

编者按

超/特高压气体绝缘开关设备(gas-insulated switchgear, GIS)变电站中, 隔离开关操作产生的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)具有幅值高、波前陡、频率高和多次连续脉冲等特点, 会威胁 GIS、变压器及二次设备的安全, 特高压系统尤为突出。为了揭示特高压系统中 VFTO 的特性及其影响, 为设备的设计和运行提供技术支撑, 国家电网公司立项, 组织中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、华北电力大学、清华大学、西安交通大学、河南平高电气股份有限公司和西安西电电气股份有限公司等单位, 采用真型试验和仿真计算相结合的方法, 对特高压系统中 VFTO 的测试技术、特性试验、仿真技术、绝缘特性、壳体电位升(transient enclosure voltage, TEV)和电磁干扰等进行了全面研究。在此, 谨将部分研究成果特设专栏刊出, 供关注此项技术进展的人士参考。

文章编号: 0258-8013 (2011) 31-0001-11 中图分类号: TM 85 文献标志码: A 学科分类号: 470-40

气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压研究的新进展

陈维江¹, 颜湘莲², 王绍武¹, 王承玉², 李志兵², 戴敏³, 李成榕⁴,

刘卫东⁵, 陈海波¹, 张乔根⁶, 魏光林⁷, 张猛⁸

- (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. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206;
5. 清华大学, 北京市 海淀区 100084; 6. 西安交通大学, 陕西省 西安市 710049; 7. 河南平高电气股份有限公司, 河南省 平顶山市 467001; 8. 西安西电电气股份有限公司, 陕西省 西安市 710077)

Recent Progress in Investigations on Very Fast Transient Overvoltage in Gas Insulated Switchgear

CHEN Weijiang¹, YAN Xianglian², WANG Shaowu¹, WANG Chengyu², LI Zhibing², DAI Min³,
LI Chengrong⁴, LIU Weidong⁵, CHEN Haibo¹, ZHANG Qiaogen⁶, WEI Guanglin⁷, ZHANG Meng⁸

- (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. North China Electric University, Changping District, Beijing 102206, China; 5. Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 6. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, 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), transient enclosure voltage (TEV) and electromagnetic interference (EMI) with steep wave-front and high amplitude

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).

are generated during switching of disconnector in gas insulated switchgear (GIS) with no-load short busbar. The transient voltages cause high stress on the insulation of GIS, equipment connected to GIS and electronic devices connected to GIS enclosure. And the operation of electronic devices is interfered by EMI. VFTO and associated effects have seriously affected the safety operation of equipment in GIS substations. To guide the equipment development and engineering design for ultra high

voltage (UHV) transmission systems in China, the achieved results before 2009 on VFTO measurement, characteristics test, digital calculation and its impact on insulation were summarized in the paper. And the achievements on measurement and simulation of VFTO within UHV GIS by State Grid Corporation of China were described. Finally some subjects of VFTO in UHV GIS to be deeply studied were proposed. The transmitting characters and simulation model of VFTO should be emphasized, including the insulation properties and its mechanism under VFTO. All the achievements provide important reference to master thoroughly the characteristics of VFTO in UHV GIS and to guide the switching of GIS.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); gas insulated switchgear (GIS); very fast transient overvoltages (VFTO); transient enclosure voltage (TEV); disconnecter switch (DS); electromagnetic interference (EMI)

摘要: 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中的隔离开关操作空载短母线会产生陡波前、高幅值的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)、瞬态壳体电位和电磁干扰,对GIS及其连接的具有绕组的设备、与壳体连接的二次设备绝缘产生危害,干扰二次设备工作,严重影响设备的安全运行。对2009年前国内外在VFTO测量方法、特性试验、数字仿真和对绝缘影响以及外部VFTO方面的研究状况进行了综述。概要总结了国家电网公司在特高压GIS中VFTO实测及仿真研究方面取得的新进展,提出了特高压GIS中VFTO需要深化研究的内容,即重点关注VFTO的传播特性与仿真建模,VFTO下的绝缘特性和机制研究,以期全面掌握特高压GIS中VFTO特性,对特高压输变电设备的研制、工程设计和运行提供依据和有益的参考。

关键词: 特高压; 气体绝缘开关设备; 特快速瞬态过电压; 暂态壳体电位; 隔离开关; 电磁干扰

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)具有结构紧凑、占地省、易于维护等优点,在110kV及以上电网中得到了广泛应用,中国特高压交流输电系统全部采用GIS设备。GIS变电站中,断路器、隔离开关和接地开关操作以及发生单相接地短路故障都会产生特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO),其中隔离开关操作是其产生的主要原因。VFTO具有幅值高、波前陡、频率高和多次连续脉冲的特点,对GIS及其连接的绕组类设备(如变压器)绝缘有重要影响;同时,它也会在GIS外壳与外部引线连接处产生瞬态壳体电位(transient enclosure voltage, TEV),引起二次设备

绝缘和人身安全问题,并对测量控制设备产生电磁干扰,造成二次设备的误动作。因此,VFTO已成为国内外研究人员关注的焦点。

针对GIS的产品设计,20世纪80年代开始国外一些厂商对超高压系统中隔离开关操作产生的VFTO现象进行了大量研究,设计了VFTO测量系统,采用模拟试验和数字仿真方法分析VFTO的特性、对设备绝缘的影响和对二次设备的电磁干扰等,提出了隔离开关加装阻尼电阻抑制VFTO的措施^[1-16]。国内对500、750kV GIS变电站的VFTO进行了仿真计算,结合750kV输电工程调试进行了实测^[17-27]。国外对VFTO的研究极少涉及1000kV系统,只有日本对特高压GIS的VFTO进行了少量试验研究^[28-29],中国对特高压交流试验示范工程开展了VFTO的仿真计算^[30-31]。

随着电压等级提高,GIS设备的雷电冲击耐受电压(lightning impulse withstand voltage, LIWV)与VFTO间的裕度减小,特高压系统更为突出。在中国着力推进特高压骨干网架建设的形势下,研究特高压GIS的VFTO特性及其影响显得尤为必要和迫切。为此,国家电网公司2009年立项开展“特高压GIS/HGIS设备VFTO实测及仿真研究”(以下简称特高压VFTO项目),对特高压系统的VFTO测量、仿真及VFTO下的绝缘特性、TEV和电磁干扰等进行了研究,取得了阶段性进展。

本文全面总结国内外在VFTO测量方法、特性试验、数字仿真、VFTO对绝缘的影响、外部VFTO的研究状况和特高压VFTO项目的研究进展,分析VFTO研究存在的不足,结合中国未来特高压电网的建设需求,提出特高压VFTO深化研究的内容,以期全面掌握特高压GIS中VFTO特性,进一步对特高压输变电设备研制、工程设计和运行提供依据和有益的参考。

1 VFTO产生机制

GIS中隔离开关操作空载短母线时,由于触头运动速度较慢,造成隔离开关断口间隙多次重击穿,产生陡变的行波,在GIS波阻抗变化的节点发生多次折反射和叠加,形成VFTO。

图1给出了隔离开关分闸产生VFTO的原理,图中: U_s 为电源电压值; U_1 为残余电压值; U_p 为VFTO幅值。对于最严重情形,假定在 $U_s=1.0\text{pu}$ 、

$U_1 = -1.0 \text{ pu}$ 时隔离开关触头间隙击穿，理论上计算得到的 U_p 最大值接近或超过 3.0 pu 。仿真和试验结果表明，VFTO 幅值的范围一般为 $1.5 \sim 2.8 \text{ pu}$ 。VFTO 上升时间短，少至数 ns，主要频率为几 MHz 至几十 MHz，最高频率可达 100 MHz 。隔离开关操作过程中发生的重击穿次数与操作速度有关，速度高，则次数少；反之则次数较多。重击穿次数一般为十几至几十次。

GIS 中隔离开关操作时，在高压导体(杆)与外壳之间产生的陡波前过电压，称为内部 VFTO。该电压波在传播时，由于在外壳与电缆或架空线路的连接处(节点)的折反射，在 GIS 壳体外产生 TEV 和电磁干扰，统称为外部 VFTO。内部 VFTO 对 GIS 及其连接的具有绕组的设备绝缘有重要影响，外部 VFTO 则危害与壳体连接的二次设备绝缘，或对二次设备产生电磁干扰。

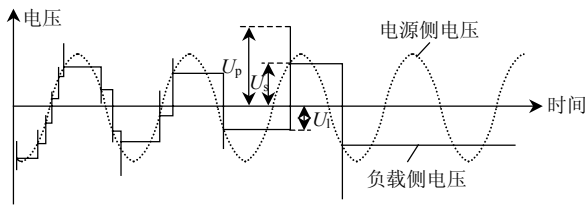


图 1 VFTO 产生机制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VFTO generation mechanism

2 VFTO 的测量方法

2.1 概述

VFTO 现象复杂，随机性强，主要应通过试验获取其特性。为测量到准确的 VFTO 波形，需要先研究 VFTO 的测量方法。

2.2 国内外研究状况

加拿大、日本、德国和瑞士等国家较早地开展了 VFTO 测量方法的研究，研制了手孔式、预埋环型电容传感器和电场探头的 VFTO 测量系统，并应用于实验室试验和现场实测^[32-35]。中国在 20 世纪 90 年代也研制了手孔式电容传感器，应用于 252 kV 试验回路的 VFTO 测量^[36]；21 世纪初对预埋环型电容传感器测量系统进行了初步探索；提出了变压器或高压并联电抗器套管末屏测量方法，在 750 kV 工程调试中对 VFTO 进行了实测^[24-25]。

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 3 种。

1) 电容传感器法的测量原理如图 2 所示。 C_1 、

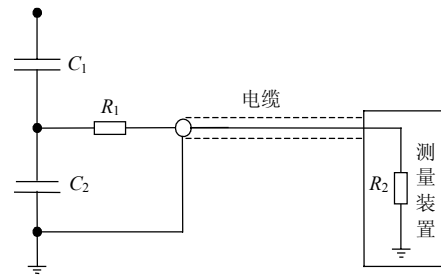
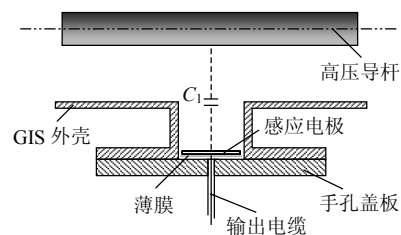


图 2 电容传感器法测量原理

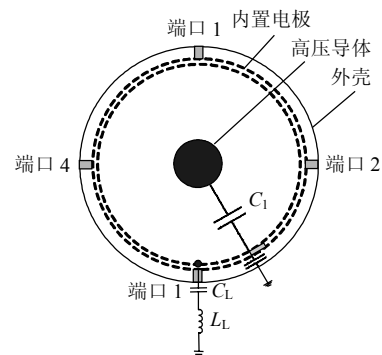
Fig. 2 Measurement principle of capacitive sensor

C_2 组成电容传感器， R_1 为电缆的匹配电阻，测量装置包括示波器、缓冲放大器和触发电路等。传感器、匹配电阻、电缆和测量装置共同构成测量系统。电容传感器测得的信号通过电缆输入测量装置进行采集存储。电容传感器法测量系统的频响特性与测量装置的输入阻抗 R_2 有关，需设计合适的 R_2 以获得 VFTO 测量所需的频率范围。

电容传感器有手孔式和预埋环 2 种结构型式，如图 3 所示。手孔式电容传感器通过在 GIS 外壳上开孔安装平板电极，与 GIS 高压导杆构成的电容 C_1 为高压臂，与壳体构成的电容或外接电容 C_2 为低压臂；预埋环电容传感器用预埋于盆式绝缘子中的内屏蔽电极与高压导杆构成电容 C_1 ，外接电容 C_2 形成电容传感器，图 3(b)中的 C_L 、 L_L 为外接电路。



(a) 手孔式传感器



(b) 预埋环传感器

图 3 手孔式和预埋环传感器

Fig. 3 Porthole sensor and embedded ring sensor

加拿大研制了测量频率范围分别为 1 Hz~100 MHz 和 100 kHz~500 MHz 的 2 种手孔式电容传感器测量系统, 平板电极直径为 6~25 cm, 用电压 1 kV 的工频信号和上升时间为 700 ps 的阶跃波进行标定, 并应用该测量系统对 138 和 500 kV GIS 变电站中隔离开关操作产生的 VFTO 进行了实测^[33]。中国研制的手孔式电容传感器测量系统用方波发生器进行了标定, 频率范围为 3 Hz~38 MHz, 在实验室对 252 kV 隔离开关操作产生的 VFTO 进行了测量^[36]。日本东芝公司研制了预埋环电容传感器测量系统, 主要用于其产品中的 VFTO 测量, 最高测量频率为 10 MHz^[34]。

2) 电场探头法可用于测量 GIS 的外部 VFTO, 球状探头被放置在测量点附近, 感应电场被转换为瞬态电压信号, 通过光纤系统传输至示波器, 频率可达 100 MHz, 德国和瑞士尝试用该测量系统对 420 kV 系统的外部 VFTO 进行了测量, VFTO 最高频率为 12 MHz^[35]。该传感器分压比受变电站设备布置等环境条件影响较大, 须进行现场标定, 但实施较困难。

3) 套管末屏法也是采用电容分压原理, 在变压器或高压并联电抗器出线套管的末屏处接入二次电容, 形成电容分压器测量 VFTO, 但需采用反卷积方法还原测量信号, 测量精度较低, 且测点受限。中国在 750 kV 工程调试中用该方法对 VFTO 进行了测量^[24-25]。

上述情况表明: 国外研制的手孔式电容传感器的性能指标较高, 国内研制的手孔式电容传感器测量频率范围偏低, 这些电容传感器测量系统均未进行高压标定, 难以确保 VFTO 测量结果的准确性; 预埋环电容传感器测量系统的测量带宽较低, 电场探头法的测量标定受现场环境影响较大, 套管末屏法的测量精度较低且测点受限, 后 3 种方法在 VFTO 测量中应用较少。

2.3 特高压 VFTO 项目进展

特高压 VFTO 项目对电容传感器的测量方法进行了系统研究, 研制出了性能先进的手孔式电容传感器测量系统及高压标定装置, 综合指标达到了国际领先水平。高压标定装置输出电压的幅值为 300 kV, 波前时间小于 5 ns。用该装置标定了测量系统, 在试验现场对测量系统进行了多次工频、雷电和直流放电标定, 结果表明测量系统带宽为 0.1 Hz~

100 MHz, 分压比稳定。采用开关动作过程中产生的高频辐射信号作为触发控制信号, 研制了光纤快速同步触发装置, 可同步触发、远程控制多测点示波器, 充分利用示波器的存储深度, 实现了 VFTO 全过程的可靠捕捉。

在特高压交流试验基地的特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路中, 应用该测量系统对 2 000 余次隔离开关操作产生的 VFTO 进行了测量。分析表明, 手孔式电容传感器测量系统的测量结果与理论分析吻合, 数据可信。

特高压 VFTO 项目对预埋环电容传感器测量系统也进行了研究, 经信号发生器标定, 测量系统的最高频率为 12 MHz。在特高压交流试验基地的现场测量表明, 该测量系统在高频性能方面不能满足要求。

通过对国内外研究现状的分析可知, VFTO 测量方法还需开展深入的研究, 如预埋环电容传感器测量系统的高频性能提升, VFTO 测量系统的标准化、工业化和现场应用可靠性等。

3 VFTO 特性试验

3.1 概述

VFTO 特性是 GIS 绝缘配合的基础, 也是 GIS 隔离开关优化设计的关键影响因素, 试验是直接获得 VFTO 特性的主要手段, VFTO 特性的试验研究是国内关注的重要问题。

3.2 国内外研究状况

英国、日本、瑞典、巴西和南非等国家对于超高压系统的 VFTO 特性进行了实验室试验和少量的现场实测, 分析 VFTO 的影响因素^[1-6]。国内在 252 kV 试验回路中进行了 VFTO 研究^[36], 结合 750 kV 输电工程调试对 VFTO 进行了现场实测^[23-25]。

1) 实验室试验。

为优化设计 GIS 产品, 国内外一些厂商和科研机构在实验室建立 VFTO 试验回路, 对 VFTO 特性进行了大量的试验研究。如 20 世纪 80 年代英国 NEI Reyrolle 公司设计了 420 kV GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 模拟试验平台, 进行了 30 次隔离开关操作。测量结果表明, 隔离开关合闸过电压水平为 1.3~2.1 pu, 分闸过电压范围为 1.4~1.7 pu, 分闸后负载侧的残余电压为 -300~300 kV^[4]。西安高压电器研究所于 20 世纪 90 年代初建立了 252 kV GIS 试

验回路，对隔离开关进行了 15 次合分操作，测量到的 VFTO 上升时间为 18~28 ns，频率为 9~14 MHz，最大值为 1.775 pu^[36]。

1988 年，CIGRE 总结国际上 VFTO 特性试验的研究成果，出版了 VFTO 研究的技术专论^[37]。在此基础上，IEC 制定了相关标准，提出了能产生相对严重 VFTO 并用于隔离开关带电操作考核的典型试验回路，如图 4 所示^[38-39]。图中， U_1 为交流电源， U_2 为直流电源， C_1 为电容，DT 为被试隔离开关，DA 为辅助隔离开关，为使试验回路产生相对严重的 VFTO， d_2/d_1 应满足 0.36~0.52，其中 d_1 为 DT 到套管的母线长度， d_2 为 DT 与 DA 连接母线的长度。目前，该回路也被用作试验研究 VFTO 特性的典型回路。

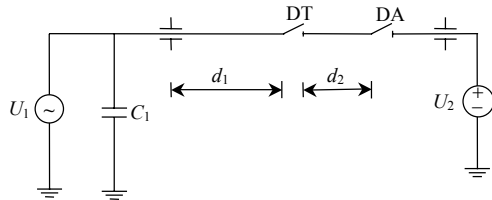


图 4 隔离开关带电操作考核的试验回路

Fig. 4 Test circuit of DS live assessment

参考图 4，日本建立了实验室的 VFTO 模拟试验回路，对 110 kV 隔离开关带阻尼电阻操作产生的 VFTO 进行了一些试验研究^[28-29]，表明阻尼电阻可有效限制 VFTO。

2) 现场实测。

现场实测能得到实际的 VFTO 波形，国内外在实际工程调试中进行了少量的 VFTO 实测。

巴西对 500 kV Grajau GIS 变电站中隔离开关操作在变压器上产生的过电压进行了测量，过电压上升时间为 6~20 ns，幅值为 0.3~0.46 pu^[1]。为验证 VFTO 仿真模型和计算方法的正确性，南非对 765 kV 示范工程中的 VFTO 进行了实测，得到了 VFTO 的幅值和频率特征^[5]。

中国在 750 kV 输电工程调试时，用套管末屏法对银川东变电站的隔离开关操作产生的 VFTO 进行了测量，最大过电压为 763 kV，低于设备的 LIWV，VFTO 的最高频率为 1.75 MHz^[24]。

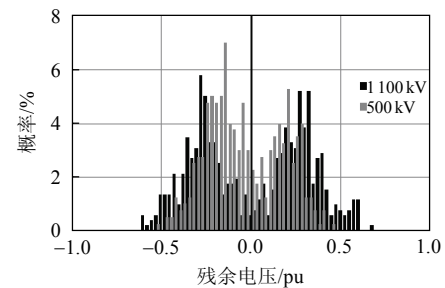
3) 影响因素。

隔离开关操作速度是影响 VFTO 的重要因素。阻尼电阻是限制 VFTO 的主要手段。目前国外对抑制 VFTO 有 2 种方案：ABB 认为操作速度慢，残

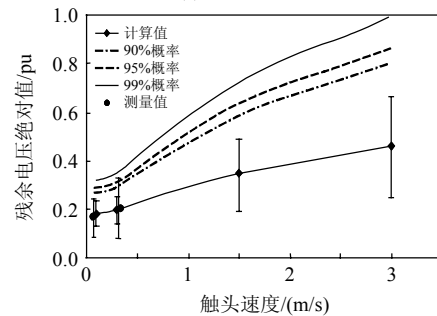
余电压低，VFTO 幅值也低，不需要采用阻尼电阻；东芝公司则认为操作速度快，重击穿次数少，对于高幅值的 VFTO 可采用阻尼电阻进行限制。

ABB 对慢速隔离开关的实测结果表明，99% 的残余电压为 0.4 pu 左右，500 和 110 kV 隔离开关操作产生的残余电压概率分布如图 5(a) 所示，图中接近对称分布的残余电压是由隔离开关两侧分别施加电源电压产生的残余电压组合而成的；图 5(b) 为操作速度对残余电压的影响，随着操作速度提高，残余电压增加^[32]。

东芝公司提出的隔离开关安装阻尼电阻限制 VFTO 的措施，如图 6 所示，在开关动作过程中，



(a) 残余电压分布



(b) 操作速度的影响

图 5 残余电压分布及隔离开关操作速度的影响

Fig. 5 Distribution of trapped voltage and Influence of contact speed on trapped voltage during switching of DS

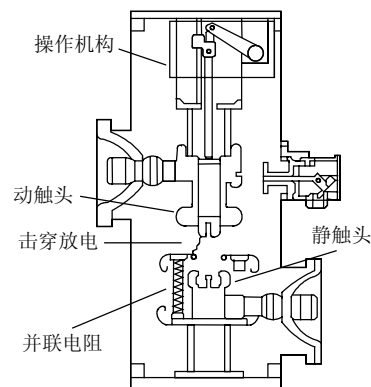


图 6 110 kV 隔离开关带阻尼电阻结构

Fig. 6 Structure of 110 kV DS with damping resistor

阻尼电阻被串入放电回路, VFTO 的幅值及其振荡受到了明显抑制^[32]。

3.3 特高压 VFTO 项目进展

特高压 VFTO 项目首次在国际上建立了 2 个特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路, 涉及 2 种结构型式的隔离开关: 一种是河南平高电气股份有限公司生产的快速隔离开关, 可带/不带阻尼电阻以研究其对 VFTO 的抑制作用; 另一种是西安西电电气股份有限公司生产的无阻尼电阻的慢速隔离开关。试验回路在满足 IEC 62271-102: 2002^[38]标准基础上, 结合特高压交流试验示范工程实际情况, 增设了可调整长度的分支母线, 以研究接线方式和母线长度对 VFTO 的影响, 具有典型的工程实用价值。

在预充/不预充直流电压(以模拟残余电压)的情况下, 对上述 2 种隔离开关进行了 2 000 余次操作用于产生 VFTO 的试验。获得了大量的 VFTO 测试数据, 统计分析得到了 VFTO 的波形特征(峰值、波前时间、陡度、频率、重击穿次数)和 VFTO 幅值概率分布(包括空间分布)。图 7 为快速、慢速隔离开关在不预充直流电压下产生最严重 VFTO 测点的最大 VFTO 概率分布。结果表明, VFTO 最大值为 2.23 pu, 主要频率范围为 6~8 MHz, 最高频率约

60 MHz, 隔离开关带阻尼电阻可将 VFTO 最大值降至 1.33 pu。

综上所述, 国外对特高压 GIS 特性的试验研究成果甚少。特高压 VFTO 项目虽已取得大量的实测结果, 但仍需深化对 VFTO 影响因素的研究, 包括接线方式、母线长度、隔离开关操作速度等, 并开展试验回路连接油气套管和变压器、电流互感器(current transformer, CT)、电压互感器(voltage transformer, VT)的 VFTO 特性试验研究。

4 VFTO 数字仿真

4.1 概述

VFTO 与 GIS 运行接线方式密切相关, 难以通过试验得到各种方式下的 VFTO 特性, 数字仿真是研究 VFTO 特性的重要方法, 国际上对 VFTO 仿真方法给予了高度关注。

4.2 国内外研究状况

1) 仿真模型与方法。

国内外对 GIS 设备元件建模进行了研究^[2], 但对隔离开关的电弧模型研究甚少。在通常的 VFTO 计算中, 变压器采用等值入口电容模型、带损耗的高频参数模型或以线圈为单元的变压器等值回路。GIS 管母为无损传输导线模型。CT、VT 和盆式绝缘子可看成集中对地电容。电容型套管等效为分段传输导线, 充气套管由波阻抗和对地电容构成。断路器合闸状态等效为传输导线模型, 分闸状态等效为多个断口电容和对地电容的组合。避雷器采用非线性高频参数模型。架空线路等效为波阻抗。

隔离开关分闸状态用断口电容和对地电容来表示, 合闸状态等效为传输导线模型。采用小电阻或时变电阻描述弧阻, 未考虑隔离开关的间隙击穿、高频电弧熄灭、介质恢复和多次击穿过程的相互作用, 可能对 VFTO 的计算结果产生较大影响。在研究 1 100 kV 隔离开关 VFTO 特性时, 日本提出了击穿电压曲线, 如图 8 所示。在未考虑高频电弧特性情况下, 对多次重击穿过程进行了仿真计算^[40]。

目前, VFTO 计算的常规方法是采用 EMTP、Bewley 矩阵、两端口网络和行波法等计算程序, 考虑隔离开关在断口两侧电压反相峰值下发生单次击穿的最严重条件, 来仿真计算 VFTO^[1-6]。

2) 工程计算。

应用 VFTO 仿真模型和方法, 国内外结合输电变电工程, 对 VFTO 进行了大量仿真计算。

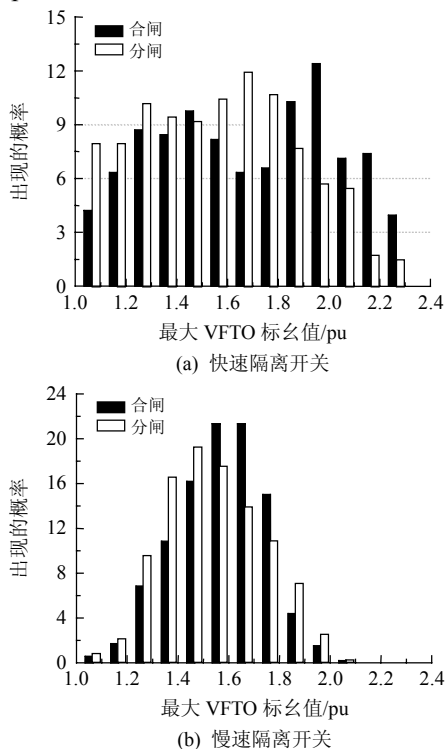


图 7 不预充直流电压下的最大 VFTO 概率分布

Fig. 7 Probability distribution of maximum VFTO magnitude without pre-charging DC voltage

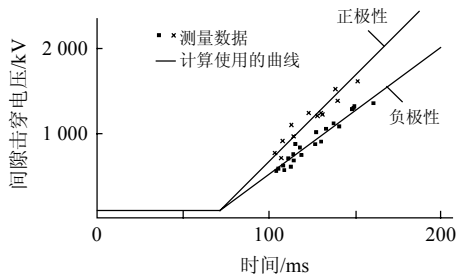


图 8 1100 kV 隔离开关的击穿电压特性

Fig. 8 Striking voltage characteristics of 1100 kV DS

国外对 130~765 kV 系统中的 VFTO 进行了仿真计算^[4-13]，如苏格兰南部电力局计算得到所属的 420 kV GIS 变电站的 VFTO 最大值为 2.58 pu，电压陡度最大值为 38 MV/ μ s，频率成分有 0~3、5~17 和 30~100 MHz^[4]。南非 765 kV 示范工程的计算结果表明，无残余电压的合闸过电压为 1.68 pu，残余电压 0.4 pu 的合闸过电压为 1.95 pu，残余电压 1 pu 的合闸过电压达到 2.36 pu，大多数运行方式下未出现过电压^[5]。

中国对 500 kV 及以上输电系统的 VFTO 特性进行了仿真计算^[14-22,26-31]，以特高压交流试验示范工程为例，不带阻尼电阻情况下，长治 GIS 站的 VFTO 最大值达 3.05 pu，南阳和荆门 HGIS 站 VFTO 最大值为 2.09 pu；采用 500 Ω 阻尼电阻后，长治站的 VFTO 最大值降为 1.39 pu，南阳站 VFTO 最大值降为 1.34 pu，结果表明阻尼电阻可有效限制 VFTO^[26]。

总之，现有 VFTO 仿真计算只考虑断口两侧电压反相峰值和单次击穿的最严重情形，未涉及隔离开关的击穿和电弧特性，与 VFTO 产生机制不尽符合，影响了计算结果的准确性。

4.3 特高压 VFTO 项目进展

针对 VFTO 数字仿真中隔离开关模型较为简单的状况，特高压 VFTO 项目正在开展隔离开关仿真模型的试验和仿真研究，建立了 252 kV GIS 隔离开关 VFTO 的试验平台，通过测量隔离开关断口两端电压、电弧电流、触头开距，调整隔离开关操作速度，研究隔离开关击穿特性、熄弧机制和机械特性对 VFTO 的影响。

为摸索特高频电弧特性，设计了短间隙电弧试验回路，测量电弧电压和电弧电流，统计分析弧阻特性，为建立准确的隔离开关仿真模型奠定基础。

考虑隔离开关的机械特性、击穿特性及多次重击穿过程对 VFTO 的影响，采用并行算法、变步长算法等，进行了 VFTO 全过程的初步仿真。

特高压 VFTO 项目已初步得到了隔离开关的击穿特性和熄弧机制，建立了 VFTO 全过程仿真方法，但仍需深入研究高频电弧特性和设备的高频参数模型，以实现 VFTO 全过程的准确仿真。

5 VFTO 对绝缘的影响

5.1 概述

VFTO 波形陡度大、频率高，GIS 设备绝缘对其较敏感，设备的 LIWV 与计算得到的 VFTO 配合裕度随电压等级升高而减小，研究超/特高压系统 GIS 设备 VFTO 对绝缘的影响是十分必要的。

5.2 国内外研究状况

1) 绝缘特性。

由于 VFTO 具有陡波前、频率高和多次连续脉冲的特点，与雷电冲击(lightning impulse, LI)波形有较大差异，所以国内外一些研究机构和厂商都致力于研制 VFTO 模拟发生装置，以开展 VFTO 下 GIS 的绝缘特性研究。

东京电力公司采用冲击电压发生器加陡化间隙的方案，建立了 300 kV 的 VFTO 发生装置。日立公司研制出 VFTO 发生装置，对直径为 400 mm、SF₆ 间隙距离为 35 mm 的 GIS 管母进行了试验，最高击穿电压达 800 kV。印度高压研究院采用工频试验变压器加限流电阻、高压套管、陡化间隙及高压母线的方案，研制了 VFTO 发生器，对最大距离为 10 mm 的 SF₆ 间隙进行了试验。

意大利、法国和德国等也建立了 VFTO 发生装置，对 SF₆ 短间隙在 VFTO、LI 作用下的绝缘特性进行了试验研究^[7-8]，结果如图 9 所示。对于良好的

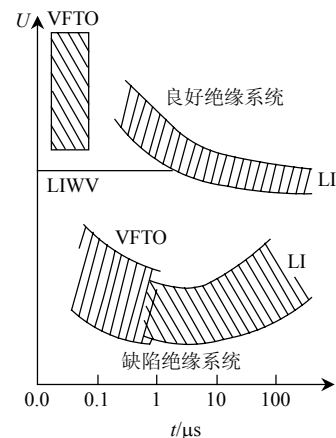


图 9 VFTO 和 LI 下的 SF₆ 绝缘特性

Fig. 9 Insulation characteristics of SF₆ under VFTO and LI

设备绝缘, SF_6 绝缘的放电电压随冲击电压波前时间减小而增加, VFTO 绝缘耐受电压大于 LIWV, 且有一定的裕度。若设备存在缺陷(如表面突起、尖端和悬浮颗粒等), SF_6 绝缘的放电电压会降低, VFTO 绝缘耐受电压小于 LIWV, 甚至低于 LI 放电电压。试验结果还表明, LI、操作冲击(switching impulse, SI)和 VFTO 叠加直流(direct current, DC)分量, 都会引起 SF_6 绝缘的放电电压降低, 随着 SF_6 气体压力和设备电场不均匀度的增加, DC 分量对绝缘的影响增大^[8]。

西安交通大学在 20 世纪 80 年代末开始进行 VFTO 下 SF_6 绝缘特性的试验研究^[41-43], 采用冲击电压发生器加陡化间隙的方案, 产生上升时间小于 50ns 的非振荡或振荡高压陡波模拟 VFTO, 利用非振荡波对距离为 50mm 的 SF_6 同轴电极间隙的伏秒特性进行了试验, 利用振荡波对 17mm 的 SF_6 间隙及模拟绝缘子沿面的放电电流进行了测量, 初步分析了 SF_6 气体间隙在 VFTO 下的击穿机制。

2) 绝缘配合。

由于缺乏大尺度 SF_6 绝缘结构在 VFTO 下的放电电压数据, 工程中 VFTO 下的设备绝缘配合仍以 LIWV 为依据。LIWV 与 VFTO 间需选取一定的配合裕度, 对于 VFTO 较高的情况, 可通过提高 LIWV 或抑制 VFTO, 以达到最优的技术经济性。

中国超/特高压设备的 LIWV 与系统 VFTO 间的裕度系数(二者之比)列于表 1, 随着电压等级的提高, 裕度系数降低。中国建设特高压交流试验示范工程时, 通过对提高 LIWV 和降低 VFTO 进行经济技术比较, 确定 VFTO 的配合系数取 1.15^[26]。在长治 GIS 变电站, 由于 VFTO 较高, 采用了隔离开关带阻尼电阻抑制 VFTO 的方案, 荆门 HGIS 变电站的 VFTO 水平不高, 故未采取 VFTO 限制措施。

表 1 超特高压设备的 LIWV 与系统 VFTO 的裕度系数

Tab. 1 Margin between LIWV of equipments and VFTO of system in EHV and UHV

系统标称电压/kV	VFTO/pu	LIWV/(kV/pu)	裕度系数(LIWV/VFTO)
330	1.5~2.8	1 175/3.96	2.64~1.41
500	1.5~2.8	1 675/3.73	2.49~1.33
750	1.5~2.8	2 100/3.21	2.14~1.15
1000	1.39~2.09	2 400/2.67	1.92~1.28

5.3 特高压 VFTO 项目进展

特高压 VFTO 项目采用冲击电压发生器加陡化

间隙、调波阻抗的方案, 建成了波前时间小于 50ns、幅值达 2.5 MV 的 VFTO 发生装置, 可开展 SF_6 间隙和绝缘子沿面的 VFTO 放电特性试验, 试品的间隙距离达 200mm。目前, 完成了 33~147mm 的 SF_6 球-板间隙和 112~190 mm SF_6 棒-板间隙在 VFTO 与 LI 下的放电电压试验, 得到了不同距离下 SF_6 间隙的 50%击穿电压。球-板间隙的电场分布与 GIS 的类型, 试验结果为其在 VFTO 下的放电电压高于 LI 下的数值, 图 10 为试验得到的 33mm SF_6 球-板间隙在气压 0.5 MPa 下的正、负极性放电电压特性。由于棒-板间隙的电场不均匀度较大, 导致 VFTO 下的放电电压存在较大的分散性。

综上所述, 国内外早期仅在小尺度模型上进行了少量的 VFTO 下 SF_6 间隙击穿和绝缘子沿面闪络特性的试验研究, 所用 VFTO 发生装置的电压幅值较低、波前时间稍长。目前特高压 VFTO 项目研制的 VFTO 发生装置输出的电压虽高达 2.5MV, 波前时间仅为 50 ns 左右, 但为了深化研究 VFTO 对绝缘的影响, 应进一步提升 VFTO 发生装置的性能。研究大尺度或真型 GIS 间隙、盆式绝缘子在 VFTO 和 LI 下的放电特性及机制, 以及变压器在 VFTO 下的匝间电压分布和耐受特性, 建立 VFTO 下的设

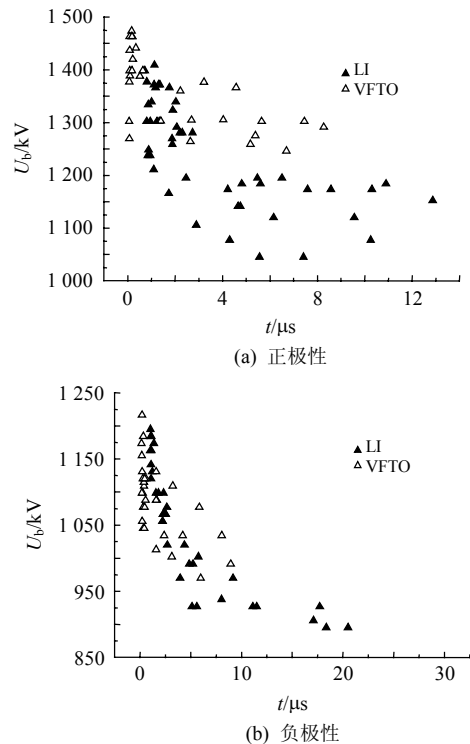


图 10 33 mm SF_6 球-板间隙的放电电压伏秒特性

Fig. 10 Volt-second characteristics of discharge voltage for 33 mm SF_6 ball-plate gap

备绝缘等效考核方法。

6 外部 VFTO

6.1 概述

GIS 隔离开关操作产生的 VFTO 在 GIS 管道内传播,通过耦合和感应,同时在 GIS 外产生 TEV 和电磁干扰等外部 VFTO,对二次设备和人身安全造成危害,需进行实测和仿真研究,并寻求合理的抑制措施。

6.2 国内外研究状况

1) TEV 研究。

瑞士 Energie 公司、加拿大安大略水电研究所和美国电科院对 TEV 的测量方法、仿真计算及其限制措施进行了研究^[9-12]。

文献[9-11]介绍了 72.5~245kV GIS 变电站 TEV 的测量结果。测得的 TEV 幅值为 0.1~0.25 pu(1 pu 为最高运行相电压),主要频率为 5~10 MHz,持续时间达数 ms。用分流器装置测量了 GIS 外壳电流,其中 123kV GIS 的最大外壳电流为 2.5kA。同时对 TEV 进行了仿真计算,比较分析了 GIS 与架空线路、电缆连接等不同终端方式下的 TEV。其中 GIS 与架空线路连接方式下的 TEV 较大,提出了技术经济合理的接地网布置方案。

国外研究结果表明,GIS 接地方式对 TEV 的波形和幅值有较大影响。限制 TEV 的主要方法是在 GIS 壳体与外部引线连接处就近增加有效接地,例如增加连接线数量,缩短接地线长度,优化布置接地网等。

2) 电磁干扰。

澳大利亚、瑞士和意大利研究了 VFTO 在 GIS 周围二次设备中产生的电磁干扰^[13-16],采用电场测量仪或频域测量方法和装置测量骚扰电磁场。瑞士针对某 220kV GIS 变电站进行了干扰电磁场测量,最大值为 38.8kV/m。GIS 外壳附近的电场强度一般为 10 kV/m,磁场强度幅值为数十 A/m。对于 GIS 开关场操作产生的电场强度,美国电科院给出的典型值为 3 kV/m。意大利对 420 kV 变电站进行了 VFTO 干扰电磁场测量,结果表明随着离开 GIS 距离的增加,电场强度降低,但由于波的多次反射,接地侧电场强度的频率增加。电磁场的频率与变电站布置有关,主要为 10~20MHz。

GIS 变电站中二次设备受到 VFTO 电磁干扰的

主要抑制措施为屏蔽和隔离,包括用屏蔽电缆、隔离变换器、光耦元件和光纤隔离骚扰信号等。

国外对外部 VFTO 的研究,主要针对 420 kV 及以下系统的具体变电站开展了一些现场实测,缺乏产生机制和传播特性的仿真研究,未涉及到特高压 GIS 变电站。

6.3 特高压 VFTO 项目进展

特高压 VFTO 项目利用泰克探头作为电阻分压器建立了 TEV 和电磁干扰测量系统,对测量系统进行了幅值和频率标定。在特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路中对 TEV 和二次电缆的干扰电压进行了实测,初步研究了二次电缆屏蔽和接地方式对电磁干扰的抑制效果。

特高压系统的外部 VFTO 有待深入研究的主要内容有:建立 GIS 设备、外壳与接地系统的宽频模型及 VFTO 对二次系统的耦合模型,研究 GIS 内部电磁场与 GIS 设备外壳接地系统、终端的耦合过程以及 VFTO 对二次设备的作用机制,实现外部 VFTO 的准确仿真;研究降低 TEV 和二次设备骚扰电压的有效措施。

7 结论

1) 国内外对超高压系统 GIS 中 VFTO 开展了大量的研究,获得了一些有益的结果。在此基础上,特高压 VFTO 项目进一步对 VFTO 测量、仿真及 VFTO 下的绝缘特性、TEV 和电磁干扰进行了研究,取得了阶段性成果。

2) 特高压 VFTO 项目研制了性能先进的电容传感器测量系统,建立了特高压 GIS 设备 VFTO 试验回路,开展了大量 VFTO、TEV 和电磁干扰试验测量,得到了波形特征及其概率特性,尚需深入研究隔离开关操作速度、分支母线长度对 VFTO 的影响和 GIS 直接连接变压器情况下的 VFTO 特性。

3) 特高压 VFTO 项目建立了 252kV GIS 隔离开关 VFTO 试验平台,初步探讨了隔离开关的击穿特性和熄弧机制,需继续深入研究高频电弧特性,探索场路结合的设备元件建模方法,实现 VFTO 全过程的准确仿真;研究外部 VFTO 传播过程和耦合机制,建立外部 VFTO 的宽频传播模型。

4) 特高压 VFTO 项目研制了幅值达 2.5MV 的 VFTO 发生装置,得到了 33~147 mm 的 SF₆ 球-板间隙和 112~190 mm SF₆ 棒-板间隙在 VFTO 与 LI

下的50%击穿电压,需进一步提升VFTO发生装置性能,试验研究大尺度或真型GIS间隙、盆式绝缘子在VFTO与LI下的放电特性,探讨VFTO下SF₆绝缘放电机理等。

参考文献

- [1] Esmeraldo P C V, Salgado F M, Carvalho. Surge propagation analysis: an application to the Grajau 500kV gas insulated substation[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [2] Working Group 33/13-09. Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substations[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [3] POVH D, Schimitt H. Modeling and analysis guidelines for very fast transient[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 231-238.
- [4] Lewis J, Pryor B M, Jones C J, et al. Disconnecter operations in gas insulated substation overvoltage studies and tests associated with a 420 kV installation[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [5] Grandl J, Eriksson A, Meppelink J, et al. Studies of very fast transient (VFT) in a 765kV substation[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [6] 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.
- [7] Auriol Ph, Buret F, Helle G, et al. Dielectric withstand of SF₆ stressed by steep fronted waves[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [8] Luxa G, Kynast E, Pignini A, et al. Recent research activity on the dielectric performance of SF₆, with special reference to very fast transients[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [9] Noack F, Zahlmann P, Brocke R, et al. Fast transients in the earthing system of GIS[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [10] Aanestad H, Deter O, Lewis J, et al. Substation earthing with special regard to transient ground potential rise, design aims to reduce associated effects[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [11] Buesch W, Stephandies H, Heinemann T. Attenuation of fast transients in gas earthing system[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [12] Fujimoto N, Chu F Y, Harver S M, et al. Developments in improved reliability for gas insulated substations [R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [13] Haydon J M. Experiences in the influence of primary pliant operation on secondary plant and procedures to minimize its effect[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [14] Chevalley F, Sauvain H. Protection of microprocessor based distributed control units in gas insulated substations against electromagnetic interferences[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [15] Anders R, McGrath D. Protection of data communication system against electromagnetic interference in high voltage stations[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [16] Cortina R, Pandini L, Pellegrini G. Evaluation of the electromagnetic interferences on the power plant and substation auxiliary equipment[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [17] 林莘, 孟涛, 徐建源, 等. 快速暂态过电压对断路器中并联电容的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 35-40. Lin Xin, Meng Tao, Xu Jianyuan, et al. Influence of fast transients overvoltage on parallel capacitance of circuit breaker[J]. High Voltage Technology, 2009, 35(10): 35-40(in Chinese).
- [18] 霍大渭, 刘孝为, 王森, 等. 750 kV GIS 中特快速暂态过电压研究[J]. 陕西电力, 2008, 36(7): 12-16. Huo Dawei, Liu Xiaowei, Wang Sen, et al. Study on VFTO in 750 kV GIS[J]. Shanxi Electric Power, 2008, 36(7): 12-16(in Chinese).
- [19] 刘青, 张玉峰, 施围. 800 kV GIS 中变压器的 VFTO 防护的研究[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 122-124. Liu Qing, Zhang Yufeng, Shi Wei. Study on protection of transformer from VFTO in 800 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 122-124(in Chinese).
- [20] 史保壮, 张文元, 邱毓昌. 测量气体绝缘变电站中快速暂态过电压的微分积分方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 59-61, 29. Shi Baozhuang, Zhang Wenyuan, Qiu Yuchang. Differentiating/integrating system for the measure-ement of very fast transient overvoltages in GIS [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 59-61, 29(in Chinese).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] 王森, 李媛媛, 卢江平, 等. 750 kV GIS 变电站特快速暂态过电压的实测研究[J]. 陕西电力, 2009, 37(9): 29-32. Wang Sen, Li Yuanyuan, Lu Jiangping, et al. Field research on very fast transient overvoltage in 750 kV GIS substation[J]. Shanxi Electric Power, 2009, 37(9): 29-32(in Chinese).
- [24] 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暂态过电压[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008. China Electric Power Research Institute, North China Electric University. Switching transient overvoltage by disconnecter in Yinchuandong substation[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2008.

- [25] 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).
- [26] 邵冲, 王钰, 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, Wang 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).
- [27] 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).
- [28] Kobayashi A, Murayama Y, Ohyama 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.
- [29] Yamagata Y, Tanaka K. Suppression of VFT in 1100kV GIS by adopting resistor-fitted disconnecter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.
- [30] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1 000 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 1 000 kV GIS substation[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(11): 5-10(in Chinese).
- [31] 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.
- [32] Riechert U, Neumann C, Hama H, et al. Very fast transient overvoltage (VFTO) in gas-insulated UHV substations [C]//CIGRE Advisory Group Report. Paris: CIGRE, 2010: 56-67.
- [33] Boggs S A, Fujimoto N. Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, 19(2): 87-92.
- [34] Murase H, Ohshima I, Aoyagi H, et al. Measurement of transient voltages induced by disconnect switch operation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1995, 104(1): 157-165.
- [35] Feser K, Pfaff W. A Potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(10): 123-128.
- [36] 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 disconnecter switching small capacitive current in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1992, 28(2): 22-26(in Chinese).
- [37] Working Group 33/13.09. Monograph on GIS very fast transients[R]. Paris: CIGRE, 1988.
- [38] IEC. IEC 62271-102 High-voltage switchgear and controlgear-part 102: alternating current disconnectors and earthing switches[S]. Geneva: IEC Central Office, 2001.
- [39] 全国高压开关设备标准化技术委员会. GB 1985-2004 高压交流隔离开关和接地开关[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
National High-voltage Switch Device Standardization Technical Committee. GB 1985-2004 High voltage AC disconnecter and earthing switch[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004(in Chinese).
- [40] Shimomura I K, Iyoda T. Simulation technology for 1 000 kV power systems[J]. Mitsubishi Electric Advance, 1996(77): 35-41.
- [41] 陆羿, 张镁同, 邱毓昌. 快速暂态绝缘试验中非振荡型陡波的产生[J]. 高压电器, 1992, 28(3): 21-24.
Lu Yi, Zhang Meitong, Qiu Yuchang. Generation of steep waveform without oscillation in fast transient insulation test[J]. High Voltage Apparatus, 1992, 28(3): 21-24(in Chinese).
- [42] 陈庆国, 邱毓昌, 张乔根, 等. GIS 中快速暂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 Technology, 2000, 26(1): 1-5(in Chinese).
- [43] 陈庆国, 张乔根, 邱毓昌, 等. VFTO 下 SF₆ 间隙及绝缘子沿面预放电电流特性[J]. 高压电器, 2000, 26(3): 21-24.
Chen Qingguo, Zhang Qiaogen, Qiu Yuchang, et al. Characteristics of pre-discharging current of SF₆ gap and insulator under VFTO[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 26(3): 21-24(in Chinese).



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;

颜湘莲(1977), 女, 博士, 研究方向为电力系统过电压、电弧试验与建模、SF₆ 开关设备故障诊断等, yanxl@epri.sgcc.com.cn。

(编辑 胡琳琳)