第 49 卷 第 1 期：418-431 高电压技术 Vol.49, No.1: 418-431
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211725

GIS 中快速暂态过电压 VFTO 的抑制研究进展

张文斌，胡　洋
（昆明理工大学机电工程学院，昆明 650504）

摘　要：气体绝缘变电站 GIS 中的隔离开关在分合闸时，会产生快速暂态过电压 VFTO，对 GIS 本身及邻近设备将造成极大危害。综述了国内外现有抑制 VFTO 的研究现状。从抑制 VFTO 的产生、改造 GIS 内部结构及抑制 VFTO 沿输电路径传播 3 个方面，概要总结了各抑制方法的优势及存在的问题。提出了抑制 VFTO 需要深化的研究内容：研制能精准控制开关合闸时间的成套设备，怎么样控制电弧击穿导通的时间，通过微机系统综合控制实现精准相位合闸；探索场路论结合的方式准确仿真加装阻尼母线前后 VFTO 的变化，建立阻尼母线抑制 VFTO 的特性参数关系；磁环抑制 VFTO 的理论，量化分析磁环的物理尺寸及磁材料特性参数对抑制效果的影响，在此基础上进而研究半圆卡扣式磁环对抑制 VFTO 的影响，以便后续在运 GIS 的改造，最后还需进一步研究如何解决磁饱和增加磁损耗增强抑制效果。

关键词：气体绝缘变电站；快速暂态过电压；隔离开关；VFTO；GIS；抑制过电压；特高压防护

Research Progress in Suppression of Fast Transient Overvoltage VFTO in GIS

ZHANG Wenbin, HU Yang
(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: The disconnecting switch in a gas-insulated substation GIS generates a fast transient overvoltage VFTO when it breaks and closes, which will bring great harm to the GIS itself and the neighboring equipment. This paper reviews the current status of existing research on VFTO suppression at home and abroad. The advantages and problems of each suppression method are summarized from three aspects: suppression of VFTO generation, modification of GIS internal structure and suppression of VFTO propagation along the transmission path. The research contents that need to be deepened to suppress VFTO are proposed as follows: developing complete sets of equipment that can accurately control the closing time of the switch; how to control the time of arc breakdown conduction and to realize accurate phase closing through integrated control of microcomputer system; exploring the combination of field and path theory to accurately simulate the change of VFTO before and after adding damping bus, and establishing the characteristic parameter relationship of damping bus to suppress VFTO; by magnetic ring to suppress VFTO theory, quantitatively analyzing the physical size of the magnetic ring and the influence of the magnetic material characteristics parameters on the suppression effect. Thereby, the influence of the semi-circular snap-on magnetic ring on the suppression of VFTO for the subsequent transformation of the GIS in operation is studied. Finally, how to solve the magnetic saturation to increase the magnetic loss to enhance the suppression effect needs to be further researched.

Key words: gas-insulated substation; rapid transient overvoltage; isolating switch; VFTO; GIS; overvoltage suppressing; extra high voltage protection

0　引言

全封闭式 SF_6 气体金属绝缘开关设备(gas insulated substation，GIS)具有可靠性高、结构紧凑、占地面积小、检修维护方便且周期长等优点[1]，因此从 20 世纪 60 年代开始就得到了快速发展并大量使用在电力系统中[2-6]。在特高压变电站隔离开关和断路器开合闸时[7]，由于动静触头两端极大的电势差使电子定向移动发生多次重燃弧，重燃弧在传播过程中经过多次折反射，形成上升沿小于 5 ns、最高频率成分达 100 MHz、幅值可超 3.0(标幺值)的快速暂态过电压(very fast transient over voltage，VFTO)[8-10]。

依据国际大电网会议(CIGRE)A3.22 和 A3.28 等相关研究工作[11-12]，发现 VFTO 对 GIS 本身及二次

基金资助项目：中国南方电网公司科技项目(KTKM2018203)。
Project supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (KTKM2018203).

侧相邻设备危害很大[13]。VFTO 将导致：GIS 内部发生盆式绝缘子闪络、开关壳体放电烧融壳体及二次侧变压器匝间饼间短路变形绝缘损坏等现象[14-15]。真实事件有：1992 年广东大亚湾核电站切合空载变压器导致主变绝缘击穿；巴西 Grajau500 kV 在运期间发生变压器故障油纸套管炸裂；2001 年浙江北仑电厂主变在运受损等[16-20]。还会导致设备误动作、电压电流等测量设备采集数据有误等问题，给电网稳定运行及人身安全带来极大危害[11]。因此研究 VFTO 的抑制方法，保护 GIS 及邻近设备安全成为研究重点，也是维护电力系统安全稳定运行的必由之路。

对抑制方法效果评价的基础是对 VFTO 的准确测量。从 20 世纪 80 年代开始，国内外就有很多机构研究准确 VFTO 测量的方法。国外有日本东京电力公司研制的预埋环式测量系统[21]、印度 IIT 大学与东芝公司的手窗式测量系统等[22]。国内西安交通大学、清华大学、华北电力大学等科研单位，相继研制出了多种内置于 GIS 内部的测量系统：盆式绝缘子预埋环传感器[23]、宽频窗口式传感器[24]、窗口式内置探头结构传感器[25]、介质窗口式快速暂态过电压测量传感器等[26]。测量频带从近乎直流到 300 MHz，测量幅值满足 MV 级电压等级的测量，且这些测量系统都经过大量实测数据验证[27-33]。满足 IEC 60071-1:2019 标准中 VFTO(低频 10 Hz 以内到 100 MHz 频率成分)测量的需求。

国内外学者基于 VFTO 的测量系统研究之上，对 VFTO 进行实测及仿真波形的研究，通过波形特性进而对产生 VFTO 故障原因进行分析，并提出了一系列抑制措施[34]。本文就抑制 VFTO 的情况进行了详细综述。从 20 世纪 80 年代最初由日本学者提出加合闸电阻抑制 VFTO 开始[35]，后续学者相继提出：加装避雷器、控制开合闸速度、加装铁氧体磁环、架空线、改造成阻尼母线、控制隔离开关动作顺序、加装阻波器、加装接地开关、并联变压器入口电容、加 R-C 阻容分压及高频滤波器等抑制措施[36-41]。

根据国内外学者研究的众多抑制措施，可大致分为：抑制 VFTO 的产生、改造 GIS 内部结构抑制 VFTO 以及抑制 VFTO 沿输电路径传播 3 个方面。

1　抑制 VFTO 的产生

VFTO 是由操作 GIS 中的隔离开关和断路器产生。在隔离开关开合闸时，动触头的动作速度较慢产生了燃弧现象，隔离开关上没有灭弧装置，导致在动静触头上产生多次重燃弧。且 VFTO 行波传播过程中，由于线路波阻抗的变化，导致 VFTO 发生多次折反射，最终形成幅值高达 3.0(标幺值)上升沿小于 5 ns 的特性[42]。隔离开关合闸过程电路原理如图 1 所示，其过电压极值计算如式(1)所示[43]。

$$U_{\mathrm{Max}} = KU_{\mathrm{s}} - U_{\mathrm{rc}} \le 3.0 \tag{1}$$

式中：U_{Max} 为产生的最大 VFTO 幅值；K 表示一个系数；U_{s} 为开关合闸前源端的电压；U_{rc} 为负载端累积的最大电压。

部分学者从 VFTO 产生原理出发，遏制 VFTO 的产生或抑制 VFTO 的其他特性。图 1 中 ΔU 为隔离开关两端点压差；L_{y} 为电源的等效电感；C_1 为源端的等效电容；C_2 为负载端的等效电容。

1.1　控制隔离开关操作速度减少 VFTO 的产生

华北电力大学许军、中国电力科学研究院韩彬等人以及诸多国外学者，针对隔离开关分合闸速度快慢对产生 VFTO 的影响，进行了实测及仿真分析[44-46]。对比了回路结构基本一致的平高和西开两个公司的 GIS，只是开关动作速度不同，详细数据如图 2 所示[45,47-48]。发现无论分闸还是合闸，快速隔离开关击穿次数都明显少于慢速隔离开关。

这是由于开关动作较慢，电源侧的 50 Hz 工频电压一定有一个时刻达到峰值，使得隔离开关两端电压差将达到最大，从而击穿 SF_6 绝缘气体，所以开关动作速度越慢 VFTO 的重复击穿次数越多。缩短时间减少击穿次数，从而降低 VFTO 出现概率[48]。

有学者研究发现分合闸速度与产生 VFTO 幅值有关系，如图 3 所示。快速隔离开关相对慢速隔离开关的幅值更大，且各幅值点出现概率更均匀，慢速隔离开关分布集中在 1.6(标幺值)幅值附近[49]。慢速隔离开关产生的 VFTO 最大幅值更小且集中，所以慢速隔离开关也有它的优势[50]。

陈维江等学者就控制隔离开关速度对 VFTO 的影响，进行了大量实验与仿真研究，发现将合适的

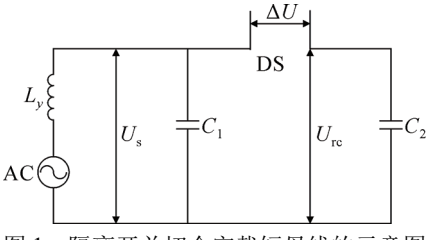
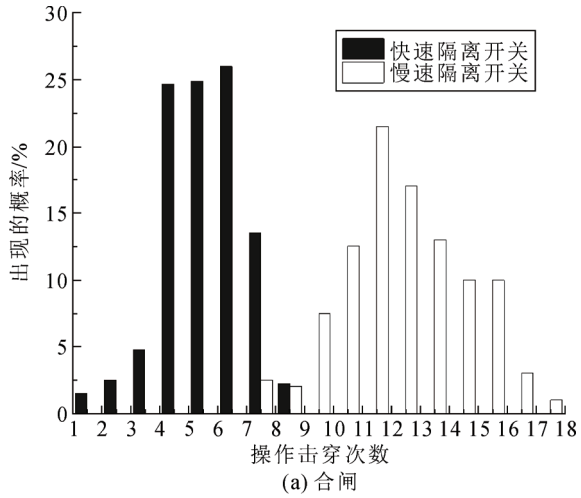
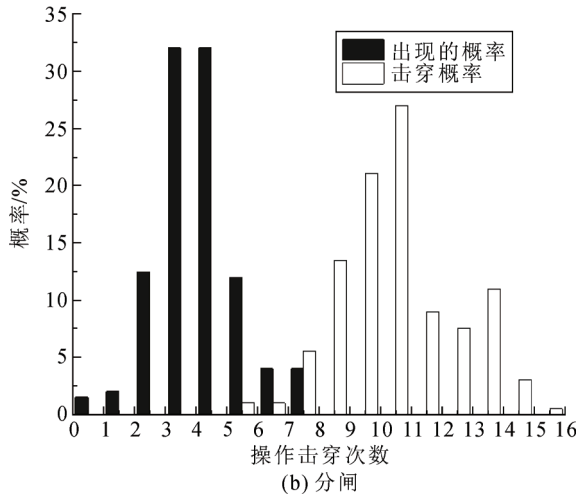


图 1　隔离开关切合空载短母线的示意图

Fig.1　Schematic diagram of disconnecting switch closing no-load short bus



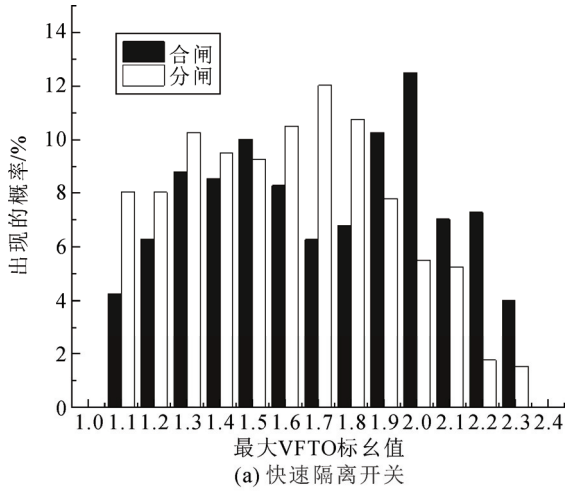
(a) 合闸



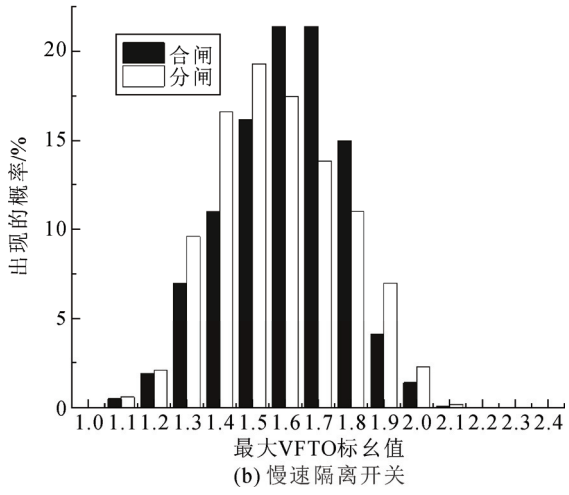
(b) 分闸

图 2 隔离开关不同速度击穿次数

Fig.2 Breakdown times of isolating switch at different speeds



(a) 快速隔离开关



(b) 慢速隔离开关

图 3 不预充直流电压下的最大 VFTO 概率分布

Fig.3 Probability distribution of maximum VFTO under DC voltage without precharging

隔离开关运行速度控制在 0.5~0.8 m/s 之间，能有效抑制 VFTO 幅值[51]。

1.2 隔离开关开合闸操作方式抑制 VFTO 产生

西安科技大学刘青针对某 550 kVGIS，用电磁暂态程序 EMTP，研究了隔离开关 37 种不同操作方式对产生 VFTO 的影响，发现在不同操作方式下会影响操作过电压的幅值，最高和最低幅值标幺值可相差 1.0[52]。西安交大余芳等人，也开展了相应的研究，但都是未发现操作方式对 VFTO 影响的一般规律，需要针对不同的气体绝缘变电站具体分析[53-57]。对每个变电站需要单独分析，操作方式对产生 VFTO 的影响。

1.3 控制隔离开关合闸相位抑制 VFTO 产生

在 20 世纪 90 年代国际大电网会议(CIGRE)，对于相控开关的优缺点进行了评述，通过一些学者研究理论仿真计算及现场试验验证该方法确实有效，已相继投入使用[58-63]。表 1 为国外 1993 年以前

表 1 各国相位控制隔离开关应用台数统计(总数 379)

Table 1 Statistics on the number of phase control high-voltage circuit breakers in various countries (total 379)

国家	澳大利亚	比利时	加拿大	丹麦	芬兰	德国	日本
台数	39	6	5	15	5	3	11
国家	新西兰	挪威	西班牙	瑞典	瑞士	英国	美国
台数	13	2	10	77	114	2	68

国外应用相控开关的数据统计表，根据 CIGRE 研究组 WG A3.07 小组调查，截止 2007 年安装在运的相控隔离开关已经超过 4000 台[64]。可见相控隔离开关应用的增长非常迅速。

隔离开关在合闸时，由动触头向静触头移动的过程。在两者相距越来越近，达到某个距离时，两触头之间的电压差超过 SF_6 气体绝缘强度，此时触头间发生绝缘击穿产生动态电弧[65-66]。由此该技术

核心就是控制开关在最佳电角度分合闸(即源端电压与负载端电势差最小)[67-68]。该技术是由相控开关(同步开关)来实现的，综合微机系统时间、开关合闸机械时间以及电弧导通时间来控制开关合闸时的相角，从而能够有效的抑制操作过电压[69]。

难点在于隔离开关本身机械合闸时间以及电弧绝缘击穿时间都具有离散性，使得真实合闸电弧导通时间的离散度过大，控制误差较大，达不到理想合闸相角。相控法经济技术比传统方法更优，且能简单有效抑制 VFTO，但怎样精确控制隔离开关动作时间以及动态电弧击穿导通时间非常困难，很难真正实现精准相控合闸。

1.4　加装接地开关抑制 VFTO

当隔离开关断开后，残余电荷在母线上衰减很慢，将会导致负载端有一个很大的残压[70]。残压是残余电荷聚集在负载侧母线端部，形成的对地电压。VFTO 的幅值大小跟母线残压的大小成近似线性正比关系[71]。

当隔离开关再次合闸时，在合闸过程中，源端是正弦 50 Hz 交流电，其电压相位一直在变化，相当于一直在一个区间波动的实时电压值。当母线端残压遇到极性相反的源端峰值电压时，形成最大电压差，从而容易产生 VFTO 的幅值更大[70-75]。考虑到最严重的情况是负载侧残压标幺值为−1.0 时，隔离开关在合闸过程中，触头间的电压差标幺值将达到 2.0[16,76-77]。产生最严重的 VFTO 幅值标幺值将超过 3.0，因此加装接地开关释放残余电荷及其重要[78-79]。

根据线路的实际情况，应该在断开隔离开关及断路器后，立马合上后端接地开关。将后端母线及壳体上残余的电荷疏导到地。经仿真计算接地开关能把 VFTO 幅值标幺值抑制到 1.6 以下，抑制效果明显[70,80]。当接地开关闭合时，断路器两断口上的电压差别很小，但在某一特定频率处该电压以及端口对地电压均可能产生谐振过电压[81]。加装后会增加整个回路系统的故障率及其他影响也需要进一步分析[82]，虽然陈禾等学者研究表明不允许单侧设置接地开关[83]，但接地开关最优加装个数及位置也有待深入研究。

2　改造 GIS 内部结构抑制 VFTO

2.1　GIS 内部隔离开关加装阻尼电阻

早在 1986 年日本学者就提出加装电阻来抑制 VFTO 的产生，其简化电路如图 4 和图 5 所示[35]。带电阻器的结构如图 6 所示，由操作机构使动触点向静触点移动，当达到击穿电压阈值时，将击穿 SF_6 绝缘气体介质产生电弧，电弧先流经阻尼电阻，则其幅值和陡度会被抑制。当动触头再继续向前运动与静触头接触后，电阻与动触头的间隙会自动灭弧[40,50,84]。国内外学者研究了各电阻值对抑制效果的影响，发现电阻为 500 Ω 左右时有明显抑制效果，并对电阻进行严谨的选型，考虑到过电压大小、吸收能量大小以及温度等因素，最后电阻能把 VFTO 幅值标幺值抑制在 1.7 以下[85-93]。

图 4 和图 5 中 I_1、U_1 分别为源端传输线上电流电压；I_2、U_2 分别为负载端传输线上的电流电压。+1.0PU 为正一倍源端电压，−1.0PU 为负一倍源端电压。

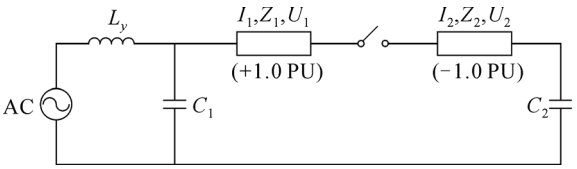


图 4 隔离开关无电阻

Fig.4　Isolation switch with no resistance

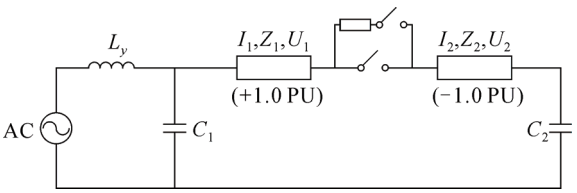


图 5　隔离开关有电阻

Fig.5　Isolating switch with resistance

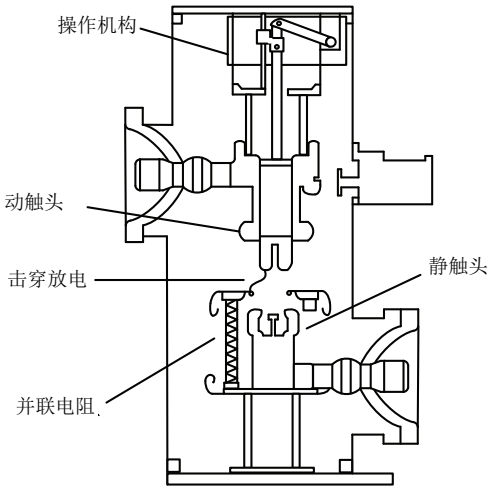


图 6　带电阻器的气体隔离器结构

Fig.6　Gas isolator structure with resistor

但是在静触头上加装电阻，改变原有 GIS 结构，会使内部电场产生畸变，同时也增加了成本及维护维修工作量，事故率也明显上升。鉴于此中国电力科学研究院及西安交通大学王磊、万磊、郭洁等人，在前人基础上开展了取消阻尼电阻的研究，在保证安全的情况下，取消阻尼电阻能提高工程应用的经济性[94-95]。由此可见该方法不一定适用于每个变电站，且存在一些弊端。

2.2 改变 GIS 内部母线长度及断口电容大小

经韩明明等人仿真分析发现：断路器断口电容增大可降低 VFTO 的陡度，但对幅值的影响较小。仿真分析中发现母线长度可一定程度上降低 VFTO 的幅值及陡度特性[96-99]。通过武汉特高压实验基地验证了母线长度对 VFTO 的影响，实验结果表明母线越长 VFTO 最大幅值越大，合适母线长度以成为后期建设新 GIS 的依据[100]。但不方便改造目前在运 GIS。

2.3 GIS 母线加工成阻尼母线

由中国电力科学研究院吴士普等人提出用一种阻尼母线抑制 VFTO 的方法[101]。该阻尼母线是将常规的 GIS 母线管，采用螺旋加工的方式，掏镂空槽，其内侧用环氧支撑筒加不锈钢法兰制作，并在合适位置焊上并联电阻[102]。阻尼母线三维及二维结构如图 7 所示。

阻尼母线抑制 VFTO 等效电路原理如图 8 所示在传输线上串入电感 L_{mx}，并在电感上并联电阻 R_{mx}，Z_{mx} 为阻尼母线等效阻抗[103]。电路中等效电感和电阻将抑制 VFTO 的陡度和幅值[104]。当高频行波经过电感 L_{mx} 时会在端部形成一个高电压，电感两端并联电阻就会在高电压下形成回路，消耗掉高频行波的能量[105]。

同时阻尼母线镂空槽间的间隙在高压下起到间隙放电的作用，消耗 VFTO 的能量。VFTO 行波的本身总能量很小，因此改造的阻尼母线理论上从多方面增加了 VFTO 有功功率损耗，能抑制其幅值和陡度。

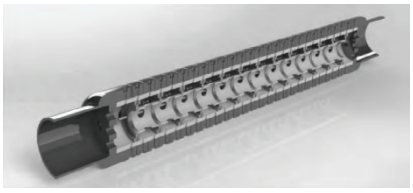
国内学者吴细秀、张圆圆等人对阻尼母线进行仿真计算及实验分析得：阻尼母线等效电感为 9 μH 等效电阻为 50~100 Ω 时抑制效果最佳，能把幅值降低 30%~50%，同时能降低 VFTO 的陡度及 VFTO 击穿次数[102,105-107]。后续可探索场路论结合的方式准确仿真加装阻尼母线前后 VFTO 的变化，建立阻尼母线抑制 VFTO 的特性参数关系，并分析阻尼母线的可靠性。但是阻尼母线需要进行复杂的镂空加工，还需停电在运 GIS 拆装的缺点，不方便后期维护。

3 抑制 VFTO 沿输电路径传播

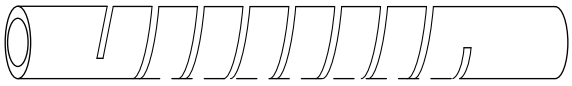
VFTO 产生之后，将通过 GIS 母线及连接二次设备的输电线传播到后端设备，导致后端设备损坏。当产生 VFTO 以及结构改变不了时，抑制它的传播的方法将是最后防线。抑制 VFTO 传播有后续几点。

3.1 避雷器抑制 VFTO 幅值

金属氧化物避雷器能抑制 VFTO 的幅值[108]。如图 9 MOA 暂态电路模型所示，当 VFTO 经过 MOV 时，根据交变场电介质极化作用原理，将形成非线性特性的电导电流、位移极化的瞬态电流及松弛极化的松弛电流 3 部分电流[109-111]。图中 $R(m)$ 为晶界层变化的非线性电阻；C_{ml} 为几何电容；G_m和C_{m2} 为导纳；R_m 为晶粒的固定电阻。



(a) 阻尼母线整体三维结构图



(b) 阻尼母线螺线管二维外观图

图 7 阻尼母线

Fig.7 Damping bus

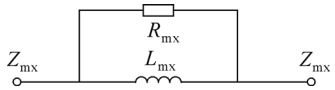


图 8 阻尼母线等效电路模型

Fig.8 Damping bus equivalent circuit model

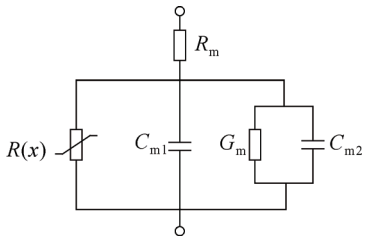


图 9 MOA 暂态模型

Fig.9 MOA transient model

GIS 中装有金属氧化物避雷器时，遇到传播过来的高幅值 VFTO，MOA 就会迅速将形成的 3 种电流导通到地；并且非线性电阻会吸收一部分能量，从而达到对 VFTO 幅值限制的效果[112]。国际上 IEEE、CIGRE、日本等学者，都通过实验验证了 MOA 对 VFTO 有明显的抑制效果[39,113-116]。由于只有安装避雷器附近的设备得到保护，所以需要进一步分析怎样进行不同位置的排列布局[109,117-118]。加装避雷器能对幅值有效抑制[119]，但对陡度没有较好的抑制效果，幅值低但陡度大也会对二次侧设备造成如变压器绝缘击穿等危害。

3.2　磁环抑制 VFTO

国际上由清华大学刘卫东、金立军等学者最早提出用铁氧体磁环来抑制 VFTO，此想法来源于小磁环抑制电器设备中的高频电磁干扰[120-121]。磁环直接加装在 GIS 母线上，对正常的高频 50Hz 交流几乎没有能量损耗，但对 VFTO 这种高频过电压有明显的抑制效果。国内研究者将磁环抑制 VFTO 电路等效为：在电路中串入电感电阻并联的模型，根据磁环的串并联，等效模型也随着电阻与电感的增加模型阶数也会增加，如图 10 和 11 所示[105,120,122-123]。图中 K_d 为隔离开关；R_d 和 L_d 分别为磁环的并联等效电阻和电感；Z_d 为磁环的等效阻抗。

如图 11 所示：R_1、R_2 到 R_i 为磁环分布参数等效电阻；电感 L_1、L_2 到 L_i 为磁环分布参数等效电感；i_1、i_2 到 i_i 为磁环分布参数等效电流。

而国外 ABB 公司等效电路全由一阶等效模型串联构成如图 12 所示[105,124-125]。可见磁环抑制 VFTO 的等效电路模型还没有达到统一的共识。从变压器原理来看可把母线和磁环看成变压器的一次侧，把磁环内部损耗看成变压器的负载损耗，因此用磁环能降低快速暂态过电压的幅值和陡度[126-128]。

国内学者刘卫东、项祖涛、金立军、关永刚、高凡夫等人相继开展了低压模拟等实验，验证了铁氧体磁环对 VFTO 的幅值及陡度有明显抑制效果[129]。磁环试验安装 GIS 示意图如图 13 所示[120-121,130-136]。

在交变磁场中磁环材料单位体积产生的损耗由剩磁损耗 P_c、磁滞损耗 P_h 及涡流损耗 P_e，3 部分组成；式(2)—(5)中：P 为总磁损耗；B_{max} 为最大磁通密度；ξ 和 k 为常系数；W_h 为静磁势能密度；B 为磁感应强度；f 为频率；m、n 为指数变量[134,137-139]。

$$P = P_e + P_h + P_c \tag{2}$$

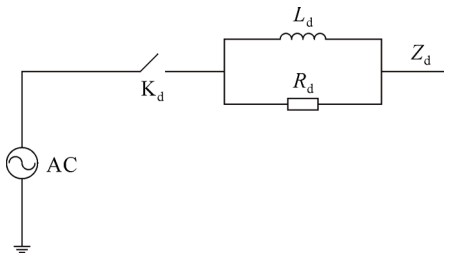
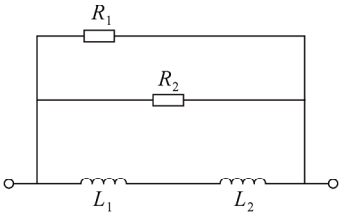
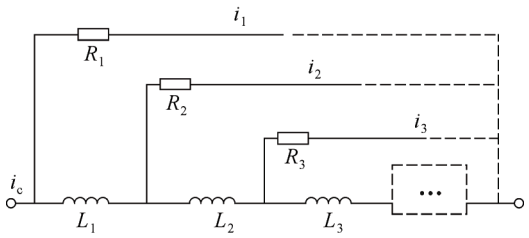


图 10　磁环抑制 VFTO 的一阶等效电路图

Fig.10　The first-order equivalent circuit diagram of magnetic ring suppression VFTO



(a) 二阶电路模型



(b) 高阶磁环电路模型

图 11　二阶及高阶磁环电路模型

Fig.11　Second-order and high-order magnetic ring circuit models

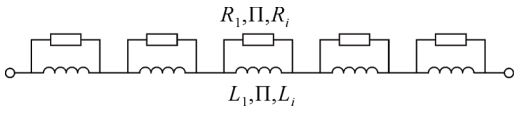


图 12　ABB 公司磁环串联等效模型

Fig.12　ABB company's magnetic ring series equivalent model

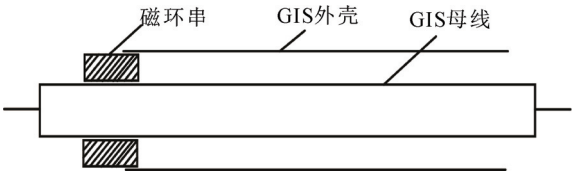


图 13　磁环安装示意图

Fig.13　Magnetic ring installation diagram

$$P_e = \xi B_{max}^2 f^2 \tag{3}$$

$$P_h = W_h f \tag{4}$$

$$P = k f^m B^n \tag{5}$$

从式(2)—(5)可以看出 P_h 和 P_e 随着交流电流的频率升高而升高，即使 P_c 会随频率的升高而降低，但是总损耗 P 还会随着频率的升高而升高。

磁环对应参数的 B 和 f 越高时损耗越大，磁环总损耗 P 越大，抑制效果越好[134,137,140-141]。国际上 ABB 公司曾用纳米晶材料制作磁环展开对 VFTO 抑制效果的实验，ABB 公司把磁环安装在母线导体的内部，工程实现难度更大[105]。其本质上与国内学者提出的思想没区别。综合各种因素磁环应满足：频带宽、高频损耗高、微分磁导率随磁场强度快、饱和磁通密度大和最佳波阻抗匹配等特性。根据等效电感电阻，设计对应磁环物理几何尺寸[137]。

但电流过大时，磁环将受到磁饱和特性的限制[106]。为此 2009 年清华大学又提出在磁环上并联电阻强化集肤效应增加损耗，以弥补磁环磁饱和的问题[142]。并联电阻强化集肤效应的方法，没有对抑制 VFTO 进行量化，且未进行在运 GIS 试验需进一步验证研究成果。

在 2016 年末，国内刘卫东课题组，已经将磁环阻尼装置研制成功，并安装于特高压石家庄站和特高压蒙东站百万伏 GIS 上进行了试运行，经准确测量已经能将 GIS 各位置处的 VFTO 抑制到 1.4(标幺值)以下。这证明了磁环抑制 VFTO 的切实可行，提出了磁环最佳阻尼条件[143-145]。

目前研究磁环抑制 VFTO，都只考虑加装在 GIS 内部母线上，可开展磁环直接加装在 GIS 接地外壳上的研究，若此方法抑制效果很好，安装磁环将无需停电拆装 GIS 且后期维护方便。同时可根据变压器原理，母线与磁环相当于变压器一次侧，可在磁环上绕线圈并串入负载电阻，以此增大二次侧负载损耗，从而增大磁环损耗弥补磁饱和带来的不足，并进行理论及实验研究。

3.3 R-C 滤波器抑制 VFTO

由于 VFTO 的频率很高，所以考虑到把 R-C 滤波器并联到主变旁，重点保护变压器。当 VFTO 到变压器入口时，变压器入口相当于高阻抗通路，而并联滤波器相当于低阻抗通路。VFTO 将通过滤波器疏导到地，与此同时电阻也能衰减 VFTO 部分能量。对于正常工频电流，变压器入口处相对于滤波器呈低阻抗特性，因此工频 50 Hz 将正常传输不受影响。

某供电局李雷等人仿真分析可将幅值抑制下降 15%以上[36]。但山东大学李岩等学者对加装 R-C 滤波器进行了仿真分析，发现此方法仅能将 VFTO 幅值标幺值降低 0.1，抑制效果并不大，因此加装 R-C 滤波器需进一步理论加实验分析论证[71,146]。滤波器仅对后端变压器等设备进行保护，但是不能保护 GIS 设备本身，且该方法在变压器处并联了电容，整个 GIS 系统可能产生更严重的谐振。

3.4 架空线对 VFTO 的抑制

行波在传播过程中会发生一定的畸变和衰减，该衰减由对地电容漏电损耗、导线电阻损耗及电晕损耗等构成。架空地线在强电场的作用下，周围空气将发生电离现象，导致输电线上产生冲击电晕。波头极陡的行波在电晕效果下波头会被拉长，从而抑制 VFTO 的陡度及幅值[147]。

从路的模型来看，架空线相当于在后端回路中串联一个电感 L_{jk}，且架空线与地形成的分布电容的叠加，相当于并联上一个电容 C_{jk}，等效电路如图 14 所示。有学者研究表明架空线能将 VFTO 的陡度降低 50%以上，使得行波陡度不会超过安全阈值[148-150]。清华大学陈水明等学者，仿真分析当电缆取值合适时能将幅值抑制到安全绝缘裕度以下[38,80,149]。但后续经周力行等学者仿真分析，对幅值的影响效果不理想[147]。

有部分学者考虑用 GIL 连接，考虑经济技术性没那么好，所以用架空线更合适[151-153]。架空导线能抑制 VFTO 陡度，但不能抑制 VFTO 幅值，由此可开展复合式抑制的研究，架空线配合避雷器等措施综合防护。

3.5 阻波器抑制 VFTO

浙江大学江学斌等学者在仿真中加装 1 mH 阻波器后，对变压器前 VFTO 的幅值陡度进行分析，发现能将变压器前的幅值降低 8.5%左右，VFTO 波时间由 0.1 μs 增加到 2.5 μs，陡度从 1181.3 kV/μs 降低至 40 kV/μs[154-155]。但将其串入输电回路中，可能会导致整个系统产生更大的谐振电压。

其次阻波器虽然能有效的保护后端变压器，但是阻波器自身也易在首段形成高电压，导致匝间绝

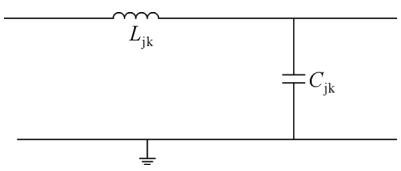


图 14 架空线等效电路模型

Fig.14 Overhead line equivalent circuit model

缘击穿发生输电事故[156]。因此加入阻波器后可能会增加 GIS 停电故障率，也可能带来更严重的谐振过电压，阻波器作为抑制 VFTO 措施尚待考证。

3.6　并联电容抑制 VFTO

在输出端变压器前加装并联电容，相当于增大了入口电容。当变压器入口电容变大时，变压器的等效阻抗将变小，VFTO 传播到变压器时的折射系数变小，因此变压器 VFTO 幅值会明显降低[157]。

有学者仿真建模计算发现变压器入口电容小于 1000 pF 时，VFTO 陡度随着入口电容的增大急剧减小；当变压器入口电容为 10 000 pF 时，相当于在主变上并联 5000 pF 时，主变入口处 VFTO 陡度和幅值分别能降低 33%和 35%[70,154-155,158]。但是这对并联电容本身的制作要求很高，跟阻波器一样也会因为自身的故障率增加 GIS 事故发生[159]，加装后可能会带来更严重的谐振过电压。

4　结论

国内外对抑制快速暂态过电压已经开展了大量的研究，且获得了很好的抑制效果。但现有抑制方法还存在一些问题以及需要进一步研究的点：

1）从 VFTO 的产生来看：隔离开关合闸速度能抑制 VFTO 的幅值，陈维江等学者研究建议最佳合闸时间为 0.5~0.8 m/s；接地开关释放残余电荷后能有效抑制 VFTO 产生，但接地开关断口和断口对地在一定频率下将产生谐振过电压；相控法通过减小合闸电压差能抑制 VFTO 的产生，但机械开关合闸时间及电弧导通时间的离散性，导致实现每次精准合闸难度极大。

2）从改造 GIS 内部结构抑制 VFTO 来看：隔离开关加装阻尼电阻抑制好，但开关结构变复杂增加了整个系统的故障率；合适母线长度能抑制 VFTO 产生，以成为后期建设新 GIS 的依据，但对不方便改造目前在运 GIS；阻尼母线能很好的抑制 VFTO 幅值及陡度，但制造加工非常复杂，且复杂结构带来的可靠性没有明确论证。

3）从抑制 VFTO 沿输电路径传播来看：避雷器仅能抑制幅值；架空线仅能抑制陡度；R-C 滤波器、阻波器、并联电容都存在使整个系统发生谐振，且加装器件本身的可靠性也严重影响输电系统的稳定运行；磁环抑制 VFTO，经过各种验证能有效抑制 VFTO 幅值及陡度，经过对磁环的材料选型、尺寸设计、电晕以及振动可靠性等一系列研究后，磁环已应用于工程实际，磁环的加工制造也相对容易，经济技术性好，不足之处在于需要停运拆装 GIS，安装维护不方便。

4）目前阻尼电阻、滤波器、阻波器、并联电容都存在产生更严重的谐振过电压及本身元器件的可靠性问题；架空线和避雷器只能单方面抑制陡度或者幅值不可取；最佳合闸速度，接地开关、母线长度以逐步应用于工程实际，但抑制效果有限；控制相位合闸、阻尼母线、磁环抑制能很好的抑制 VFTO，但相控法由于开关动作及电弧导通时间的离散性难以控制精准相位合闸、阻尼母线加工制造工艺复杂、磁环的问题在于拆装不便及磁环饱和问题。相对而言磁环的经济技术性好、前面已有很多理论及实验研究基础及成果验证了磁环的可行性，磁饱和问题也还需要学者进一步研究；若将磁环套在 GIS 外壳上有抑制效果，加之研究开口式磁环抑制效果及各种因素的影响，就能做到向卡扣式磁环抑制电子设备中的高频传播信号那样广泛应用；在一定的条件下还能很方便的改造在运 GIS，后期安装维护也很方便，该方向值得深入研究。

参考文献　References

[1] CUK N, NISHIKAWARA K K, MCCRAE G G, et al. Specification and application of SF_6 compressed gas insulated switchgear a utility's point of view[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(6): 2241-2250.

[2] 项　稷. 六氟化硫(SF_6)密封组合电器的安装与调试[J]. 电力建设，1987，8(6)：37-41.
XIANG Ji. Installation and commissioning of sulfur hexafluoride (SF_6) sealed combined electrical apparatus[J]. Electric Power Construction, 1987, 8(6): 37-41.

[3] 陈天祥. 电力系统选用 GIS 的一般问题[J]. 高压电器，1989，25(2)：45-50.
CHEN Tianxiang. General problems of choosing GIS in power system[J]. High Voltage Apparatus, 1989, 25(2): 45-50.

[4] 陈　飞. GIS 设备的发展和应用研究[D]. 杭州：浙江大学，2007.
CHEN Fei. Investigation of GIS development and application[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2007.

[5] MOREIRA D C, NUNES M V A, MOREIRA D D C, et al. Analysis of VFTO during the failure of a 550-kV gas-insulated substation[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106825.

[6] BOGGS S A, FUJIMOTO N. Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, EI-19(2): 87-92.

[7] YOSHIZUMI T, MATSUDA S, NITTA T. Fast transient overvoltages in gis caused by the operation of isolators[M]. CHRISTOPHOROU L G. Gaseous Dielectrics III. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2013: 456-465.

[8] 李云阁，尚　勇，施　荣，等. 750 kV GIS 中 VFTO 现场实测波形分析[J]. 电网与清洁能源，2011，27(11)：25-29.
LI Yunge, SHANG Yong, SHI Rong, et al. Analysis of VFTO waveforms on-site measured on 750 kV GIS[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11): 25-29.

[9] BUROW S, KÖHLER W, TENBOHLEN S, et al. Measurement system for very fast transient overvoltages in gas insulated switchgear[C]// Proceedings of 2013 IEEE Electrical Insulation Conference. Ottawa, Canada: IEEE, 2013: 215-219.

[10] NARIMATSU S, YAMAGUCHI K, NAKANO S, et al. Interrupting performance of capacitive current by disconnecting switch for gas insulated switchgear[J]. IEEE Power Engineering Review, 1981, PER-1(6): 36-37.

[11] 武超飞. 特高压 VFTO 对二次电缆骚扰的耦合机理及抑制方法研究[D]. 保定：华北电力大学，2013.
WU Chaofei, Research on the coupling mechanism and suppression method of UHV VFTO to the secondary cable[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2013.

[12] ITO H, JANSSEN A, AMON J, et al. Technical requirements for substation equipment exceeding 800 KV AC[J]. Electra, 2008, 214: 424-7701.

[13] WU Hengtian, CUI Xiang, LIU Xiaofan, et al. Characteristics of electromagnetic disturbance for intelligent component due to switching operations via a 1100 kV AC GIS test circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2228-2237.

[14] 高有华，宋 佳，杜翰文，等. VFTO 对电力变压器绕组暂态电压分布的影响研究[J]. 电气工程学报，2018，13(10)：6-10.
GAO Youhua, SONG Jia, DU Hanwen, et al. Study of the transient voltage distribution of the transformer windings caused by VFTO[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(10): 6-10.

[15] LEE C H, HSU S C, HIS P H, et al. Transferring of VFTO from an EHV to MV system as observed in Taiwan's No. 3 nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1008-1016.

[16] 李 亮. 考虑母线残余电荷的快速暂态过电压计算分析[D]. 西安：西安科技大学，2016.
LI Liang. Analysis of very fast transient overvoltage considering residual charges on gis bus[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Science and Technology, 2016.

[17] 田 婷. GIS 中快速暂态过电压和暂态壳体电压的研究[D]. 保定：华北电力大学，2013.
TIAN Ting. Study on very fast transient overvoltage and transient enclosure voltage in GIS[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2013.

[18] 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.

[19] 周 浩. 北仑电厂 500 kV GIS 特快速暂态过电压(VFTO)分析[R]. 杭州：浙江大学，2002.
ZHOU Hao. Analysis of very fast transient overvoltage (VFTO) of 500 kV GIS in Beicang power plant[R]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2002.

[20] 电力科学研究院系统所. 广东大亚湾核电站 400/500 kV 开关站操作过电压研究[R]. 北京：电力科学研究院内部报告，1993.
System Institute of Electric Power Research Institute. Research on operating overvoltage of 400/500 kV switchyard of guangdong daya bay nuclear power station[R]. Beijing, China: Internal report of Electric Power Research Institute, 1993.

[21] NOJIMA K, NISHIWAKI S, OKUBO H, et al. Measurement of surge current and voltage waveforms using optical-transmission techniques[J]. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), 1987, 134(6): 415-422.

[22] KUMAR V V, THOMAS J. Capacitive sensor for the measurement of VFTO in GIS[C]// Proceedings of 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IET, 1999: 467.

[23] 张 博，李成榕，孙泽来，等. 测量快速暂态过电压的宽带预埋环传感器的研制[J]. 高电压技术，2011，37(6)：1398-1404.
ZHANG Bo, LI Chengrong, SUN Zelai, et al. Development of broadband sensor using floating ring electrode embedded in a spacer for measuring VFTO[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(6): 1398-1404.

[24] 徐海瑞，李成榕，张 博，等. 宽频带窗口式 VFTO 测量传感器研究[J]. 现代电力，2011，28(2)：1-6.
XU Hairui, LI Chengrong, ZHANG Bo, et al. The research on broadband window VFTO measuring sensor in GIS[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 1-6.

[25] 孙泽来，马国明，郭攀辉，等. 采用内置探头结构的 1000kV 特快速暂态过电压测量用窗口式传感器设计[J]. 高电压技术，2013，39(6)：1426-1433.
SUN Zelai, MA Guoming, GUO Panhui, et al. Design of a VFTO port hole sensor for 1000 kV based on inner probe structure[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1426-1433.

[26] 陈 珉，马国明，李成榕，等. 气体绝缘开关设备介质窗口式特快速暂态过电压测量用传感器研制[J]. 高电压技术，2014，40(3)：897-903.
CHEN Min, MA Guoming, LI Chengrong, et al. Dielectric window sensor development for very fast transient overvoltage measurement in gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 897-903.

[27] 吴 昊，李成榕，徐海瑞，等. 用于 VFTO 测量的 GIS 窗口式传感器[J]. 电工技术学报，2012，27(9)：210-217.
WU Hao, LI Chengrong, XU Hairui, et al. Method for measurement of VFTO based on GIS disk sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 210-217.

[28] 岳功昌，刘卫东，陈维江，等. 特高压气体绝缘组合开关设备中特快速瞬态过电压测量系统的标定[J]. 高电压技术，2012，38(2)：342-349.
YUE Gongchang, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Calibration of very fast transient overvoltage measurement system for ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 342-349.

[29] 岳功昌，刘卫东，陈维江，等. 气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压的全过程测量方法[J]. 中国电机工程学报，2011，31(31)：18-27.
YUE Gongchang, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Measurement methods of very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear with complete process[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 18-27.

[30] 丁卫东，李 峰，张乔根，等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压测量用电容传感器的标定[J]. 中国电机工程学报，2011，31(31)：56-65.
DING Weidong, LI Feng, ZHANG Qiaogen, et al. Calibration of the capacitive sensor used in the very fast transient overvoltage measurement of ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 56-65.

[31] 史保壮，张文元，邱毓昌，等. GIS 中快速暂态过电压的测量[J]. 高电压技术，1998，24(1)：17-18.
SHI Baozhuang, ZHANG Wenyuan, QIU Yuchang, et al. Measurement of very fast transient overvoltages in GIS[J]. High Voltage Engineering, 1998, 24(1): 17-18.

[32] MA G M, LI C R, CHEN W J, et al. Very fast transient overvoltage measurement with dielectric window[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2410-2416.

[33] YUE G C, LIU W D, CHEN W J, et al. Development of full frequency bandwidth measurement of VFTO in UHV GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2550-2557.

[34] 陈 建. GIS 中陡波前过电压特性及影响因素的研究[D]. 保定：华北电力大学，2007.
CHEN Jian. Characteristic of very fast transient overvoltages in gis and analysis of influencing factors[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2007.

[35] OZAWA J, YAMAGIWA T, HOSOKAWA M, et al. Suppression of fast

transient overvoltage during gas disconnector switching in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4): 194-201.

[36] 李　雷，甘凌霞，杨发荣，等. GIS 快速暂态过电压防护措施研究[J]. 变压器，2010，47(9)：30-33.
LI Lei, GAN Lingxia, YANG Farong, et al. Research on protection measure for VFTO of GIS[J]. Transformer, 2010, 47(9): 30-33.

[37] 吕　闻，唐陇军，杨凌辉. 500 kV 特高频暂态过电压的应对措施[J]. 华东电力，2006，34(4)：20-22.
LÜ Wen, TANG Longjun, YANG Linghui. Research on methods against very fast transient over-voltage in the 500 kV grid dispatching of East China[J]. East China Electric Power, 2006, 34(4): 20-22.

[38] 任孝梁，王健生. SF_6 全封闭变电站的侵入波保护[J]. 西安交通大学学报，1981，15(5)：33-42.
REN Xiaoliang, WANG Jiansheng. Overvoltage protection of metal-enclosed SF_6 substations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1981, 15(5): 33-42.

[39] SHIMODA N, TAGUCHI K, NEMOTO T, et al. Suppression of very fast transient overvoltages across insulating flange of 1000 kV GIS[C]// Proceedings of 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IET, 1999: 415-418.

[40] BAN L G, XIANG Z T, WANG S, et al. Estimation of VFTO for GIS and HGIS of China 1000 kV UHV pilot project and its suppressing countermeasures[C]// Proceedings of the International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage. Beijing, China, 2007: 271-285.

[41] TAVAKOLI A, GHOLAMI A, NOURI H, et al. Comparison between suppressing approaches of very fast transients in gas-insulated substations (GIS)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 303-310.

[42] 孙　彤. GIS 中快速暂态过电压的数值计算与分析[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2008.
SUN Tong. Numerical calculation and analysis of very fast transient overvoltage in GIS[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2008.

[43] 周　挺. 特高压 GIS 中快速暂态过电压的特性研究[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
ZHOU Ting. The research of characteristics of very fast transient overvoltage in UHV GIS system[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[44] 韩　彬. 优化隔离开关操作速度抑制特快速瞬态过电压的机理及应用研究[D]. 北京：中国电力科学研究院，2017.
HAN Bin. Study on the mechanism and application of supressing very fast transient overvoltage by optimizing the switching speed of disconnector[D]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2017.

[45] 许　军. 特高压 GIS 快速暂态过电压(VFTO)的测量及分析[D]. 北京：华北电力大学，2011.
XU Jun. Measurement and analysis of very fast transient overvoltage (VFTO) induced by operating disconnector in 1000 kV GIS[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2011.

[46] ZHAN H M, DUAN S F, YAO L Z, et al. Influence of switching properties of the disconnector on very fast transient overvoltage[C]// Proceedings of 2017 IEEE Electrical Insulation Conference. Baltimore, USA: IEEE, 2017: 412-416.

[47] ITO H. Controlled switching technologies, state-of-the-art[C]// Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Yokohama, Japan: IEEE, 2002: 1455-1460.

[48] 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.

[49] 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.

[50] SHU Y B, HAN B, LIN J M, et al. Influence of the switching speed of the disconnector on very fast transient overvoltage[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2080-2084.

[51] CHEN W J, WANG H, HAN B, et al. Study on the influence of disconnector characteristics on very fast transient overvoltages in 1100-kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 2037-2044.

[52] 刘　青. 隔离开关不同操作方式产生的快速暂态过电压[J]. 高压电器，2011，47(4)：17-22.
LIU Qing. Very fast transient overvoltage caused by different switching modes of disconnector[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 17-22.

[53] 苏　帅. 1100kV GIS 中操作及雷电过电压的计算分析[D]. 西安：西安科技大学，2017.
SU Shuai. Calculation and analysis of operation and lightning overvoltage in 1100kV GIS[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Science and Technology, 2017.

[54] 倪　辉，田　禄，马飞越，等. GIS 同频同相试验中产生的 VFTO 及相应安全策略[J]. 高压电器，2021，57(6)：115-122，131.
NI Hui, TIAN Lu, MA Feiyue, et al. VFTO generated in the same frequency and phase test of GIS and corresponding safety measures[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 115-122, 131.

[55] 甄昊涵，曹　祎，沈　华，等. 500 kV GIS 变电站隔离开关操作引起的 VFTO 研究[J]. 华东电力，2014，42(10)：2051-2055.
ZHEN Haohan, CAO Yi, SHEN Hua, et al. VFTO caused by disconnecting switch operation in 500 kV GIS substation[J]. East China Electric Power, 2014, 42(10): 2051-2055.

[56] 余　芳，郭　洁，刘　振，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(增刊 2)：233-235.
YU Fang, GUO Jie, LIU Zhen, et al. Influence of operation modes to very fast transient voltage in 750 kV GIS[J]. Power System Technology, 2008, 32(Supplement2): 233-235.

[57] KUMAR V V, THOMAS J M, NAIDU M S. Influence of switching conditions on the VFTO magnitudes in a GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 539-544.

[58] 钱家骊，袁大陆，徐国政. 对 1000 kV 电网操作过电压及相位控制隔离开关的讨论[J]. 电网技术，2005，29(10)：1-4，8.
QIAN Jiali, YUAN Dalu, XU Guozheng. DIscussion on switching overvoltage in 1000 kV power networks and phase controlled circuit breaker[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 1-4, 8.

[59] 钱家骊. 相位控制高压断路器的动向[J]. 高压电器，2001，37(1)：38-40.
QIAN Jiali. Tendency on phase-controlled hv circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1): 38-40.

[60] 李六零，邱毓昌. 相位控制高压断路器在配电网络中的应用[J]. 高压电器，2002，38(1)：40-42.
LI Liuling, QIU Yuchang. Application of the phase-controlled high voltage circuit breaker in power distribution networks[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(1): 40-42.

[61] 张　帆. 选相投切技术对特高压系统绝缘水平影响的研究[D]. 大连：大连理工大学，2020.
ZHANG Fan. The influence of controlled switching technology on insulation level of ultra high voltage (UHV) system[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2020.

[62] 苏方春，李　凯. 开关设备选相分合闸技术的发展现状[J]. 电气开关，1997(2)：3-5，9.
SHU Fangchun, LI Kai. The development status of switchgear phase-selection breaking technology[J]. Electric Switchgear, 1997(2): 3-5, 9.

[63] LU B X, SHI Y X, ZHAN H M, et al. VFTO suppression by selection

of a combination of initial phase angle and contact velocity[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1115-1123.

[64] 赵相盛. 真空断路器选相控制技术的研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2016.
ZHAO Xiangsheng. Research on controlled switching technology of vacuum circuit breakers[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2016.

[65] 李 辉，刘伟良，徐 浩，等. 特高压直流换流站选相合闸装置现场参数整定及测试方法[J]. 电网技术，2018，42(1)：133-139.
LI Hui, LIU Weiliang, XU Hao, et al. On-site parameter setting and testing method for phase-selection switching-on control device of UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 133-139.

[66] 曾凡兴，赵 谦，余祥坤，等. 变电站高压断路器新型选相控制器研究[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(22)：143-148.
ZENG Fanxing, ZHAO Qian, YU Xiangkun, et al. Study of controlled switching device for high-voltage circuit breaker in substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 143-148.

[67] 刘忠伟. 选相投切特高压线路抑制操作过电压研究[D]. 大连：大连理工大学，2010.
LIU Zhongwei. Research on restraining operation overvoltage by synchronous switching for UHV transmission line[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2010.

[68] 王立辉，钱佳斌，嵇建飞，等. 断路器相控技术抑制操作过电压的有效性[J]. 仪器仪表学报，2016，37(7)：1581-1587.
WANG Lihui, QIAN Jiabin, JI Jianfei, et al. Efficiency of circuit breaker phase-controlled technique for restraining operation overvoltage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1581-1587.

[69] 樊 陈，倪益民，赵国庆. 智能变电站选相合闸方案改进[J]. 电力系统自动化，2016，40(19)：139-144.
FAN Chen, NI Yimin, ZHAO Guoqing. Improvement of phase-selection switching scheme in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 139-144.

[70] 柳伟青，杨 琴，邓传海，等. 550 kV GIS 中快速暂态过电压仿真及防护措施研究[J]. 电气技术，2016(2)：13-17，27.
LIU Weiqing, YANG Qin, DENG Chuanhai, et al. The simulation and protective measures study by simulation on VFTO in GIS[J]. Electrical Engineering, 2016(2): 13-17, 27.

[71] 张 伟. GIS 中快速暂态过电压的测量计算与抑制[J]. 山东电力高等专科学校学报，2006，9(4)：57-60.
ZHANG Wei. GIS medium rapid voltage overvoltage measurement calculation suppression[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2006, 9(4): 57-60.

[72] 李 岩. 特快速暂态过电压特性分析及其数值仿真研究[D]. 济南：山东大学，2015.
LI Yan. Characteristics analysis of very fast transient overvoltageand its numerical simulation study[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2015.

[73] 饶海伟. GIS 中陡波前过电压特性及影响因素的研究[J]. 中国高新技术企业，2011(20)：130-131.
RAO Haiwei. Pre-wavefront voltage characteristics and shadow factor study of GIS[J]. China High-Tech Enterprises, 2011(20): 130-131.

[74] 田 驰. 超、特高压 GIS 中快速暂态过电压(VFTO)及其影响的研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2009.
TIAN Chi. Study on very fast transient overvoltage and its impacts in ehv and uhv GIS[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2009.

[75] BOGGS S A, CHU F Y, FUJIMOTO N, et al. Disconnect switch induced transients and trapped charge in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3593-3602.

[76] 于弘洋. 气体绝缘电站中残余电荷放电对特快速暂态过电压影响的研究[D]. 北京：华北电力大学，2011.
YU Hongyang. Research of the influence of the residual charge on the VFTO in the GIS[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2011.

[77] SZEWCZYK M, KUNIEWSKI M, PIASECKI W, et al. Determination of breakdown voltage characteristics of 1100 kV disconnector for modeling of VFTO in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2151-2158.

[78] IEC. High-voltage switchgear and controlgear-Part 102: alternating current disconnectors and earthing switches: IEC 62271-102[S]. 2022.

[79] KIMBARK E W, LEGATE A C. Fault surge versus switching surge a study of transient overvoltages caused by line-to-ground faults[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(9): 1762-1769.

[80] 陈水明，许 菁，何金良，等. 特快速暂态过电压及其对主变的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2005，45(4)：573-576.
CHEN Shuiming, XU Jing, HE Jinliang, et al. Very fast transient over-voltages and their effects on power transformers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(4): 573-576.

[81] 邵 冲，杨 钰，刘卫东，等. 断路器结构参数对 GIS 中特快速暂态过电压波形的影响[J]. 高电压技术，2011，37(3)：577-584.
SHAO Chong, YANG Yu, LIU Weidong, et al. Effect of breaker structural parameters on very fast-fronted transient overvoltage waveform in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 577-584.

[82] 刘 涛，裴东良，徐瑞娜，等. 1000 kV HGIS 隔离/接地刀闸控制触点频繁烧损事故分析及改进[J]. 华北电力技术，2017(5)：60-65.
LIU Tao, PEI Dongliang, XU Ruina, et al. Analysis and improvement on isolation and grounding switch's control contact malfunction in 1000 kV HGIS device[J]. North China Electric Power, 2017(5): 60-65.

[83] 陈 禾，陈维贤. 高速接地开关抑制超、特高压输电线路潜供电流的研究[J]. 高电压技术，2010，36(7)：1601-1604.
CHEN He, CHEN Weixian. High-speed grounding switches for suppressing the secondary current in EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1601-1604.

[84] YAMAGATA Y, TANAKA K, NISHIWAKI S, et al. Suppression of VFT in 1100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnector[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.

[85] 阮全荣，施 围. GIS 隔离开关带分合闸电阻抑制 VFTO 的研究[J]. 高电压技术，2005，31(12)：6-8.
RUAN Quanrong, SHI Wei. Suppression of VFTO by disconnector with opening and closing resistor in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 6-8.

[86] 项祖涛，丁 扬，班连庚，等. 采用投切电阻抑制特高压 GIS 中特快速暂态过电压[J]. 中国电力，2007，40(12)：31-35.
XIANG Zutao, DING Yang, BAN Liangeng, et al. Suppressing VFTO in UHV GIS with switching resistor[J]. Electric Power, 2007, 40(12): 31-35.

[87] 余 芳，贾 磊，周春雨，等. 750 kV GIS 中隔离开关的分合闸电阻对快速暂态过电压的影响[J]. 电瓷避雷器，2008(4)：20-22，25.
YU Fang, JIA Lei, ZHOU Chunyu, et al. Influence of opening and closing resistor of disconnecting switches to VFTO in 750 kV GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2008(4): 20-22, 25.

[88] 叶 波，尹玉鹏，陈仕龙，等. 特高压 GIS 系统空载长线合闸极快速暂态过电压研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2013，38(1)：59-64，71.
YE Bo, YIN Yupeng, CHEN Shilong, et al. Study on very fast transient overvoltage of closing no-load long lines on ultra high voltage GIS system[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 38(1): 59-64, 71.

[89] 阮全荣，施 围，王 亮. 限制 GIS 中隔离开关操作引起过电压的研究[J]. 高压电器，2006，42(1)：18-20，24.
RUAN Quanrong, SHI Wei, WANG Liang. Study on suppression of switching overvoltage caused by operation of disconnector in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 18-20, 24.

[90] 崔 玉，张周麟，万亦如，等. 1000 kV 特高压 GIS 变电站快速暂

态过电压的研究[J]. 能源工程，2010(6)：10-14.
CUI Yu, ZHANG Zhoulin, WAN Yiru, et al. Study on VFTO in 1000 kV UHV GIS substation[J]. Energy Engineering, 2010(6): 10-14.

[91] 王　磊. 750kV 变电站 GIS 设备 VFTO 特性研究[J]. 中国电力，2015，48(5)：125-132.
WANG Lei. Study on VFTO charaterstics of GIS in 750 kV substation[J]. Electric Power, 2015, 48(5): 125-132.

[92] 魏长宇，孙永恒，张　铎，等. 南阳站 1100 kV HGIS VFTO 仿真[J]. 高压电器，2013，49(7)：35-39.
WEI Changyu, SUN Yongheng, ZHANG Duo, et al. VFTO computation of 1100 kV HGIS in Nanyang substation[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 35-39.

[93] 林　莘，庚振新，徐建源，等. 550 kV 全封闭组合电器快速暂态过电压影响因素分析[J]. 电网技术，2009，33(19)：190-194.
LIN Xin, GENG Zhenxin, XU Jianyuan, et al. Analysis on factors impacting very fast transient overvoltage in 550 kV GIS[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 190-194.

[94] 王　磊，万　磊，王　浩，等. 取消特高压 GIS 变电站隔离开关阻尼电阻的研究[J]. 高电压技术，2015，41(5)：1746-1752.
WANG Lei, WAN Lei, WANG Hao, et al. Study on eliminating damping resistance of disconnector in UHV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1746-1752.

[95] 魏　磊，郭　洁，贾宏刚，等. 750 kV GIS 中隔离开关取消合分闸电阻可行性研究[J]. 高压电器，2016，52(5)：136-140，147.
WEI Lei, GUO Jie, JIA Honggang, et al. Study on the feasibility of removing the opening and closing resistor of disconnecting switch in 750 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 136-140, 147.

[96] 胡　榕. 特高压交流气体绝缘开关设备的电磁瞬态特性研究[D]. 北京：华北电力大学，2016.
HU Rong. Research on the characteristics of electromagnetic transient generated during switching of disconnector in AC ultra high voltage gas insulated switchgear[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.

[97] 冯　鹏. 考虑三相母线耦合的 500 kV GIS 中 VFTO 幅频特性及其抑制措施研究[D]. 郑州：郑州大学，2019.
FENG Peng. Research on VFTO amplitude-frequency characteristics and suppression measures in 500 kV GIS considering three-phase bus coupling[D]. Zhengzhou, China: Zhengzhou University, 2019.

[98] 韩明明，李清泉，刘洪顺，等. 特高压混合无功补偿变电站内特快速暂态波幅频特性[J]. 电网技术，2015，39(12)：3353-3359.
HAN Mingming, LI Qingquan, LIU Hongshun, et al. Amplitude and frequency characteristics of very fast transient in UHV substation with hybrid reactive power compensation[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3353-3359.

[99] 韩明明，陈　博，朱文兵，等. 基于频变传输线模型的 VFTO 幅频特性及抑制效果分析[J]. 山东电力技术，2018，45(9)：1-8.
HAN Mingming, CHEN Bo, ZHU Wenbing, et al. The amplitude-frequency characteristics of VFTO and inhibitory effect analysis based on frequency-dependent transmission line model[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(9): 1-8.

[100] CHEN Weijiang, LI Zhibing, LIU Weidong, et al. Experiment and simulation research on VFTO in UHV GIS[R]. GIGRE A3-102, Paris, France: CIGRE, 2014.

[101] 冯　宇，吴士普，吴细秀，等. 高频过电压抑制导线抑制 VFTO 的试验研究[J]. 高压电器，2019，55(2)：31-38.
FENG Yu, WU Shipu, WU Xixiu, et al. Experimental study on restraining busbar suppressing VFTO[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 31-38.

[102] 吴士普，李　璿，臧　英，等. 550 kV GIS 站 VFTO 计算及抑制方法研究[J]. 高压电器，2018，54(1)：90-96.
WU Shipu, LI Xuan, ZANG Ying, et al. Study on VFTO calculation and inhibition method of 550 kV GIS station[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 90-96.

[103] LI C, WU X, YANG X, et al. A novel method of suppressing VFTO in GIS –spiral tube damping bus-bar[C]// Proceedings of 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2019: 743-747.

[104] 高有华，赵一平，刘树鑫. 1000 kV 气体组合开关中 VFTO 抑制方法研究[J]. 电气工程学报，2019，14(4)：93-97.
GAO Youhua, ZHAO Yiping, LIU Shuxin. Research on the method of VFTO suppression in 1000 kV gas insulated switchgear[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(4): 93-97.

[105] 张圆圆. VFTO 抑制新方法-螺旋管式阻尼母线初步研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.
ZHANG Yuanyuan. A new method of VFTO suppression-preliminary study of spiral tube damping busbar[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2019.

[106] 吴细秀，冯晓彤，胡云枫，等. 考虑最佳 VFTO 抑制效果的螺旋管式阻尼母线电感特性研究[J]. 电网技术，2022，46(7)：2812-2822.
WU Xixiu, FENG Xiaotong, HU Yunfeng, et al. Inductor characteristics of spiral tube damping busbar based on optimal VFTO suppression effects[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2812-2822.

[107] 冯　宇，吴士普，吴细秀，等. VFTO 抑制新方法研究——高频过电压抑制导线[J]. 高压电器，2018，54(10)：90-96.
FENG Yu, WU Shipu, WU Xixiu, et al. New method of restraining VFTO-the high frequency overvoltage restraining busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 90-96.

[108] 王　琦，李六零，胡攀峰，等. 金属氧化物避雷器对气体绝缘开关装置暂态地电位升高的抑制作用[J]. 电力设备，2005，6(8)：12-13.
WANG Qi, LI Liuling, HU Panfeng, et al. Suppression of transient ground potential rise in GIS by using MOA[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(8): 12-13.

[109] 李　宜，张彼德. GIS 中金属氧化物避雷器对 VFTO 抑制研究[J]. 电瓷避雷器，2020(4)：41-45.
LI Yi, ZHANG Bide. Study on the suppression of VFTO by metal oxide arrester in GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4): 41-45.

[110] 林　莘，王　静，徐建源，等. GIS 中金属氧化物避雷器对特快速暂态过电压的影响[J]. 高电压技术，2012，38(10)：2655-2661.
LIN Xin, WANG Jing, XU Jianyuan, et al. Influence of metal oxide arrester on very fast transient over-voltage in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2655-2661.

[111] TAKANASHI M. Swithing surge voltages due to 500kV disconnecting switches operation and performance of lightning arresters[J]. The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1970, 90(8): 1593-1601.

[112] 何金良，刘　俊，胡　军，等. 电力系统避雷器用 ZnO 压敏电阻研究进展[J]. 高电压技术，2011，37(3)：634-643.
HE Jinliang, LIU Jun, HU Jun, et al. Development of ZnO varistors in metal oxide arrestors utilized in ultra high voltage systems[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 634-643.

[113] 李志兵，颜湘莲，王　浩，等. 金属氧化物避雷器在陡波下的试验与模型分析[J]. 高电压技术，2012，38(10)：2698-2706.
LI Zhibing, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Analysis of test and model for metal oxide arrester under steep-front wave[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2698-2706.

[114] 车文俊，张晓星，李明刚，等. 1000 kV GIS 型和瓷套型避雷器研发综述[J]. 高电压技术，2010，36(1)：230-236.
CHE Wenjun, ZHANG Xiaoxing, LI Minggang, et al. Research and development overview of 1000 kV GIS and porcelain housed surge arresters[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 230-236.

[115] 车文俊，宋继军，张晓星，等. 1000 kV 交流特高压 GIS 型和瓷套型金属氧化物避雷器的研发[J]. 电力设备，2007，8(4)：14-18.
CHE Wenjun, SONG Jijun, ZHANG Xiaoxing, et al. R & D of 1000 kV UHVAC GIS and porcelain-clad metal oxide arrester[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(4): 14-18.

[116] MIYACHI I. Insulation coordination for UHV SF6-insulated installation and transmission lines by application of high performance metal oxide surge arrester[J]. CIGRE Paper, 1998.

[117] 余　芳，金　青，郭　洁，等. 750 kV GIS 中金属氧化物避雷器对 VFTO 影响的研究[J]. 电瓷避雷器，2009(3)：31-33，38.
YU Fang, JIN Qing, GUO Jie, et al. Research on the influence of operation modes to VFTO in 750 kV GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2009(3): 31-33, 38.

[118] AVENT B L, PEELO D F, SAWADA J H, et al. Application of 500 kV circuit-breakers on transmission line with MOV protected series capacitor bank[C]// Proceedings of the Cigre 2002 Session. Paris, France: Cigre, 2002.

[119] RAO J V G, AMARNATH J, KAMAKSHAIAH S. Accurate modelling of very fast transient overvoltages in a 245kV GIS and research on protection measures[C]// Proceedings of 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectic Phenomena. West Lafayette, USA: IEEE, 2010: 1-4.

[120] 刘卫东，金立军，钱家骊，等. 铁氧体磁环抑制 GIS 的 VFTO 的可能性[J]. 电工技术学报，2002，17(4)：22-25.
LIU Weidong, JIN Lijun, QIAN Jiali, et al. Possibility of suppressing VFTO in GIS by ferrite rings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(4): 22-25.

[121] 金立军，刘卫东，钱家骊. 铁氧体磁环抑制 GIS 特快速暂态过电压研究[J]. 高电压技术，2002，28(7)：1-3.
JIN Lijun, LIU Weidong, QIAN Jiali. Research on the suppressing VFTO in GIS by ferrite ring[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(7): 1-3.

[122] 马玉晖. VFTO 波形及磁环抑制的研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.
MA Yuhui. Research on VFTO waveform and suppressing method with magnetic-rings[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2017.

[123] 南保峰，刘轩东，冯　磊，等. GIS 中 VFTO 防护措施研究综述[J]. 电瓷避雷器，2017(6)：81-85.
NAN Baofeng, LIU Xuandong, FENG Lei, et al. Review of research on VFTO protective measures in GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(6): 81-85.

[124] SZEWCZYK M, KUTORASIŃSKI K, PAWŁOWSKI J, et al. Advanced modeling of magnetic cores for damping of high-frequency power system transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2431-2439.

[125] SZEWCZYK M, PAWŁOWSKI J, KUTORASIŃSKI K, et al. High-frequency model of magnetic rings for simulation of VFTO damping in gas-insulated switchgear with full-scale validation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2331-2338.

[126] 马　环. GIS 中的快速暂态过电压的抑制机理[J]. 华通技术，2006，25(3)：14-16.
MA Huai. Suppression principal on quick speed transient overvoltage in GIS[J]. Huatong Technology, 2006, 25(3): 14-16.

[127] 于剑标. 利用铁氧体抑制雷电过电压的研究[D]. 南昌：南昌大学，2011.
YU Jianbiao. Use of ferrite inhibition of lightning overvoltage[D]. Nanchang, China: Nanchang University, 2011.

[128] 曲振旭，王巨丰，苏浩益，等. 应用高频磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压和雷电过电压仿真分析[J]. 电瓷避雷器，2012(1)：50-55，60.
QU Zhenxu, WANG Jufeng, SU Haoyi, et al. Analysis and simulation of an approach to suppress very fast transient overvoltage and lightning overvoltage in GIS by high frequency magnetic ring[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1): 50-55, 60.

[129] GUAN Y G, YUE G C, CHEN W J, et al. Experimental research on suppressing VFTO in GIS by magnetic rings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2558-2565.

[130] 项祖涛，刘卫东，钱家骊，等. 用磁环抑制 GIS 的 VFTO 的高电压模拟试验[J]. 电工技术学报，2004(7)：1-3.
XIANG Zutao, LIU Weidong, QIAN Jiali, et al. High voltage simulation tests of suppressing VFTO in GIS by magnetic rings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004(7): 1-3.

[131] 关永刚，张　猛，岳功昌，等. 磁环抑制特高压 GIS 设备中特快速暂态过电压的模拟试验[J]. 高电压技术，2011，37(3)：651-657.
GUAN Yonggang, ZHANG Meng, YUE Gongchang, et al. Simulation test on suppressing VFTO in UHV GIS with Magnetic-rings[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 651-657.

[132] 关永刚，郭珮琪，陈维江，等. 铁氧体磁环抑制 252 kV GIS 中 VFTO 的试验研究[J]. 高电压技术，2014，40(7)：1977-1985.
GUAN Yonggang, GUO Peiqi, CHEN Weijiang, et al. Test study on suppressing VFTO in 252 kV GIS by ferrite magnetic rings[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1977-1985.

[133] 高凡夫，谭向宇，梁　策，等. 应用小磁环加装大磁环抑制 GIS 中 VFTO 的试验研究[J]. 高压电器，2019，55(6)：56-61，69.
GAO Fanfu, TAN Xiangyu, LIANG Ce, et al. Experimental study on suppressing VFTO in GIS with small and large magnetic rings[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 56-61, 69.

[134] 高凡夫. 磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压的研究[D]. 保定：华北电力大学，2018.
GAO Fanfu. Research on suppressing the very fast transient overvoltage in GIS by magnetic rings[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.

[135] 高凡夫，谭向宇，梁志瑞. 铁氧体磁环抑制 550 kV GIS 中的特快速暂态过电压的试验研究[J]. 高压电器，2018，54(10)：132-136，144.
GAO Fanfu, TAN Xiangyu, LIANG Zhirui. Experimental study on suppressing VFTO in 550 kV GIS by ferrite beads[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 132-136, 144.

[136] LIU W D, JIN L J, QIAN J L. Simulation test of suppressing VFT in GIS by ferrite rings[C]//Proceedings of 2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2001). 2001 Asian Conference on Electrical Insulating Diagnosis. Himeji, Japan: IEEE, 2001: 245-247.

[137] 甘祥根，金立军，陈丽红，等. 抑制 GIS 中 VFTO 的铁氧体特性参数分析[J]. 高电压技术，2004，30(9)：24-26.
GAN Xianggen, JIN Lijun, CHEN Lihong, et al. Characterstic parameter analysis on suppressing VFTO in GIS by ferrite[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 24-26.

[138] GAN Xianggen, CHEN Lihong, ZHONG Shuiping, et al. Characteristic analysis on suppressing VFTO in GIS by ferrite[C]//Proceedings of the 2011 International Conference on Software Engineering and Multimedia Communication. Qingdao, China: Information Engineering Research Institute, 2011: 484-487.

[139] HE J X, GUAN Y G, LIU W D, et al. A circuit model of transverse electric eddy-current problems in magnetic rings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 6300904.

[140] 李庆民，吴明雷，张国强. 铁磁性材料在抑制 GIS 高频暂态应用中的仿真分析方法[J]. 电工技术学报，2005，20(11)：30-34.
LI Qingmin, WU Minglei, ZHANG Guoqiang. Simulating and analyzing method for the applications of ferromagnetic materials in suppressing high frequency transients within GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 30-34.

[141] BUROW S, STRAUMANN U, KÖHLER W, et al. New methods of damping very fast transient overvoltages in gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2332-2339.

[142] 刘卫东，董　琴，孙会刚. 强化集肤效应抑制快速暂态过电压[J]. 高压电器，2009，45(6)：12-14，19.
LIU Weidong, DONG Qin, SUN Huigang. Enhancing skin effect for suppression of fast transient overvoltage[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 12-14, 19.

[143] HE J X, GUAN Y G, LIU W D, et al. Design optimization of ferrite rings for VFTO mitigation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1181-1186.

[144] HE J X, GUAN Y G, CHEN W J, et al. Experimental research and simulation on VFTO mitigation by ferrite rings in UHV GIS[J]. IEEE

Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 940-948.
[145] JIN L J, ZHENG Y B, PEN G, et al. Estimating the size of ferrite for suppressing VFTO in GIS[C]// Proceedings of 2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials. Bali, Indonesia: IEEE, 2006: 388-391.
[146] 周育勇. 真空开关操作电容器组引起的过电压及其抑制[D]. 保定：华北电力大学(河北)，2008.
ZHOU Yuyong. Switching overvoltage and its protection when vacuum switch switches off shunt capcitor[D]. Baoding, China: North China Electric Power University (Hebei), 2008.
[147] 周力行，刘家郡，钟笑拳，等. 架空线对 GIS 变电站 VFTO 抑制效果的分析[J]. 电力科学与技术学报，2015，30(1)：41-46.
ZHOU Lixing, LIU Jiajun, ZHONG Xiaoquan, et al. VFTO inhibitory effect analysis of overhead line in GIS substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 41-46.
[148] 赵　琳，叶丽雅，杨　勇，等. 550 kV GIS 隔离开关操作引起特快速瞬态过电压仿真研究[J]. 浙江电力，2018，37(12)：86-92.
ZHAO Lin, YE Liya, YANG Yong, et al. Simulation study on very fast transient overvoltage during operation of 550 kV GIS disconnector[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 86-92.
[149] 邹建华，康　宁，李　成，等. 快速暂态过电压的形成机制与抑制方法[J]. 西安交通大学学报，2005，39(4)：417-420.
ZOU Jianhua, KANG Ning, LI Cheng, et al. Research on mechanism in formation and depression of very fast transient overvoltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(4): 417-420.
[150] 周　浩，李　杨，沈　扬，等. 架空线对入侵超高压变压器的特快速暂态过电压波前陡度的限制[J]. 高电压技术，2013，39(4)：943-950.
ZHOU Hao, LI Yang, SHEN Yang, et al. Limiting the steepness of VFTO invaded wave to the EHV power transformers using overhead lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 943-950.
[151] 梁贵书，陈　建，张喜乐，等. 拉西瓦操 750 kV GIL-GIS 作过电压及其影响因素分析[J]. 华北电力大学学报，2006，33(5)：6-10.
LIANG Guishu, CHEN Jian, ZHANG Xile, et al. Calculation and effects analysis of operation overvoltages in Laxiwa 750 kV GIL-GIS[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(5): 6-10.
[152] 高凡夫，谭向宇. 主变压器与 GIS 之间不同连接方式及长度对入侵 VFTO 的影响[J]. 云南电力技术，2018，46(3)：11-14.
GAO Fanfu, TAN Xiangyu. Influence of different connection modes and length between main transformer and GIS on VFTO[J]. Yunnan Electric Power, 2018, 46(3): 11-14.
[153] 陈梁金，刘　青，赵　峰，等. MOA 对 750 kV GIS-GIL 系统侵入波防护效果的研究[J]. 电瓷避雷器，2005(1)：35-37，43.
CHEN Liangjin, LIU Qing, ZHAO Feng, et al. Study on the protective effect of MOA on lightning intruding waves of 750 kV substation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(1): 35-37, 43.
[154] 梁　樑. 500 kV 钱江 GIS 变电站 VFTO 过电压研究[D]. 杭州：浙江大学，2009.
LIANG Liang. Disquisiton of very fast transient overvoltage in Qianjiang substation[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2009.
[155] 江学斌，梁　樑，陈　光，等. 500 kV GIS 变电站快速暂态过电压及防护措施仿真研究[J]. 能源工程，2010(3)：19-22，27.
JIANG Xuebin, LIANG Liang, CHEN Guang, et al. Simulation study on VFTO and its supressing methods in 500 kV GIS[J]. Energy Engineering, 2010(3): 19-22, 27.
[156] GONG W X, WANG P J, LI Q Q, et al. Simulation of VFTO suppression methods for 1100 kV GIS substation[C]// Proceedings of the 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2019: 987-991.
[157] 贺启飞，郭　洁，郝治国. 110 kV 小型化 GIS 中快速暂态过电压的研究[J]. 电瓷避雷器，2016(4)：88-92.
HE Qifei, GUO Jie, HAO Zhiguo. Study on VFTO in 110 kV miniaturization GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(4): 88-92.
[158] TAVAKOLI A, GHOLAMI A, ALAMUTI M M. Suppression of very fast transients in gas-insulated substation via terminal and capacitance components feasibility study[J]. European Transaction on Electrical Power, 2012.
[159] 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)：2361-2365.
LIN Xin, MENG Tao, XU Jianyuan, et al. Effect of very fast transient over-voltage on shunted capacitor in circuit-breaker[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2361-2365.



张文斌
1976—，男，博士，副教授
主要从事快速暂态过电压测量、快速暂态过电压抑制的研究工作
E-mail: zwbscg@126.com

ZHANG Wenbin
Ph.D.
Associate professor



胡　洋(通信作者)
1993—，男，硕士
主要从事高电压试验技术、快速暂态过电压抑制的研究工作
E-mail: 1002707384@qq.com

HU Yang
Corresponding author

收稿日期　2021-10-26　在线出版日期　2022-02-24　　编辑　陈　蔓