引用格式:淡淑恒,乔顺利.1 000 kV GIS 中特快速暂态过电压的仿真与分析[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):233-240.
Citation: DAN Shuheng, QIAO Shunli. Simulation and analysis of very fast transient overvoltage in 1 000 kV GIS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):233-240.

1 000 kV GIS 中特快速暂态过电压的仿真与分析

淡淑恒[1],乔顺利[2]
(1.上海电力大学电气工程学院,上海 200090)

摘　要:在气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear,GIS)中,隔离开关操作易引发特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage,VFTO)。为模拟并分析此电磁暂态现象及其潜在危害,在传统方法的仅考虑工频过零熄弧逻辑的基础上,考虑高频振荡过零因素,提出详细的熄弧和重燃弧的逻辑判断流程,构建1 000 kV的GIS暂态电路模型,并对其进行仿真分析。研究结果表明,隔离开关重燃弧时,负载侧呈不同宽度的"阶梯状"电压响应,母线末端出现尖峰过电压,但变压器入口处的VFTO幅值未达到绝缘击穿阈值;随着负载侧残余电压升高,燃弧频次也随之增加。相比传统模型,考虑高频振荡过零熄弧的新模型的VFTO燃弧次数增加了40次,其幅值提升0.27 p.u.。该研究可为深入理解GIS中的电磁暂态现象和优化变电站绝缘设计提供参考。

关　键　词:隔离开关;特快速暂态过电压;电弧模型;残余电压
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.023　　**中图分类号**:TM86　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0233-08

Simulation and analysis of very fast transient overvoltage in 1 000 kV GIS

DAN Shuheng[1], QIAO Shunli
(Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In gas insulated switchgear (GIS), very fast transient overvoltage (VFTO) is easily caused by disconnector operation. In order to simulate and analyze this electromagnetic transient phenomenon and its potential harm, the high-frequency oscillation zero-crossing factor is taken into account on the basis of the traditional method considering zero-crossing arc extinguishing logic. A detailed logical judgment process of arc extinguishing and arc reignition is proposed. A 1 000 kV GIS transient circuit model is constructed, and the simulation analysis on the model is carried out. The research results show that when the disconnector reignites the arc, the load side presents a ladder-shaped voltage response with different widths, and the peak overvoltage appears at the end of the bus, but the VFTO amplitude at the transformer inlet does not reach the insulation breakdown threshold. With the increase of residual voltage at the load side, the frequency of arc ignition also increases. Compared with the traditional models, the new model considering high-frequency oscillation zero-crossing arc extinguishing shows that the number of VFTO arc reignition increases by 40 times, and the amplitude increases by 0.27 p.u.. The research provides a reference for an in-depth understanding of electromagnetic transient phenomenon in GIS and optimization of substation insulation design.

Key words: disconnector; very fast transient overvoltage; arc model; residual voltage

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear,GIS)中的高压隔离开关的运动速度较慢,其灭弧性能欠佳。在带电分合闸时,GIS内部会产生具有极短上升时间的特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage,VFTO)[1-5]。该VFTO常呈高幅值、波前较陡、高频与连续多次脉冲的显著特点[6]。相关研究表明,VFTO对GIS和与之相连的绕组设备绝缘等均构成了威胁,严重影响电力系统的稳定性[7]。

收稿日期:2024-07-19;**修回日期**:2025-10-24
基金项目:国家自然科学基金(50577040)
通信作者:乔顺利(1999—),男,硕士,主要从事GIS中VFTO的仿真方面的研究;E-mail: 3131357497@qq.com

VFTO与变电站的结构设计密切相关[8]，通过试验手段精确测定较高电压等级GIS中的VFTO特性，对测量设备在耐压能力、响应速度、分辨率和抗干扰性等方面均提出了极为严苛的要求。因此，利用计算机对其进行仿真计算已成为深入研究VFTO特性的关键途径之一。

目前，构建精确、细致的隔离开关重燃弧模型是VFTO仿真研究的核心问题之一[9]。在搭建电弧模型时，应考虑电磁场与气流场，且须将这二者融合到电弧模型的计算式中。这种模型在理论上符合电弧的起弧原理，但计算机处理这类模型的效率较低，故这类模型较少在仿真时使用。为提高仿真效率，在应用仿真软件ATP-EMTP计算VFTO时，可将电弧的实际燃烧过程用一个电阻值随时间变化的时变电阻来表示。这类模型包含常见的Mayr电弧模型和Cassie电弧模型[10]，但其实用性较差，鲜见其在全过程的VFTO仿真中的应用。文献[11]基于隔离开关动静触头间电弧的燃烧特点，提出了一种改进Mayr电弧模型，但该方法未给出合理的熄弧和燃弧的逻辑判断流程。文献[12]仅采用了单次燃弧模型进行仿真，不能很好反映VFTO的实际传播过程。文献[13]通过仿真软件ATP-EMTP中的控制系统暂态分析模块(transient analysis of control systems，TACS)元件设置电弧熄灭和重燃的判据，但未明确所用电弧模型的表达式，其仿真结果与实测波形存在显著差异。

本文将电弧的燃烧过程等效为一个高频电弧电阻模型，详细介绍其熄弧逻辑、燃弧逻辑之间的协同作用与这二者结合后的逻辑判断流程。隔离开关在分合闸的过程中所产生的电压波具有很高的频率[9]。过往研究一般仅考虑工频过零熄弧。本文在前人研究的基础上考虑高频过零熄弧现象，并将这一逻辑写入重燃弧逻辑控制模块中，使该模型更贴近电弧发展的实际过程。考虑特高压GIS中产生的VFTO更严重[1]，故将这种多次重燃弧模型运用到中国某1 000 kV GIS变电站的仿真试验中，分析该变电站各个关键位置的电压波形。鉴于负载侧残余电压是影响VFTO的重要因素之一[14]，本文有针对性地设定了不同幅值的残余电压以模拟实际负载侧情况。

1 GIS设备暂态模型的建立

本文以中国某1 000 kV GIS变电站为研究对象进行分析。该1 000 kV GIS变电站主接线示意如图1所示。在该变电站中，负载端配置相应的线路终端设备，各段母线上均安装避雷装置，且其高压侧采用双母线分段接线[15]。在图1中，L1，L2，…，L6为6条主线；T1，T2，T3，T4为4个变电站。

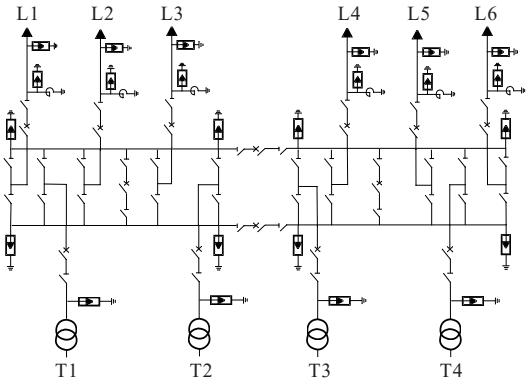


图1 中国某1 000 kV GIS变电站主接线示意

Figure 1 Main wiring of 1 000 kV GIS substation in China

图1所示的变电站GIS设备的每相电路之间均不存在耦合关系。故对其进行分析时，只对单相电路进行仿真即可。变压器T1在运行时，电流经母线先流向负载侧，变压器侧的断路器合闸等效为线路的一部分，另一端的断路器分闸等效为开路，母线正常运转；再操作分闸断路器母线侧的隔离开关。本文以操作隔离开关的分闸过程为例，进行仿真分析。该1 000 kV变电站部分元件等效参数见表1[16]，该1 000 kV GIS电路暂态仿真模型如图2所示。在图2中，F为仿真软件ATP EMTP中的一个元器件，其可实时调用TACS输出的信号，并将调用到的信号输出；T是该软件中自带的符号，其出现在自定义的变化电阻旁边，就代表这个自定义的电阻本身；V为能测量附近点电位的电压探针。从图2中可以看出，该仿真模型包括MODEL(自定义模型模块)与TACS。

表1 该1 000 kV变电站部分元件等效参数

Table 1 Equivalent parameters for some components of 1 000 kV substation

元件	变压器		GIS管线		断路器		隔离开关		电压互感器	接地开关
等效参数	入口电容/pF	串联电感/mH	波阻抗/Ω	波速/(m·μs^{-1})	分闸等效为电容/pF	串联合闸等效为母线的一部分	合闸等效为对地电容/pF	分闸等效为电弧电阻	对地电容/pF	对地电容/pF
数值	10 000	100	70	270	540	—	173	—	1 000	300

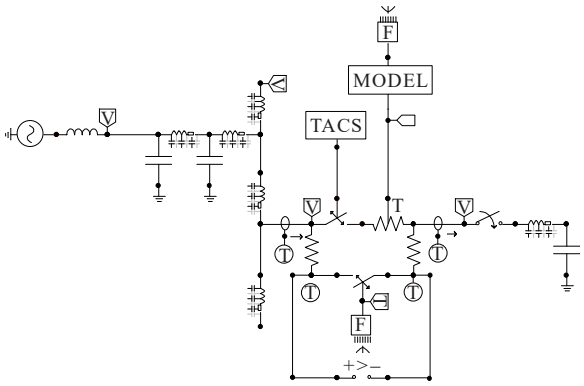


图 2　某 1 000 kV GIS 电路暂态仿真模型

Figure 2　Transient simulation model of 1 000 kV GIS circuit

2　重燃弧模块的实现

2.1　高频电弧电阻模型

文献[17-19]设计了 GIS 隔离开关带电操作试验，在分析电弧电阻的参数和随时间变化规律的基础上，建立了 GIS 隔离开关高频电弧电阻模型。该模型是一个考虑了 GIS 内部气体压力、电弧静态燃烧时阻值和电火花的长度等因素的 U 型时变电阻模型，其仿真数据与实测数据基本吻合。该模型的高频电弧电阻 R 为

$$R = R_{\mathrm{i}}\mathrm{e}^{-t/\tau_1} + R_{\mathrm{c}}\mathrm{e}^{t/\tau_2} \tag{1}$$

式中，t 为时间；τ_1 为击穿时间常数，本文取其值为 2 ns；τ_2 为恢复时间常数，其值主要取决于单个冲击波的持续时间，本文取其值为 1 μs；R_{i} 为隔离开关间隙击穿前触头之间的等效电阻，常取其值为 $10^{12}\,\Omega$；R_{c} 为隔离开关触头间隙电弧稳定燃烧时的电阻。

R_{c} 的计算式为[19]

$$R_{\mathrm{c}} = 34 I_1^{-0.86} p^{0.24} L^{0.63} \tag{2}$$

式中，I_1 为电弧电流的峰值；p 为气压；L 为触头间的开距。

经过数十微秒，电弧电阻值恢复至 $10^{12}\,\Omega$，这一结果与试验发现的规律相符[18]。

高频电弧模型阻值随时间变化曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出，该模型将电弧燃烧过程中的等效电阻变化过程分为 3 个阶段[17]：

1）$0 \sim t_1$（AB 段）。该阶段为触头间从高阻抗状态到燃弧的过渡阶段。

2）$t_1 \sim t_2$（BC 段）。该阶段为触头间彻底击穿后接近导通的阶段。

3）$t_2 \sim t_3$（CD 段）。该阶段为触头间电弧逐渐熄灭的阶段。

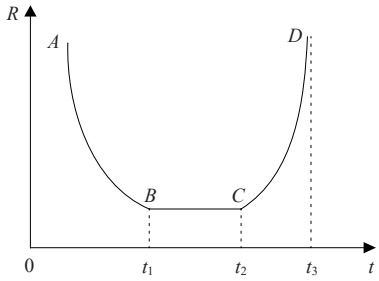


图 3　高频电弧模型阻值随时间变化曲线

Figure 3　Time-resistance curve of high-frequency arc model

2.2　熄弧与重燃弧判据

目前，很多研究都分析了电弧熄灭与击穿的判断逻辑，但没有深入探讨这二者之间的协同作用；即使在熄弧的判断逻辑中，也仅考虑了工频过零这一种情况[20]；部分研究的电压等级也较低[21]。为更准确地表征较高电压等级 GIS 中的 VFTO 现象，本文采用高频电弧电阻模型，在熄弧的判据上考虑电流的工频过零熄弧和高频振荡过零熄弧同时发生的情况。高频振荡过零现象示意如图 4 所示。高频振荡过零（即 GIS 在产生 VFTO 时，电流以很高的频率震荡）时，这种震荡的电流在工频自然过零发生之前，低于截流值时，就可能提前出现过零现象[13,20]。

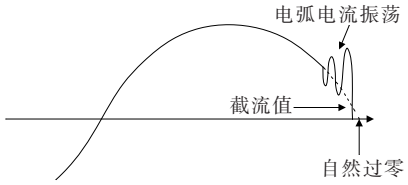


图 4　高频振荡过零现象示意

Figure 4　High-frequency oscillation zero-crossing phenomenon

高频截流现象往往在工频电流即将自然过零的前段时间发生。因此，在熄弧逻辑的判断中，只要电流自然过零与高频振荡过零这两种现象中任意一种发生，就可认为电弧熄灭。

SF_6 气体的截流值受隔离开关性能、外部电路条件与环境因素等影响。文献[13,22]给出了一种较好的解决思路，其取高频震荡过零熄弧的截流值 I_{ch} 为

$$I_{\mathrm{ch}} = \frac{120}{\Delta t} \tag{3}$$

式中，Δt 为仿真步长。

在重复击穿的过程中，采用电介质理论来判断燃弧是否发生[23]：只要隔离开关动静触头之间的电压差大于触头间的击穿电压，即可认为间隙之间出现电弧。令隔离开关动静触头间的临界击穿电压

为 $U_a(t)$，则有[24]

$$U_a(t)=\begin{cases}-31\,250(vt)^2+16\,320vt+4.325,\text{隔离开关关断}\\-31\,250(d-vt)^2+16\,320(d-vt)+4.325,\\\text{隔离开关闭合}\end{cases}\tag{4}$$

式中，t 为时间；d 为动静触头间的开距；v 为隔离开关的分闸速度。

2.3 隔离开关重燃弧模型与逻辑判断流程

基于文 2.2 的分析，隔离开关多次重燃弧模型，其示意图如图 5 所示。在仿真软件 ATP-EMTP 中，TACS 是实现电弧重燃与熄灭的逻辑判断模块。在重燃弧的过程中，R 负责实时输出 MODEL 中的电阻值；S 则根据 TACS 模块的逻辑判断结果控制电弧的燃烧与熄灭；Ⓣ为电压或电流探针，负责将信号输入到 TACS 中；U_1、U_2 分别为隔离开关靠近电源侧和负载侧的电压；I 为流过隔离开关的高频震荡电流。隔离开关重燃弧全过程仿真算法流程如图 6 所示。

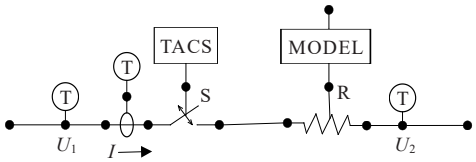


图 5 隔离开关多次重燃弧模型示意

Figure 5 Multiple arc reignition model by disconnector

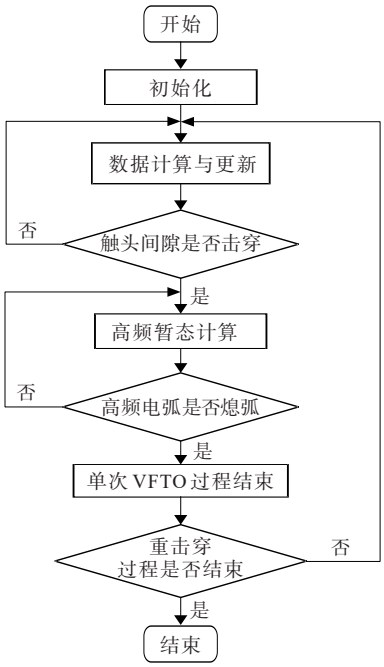


图 6 隔离开关重燃弧全过程仿真算法流程

Figure 6 Simulation algorithm flow for whole process of arc reignition by disconnector

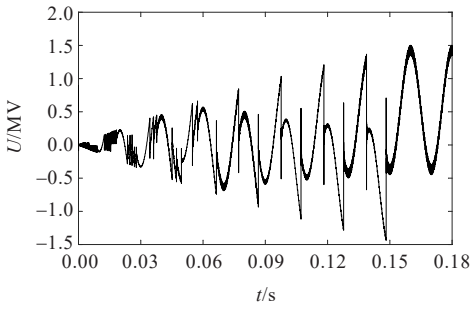
3 1 000 kV GIS 中 VFTO 全过程仿真

综上所述，在 ATP-EMTP 软件中建立仿真模型，燃弧过程用高频电弧电阻模型表示。文献[23]指出特高压 GIS 隔离开关的分闸与合闸产生的 VFTO 幅值与陡度基本一致。因此，本文以隔离开关分闸为例研究 GIS 内部的 VFTO 现象，选取具有代表性的位置在 0～180 ms 内的 VFTO 作为研究对象，进行深入的仿真分析[25]。

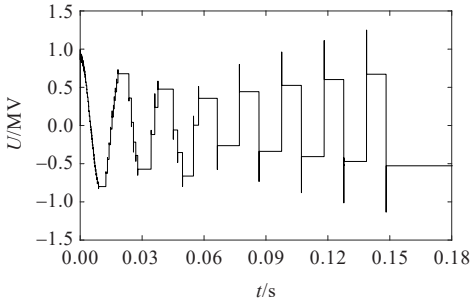
3.1 GIS 关键位置的 VFTO 波形

隔离开关分闸时的各主要位置的 VFTO 波形如图 7 所示。从图 7(a)中可以看出，隔离开关两端电压之差的突变显示系统发生了间隙击穿。这种现象是电场强度达到气体击穿阈值导致的，其表现为电压的瞬时下降。在隔离开关分闸的起始阶段，动、静触头间的距离较短，这使得隔离开关间隙频繁发生击穿；在隔离开关的分闸过程中，随着动、静触头间距离的不断增大，该间隙的绝缘性能逐渐提升，击穿电压将不断提高，相邻两次燃弧的间隔时间逐渐延长，重燃弧的次数呈现递减趋势，直到分闸结束。由于电压等级高，隔离开关两侧电压之差变化大，其燃弧持续时间比电压等级较低的 VFTO 燃弧时间更长[13]。

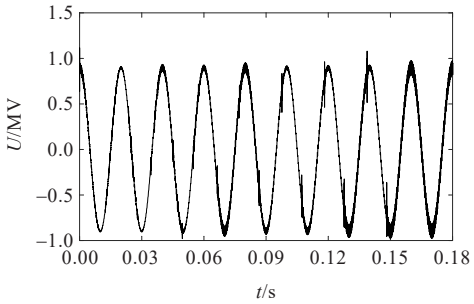
图 7(b)展示了隔离开关分闸过程中的负载侧短线残余电压分布。从图 7(b)中可以看出，该波形呈现出与工频电压相似的轮廓特征，且其每个阶梯状变化的起始点均在工频电压波形上。在隔离开关分闸的初期阶段，较低的介质恢复强度使得开关间隙击穿现象频繁发生，但此阶段产生的操作过电压相对较小，其短线电压波形仍与标准的工频正弦波形保持较高的相似性；在分闸后期，隔离开关间隙的重复击穿使得负载侧的电压以跳变形式紧随工频电源电压的变化而变化，从而展现出 VFTO 特有的不同宽度的“阶梯状”电压波形。从图 7(b)中还可以看出，在 12.51～23.55 ms 这段电压上升时间内，相邻两次间隙击穿相隔的时间最长为 0.36 ms；在波峰附近的 18.30、23.58 ms 处各发生了一次击穿，这两次连续燃弧时间相差 5.28 ms；类似地，在波峰附近的 37.68 、45.10 ms 这两次击穿的连续燃弧时间仅相差 7.42 ms。由此可见，峰值附近的连续燃弧时间间隔更长。这是因为电压在峰值处的变化速率低，隔离开关两侧电压差变化慢，电压到达峰值附近时，相邻两次间隙击穿的时间间隔会更长。同时，随着分闸后期介质恢复强度变大，“阶梯状”



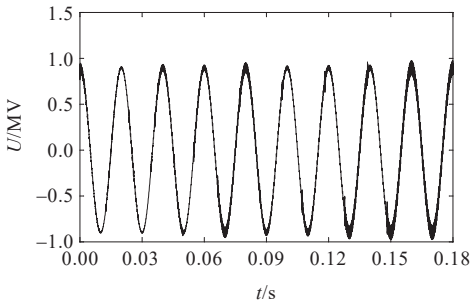
(a)隔离开关两端



(b)负载侧



(c)母线末端



(d)变压器处

图 7　隔离开关分闸时的各主要位置的 VFTO 波形

Figure 7　VFTO waveform at main positions during disconnector opening

电压的“阶梯”也会变得更宽。该 1 000 kV 高电压等级 GIS 中的 VFTO 标幺值与较低电压等级 GIS 中的 VFTO 的标幺值近似[13]，但 1 000 kV 高电压等级 GIS 中的 VFTO 实际幅值更大，危害也更严重。

从图 7(c)中可以看出，在操作隔离开关分闸时，间隙击穿产生的电压波从动作的隔离开关流向各种电路元件，电压波在流经阻抗不匹配点时，将发生折射和反射。经过折、反射的多重电压波叠加，线路电压在极短时间内急剧上升。在此过程中，母线与出线的波阻抗之间存在差异，母线上的部分电压波会折射至短线与架空线上，母线末端会出现明显的尖峰过电压。

从图 7(d)中可以看出变压器处的电压波形。1 000 kV GIS 的隔离开关与变压器之间的距离超过百米，远大于电压等级较低的 GIS 的隔离开关与变压器之间的距离[23]。因此，其对多次燃弧产生的电压波能起到更好的抑制作用。当这些电压波传播至变压器绕组时，波形也变得更为平缓。分闸操作在主变压器上产生的电压最大值为 1.54 p.u.，不会直接破坏变压器的绝缘结构[26]，但长久的过电压依旧会缩短变压器绝缘材料的使用寿命。此外，由于 VFTO 的频率分布很广，电路的谐振过电压可能会严重影响有线圈的设备绝缘性能，这种潜在的安全隐患应引起重视。

3.2　隔离开关负载侧残压对 VFTO 的影响

在隔离开关间隙发生击穿后，负载侧在短时间内会存在大小不同的残余电压。为研究在不同残余电压条件下 GIS 内的 VFTO 特性，在隔离开关负载侧设置了多组大小不同的残余电压。试验统计表明，分闸过程中负载侧电压往往以负极性为主[27]。因此，本文对负极性残余电压(电压标幺值分别为 0.0、−0.2、−0.4、−0.6、−0.8、−1.0 p.u.)进行分析。

为研究残压大小不同时对 GIS 中燃弧次数的影响，对间隙在不同残压下的燃弧次数进行仿真，其结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出，当隔离开关负载侧残余电压幅值增大时，动、静触头之间的燃弧次数也呈增加趋势，其最大燃弧次数达到了 695 次，而未考虑高频振荡过零熄弧时的最大燃弧次数为 655 次[23]。

为进一步分析负载侧残压大小不同时对 GIS 变电站各关键位置 VFTO 的影响程度，分别采集变压器侧、隔离开关负载侧和母线末端 3 个主要位置的过电压波形数据，各关键位置在不同残压条件下的 VFTO 幅值如图 9 所示。从图 9 中可以看出，变压器侧的 VFTO 幅值始终小于另外 2 处的 VFTO 幅值，且随着负载侧残余电压幅值的递增，变压器侧的 VFTO 最大值并未持续增大。这主要是因为变压器与隔离开关相距较远，VFTO 在传递的过程中幅值逐渐衰减，波前陡度变缓，受负载侧残压的

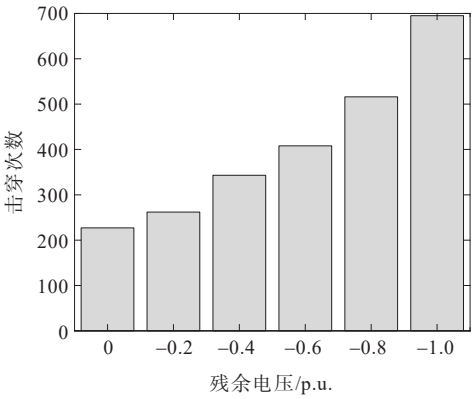


图 8 间隙在不同残压下的燃弧次数

Figure 8 Arc ignition times of gaps under different residual voltages

影响很小；而负载侧与母线末端的VFTO幅值随残压的增大而增大，其幅值最大为2.06 p.u.，比未考虑高频振荡过零熄弧时VFTO的最大幅值大0.27 p.u.[23]。但这些VFTO的幅值均小于雷电冲击耐受电压，不会造成变电站设备的绝缘问题[27]。

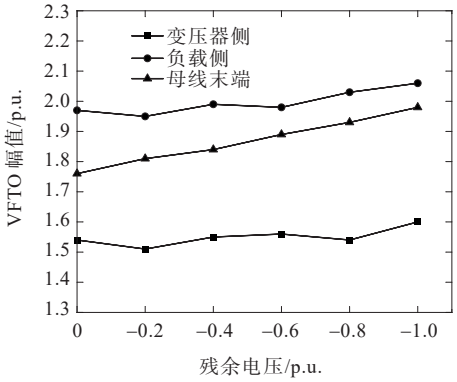


图 9 各关键位置在不同残压条件下的VFTO幅值

Figure 9 Amplitude of VFTO at various key locations under different residual voltages

4 结语

本文通过对某1 000 kV GIS的仿真建模，研究了GIS内部隔离开关动作时所引发的VFTO的暂态特性及其影响因素，得出如下结论：

1）采用高频电弧电阻模型来表征隔离开关的燃弧过程；在传统工频过零熄弧基础上，考虑高频振荡过零熄弧，构建多次重燃弧模型，并将其成功应用到1 000 kV GIS的VFTO仿真中。

2）GIS各关键位置的VFTO击穿波形显示：在燃弧过程中，每次间隙击穿均引发电压突变，负载侧电压呈“阶梯状”响应，阶梯宽度与燃弧间隔相关；母线末端则观测到显著的尖峰过电压。相比之下，变压器处的VFTO未见明显尖峰，其电压幅值更低。采用考虑高频振荡过零熄弧的重燃弧模型的VFTO燃弧次数与幅值比仅考虑工频过零的传统模型的分别增加了40次，提升了0.27 p.u.。

3）隔离开关负载侧的残余电压对VFTO幅值与燃弧频次有显著影响：残余电压绝对值增大时，各关键位置的VFTO幅值整体上升，且燃弧次数也随之增加。尽管在本研究的多种残压条件下，变压器侧与隔离开关负载侧的过电压均未触及绝缘击穿阈值，但长期重复操作仍可能损害绝缘设备。因此，文中提供的数据对GIS设备的绝缘设计具有重要参考价值及实践意义。

参考文献：

[1] 张文斌，胡洋. GIS中快速暂态过电压VFTO的抑制研究进展[J]. 高电压技术，2023，49(1)：418-431.
ZHANG Wenbin, HU Yang. Research progress in suppression of fast transient overvoltage VFTO in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 418-431.

[2] 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.

[3] 杨喜龙，穆双录，王浩，等. 特高压GIS用磁环型阻尼母线VFTO抑制性能试验研究[J]. 高压电器，2024，60(8)：77-84.
YANG Xilong, MU Shuanglu, WANG Hao, et al. Experimental study on VFTO suppression performance of magnetic ring damping bus for UHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 77-84.

[4] ZHU H D, CHEN Q, LI H B, et al. Analyses on an electronic voltage transformer's failure by its resonance with very fast transient overvoltage and suppression[J]. High Voltage, 2024, 9(1): 150-162.

[5] 魏争，文卫兵，杨勇，等. 500 kV直流断路器快速机械开关典型故障特性及可靠性提升方法研究[J]. 全球能源互联网，2023，6(1)：54-63.
WEI Zheng, WEN Weibing, YANG Yong, et al. Research on typical fault characteristics and reliability improvement methods of high-speed mechanical switch used in 500 kV DC circuit breaker[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 54-63.

[6] 吴细秀，李园芳，杨馨，等. SF6/N2介质条件下GIS隔离开关操作动态击穿特性研究及其操作过电压的计算[J]. 电网技术，2024，48(4)：1742-1755.

WU Xixiu, LI Yuanfang, YANG Xin, et al. Dynamic breakdown characteristics of GIS disconnecting switch operation and its calculation of operating overvoltage in SF6/N2 medium[J]. Power System Technology, 2024, 48 (4): 1742-1755.

[7] 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): 2812-2826.
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): 2812-2826.

[8] 辛文成，姚森敬，陈浩敏，等. 计及电磁模特高频信号的局部放电模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报，2022, 37(6): 108-115.
XIN Wencheng, YAO Senjing, CHEN Haomin, et al. Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 108-115.

[9] 李振华，廖星锐，童悦，等. 基于动态重燃弧模型的VFTO与VFTC仿真及特性分析[J]. 电力系统保护与控制，2023, 51(3): 79-88.
LI Zhenhua, LIAO Xingrui, TONG Yue, et al. Simulation and characteristic analysis of VFTO and VFTC based on a dynamic reignition arc model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 79-88.

[10] 崔建，孙帅，张国钢，等. 基于双温度磁流体电弧仿真改进Mayr电弧模型的特快速暂态过电压仿真方法[J]. 电工技术学报，2024, 39(16): 5149-5161.
CUI Jian, SUN Shuai, ZHANG Guogang, et al. The very fast transient overvoltage simulation method based on two-temperature MHD arc simulation to improve Mayr arc model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5149-5161.

[11] 李佰霖，赵国胜，柯学志，等. GIS中阻尼母线等效装置的抑制仿真研究[J]. 电瓷避雷器，2023(1): 199-207.
LI Bailin, ZHAO Guosheng, KE Xuezhi, et al. Simulation study on the damped bus equivalent device in GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 199-207.

[12] 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.

[13] 沈杨，朱勇，梁轶峰，等. VFTO的全时段仿真与实测对比研究[J]. 电测与仪表，2020, 57(14): 83-87.
SHEN Yang, ZHU Yong, LIANG Yifeng, et al. Comparative study of full-time simulation and measurement of VFTO[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 83-87.

[14] 胡洋. 磁环抑制GIS中快速暂态过电压的研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2022.
HU Yang. Research on magnetic ring suppressing fast transient overvoltage in GISD]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[15] 刘子英，张靖，吴文辉. 合闸电阻对1000 kV GIS高压隔离开关VFTO的抑制研究[J]. 高压电器，2021, 57(5): 1-6+13.
LIU Ziying, ZHANG Jing, WU Wenhui. Study on suppressing VFTO of 1 000 kV GIS disconnector by closing resistor[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 1-6+13.

[16] 成林，陶佳鑫，吴涛，等. 330 kV GIS隔离开关操作产生的VFTO电磁骚扰特性研究[J]. 电网与清洁能源，2023, 39(5): 11-19.
CHENG Lin, TAO Jiaxin, WU Tao, et al. Research on VFTO electromagnetic disturbance characteristics of 330 kV GIS disconnector operation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 11-19.

[17] 陈维江. 一种GIS隔离开关高频电弧电阻模型建模方法[P]. 中国专利：104392049, 2018-05-01.
CHEN Weijiang. A GIS disconnector high-frequency arc resistance modeling method[P]. Chinese Patent: 104392049, 2018-05-01.

[18] 赵琳，叶丽雅，詹花茂，等. GIS隔离开关特快速瞬态过电压试验重复击穿全过程仿真模型研究[J]. 高压电器，2020, 56(11): 130-138.
ZHAO Lin, YE Liya, ZHAN Huamao, et al. Investigation of repeated breakdown process during very-fast transient overvoltage test of overall switching process of disconnector in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 130-138.

[19] 苏春强，康振东，李博，等. 基于ATP-EMTP的空气绝缘隔离开关分闸电弧模型[J]. 高压电器，2023, 59(1): 8-16.
SU Chunqiang, KANG Zhendong, LI Bo, et al. Opening arc model of air insulated disconnector based on ATP-EMTP[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 8-16.

[20] 张铭洋，高有华，李茜，等. 1000kV GIS中燃弧电阻模型对快速瞬态过电压的影响[J]. 电气技术，2023, 24 (12): 7-13.
ZHANG Mingyang, GAO Youhua, LI Qian, et al. Influence of arc resistance model on very fast transient overvoltage in 1000kV gas insulated switchgears[J]. Electrical Engineering, 2023, 24(12): 7-13.

[21] 卢家力，王佳，陈奕. 330 kV GIS变电站电子式电压互感器抗VFTO干扰方法研究[J]. 电工技术，2023(9): 103-105.
LU Jiali, WANG Jia, CHEN Yi. Study on VFTO

suppressing method for electronic voltage transformer in 330 kV gas insulated substation[J]. Electric Engineering, 2023(9): 103-105.

[22] 杨飞. 66 kV 干式空心并联电抗器切断过电压及其保护[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
YANG Fei. Breaking over-voltage and protection for 66 kv dry-type air-core shunt reactors[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.

[23] 张普. 特高压 GIS 中快速暂态过电压的仿真与分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
ZHANG Pu. Simulation and analysis of fast transient overvoltage [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.

[24] 仵涛. 基于 EMTP 的特快速暂态过电压的仿真研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
WU Tao. Simulation study of VFTO based on EMTP [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.

[25] 贺天任, 高宇, 刘晓航, 等. 550 kV GIS 变电站中 VFTO 仿真计算及抑制措施[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(2): 65-70+81.
HE Tianren, GAO Yu, LIU Xiaohang, et al. Numerical simulation and suppression measure for VFTO in 550 kV GIS substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(2): 65-70+81.

[26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 高压交流隔离开关和接地开关: GB/T 1985—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023:1.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. High-voltage alternating current disconnectors and earthing switches: GB/T 1985—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023:1.

[27] 张普, 莫付江, 刘欣桐, 等. GIS 中隔离开关多次重燃弧模型计算与分析[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 30-37.
ZHANG Pu, MO Fujiang, LIU Xintong, et al. Calculation and analysis of multiple reignition arc model of disconnector in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 30-37.