

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

戴敏¹, 谷定燮¹, 孙岗², 王磊¹, 周沛洪¹, 姚涛¹, 陈海波²,

万磊¹, 庞庆平³, 邹晓明⁴, 陈洁⁵

- (1. 国网电力科学研究院, 湖北省 武汉市 430074; 2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031;
3. 河南平高电气股份有限公司, 河南省 平顶山市 467001; 4. 西安西电电气股份有限公司,
陕西省 西安市 710077; 5. 西安交通大学, 陕西省 西安市 710049)

Study on Full-scale 1 000 kV Gas Insulated Switchgear Test Circuit for Very Fast Transient Overvoltage

DAI Min¹, GU Dingxie¹, SUN Gang², WANG Lei¹, ZHOU Peihong¹, YAO Tao¹, CHEN Haibo²,
WAN Lei¹, PANG Qingping³, Zou Xiaoming⁴, CHEN Jie⁵

- (1. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. State Grid Corporation of China, Xicheng
District, Beijing 100031, China; 3. Henan PINGGAO Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467001, Henan Province, China;
4. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, Shaanxi Province, China;
5. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: For fully understanding the characteristics of very fast transient overvoltage (VFTO) in ultra high voltage (UHV) gas insulated switchgear (GIS), it is necessary to set up full-scale 1 000 kV GIS Test circuit. Based on the computer simulation of the VFTO and comparison between different circuit schemes of UHV GIS substation and planned 1 000 kV GIS test circuit, it is suggested that the 1 000 kV GIS test circuit should be equipped with a branch bus which could cause more severe VFTO than that tested without the branch bus. A new 1 000 kV GIS test circuit with a branch bus, different from the one presented in national or IEC standards, is put forward. Investigation and designing were made for the test circuit with the arrangement of measurement points and the selection of the disconnectors with different switching speeds. The test results obtained with the constructed GIS test circuit show that the influence of branch bus on VFTO is in accordance with the anticipation of design, either in waveforms or in statistical

regularity. The test circuit showed an excellent performance in the research on 1 000 kV GIS VFTO.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); gas insulated switchgear (GIS); very fast transient overvoltages (VFTO); disconnector switchgear; test circuit

摘要: 为研究特高压气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)规律, 需要建立全尺寸的真型模拟试验回路。计算了 1 000 kV GIS 变电站和模拟试验回路在不同接线方式下的 VFTO, 指出 1 000 kV GIS 的 VFTO 模拟试验回路宜带有分支母线, 比国家标准和 IEC 标准规定的无分支母线的简单试验回路更严格, 从而提出新的 VFTO 试验回路, 并推荐了测点布置方案和试验隔离开关型式。对所建成的 VFTO 试验回路进行试验, 结果表明: 无论是从 VFTO 实测波形还是从统计规律上看, 试验回路均达到了设计的预期, 对研究 VFTO 的特性发挥了重要作用。

关键词: 特高压; 气体绝缘开关设备; 特快速瞬态过电压; 隔离开关; 试验回路

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[2011])。

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

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear,

GIS)中的隔离开关操作会产生波前很陡、振荡频率及幅值也很高的特快速瞬态过电压(very fast transient over voltage, VFTO)。随着设备额定电压的提高, VFTO 的危害性增大^[1]。国内外均发生过超高压 GIS 的 VFTO 损坏 GIS 设备自身绝缘、变压器绝缘以及二次设备事故^[2-4]。对于特高压 GIS 变电站, 此问题更加突出。为此, 深入研究特高压 GIS 中 VFTO 的特性显得尤为重要^[5]。

仿真计算和模拟试验是 VFTO 研究的主要方法。目前的仿真模型大多采用简化参数, 导致 VFTO 特性的计算结果受到一定质疑, 因此, 需要通过模拟试验来实际测量 VFTO 的特性, 达到以模拟试验结果校验仿真计算的目的。仿真计算需要通过模拟试验来校验和完善, 模拟试验的建立也需要仿真计算来预测和比较分析, 两者相辅相成。

在国家标准“交流隔离开关和接地开关”^[6]和 IEC 标准 60129^[7]中已经提出了 VFTO 试验回路, 其主要目的是考核隔离开关。该试验回路可产生典型的 VFTO, 但是结构比较简单, 与工程中的典型接线方式有较大的区别, 所产生的 VFTO 不能反映实际中最严重的情况。

为了深入研究特高压 GIS 中的 VFTO 特性和规律, 有必要对 VFTO 模拟试验的回路接线方式进行进一步的探讨。国外的相关设备厂家从 20 世纪 80 年代开始对超高压 GIS 中 VFTO 现象进行了大量研究。但是对 VFTO 试验回路的深入研究较少, 也很少涉及特高压电压等级设备。

本文结合中国特高压 GIS/混合 GIS(hybrid GIS, HGIS)变电站的典型接线方式, 通过大量的仿真计算, 分析归纳试验回路接线方式对 VFTO 的影响规律, 并提出了新的 VFTO 模拟试验的 GIS 接线方案。

1 VFTO 仿真计算模型

1.1 隔离开关模型

VFTO 的特征参数取决于行波在 GIS 设备中的传播与叠加, 与设备的结构、管道的长度及隔离开关分合闸速度等因素相关^[8-10]。目前对于 VFTO 的仿真计算, 多采用 EMTP 等仿真软件, 将 GIS 设备的元件, 如断路器、隔离开关、GIS 套管和管道等, 等效为波阻抗、电感、电容、电阻及其组合元件, 以此建立和求解节点电压方程。

利用 EMTP 进行 VFTO 仿真计算时, 大多数的

设备元件均有较精确的电路模型和参数取值, 但在隔离开关模型和击穿过程模拟的问题上还存在分歧。

计算隔离开关操作引起 VFTO 时, 对隔离开关的模拟有多种方法: 一为理想开关模型^[11-12], 它是工程上普遍使用的方法, 只考虑隔离开关的通或断 2 种状态。隔离开关触头间隙击穿选择了较为苛刻的情况, 隔离开关负荷侧短线上的残留电压以 -1.0 pu 考虑, 隔离开关电源侧合闸时的电压以 $+1.0 \text{ pu}$ 考虑, 假定在隔离开关断口电压为 2.0 pu 条件下发生隔离开关触头间隙击穿, 并认为分闸最大 VFTO 和合闸最大 VFTO 的计算条件相同; 二为比较仔细地考虑隔离开关分合闸动态过程中的触头间多次击穿^[13-15](重燃或预击穿), 并考虑触头间隙击穿和电弧熄灭的条件, 本文称它为复杂开关模型。

本文的仿真计算采用复杂开关模型, 考虑了较多因素, 主要包括: 1) 隔离开关触头运动过程中, 触头间隙击穿电压随间隙距离的变化; 2) 触头间隙在不同极性电压作用下的击穿电压的差异, 负极性电压下击穿电压低于正极性电压, 取前者为后者的 0.9 倍; 3) 隔离开关触头开始运动时电源侧电压相位是随机变化的; 4) 不同类型隔离开关的触头运动速度不同, 但是对一种类型隔离开关认为其触头匀速运动; 5) 隔离开关的触头间隙电弧电阻随电弧长度和电弧状态而变化^[16-17]。

1.2 击穿过程计算模型

在隔离开关操作过程中, 负载侧短母线上的残压对 VFTO 的大小具有重要影响。前一次分闸操作留下的残压影响隔离开关下一次合闸操作产生的 VFTO 的大小。因此仿真计算需要正确的模拟残压值。

分闸相位对 VFTO 也有显著影响。计算时认为隔离开关触头开始运动时的电源电压相位是随机的, 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 内均匀分布。仿真时, 在 $0^\circ \sim 360^\circ$, 每间隔 10° 或更小角度取一点, 逐点进行计算。

在隔离开关分合闸过程中, 间隙两端的电压 U_g 为电源电压 $U_m \sin(\omega t + \Phi)$ 和母线残压 U_r 之差, 即

$$U_g = U_m \sin(\omega t + \Phi) - U_r$$

式中: U_m 的为电源电压幅值; Φ 为触头开始运动时的电源电压相位; ω 为工频电源角频率。

分闸过程中, 隔离开关间隙的绝缘耐受电压

U_w 随时间线性增大, 即

$$U_w = vtE$$

式中: v 为隔离开关分闸速度; t 为时间; E 为 GIS 隔离开关间隙的单位长度耐受电压。

合闸过程中, 间隙两端的绝缘耐受电压 U_w 随时间线性减小, 有

$$U_w = (D_0 - vt)E$$

式中 D_0 为间隙的初始距离。

当 $U_g \geq U_w$ 时, 间隙击穿, 产生特快速暂态, 间隙上流过高频暂态电流; 当高频暂态衰减结束后, 负载侧和电源侧等电位, 间隙电弧熄灭, 负载侧残留电压就是此时电源侧工频电压的瞬时值 $U_m \sin(\omega t_k + \Phi)$, 其中 $t_k=1,2,3,\dots$, 为每次重燃的时间。

隔离开关分闸, 断口间隙发生击穿、熄弧、再击穿、再熄弧的过程。随着时间增加间隙距离增大, 负载侧残压波形呈阶梯状变化。当间隙足够大, 不再发生重燃击穿时, 完全完成分闸操作, 此时负载侧电压即为分闸末次残压。

隔离开关分闸和合闸过程中开关的触头速度 v 、触头开始运动时的电源电压相位 Φ 及残压 U_r 等之间的关系如下:

$$|U_m \sin(\omega t_k + \Phi) - U_r| \geq |vt_k E| \quad (1)$$

$$|U_m \sin(\omega t_k + \Phi) - U_r| \geq |(D_0 - vt_k)E| \quad (2)$$

根据式(1)、(2), 可以确定每次重燃的时间 t_k 、每次重燃熄弧后的残压值以及分闸操作的最终残压值。

影响击穿过程的另外一个重要因素是电源电压相位 Φ 。分闸或合闸时电源电压相位影响到 U_g 的幅值, 也导致击穿过程的显著差异。

模拟试验时, 通过统计分闸或合闸过程中间隙击穿时电源电压相位的试验结果, 与仿真计算结果进行对比, 可以校核仿真计算模型的准确性。

2 特高压 GIS 变电站不同接线方式下的 VFTO 仿真计算

中国特高压变电站有较多的变压器和出线, GIS 回路的接线方式多种多样, 不同位置的隔离开关操作时, 产生的 VFTO 有较大的差异。设计试验回路前, 应先分析中国特高压变电站的接线方式, 归纳出一种或几种能够代表大多数隔离开关操作的典型接线方式。

通过对中国特高压交流试验示范工程以及远期扩建工程接线方式的分析, 本文对特高压变电站典型接线方式下的 VFTO 进行仿真研究, 总结出可能出现较大 VFTO 的接线方式, 为 VFTO 试验回路的设计提供依据。

图 1 为中国特高压示范工程长治变电站的接线示意图。初期时变电站为 2 串断路器支路接线, 采用双断路器临时接线方式。扩建时, 将建成 3/2 断路器接线方式, 形成一线两变运行方式。远期建设时, 将形成多个完整的 3/2 断路器接线支路, 如图 2 所示。图 1 和图 2 中, 方框内的数值表示该位置的过电压标幺值, 由此可以看出 2 种接线方式时

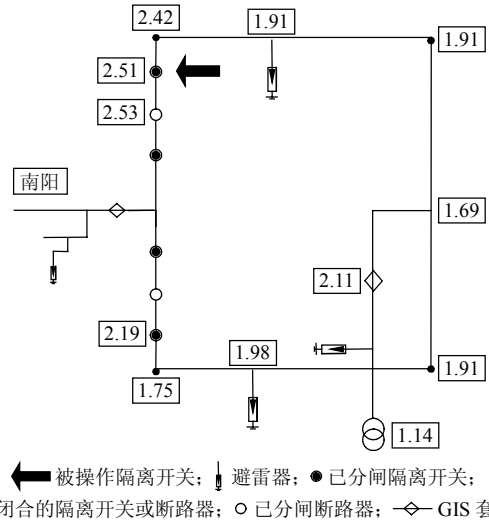


图 1 2 串断路器支路接线时 GIS 中 VFTO 分布图
Fig. 1 VFTO profile of GIS scheme with 2 circuit breaker strings

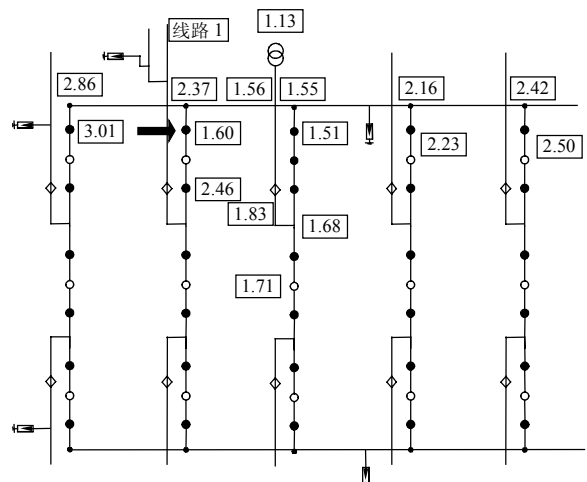


图 2 多串断路器支路接线时 VFTO 分布图
Fig. 2 VFTO profile of GIS scheme with many circuit breaker strings

的 VFTO 分布。

示范工程的接线方式比较简单，被操作隔离开关侧母线无分支。示范工程远期建成多断路器支路时，由于变电站的结构复杂，隔离开关被操作时，母线一般均带有末端开路的分支段，分支段的长短与变电站的结构和规模相关。

表 1 列出了 2 种不同断路器支路接线时的最大 VFTO，可知多串断路器支路时的最大 VFTO 高于 2 串支路时的最大 VFTO。

表 1 不同接线方式下的最大 VFTO 计算值
Tab. 1 Maximum VFTO calculated in different connection schemes

接线方式	最大 VFTO(复杂开关模型)/pu
2 串断路器支路接线	2.53
多串断路器支路接线	3.01

通过对这 2 种典型接线方式下 VFTO 的仿真计算可知，被操作隔离开关侧母线如果带有末端开路的分支，可能会在分支末端出现最大的 VFTO。原因在于电压波在母线分支开路端形成电压全反射，使末端 VFTO 增大。这种带分支的接线方式在特高压变电站中会经常出现，图 3 列出了几种典型的带分支的情况。

图 3(a)为变电站线路侧一组隔离开关分合闸时，线路与另一组隔离开关之间的短管线形成分支的情况。中国特高压 GIS 和 HGIS 变电站的线路侧接线方式与此相同，对于 HGIS 变电站，典型的分支短管线约为 3 m，对于 GIS 变电站，典型的分支短管线约为 3~6 m。

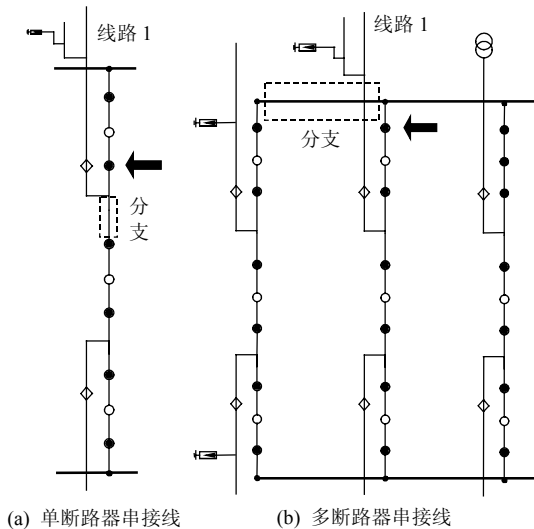


图 3 特高压变电站带分支的典型接线方式

Fig. 3 Typical schemes of UHV GIS with branch bus

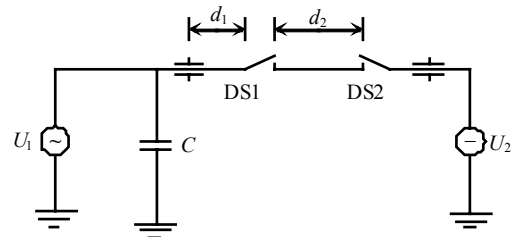
图 3(b)为变电站母线侧隔离开关分合闸时，以末端开断的母线作为分支的情况。中国特高压 GIS 变电站采用 3 个以上断路器串时，这种以末端开断母线为分支的情况经常出现。

VFTO 模拟试验的试验回路应能够尽量广泛地代表大多数接线方式，并且模拟可能产生较大 VFTO 幅值的接线方式。根据对特高压变电站的仿真研究结果，结合 IEC 相关标准的建议，提出了带有分支母线的试验回路，并结合典型的 HGIS 变电站和 GIS 变电站的具体情况，考虑不同长度的分支母线。

3 特高压 GIS VFTO 试验回路设计

3.1 接线方式的设计

国家标准“交流隔离开关和接地开关”^[6]和 IEC 标准 60129^[7]中提出了用于考核隔离开关性能的试验回路，如图 4 所示。图中： d_1 为交流电源套管与被试隔离开关的距离； d_2 为被试隔离开关与辅助隔离开关之间的距离； U_1 为交流电源， U_2 为模拟残余电荷电压的直流电源； C 为电源侧回路的附加集中电容。可知在该试验回路上产生的最大 VFTO 可能没有带分支母线时的严重。

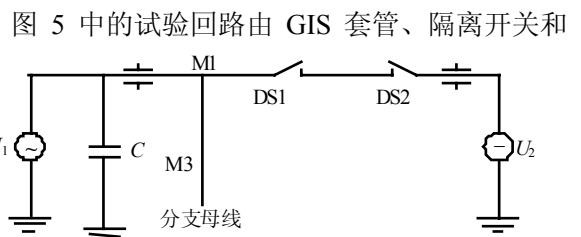


DS1 为被试隔离开关；DS2 为辅助隔离开关。

图 4 GB1985 和 IEC 标准规定的隔离开关试验回路

Fig. 4 Circuit of 1000 kV GIS module for VFTO test specified by GB1985 and IEC

结合图 4 试验回路和中国特高压 GIS 变电站的 VFTO 仿真结果，设计了特高压 VFTO 的试验回路，如图 5 所示。



DS1 为被试隔离开关；DS2 为辅助隔离开关。

图 5 设计的特高压 VFTO 试验回路示意图

Fig. 5 Sketch map of planned 1000 kV GIS test circuit

GIS 管道构成。试验回路采用的设备均为中国特高压工程中实际使用的产品。图 5 中直流电源用于在 DS1 与 DS2 之间的短管线上产生残压，模拟隔离开关分闸操作后短管线上的残压。短管线的长度是按照实际特高压 GIS 变电站中被操作隔离开关与之相连的断路器断口之间的长度来选取的，约为 6.3 m。

根据国内外的研究经验，图 4 回路中 d_2/d_1 的取值在 0.36~0.52 之间时，可产生典型的 VFTO。参考已有成果，DS1 与套管的距离在 12~17.5 m 之间。在进行试验回路设计时，通过大量的仿真计算，最终确定 DS1 与套管的长度为 14 m 时，可产生幅值较高的 VFTO。

与以往研究者设计的试验回路不同，此试验回路最突出的特点是考虑了分支母线对 VFTO 的影响。对试验回路中分支母线长度对 VFTO 的影响进行仿真，结果如图 6 和表 2 所示。

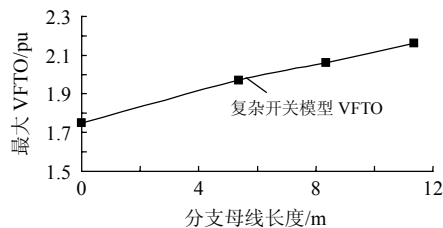


图 6 最大 VFTO 计算值随分支母线长度变化
Fig. 6 Maximum VFTO calculated in different lengths of the branch bus

表 2 不同分支长度下的 VFTO 计算值

Tab. 2 VFTO calculated in different lengths of the branch bus

分支母线长度/m	分支母线末端 M3	DS1 电源侧	负载侧短管线末端	分支母线始端 M1	最大值
0	1.75	1.66	1.50	1.75	1.75
3	1.97	1.68	1.72	1.62	1.97
6	2.06	1.63	1.67	1.63	2.06
9	2.16	1.53	1.88	1.50	2.16

在实际工程中，分支母线长度有可能长达数十 m。在试验回路中，兼顾工程施工的可行性和经济性，不必要完全模拟各种分支母线长度，退而选择 9 m 作为最长分支母线长度。在第 2 节中已经说明，3 和 6 m 的分支母线长度也是典型的工程接线长度。无分支母线(0 m)与国标和 IEC 标准的试验回路相符，试验结果也可作为参考和对比。

因此，本文选取了可拆卸式分支母线接线方式，能够完成分支母线长度分别为 0、3、6 和 9 m

条件下的 VFTO 试验。

试验回路中，分支母线连接点的位置对 VFTO 有一定影响。参考了工程中隔离开关与母线之间的连线长度，选择图 5 中 DS1 与 M1 的长度为 2 m。

3.2 测量系统及其布置方式

精确的测量系统是模拟试验的重要组成部分之一。由于 VFTO 的特快速瞬态变化的特性，对其进行测量存在很多难点。目前测量 VFTO 的主要方法有电容传感器、电场探头和套管末屏法。充分总结各种测量方法的优缺点后，本文选取了手孔式电容传感器作为测量的主要手段。试验中同时采用了清华大学和华北电力大学 2 家单位研制的传感器。清华大学的传感器具有高频响应性能好的特点，华北电力大学的传感器的频率范围非常广。在试验时，回路同一测点采用 2 套测量系统同时测量，测量结果可相互比对印证。

从仿真计算中知道，电压波在 GIS 管道中波阻抗的不连续处产生折反射，导致较高的 VFTO。试验回路的测点分布，应重点考察波阻抗不连续处。基于上述要求，结合图 5 的示意图，在交流电源套管处，分支母线首、末端，被操作短管线两端分别布置测量点。具体布置位置如图 7 所示。

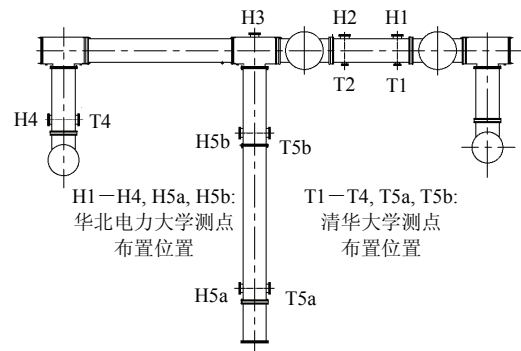


图 7 试验回路测点分布图

Fig. 7 Distribution of measure points in UHV GIS test circuit

3.3 隔离开关的选型

隔离开关考虑采用 2 种不同分合闸速度的开关，对于相同速度的开关考虑有无阻尼电阻 2 种情况。

研究表明，隔离开关带阻尼电阻是限制 VFTO 的有效措施，可以把 VFTO 限制在很低的水平^[18-20]。为了验证隔离开关阻尼电阻对 VFTO 的影响，试验回路中更换带阻尼电阻和不带阻尼电阻 2 种类型隔离开关。

特高压示范工程的 GIS 隔离开关主要采用 2 个不同厂家的设备，对于 VFTO 研究，其主要区别在于隔离开关分合闸速度的不同。国内外已有的研究成果表明，分合闸速度对最大 VFTO 值有一定的影响，但具体的影响存在不同观点。为了验证这一影响因素的作用，本研究建设 2 套接线相同的试验回路，分别对应实际变电站 2 类不同分合闸速度的隔离开关。还计划通过调节隔离开关驱动电机的速度，实现更多种分合闸速度的试验，深化研究成果。

在位于武汉的国家电网公司交流特高压试验基地建成了 2 个特高压 GIS VFTO 试验回路，如图 8 所示。2 个试验回路分别采用河南平高电气股份有限公司(简称“平高电气”)和西安西电开关电气有限公司(简称“西开电气”)的设备，在回路尺寸上基本一致，区别在于隔离开关型式和分合闸速度。

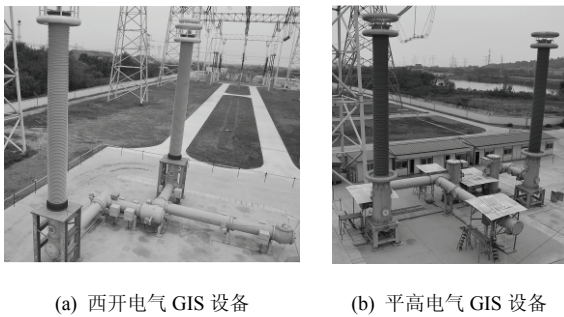


图 8 特高压 GIS VFTO 试验回路

Fig. 8 Test platform of UHV GIS VFTO

4 特高压 GIS VFTO 试验回路应用效果

4.1 VFTO 波形

第 3 节所述的试验回路建成至今，在预加和不预加残余电压，以及不同隔离开关操动速度的试验条件下，已累计进行了超过 2 000 余次产生 VFTO 的操作试验，获得了大量的 VFTO 测试数据，统计分析得到了 VFTO 波形特征(峰值、波前时间、振荡频率、重击穿次数)和 VFTO 幅值概率分布。

图 9 为采用“平高电气”试验回路进行分闸试验时记录的负载侧和电源侧的 VFTO 波形，以及仿真计算的波形。

由图 9 可以看出，仿真计算反映了 GIS 隔离开关分闸产生 VFTO 的过程，以及电源侧和负载侧电压的变化规律。

图 10 和图 11 分别为合闸过程中首次预击穿时的负载侧短管线末端和电源侧分支母线末端的 VFTO 波形图。

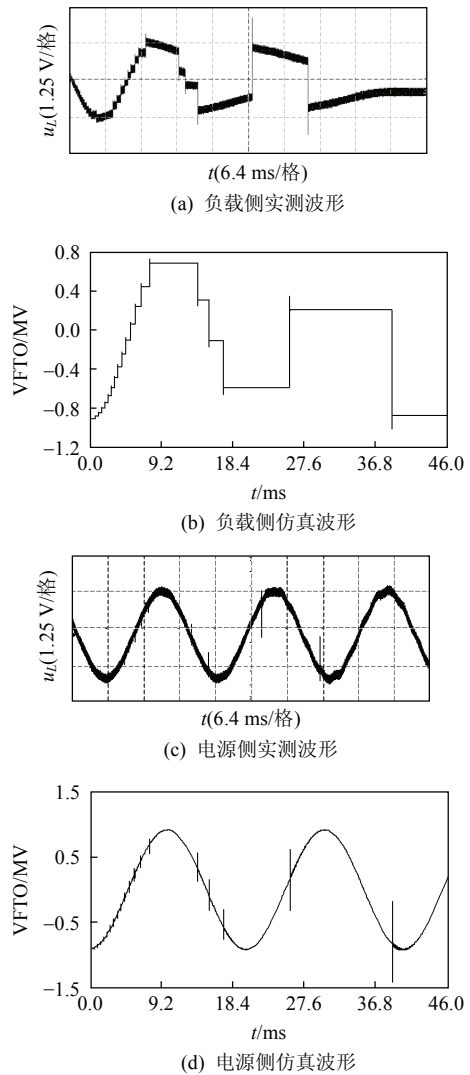


图 9 隔离开关分闸操作时仿真计算 VFTO 波形与模拟试验 VFTO 波形的比较

Fig. 9 Comparison between the VFTO waveforms from the calculation and the test for an opening operation

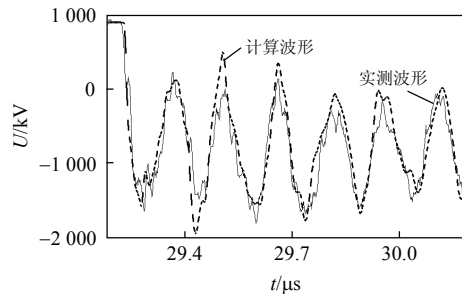


图 10 隔离开关合闸操作时负载侧短管线末端 VFTO 波形
Fig. 10 Comparison between the VFTO waveforms from the calculation and the test at the dead end of the load-side busbar of the disconnector for an closing operation

仿真计算的 VFTO 高频振荡频率与实测 VFTO 波形高频振荡频率基本相同，主要频率均为

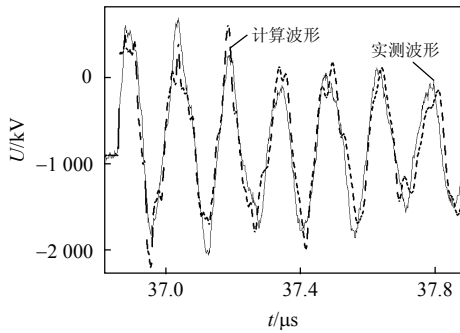


图 11 隔离开关合闸操作时分支母线末端 VFTO 波形

Fig. 11 Comparison between the VFTO waveforms from the calculation and the test at the dead end of the branch busbar for a closing operation

6.8 MHz。实测的最大 VFTO 约为 2.27 pu，仿真的最大 VFTO 为 2.12 pu。

可以看出，实测波形与仿真波形的变化规律和最大值基本相同。

4.2 隔离开关负载侧残压

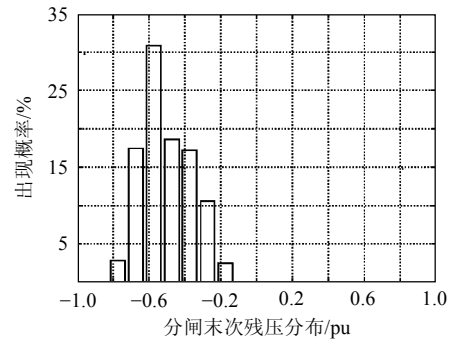
选择隔离开关分闸速度分别为 0.4、0.55、0.8 和 1.75 m/s，在每一速度下选择不同的隔离开关触头开始运动时的电源电压相位，计算隔离开关负载侧短管线残压，由此统计得残压分布直方图，如图 12 所示。残压幅值并不属于正态分布。为了得到最大 VFTO，在研究中一般偏严考虑，以其绝对值最大的残压值作为计算残压值。

相关文献[9-10]认为分闸速度在 0.2 至 3.0 m/s 范围时，残压值随分闸速度的增大而增大。本文的计算结果不支持这观点。图 13 为计算的最大残压值与分闸速度的关系。分闸速度在 0.8~2.0m/s 范围变化，其最大残压值变化很小，基本上为-1.0 pu；只有在分闸速度低于 0.8m/s 的区间，最大残压绝对值随分闸速度的降低而降低。

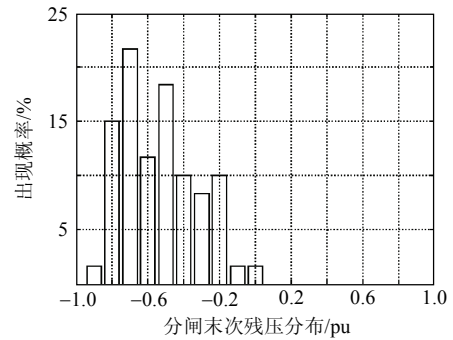
本文第 1 节仿真计算中，设定最大残压为 -1.0pu，对分闸速度在 0.8 至 2.0m/s 范围的隔离开关是合理的。对分闸速度在 0.8 m/s 以下的隔离开关，视其分闸速度的高低可能是稍偏严或偏严的。

采用“平高电气”隔离开关(分闸速度约 1.75m/s)和“西开电气”隔离开关(分闸速度约 0.55 m/s)进行 VFTO 模拟试验，分闸试验测得的残压幅值分布直方图见图 14。无论分闸速度快慢，最大残压均为 -1.0pu，只是高幅值残压出现概率大小不同。残压实测值验证了本文仿真计算中设定负载侧残压为 -1.0pu 是合适的。

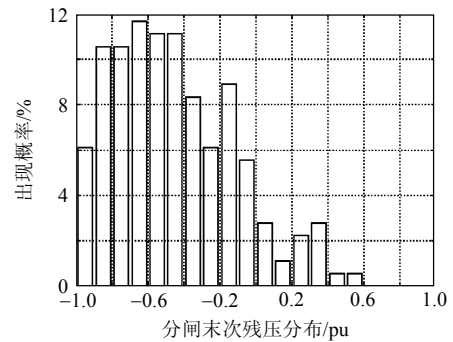
“平高电气”隔离开关的残压实测值分布图和



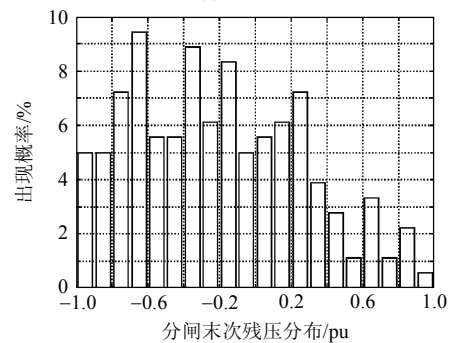
(a) $v=0.4$ m/s



(b) $v=0.55$ m/s



(c) $v=0.8$ m/s



(d) $v=1.75$ m/s

图 12 隔离开关残压计算值分布直方图

Fig. 12 Calculated distributions of the trapped charge voltages with different contact speeds

计算值分布图基本符合。

但是，分闸速度较低的“西开电气”隔离开关分闸的最大残压幅值和上述计算结果有点差异。导致此差异的原因包括：1) 隔离开关分闸速度实际值和标称值可能存在差异；2) 隔离开关断口间隙的

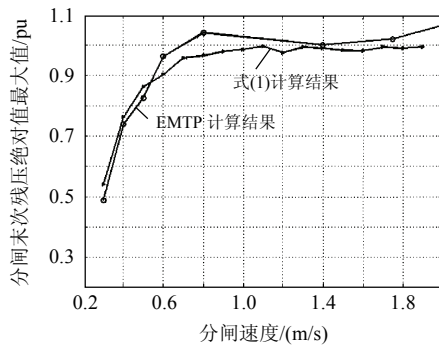
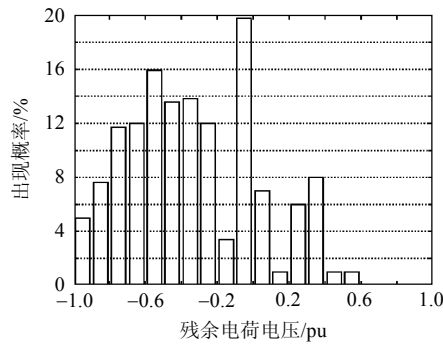
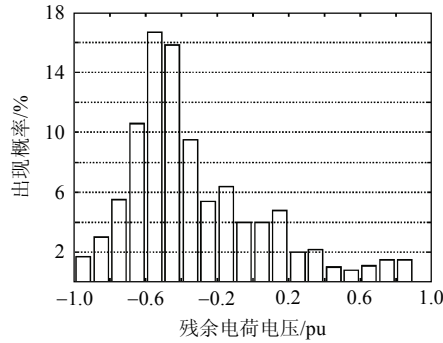


图 13 最大残压绝对值和隔离开关分闸速度的关系

Fig. 13 Calculated maximum trapped charge voltages vs the contact speed of disconnector



(a) “平高电气” 隔离开关



(b) “西开电气” 隔离开关

图 14 试验回路隔离开关分闸残压分布直方图

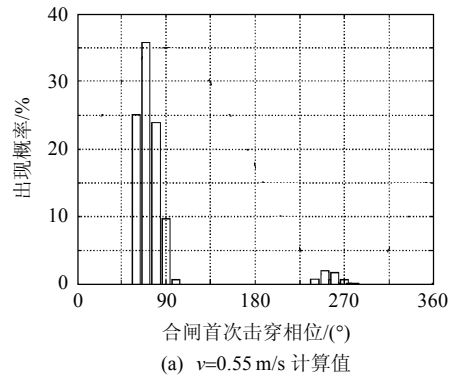
Fig. 14 Measured distributions of the trapped charge voltages with different contact speeds after opening operations

击穿特性模型不够准确；3) 隔离开关分闸过程中断口间隙每次重燃电弧后的熄弧特性模型不够准确。

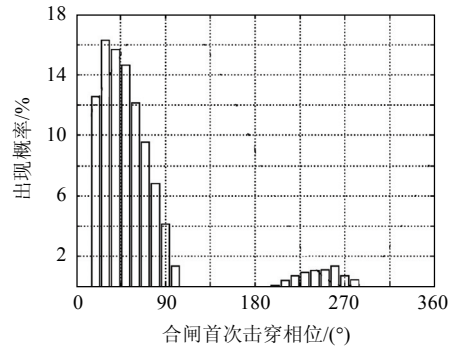
4.3 隔离开关合闸首次击穿相位

根据 VFTO 试验的残压 U_r 试验结果，统计 U_r 幅值的分布，近似视其为正态分布，期望值为 $-0.44pu$ ，方差为 $0.037pu$ 。

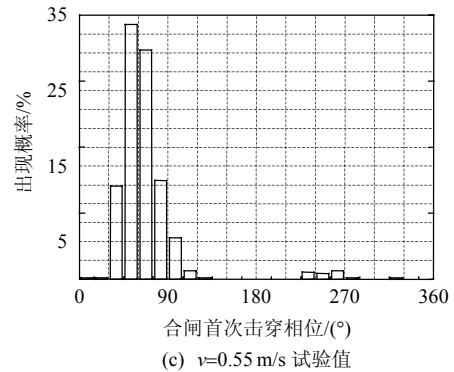
计算和试验所得的首次击穿时的工频电压相位分布直方图如图 15 所示，图中 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时的工作电压幅值为正， $180^\circ \sim 360^\circ$ 时的工作电压幅值



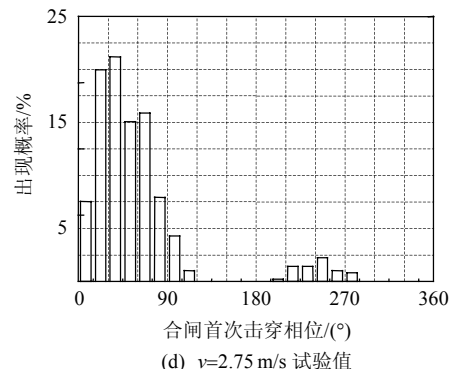
(a) $v=0.55\text{ m/s}$ 计算值



(b) $v=2.75\text{ m/s}$ 计算值



(c) $v=0.55\text{ m/s}$ 试验值



(d) $v=2.75\text{ m/s}$ 试验值

图 15 隔离开关合闸过程中发生首次预击穿时的工作电压相位分布直方图

Fig. 15 Distributions of the first breakdown phase in closing operations

为负。由图 15 可知，计算结果和试验结果是基本一致的。

当隔离开关合闸速度较低时,首次击穿的工频电压相位基本上在 $70^{\circ}\sim 100^{\circ}$,在工频峰值附近,此时出现高幅值的概率较大;当隔离开关合闸速度较高时,首次击穿时的工频电压相位分布范围较宽,在 $30^{\circ}\sim 100^{\circ}$,首次击穿的工频电压的幅值一般低于峰值,出现高幅值的概率相对较小。但是,这2种隔离开关均有首次击穿时的工频电压幅值等于其峰值的情况,因此本文前述章节的仿真计算中,设定合闸侧电压幅值为1 pu是合适的。

IEC标准60071—4^[1]中提出的首次击穿时的工频电压幅值总是在峰值的论点可能主要来源于合闸速度较低的隔离开关的研究结果,不够全面,没有反映合闸速度较高的隔离开关的特性。由于残压多数是负极性的,隔离开关断口电压在工频电压为正半波时比较大,因此首次击穿时的工作电压为正极性的概率远大于负极性。

4.4 试验回路VFTO分布

在“平高电气”试验回路上的VFTO试验结果如表3所示,可知最大VFTO出现于分支母线末端,大于短管线末端的VFTO。

表3 “平高电气”隔离开关操作实测最大VFTO值分布
Tab. 3 Distribution of the maximum VFTO tested with Pinggao test circuit pu

测点位置	合闸操作最大VFTO	分闸操作最大VFTO
负载侧短线末端	2.01	1.99
分支母线末端M3	2.27	2.21

本文第4节仿真计算已经指出,隔离开关操作引起VFTO的最大值一般出现于分支母线的末端,因此,模拟试验结果和计算结果所反映的规律是相同的。

5 结论

1) 特高压GIS VFTO试验回路应带有分支母线,分支母线末端的VFTO一般可能高于隔离开关负载侧短管线末端的VFTO,带分支母线的试验回路的最大VFTO一般高于不带分支母线的最大VFTO。

2) 提出并建设了具有工程代表性、分支母线长度可变、多种型式隔离开关试品、多点同步测量系统和多种试验功能的2个特高压GIS VFTO试验回路。

3) 利用VFTO试验回路已开展了2000余次试验,获得了大量珍贵的试验数据。模拟试验实测结

果和仿真计算结果的对比表明,从VFTO实测波形、最大值、分布规律和统计规律等方面评价,试验回路达到了预期效果。

参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission. IEC60071-4 2004 International standard Insulation co-ordination-part 4: computational guide to insulation co-ordination and modeling of electrical networks[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2004.
- [2] 钟定珠, 陈锦清. 广东省500 kV高压设备运行情况分析和事故分析[J]. 广东电力, 1998, 11(1): 24-27.
Zhong Dingzhu, Chen Jinqing. Guangdong 500 kV high-pressure equipment running status and accident analysis [J]. Guangdong Power, 1998, 11(1): 24-27(in Chinese).
- [3] 曾昭华, 林集明, 班连庚, 等. 特快速暂态过电压及研究实例[J]. 电网技术, 1996, 20(3): 10-14.
Zeng Zhaohua, Lin Jiming, Ban Liangeng, et al. Very fast transient overvoltages (VFTO) and a study of a practical case[J]. Power System Technology, 1996, 20(3): 10-14(in Chinese).
- [4] 舒印彪, 陈维江, 谷定燮, 等. GB/Z 24842-2009 1 000 kV特高压交流输电工程过电压和绝缘配合[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Shu Yinbiao, Chen Weijiang, Gu Dingxie, et al. GB/Z 24842-2009 Overvoltage and insulation coordination of 1 000 kV UHV AC transmission project[S]. Beijing: Standard Press of China, 2009 (in Chinese).
- [5] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1 000 kV GIS变电站VFTO特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 27-32.
Gu Dingxie, Xiu Muhong, Dai Min, et al. Study on VFTO of 1 000 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 27-32(in Chinese).
- [6] 杨大锴, 张姝, 严玉林, 等. GB1985-89 交流隔离开关和接地开关[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
Yang Dakun, Zhang Shu, Yan Yulin, et al. National standard of P R C. GB1985-89 Alternating current disconnectors and earthing switches[S]. Beijing: Standard Press of China, 1985 (in Chinese).
- [7] International Electrotechnical Commission. IEC 60129-1984 Alternating current disconnectors and earthing switches[S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 1984.
- [8] 郭洁, 刘振, 赵丹丹, 等. 750kV 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.
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).
- [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 disconnecter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 111-114(in Chinese).
- [10] 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 Wenyan, et al. Analysis of the reason why VFTO may endanger GIS above 300kV[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3(in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] Yamagata Y, Nakada Y, Nojima K, et al. Very fast transients in 1 000 kV gas insulated switchgear[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans, LA, USA: IEEE, 1999: 501-508.
- [14] 杜林, 唐启尧, 陈辉. 三峡电站 GIS 快速暂态过电压现场试验及分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1743-1747. Du Lin, Tang Qiyao, Chen Hui. Field measurement and analysis on very fast transient overvoltage of GIS in Three Gorges Power Plant[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1743-1747(in Chinese).
- [15] Riechert U, Neumann C, Hama H, et al. Very fast transient overvoltages(VFTO) in gas-insulated UHV substations [R]. Paris: CIGRE, 2010.
- [16] Riechert, Krusi, Sologuren. Very fast transient overvoltages during switching of bus-charging currents by 1100kV disconnecter[R]. Paris: CIGRE, 2010.
- [17] Kumar V V. Estimation and measurement of very fast transient overvoltage(VFTO) in a gas insulated substation (GIS)[D]. Bangalore: Indian Institute of Science Bangalore, 1999.
- [18] Kumar V V, Joy T M, Naidu M S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS [J], IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 15(4): 539-544.
- [19] Tanaka Y Y. Suppression of VFT in 1100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnecter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.
- [20] Hemmi R, Shinohara R, Kitazumi Y. 快速暂态过电压(VFTO)的评估及其在未来 GIS 变电站中执行断路操作时, 通过并联电阻器的抑制方法[C]//特高压输电国际会议. 北京: 国家电网公司, 2006: 300-305. Hemmi R, Shinohara R, Kitazumi Y. Evaluation of VFTO (very fast transient overvoltage) and its reduction by parallel resistor during switching operation of disconnecting switch in future UHV gas insulated substations[C]//International Conference of UHV Transmission Technology. Beijing: SGCC, 2006: 300-305 (in Chinese).



戴敏

收稿日期: 2011-06-28。

作者简介:

戴敏(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统防雷与过电压技术研究工作, daimin@sgepri.sgcc.com.cn。

(编辑 胡琳琳)