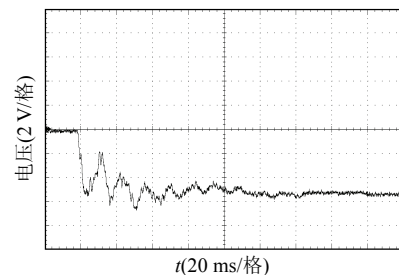
图 15 1100 kV 隔离开关加装阻尼电阻结构

Fig. 15 Structure of 1100 kV disconnector with damping resistor

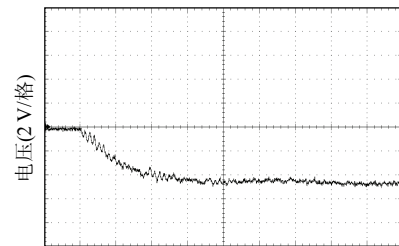
表 5 快速开关不带/带阻尼电阻操作产生的最大幅值 VFTO 比较

Tab. 5 Maximum of VFTO magnitudes during switching of fast speed disconnector without/with damping resistor pu

测点编号	快速开关	慢速开关
1	2.01	1.33
2	1.98	1.31
3	2.27	1.28
4	1.47	1.20



(a) 不带阻尼电阻



(b) 带阻尼电阻

图 16 快速开关合闸产生的 VFTO 波形比较

Fig. 16 Waveform comparison of VFTO closing of during fast speed disconnector

后，VFTO 的高频振荡及陡度受到显著抑制。

#### 5 结论

在特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路上开展了 1300 多次 GIS 隔离开关带电操作产生 VFTO 的试验，实测最大 VFTO 的幅值为 2.27 pu，低于预期仿真结果。试验过程中所有试验设备工作正常，试验前后进行的 GIS 耐压试验也正常。结果表明，通常情况下 GIS 变电站中隔离开关的带电操作是安全的。

对大量 VFTO 测量结果进行统计分析，得到了 VFTO 波形特征、残余电压分布、幅值特性和阻尼电阻对 VFTO 的抑制作用，主要有以下特性：

1) VFTO 波形包含连续多次击穿，击穿次数可达几十次，频率成分丰富，从直流到上百 MHz；单



次击穿波形具有陡度大(最大陡度平均值可达 78.6~138.9 kV/ns)、持续时间短(持续时间平均值 5.6~9.7 μs)的特点。

2) 分闸末次击穿的残余电压分布具有极性效应,慢速开关产生高幅值残余电压的概率低于快速开关。

3) 隔离开关操作产生的最大幅值 VFTO 出现在 GIS 母线开路端,这是因为该处会发生击穿电压波的全反射,导致 VFTO 升高。快速开关操作产生的最大幅值 VFTO 出现在分支母线末端,为 2.27 pu;慢速开关操作产生的最大幅值出现在空载母线末端,为 2.20 pu。合闸和分闸过程中产生的 VFTO 最大幅值及其概率分布基本接近。预充直流电压情况下合闸操作产生高幅值 VFTO 的概率明显增大,比实际情况偏严。

4) 隔离开关加装阻尼电阻能显著抑制 VFTO 的幅值和高频振荡, VFTO 最大幅值由 2.27 pu 降至 1.33 pu,波形中的高频振荡成分也被完全阻尼。

## 参考文献

- [1] Lewis J, Pryor B M, Jones C J, et al. Disconnecter operations in gas insulated substation overvoltage studies and tests associated with a 420kV installation[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [2] Grandl J, Eriksson A, Meppelink J, et al. Studies of very fast transient(VFT) in a 765kV substation[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [3] Bargigia A, Porrino A, Mazzoleni B, et al. Performance of metal clad disconnecter and its impact on the insulation design of gas insulated substations[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [4] Riechert U, Neumann C, Hama H, et al. Very fast transient overvoltage in gas-insulated UHV substations[R]. Paris: CIGRE, 2010.
- [5] Kobayashi A, Murayama Y, Ohya S, et al. Development and verification test of 1100 kV gas insulated switchgear[C]//Proceedings of International conference of UHV Transmission Technology. Beijing: International Workshop of UHV Transmission Technology, 2005: 94-99.
- [6] Yamagata Y, Tanaka K. Suppression of VFT in 1100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnecter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.
- [7] 郭洁, 刘振, 赵丹丹, 等. 750 kV GIS 中运行方式对快速暂态过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 233-235.
- [8] Guo Jie, Liu Zhen, Zhao Dandan, et al. Influence of operation modes to very fast transient voltage in 750 kV GIS[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 233-235(in Chinese).
- [8] 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 disconnecter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 111-114(in Chinese).
- [9] 史保壮, 李智敏, 张文元, 等. 超高压 GIS 中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3. Shi Baozhuang, Li Zhimin, Zhang Wenyuan, et al. Analysis of the reason why VFTO may endanger GIS above 300 kV[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3(in Chinese).
- [10] 邵冲, 杨钰, 王赞基. GIS 开关电弧建模及其对 VFTO 波形的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 200-205. Shao Chong, Yang Yu, Wang Zanji. Modeling of GIS switching arc and its effect on VFTO waveforms [J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 200-205(in Chinese).
- [11] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 39-42. Lu Tiebing, Cui Xiang. Numerical analysis of wave processes for buses without load in substations using FDTD[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 39-42(in Chinese).
- [12] 林莘, 李爽, 徐建源, 等. 考虑 GIS 外壳传输特性的 VFTO 计算模型[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 203-207. Lin Xin, Li Shuang, Xu Jianyuan, et al. Calculation model of VFTO considering transmitting characteristics of GIS enclosure[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 203-207(in Chinese).
- [13] 马国明, 李成榕, 全江涛, 等. 采用套管传感器测量变压器线端快速暂态过电压的方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 122-128. Ma Guoming, Li Chengrong, Quan Jiangtao, et al. Measurement of VFTO on transformer entrance with transformer bushing sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 122-128(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] 王建生. GIS 中隔离开关开合小电容电流时产生的 VFTO[J]. 高压电器, 1992, 28(2): 22-26.  
Wang Jiansheng. VFTO generated from disconnector switching small capacitive current in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1992, 28(2): 22-26(in Chinese).
- [16] 陈庆国, 邱毓昌, 张乔根, 等. GIS 中快速瞬态过电压的实验室模拟[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 1-5.  
Chen Qingguo, Qiu Yuchang, Zhang Qiaogen, et al. Labolary simulation fo fast transient overvoltage in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 1-5(in Chinese).
- [17] 中国电力科学研究院, 华北电力大学. 银川东变电站隔离刀闸操作瞬态过电压[R]. 中国电力科学研究院, 2008.  
China Electric Power Research Institute, North China Electric University. Switching transient overvoltage by disconnector in Yinchuandong substation[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008.
- [18] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1000 kV GIS 变电所 VFTO 特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 5-10.  
Gu Dingxie, Xiu Muhong, Dai Min, et al. Study on VFTO characteristics in 1000kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 5-10(in Chinese).
- [19] Ban Liangeng, Xiang Zutao, Wang Sen, et al. Estimation of VFTO for GIS and HGIS of China 1000kV UHV pilot project and its suppressing counter measures[C]// Proceedings of IEC/CIGRÉ UHV Symposium. Beijing: IEC/CIGRÉ UHV Symposium, 2007: 2-4.
- [20] IEC. IEC 62271-102 High-voltage switchgear and controlgear-Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches[S]. Geneva: IEC Central Office, 2001.



陈维江

收稿日期: 2011-06-28。

作者简介:

陈维江(1958), 男, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事电力系统防雷、过电压与绝缘配合、电磁环境和特高压建设等方面的研究工作, weijiang-chen@sgcc.com.cn;

李志兵(1975), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事高压开关设备和串补装置研制、GIS 中 VFTO 研究等工作, lizb@epri.sgcc.com.cn。

(编辑 胡琳琳)