第 52 卷 第 7 期：3384-3394 高电压技术 Vol.52, No.7: 3384-3394
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251239

考虑极性效应及电弧多次重燃的残余电压特性对 VFTO 的影响

刘　青，罗　浩，李奥龙，李志杰，仇志伟
（西安科技大学电气与控制工程学院，西安 710054）

摘　要：气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)隔离开关操作过程中负载侧的残余电压显著影响特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)的幅值、波形等特征，深入研究其变化规律有助于更准确地掌握 VFTO 的特性。该文以某特高压 GIS 为原型，通过对重复击穿过程进行数学描述，获得了残余电压与隔离开关速度及击穿电压极性之间的关系。建立了考虑间隙击穿电压极性效应的隔离开关多次重燃的电弧模型，通过与 IEC 典型试验回路的实测波形对比，验证了模型的准确性。基于上述模型，仿真研究了开关速度和极性特性对残余电压变化规律的影响，并进一步分析了残余电压对重复击穿过程中 VFTO 波形及幅值的影响。研究结果表明：操作速度较快时，残余电压水平较高，进而使得 VFTO 的幅值较大；残余电压受正、负极性击穿电压比值的影响呈现出不同的变化规律，导致操作过程中的 VFTO 最大值未必总是在分闸末次或合闸首次击穿时出现。正、负极性击穿电压比值较大时，产生的残余电压幅值较小。当比值趋近于 1 时，分合闸过程中可能会发生最严重的击穿工况。因此通过增大击穿电压比值可降低残余电压的幅值，从而降低 VFTO 水平。

关键词：特快速暂态过电压；分段电弧模型；残余电压；击穿电压；极性效应

Influence of Trapped Charge Voltage Characteristics on VFTO Considering Polarity Effect and Multiple Arc Reignitions

LIU Qing, LUO Hao, LI Aolong, LI Zhijie, QIU Zhiwei
(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The trapped charge voltage during a gas insulated switchgear (GIS) disconnector operation significantly influences the characteristics of the very fast transient overvoltage (VFTO), such as its amplitude and waveform, and in-depth study of its variation law is essential for accurately characterizing VFTO. Consequently, using an ultra-high voltage GIS as a prototype, we derived the relationship between trapped charge voltage, disconnector speed, and breakdown voltage polarity via mathematical description of repeated breakdown processes. An arc model for disconnector multiple restrikes, considering the polarity effect of gap breakdown voltage, was established, and its accuracy was verified by comparison with measured waveforms of the IEC typical test circuit. Based on this model, the influences of switch speed and polarity characteristics on trapped charge voltage variation laws were studied by simulation, and the impact of trapped charge voltage on VFTO waveform and amplitude during repeated breakdown was further analyzed. The results indicate that a higher operating speed leads to an elevated trapped charge voltage level, consequently resulting in an increased VFTO magnitude; trapped charge voltage exhibits different variation laws with the positive-to-negative breakdown voltage ratio, so the maximum VFTO during operation does not necessarily occur in the last opening or first closing breakdown. When the ratio is large, trapped charge voltage amplitude is small; when approaching 1, the most severe breakdown conditions may occur during both opening and closing operations. Thus, increasing the ratio can reduce the trapped charge voltage amplitude,and lower the VFTO level.

Key words: very fast transient overvoltage; segmented arc model; trapped charge voltage; breakdown voltage; polarity effect

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFC3009802)。
Project supported by National Key R&D Program of China(2023YFC3009802).

0　引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中的隔离开关触头间隙击穿是特快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)产生的源头。VFTO 具有高频率、高幅值、波前陡等特点，这对 GIS 及相连设备的绝缘性构成了重大威胁[1-4]。在 VFTO 的产生过程中，击穿电压的建立是构建仿真模型的基础，而残余电压是影响击穿过程与 VFTO 幅值的关键因素之一[5]，因此，深入研究其变化规律及对 VFTO 的影响，有助于更全面地理解 VFTO 特性。

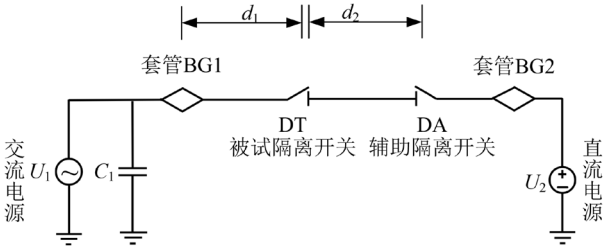
数值仿真是获取 VFTO 波形和研究其特性的重要方法，其中电弧模型的构建直接决定了仿真结果的准确性。文献[6-7]针对电弧变化提出了分段电弧模型，电弧电阻在预击穿阶段衰减较慢，而实际电弧电阻在此阶段变化迅速[8-9]，因此该模型与实际不完全相符。文献[10-12]在搭建仿真模型时，将间隙击穿电压简化为随时间线性变化的函数。虽然这种简化方式能够满足仿真需求，但忽略了击穿电压的极性效应对 VFTO 的影响。文献[13-16]通过试验测量发现，由于隔离开关触头间隙的不对称性，正极性击穿电压通常高于负极性击穿电压，即存在极性效应[17]。因此，在构建电弧重燃的仿真模型时，应考虑极性效应对 VFTO 特性的影响。

当前对残余电压的研究主要基于试验与仿真手段。文献[18-19]采用统计分析方法研究了分闸末次残余电压的分布，对比分析了慢速和快速操作下高幅值残余电压出现的概率差异；然而，该研究主要从统计角度得出分析结果，未能揭示二者之间的内在联系。文献[20]通过触头间隙电压与 VFTO 的相关性指出，分闸末次击穿和合闸首次击穿产生的 VFTO 必定为本次操作中的最大值；但该研究未考虑击穿电压的极性效应对残余电压的影响；由于残余电压的变化可能进一步作用于间隙电压，因此忽略极性效应可能对 VFTO 的最大值分布产生一定的影响。

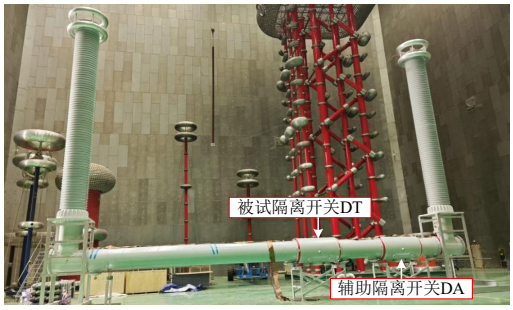
针对以上问题，本文在电弧预击穿阶段采用了更符合实际衰减规律的双曲线模型，考虑了间隙击穿电压的极性效应，建立了描述隔离开关多次重燃的分段电弧模型，仿真结果与实测波形较相符。鉴于试验条件下难以改变击穿电压参数来研究其对 VFTO 的影响，因此在上述模型基础上，通过理论推导和仿真分析，研究了操作速度和击穿电压极性特性对残余电压变化规律的影响及相应的 VFTO 特征。

1　试验回路与测量结果

本文采用国家标准和 IEC 提出的用于隔离开关带电操作考核的典型试验回路[21-22]，如图 1 所示，该回路也被用作仿真研究 VFTO 特性的典型回路。图 1 中，d_1 为 DT 到套管接头的距离；d_2 为 DT 到 DA 的距离；U_1 为交流试验电压；U_2 为直流电源，在 DA 另一侧可进行负极性直流电压充电，模拟残余电压。DT 的操作速度类型如表 1 所示。



(a) 试验回路



(b) 试验布置图

图 1　GIS 试验原理图

Fig.1　Schematic diagram of the GIS test principle

表 1　隔离开关操作速度

Table 1　Operating speeds of disconnector switch

隔离开关类型	分闸速度/(m·s^{-1})	合闸速度/(m·s^{-1})
快速	0.62	0.62
慢速	0.42	0.41

在开合母线充电电流试验中，隔离开关分闸速度为 0.62 m/s，合闸速度为 0.42 m/s。DT 操作前在负载侧加 $-1.1\times800\times\sqrt{3}/\sqrt{2}\ \text{kV}=-718.5\ \text{kV}$ 的直流电压，并保持 1 min；交流侧施加有效值为 461.9 kV 的电压。开关间隙在分合闸过程中会发生多次重复击穿，使得负载侧波形表现为阶梯状，如图 2 所示。

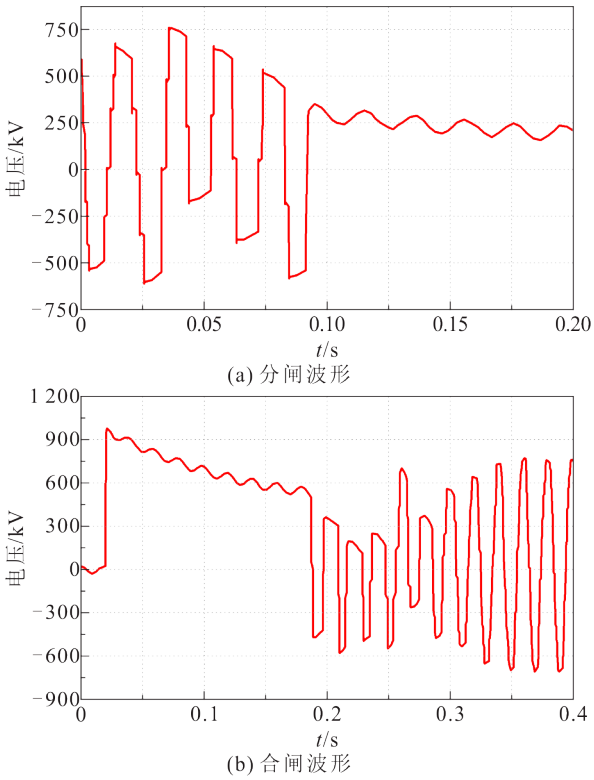


图 2 分合闸操作重复击穿全过程试验波形

Fig.2 Test waveform of repeated breakdown during closing-opening operation

分闸过程的重复击穿持续时间约为 100 ms，合闸过程的击穿持续时间约为 310 ms。对于合闸过程，由于 DT 合闸前，负载侧母线上预充了−718.5 kV 的直流电压，而试验中 VFTO 测量系统是基于电容分压，因此无法测量直流分量。首次击穿与第 2 次击穿间隔约 180 ms，间隔时间较长，主要原因是：击穿取决于间隙电压(即电源侧电压与负载侧残余电压之差)是否达到临界击穿电压。在首次击穿前，负载侧母线预充了−718.5 kV 的残余电压，而电源侧电压呈正弦变化。当电源侧电压升至正最大值时，间隙电压达到最大，从而满足击穿条件，导致首次击穿幅值较大。由图 2(b)可得，击穿后负载侧电压因能量耗散衰减，使得间隙电压减小，同时，由于初始阶段触头间距较大，临界击穿阈值较高，因此难以满足再次击穿条件。随着触头逐渐靠近，间隙距离减小，击穿阈值降低，约 180 ms 后间隙电压再次达到击穿条件，进而发生第 2 次击穿。

2 考虑极性效应的多次重燃弧模型构建

隔离开关的击穿电压特性主要取决于触头形状设计、绝缘介质特性等因素，由于已定型产品的击穿电压参数无法通过试验直接调节，难以开展不同击穿电压条件下的 VFTO 特性研究。因此搭建考虑击穿电压极性效应的多次重燃电弧模型，有助于分析击穿电压特性对 VFTO 的影响。

2.1 分段电弧模型

通常认为隔离开关的燃弧过程由预击穿阶段、燃弧阶段和熄弧阶段 3 个过程组成。

预击穿阶段，间隙的电弧通道在极短时间迅速形成，电弧电阻从绝缘状态下的阻值快速下降到一个较低的稳态值，因此采用更符合实际衰减的双曲线电阻模型[23]进行等效，其表达式如下：

$$R(t)=2Z\left(\frac{t_\delta}{t}-1\right)+r_0 \tag{1}$$

式中：$R(t)$ 为电弧电阻；Z 为 GIS 管线波阻抗；t 为时间；t_δ 为间隙击穿时间；r_0 为燃弧阶段电阻。其中 $0<t<t_\delta$，预击穿阶段电弧电阻主要受 t_δ 的影响，而 $t_\delta\approx(1.0\sim1.5)/p$，其中 p 为触头间 SF_6 的压强，GIS 中 p 在 0.3~0.4 MPa 之间，考虑触头表面粗糙度等因素的影响，t_δ 通常在几纳秒到十几纳秒范围内。t_δ 越小 $R(t)$ 衰减得越快，电弧通道的建立过程越短，进而使得 VFTO 的衰减减弱、幅值增大，同时也会导致其上升时间更短。

在隔离开关断口被完全击穿的情况下，电弧进入稳态燃弧阶段。此时电弧电阻降至最低稳态水平，$R(t)=r_0$，其大小与回路的振荡频率密切相关，通常在 0.5~5 Ω 之间[24]，随着 r_0 的增大，波形整体衰减加快。

触头间隙进入熄弧阶段后，电弧电阻一般采用 Mayr 数学模型进行描述，其表达式[9]为：

$$R(t)=\mathrm{e}^{\frac{t}{\tau_2}}\left(R_2-\frac{1}{\tau_2 P_\mathrm{s}}\int_0^t u_\mathrm{h}^2\mathrm{e}^{-\frac{t}{\lambda_{(t)}\tau_2}}\mathrm{d}t\right) \tag{2}$$

式中：τ_2 为熄弧时间常数，通常取 1 μs；R_2 为电流过零时的电弧电阻；P_s 为电弧散热功率的常数；u_h 为恢复电压；$\lambda_{(t)}$ 为控制因子，可控制熄弧时间的变化。一般认为 $u_\mathrm{h}=0$，则由式(2)可得：

$$R(t)=R_2\mathrm{e}^{t/(\lambda_{(t)}\tau_2)} \tag{3}$$

该阶段的电弧电阻变化由 $\lambda_{(t)}\tau_2$ 确定，当 $\lambda_{(t)}$=1 时，电弧约在 30 μs 左右熄灭。随着 $\lambda_{(t)}$ 的增大，VFTO 的衰减振荡时间变长，对预击穿阶段电弧电阻不造成影响，VFTO 的峰值、上升时间等特征参数保持不变。试验研究表明，隔离开关的熄弧时间通常在十几到几十微秒之间，通过调节 $\lambda_{(t)}$，可使

$R(t)$的变化符合实际。

综上可得，针对不同类型的 GIS，可通过调节每个阶段电弧电阻的主导影响因素，从而实现电弧模型的有效控制。

2.2　多次重燃弧模型的建立

2.2.1　击穿电压的计算

通常采用线性回归方法，可拟合得到隔离开关间隙临界击穿电压与时间之间呈近似线性关系。因此，仿真计算时一般采用式(4)进行表示[10]。

$$\begin{cases} U_{\mathrm{B}}(t)=E_0 vt, & \text{分闸} \\ U_{\mathrm{B}}(t)=E_0(D_0-vt), & \text{合闸} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$U_{\mathrm{B}}(t)$为击穿电压；E_0为触头间隙单位长度的耐受电压；D_0为隔离开关间隙的初始距离；v为隔离开关操作速度。

由于隔离开关动静触头间隙的几何不对称性会导致电场分布不均，进而引发显著的极性效应，即正极性击穿电压通常会高于负极性击穿电压。因此需考虑击穿电压极性效应的影响，对式(4)进行改进，可得分闸过程的表达式为：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{B}}^{+}(t)=kE_0 vt \\ U_{\mathrm{B}}^{-}(t)=-E_0 vt \end{cases} \tag{5}$$

合闸过程的表达式为：

$$\begin{cases} U_{\mathrm{B}}^{+}(t)=kE_0\left(D_0-vt\right) \\ U_{\mathrm{B}}^{-}(t)=-E_0\left(D_0-vt\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中：$U_{\mathrm{B}}^{+}(t)$为正极性击穿电压；$U_{\mathrm{B}}^{-}(t)$为负极性击穿电压；定义参数$k=\left|U_{\mathrm{B}}^{+}(t)\right|/\left|U_{\mathrm{B}}^{-}(t)\right|$，以表征正极性击穿电压与负极性击穿电压的差异。根据文献[14,18]对间隙击穿电压的试验测量结果可知，极性比k的取值范围为 1.1~1.3。

2.2.2　间隙电压与残余电压的计算

触头间隙两端的电压为电源侧电压与负载侧残余电压之差，可表示为：

$$U_{\mathrm{g}}(t)=U_{\mathrm{S}}(t)-U_{\mathrm{L}}=U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi)-U_{\mathrm{L}} \tag{7}$$

式中：$U_{\mathrm{g}}(t)$为触头间隙两端的电压；$U_{\mathrm{S}}(t)$为电源侧工频电压，峰值为U_{m}；U_{L}为残余电压；φ为电源电压相位；ω为工频电源角频率。

在隔离开关操作过程中，每次击穿结束后，空载短母线上会留有残余电压。由于残余电压衰减很慢，因此可近似认为残余电压将持续保持到下一次击穿，其大小与电源侧击穿结束时电压的瞬时值相同。则第n次击穿产生的残余电压$U_{\mathrm{L}(n)}$[25]可表示为：

$$U_{\mathrm{L}(n)}=U_{\mathrm{S}}(t_n)=U_{\mathrm{m}}\sin(\omega t_n+\varphi) \tag{8}$$

式中：t_n为第n次击穿发生的时刻。

2.2.3　多次重燃弧的实现

根据气体电介质理论，当隔离开关间隙电压$U_{\mathrm{g}}(t)$超过击穿电压$U_{\mathrm{B}}(t)$时，触头间隙由断开变为导通状态，此时电弧电阻由无穷大迅速衰减到较小稳态值，即从预击穿阶段过渡到燃弧阶段，电弧电阻采用式(1)表示。

根据能量平衡理论，电弧的熄灭取决于电弧间隙中输入能量与散出能量的关系。当输入能量小于散出能量时，电弧逐渐熄灭[26]。当电弧电流变化幅值足够小时，表明间隙能量逐渐衰减，电弧电阻快速上升，电弧逐渐由导通状态向介质状态转变，此时表明电弧进入熄弧阶段[27]，电弧电阻采用式(3)表示。

结合电弧的重燃与熄灭条件以及前文提出的电弧模型，可建立描述隔离开关多次重燃的分段电弧模型，该模型的重燃控制流程如图 3 所示。

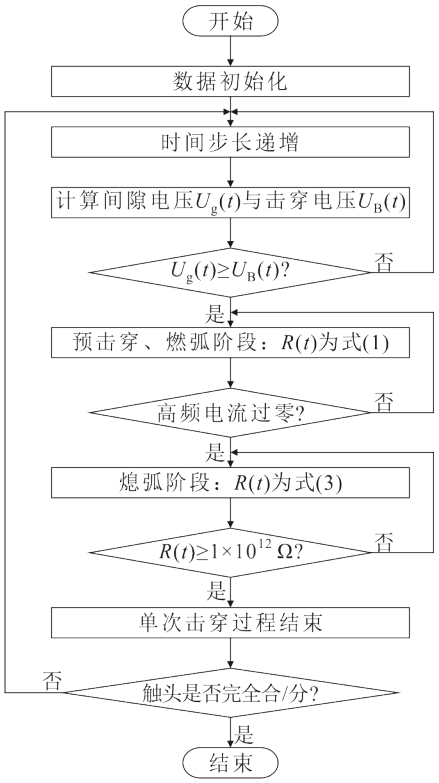


图 3　多次重燃弧仿真计算流程图

Fig.3　Flowchart of simulation calculation for multiple reignition arcs

2.3　仿真结果验证

针对某厂家的 GIS，图 1 典型试验回路中主要元件的仿真参数取值如表 2 所示。

表 2 试验回路主要元件等效参数

Table 2 Equivalent parameters of main components in the test circuit

元件	等效参数	数值
变压器	串联电感/mH	30
	入口电容/pF	1 043
隔离开关	动触头对地电容/pF	60
	静触头对地电容/pF	69
	间隙电容/pF	7.3
GIS 母线	波阻抗/Ω	87.98
	波速/(m·s^{-1})	2.95×10^{8}
套管	对地电容/pF	255.6
盆式绝缘子	对地电容/pF	6

暂态过程仿真结果准确与否是全过程仿真的基础，图 4 为母线充电试验中，交流侧施加电压峰值 718.5 kV、直流侧施加−718.5 kV 时，DT 断口产生的最严苛 VFTO 波形对比。

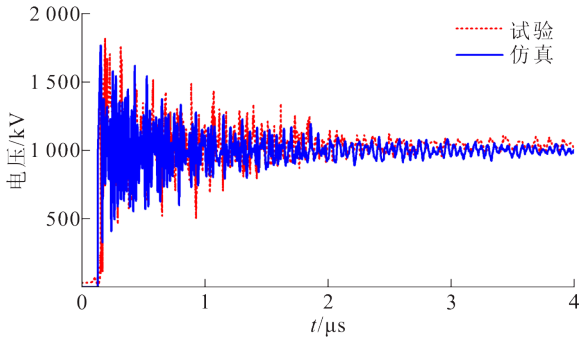


图 4 VFTO 波形对比图

Fig.4 Comparison of VFTO waveforms

由图 4 对比可得，试验结果 VFTO 幅值为 1 823.56 kV，而仿真计算结果为 1 769.3 kV，幅值误差约为 3.07%。在 0~1 μs 时段内，波形振荡较为剧烈且幅值较大，约 2 μs 后波形逐渐趋于稳定，与实测波形变化趋势相符。

在分合闸操作的重复击穿过程试验条件下，仿真得到的负载侧全过程波形如图 5 所示。

图 5 中分合闸过程的重复击穿持续时间分别约为 100 ms 和 285 ms，且波形变化趋势与试验结果较相符。考虑到击穿电压分散性的影响，重复击穿过程中波形的击穿位置以及幅值会存在误差，但击穿持续时间的准确性以及整体波形变化趋势的一致性表明，该仿真模型是可行的。

3 残余电压变化规律研究

3.1 隔离开关操作过程中的交替击穿现象

对图 1 所示的典型试验回路进行建模仿真，可得分闸过程中的电压波形如图 6 所示。

由图 6 可见，当击穿电压绝对值大于电源电压峰值时，随着击穿次数的增加，在 1 个工频周期内分别发生 1 次正极性击穿和 1 次负极性击穿，负载侧电压呈正负极性交替击穿的规律，残余电压也随之呈现为正负极性交替变化。

此外，若在重复击穿过程中，间隙击穿电压绝

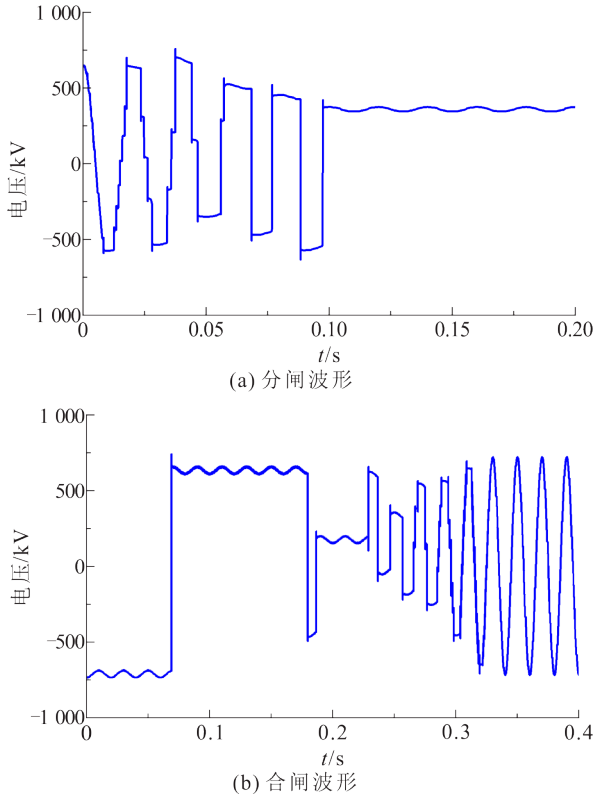


图 5 分合闸操作全过程仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of the entire process during closing-opening operations

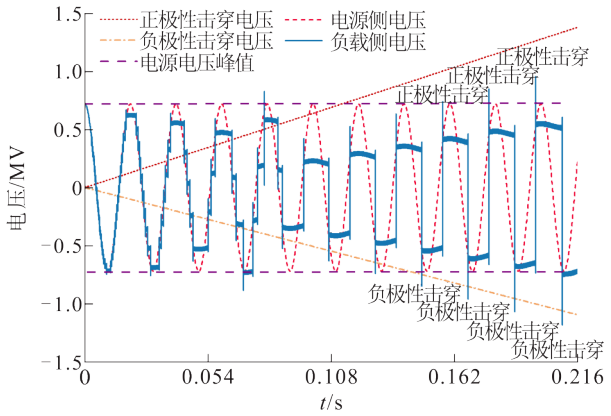


图 6 分闸过程中正负极性交替击穿现象

Fig.6 Alternating polarity breakdown during the opening process

对值小于U_{m}，则 1 个周期内间隙击穿的次数较多且产生的 VFTO 幅值通常较小。击穿电压绝对值大于$2U_{\mathrm{m}}$后，触头间隙将不再发生击穿。因此，本文重点研究击穿电压绝对值在$U_{\mathrm{m}}\sim 2U_{\mathrm{m}}$之间时残余电压与 VFTO 的变化规律。

3.2　残余电压的影响机理分析

3.2.1　击穿电压极性特性 k 的影响

基于第 3.1 节击穿过程中正负极性交替变化的规律，以分闸为例，假设$n=2i$(偶数次击穿)时，发生负极性击穿，此时$U_{\mathrm{L}(n)}<0$；当$n=2i+1$(奇数次击穿)时，发生正极性击穿，此时$U_{\mathrm{L}(n)}>0$，其中 i 为正负极性击穿周期序号，$i=1、2、3、\cdots$。根据残余电压与击穿电压的关系可得：

$$U_{\mathrm{L}(2i+q)}-U_{\mathrm{L}(2i+q-1)}=(-1)^{q-1}k^{w}E_0vt_{2i+q} \tag{9}$$

式中：q 为击穿序号，$q=1、2、3、\cdots$；w 为控制参数。当q为奇数时，w=1；当q为偶数时，w=0。由式(9)可得，影响残余电压数值大小的参数主要为击穿电压比值 k 和隔离开关速度 v，因此本节主要在 v 保持不变的前提下，着重分析 k 的变化对残余电压的影响。

1）负极性残余电压变化规律

由式(9)可得相邻负极性残余电压之差为：

$$U_{\mathrm{L}(2i+2)}-U_{\mathrm{L}(2i)}=E_0v(kt_{2i+1}-t_{2i+2}) \tag{10}$$

当$k>t_{2i+2}/t_{2i+1}$时，$U_{\mathrm{L}(2i+2)}>U_{\mathrm{L}(2i)}$，表明第$2i+2$次击穿产生的负极性残余电压大于第$2i$次击穿的负极性残余电压。通过数学归纳法，可证明随着击穿次数的增加，负极性残余电压逐渐增大，而其绝对值逐渐减小。反之，当$U_{\mathrm{L}(2i+2)}<U_{\mathrm{L}(2i)}$、即$1<k<t_{2i+2}/t_{2i+1}$时，负极性残余电压逐渐减小，其绝对值逐渐增大。

2）正极性残余电压变化规律

由式(9)可得相邻正极性残余电压之差为：

$$U_{\mathrm{L}(2i+3)}-U_{\mathrm{L}(2i+1)}=E_0v(kt_{2i+3}-t_{2i+2}) \tag{11}$$

由于$k>1$，$t_{2i+3}>t_{2i+2}$，故$U_{\mathrm{L}(2i+3)}$恒大于$U_{\mathrm{L}(2i+1)}$，即正极性残余电压呈增大趋势。

由此可以得出，正负极性残余电压受 k 的影响呈现不同的变化趋势，当 k 大于某一临界值时，在分闸过程中，正负极性残余电压呈现不断增大的趋势；反之，当 k 小于这一临界值时，负极性残余电压的变化规律会发生改变，呈现减小的趋势。同理，对于合闸过程，残余电压的变化也受 k 的影响。

3.2.2　隔离开关速度 v 的影响

假设 k 保持不变，分析隔离开关操作速度 v 对残余电压的影响。

令$A=E_0(kt_{2i+1}-t_{2i+2})$，由式(10)可得：

$$U_{\mathrm{L}(2i+2)}-U_{\mathrm{L}(2i)}=vA \tag{12}$$

若$A>0$，由于$v>0$，故$U_{\mathrm{L}(2i+2)}>U_{\mathrm{L}(2i)}$。因此，第$2i+2$次击穿产生的负极性残余电压仍大于第$2i$次击穿的负极性残余电压，残余电压的变化规律不受影响。当$A<0$时，$vA<0$，负极性残余电压的变化规律仍保持不变。同理，由式(11)可知，正极性残余电压的变化规律也不受影响。

虽然 v 不影响残余电压的变化规律，但会改变残余电压数值大小。根据式(11)和式(12)可知，相邻正极性残余电压之差$U_{\mathrm{L}(2i+3)}-U_{\mathrm{L}(2i+1)}$和相邻负极性残余电压之差$U_{\mathrm{L}(2i+2)}-U_{\mathrm{L}(2i)}$均与 v 成正比。因此，随着 v 的增大，相邻正负极性残余电压差会增大，进而导致分闸末次残余电压值增加。

3.3　仿真验证分析

3.3.1　k 的影响规律仿真分析

基于第 3.2.1 节中 1）和 2）的分析可知，当 v=0.62 m/s 时，取不同的 k 值进行分合闸仿真计算，结果如图 7、8、9 所示。

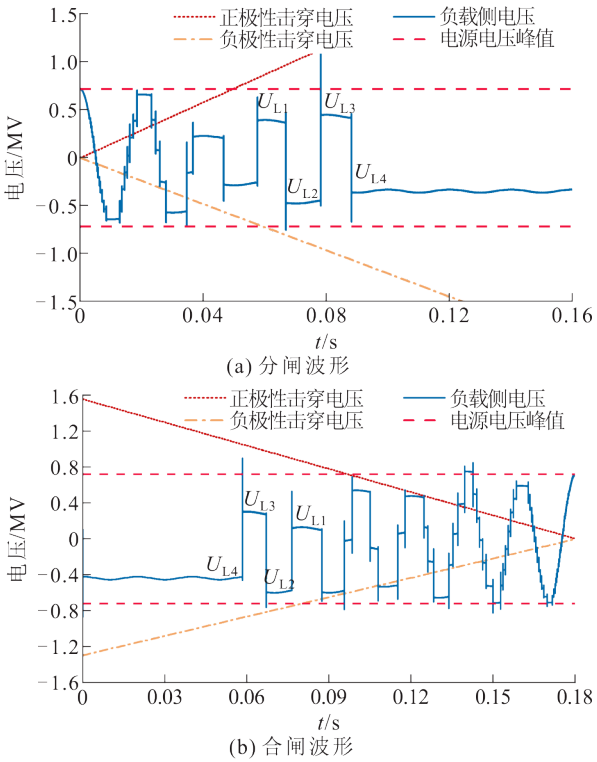


图 7　k=1.2 时负载侧电压波形

Fig.7　Load-side voltage waveform when k=1.2

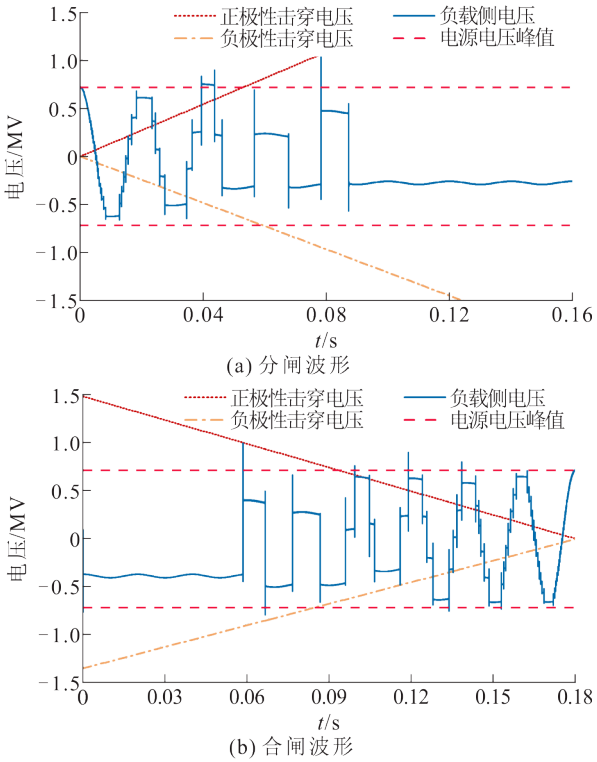


图 8 k=1.1 时负载侧电压波形

Fig.8 Load-side voltage waveform at k=1.1

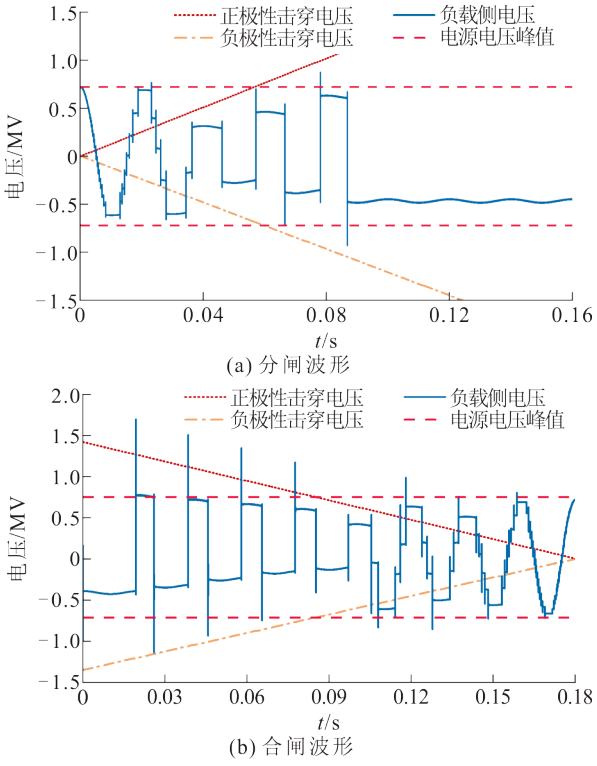


图 9 k=1.05 时负载侧电压波形

Fig.9 Load-side voltage waveform when k=1.05

为描述残余电压的变化规律，图 7 中以U_{L1}表示正极性击穿电压大于电源电压峰值U_m后的第 1 次正极性击穿产生的残余电压，U_{L3}则表示下一次正极性击穿后的残余电压。同理，U_{L2}和U_{L4}表示负极性击穿后的残余电压，以此类推，如图 7 所示。图 8、9 未具体标注，但遵循相同规律。

由图 7—图 9 可以看出，当k=1.2 和k=1.1 时，残余电压变化规律一致；当k=1.05 时，负极性残余电压的规律发生变化。图 10 给出了残余电压变化与k的关系。

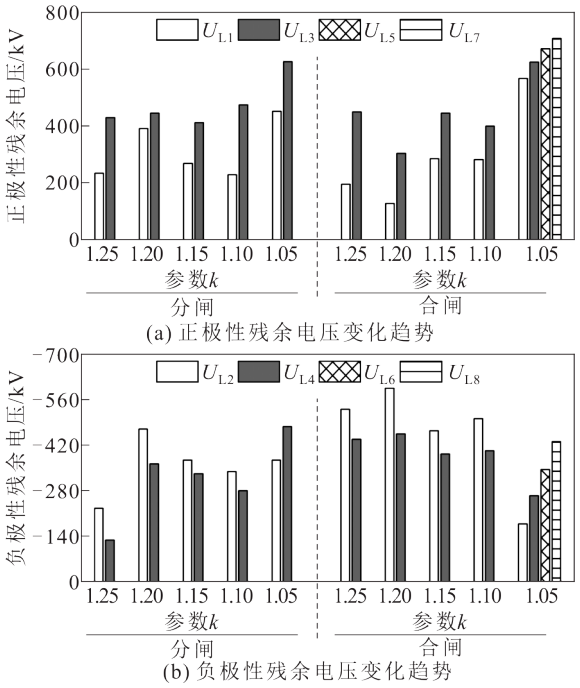


图 10 残余电压与 k 的关系

Fig.10 Relationship between trapped charge voltage and k

由图 10 可得，随着正负极性击穿电压比k的减小，正极性残余电压逐渐增大，而负极性残余电压则先增加，在k=1.05 时呈现减小趋势。因此，同理论分析一致，参数k会改变残余电压的变化规律，并影响残余电压的幅值分布。图 11 为分闸过程中最后一击穿时刻产生的残余电压随k的变化规律。

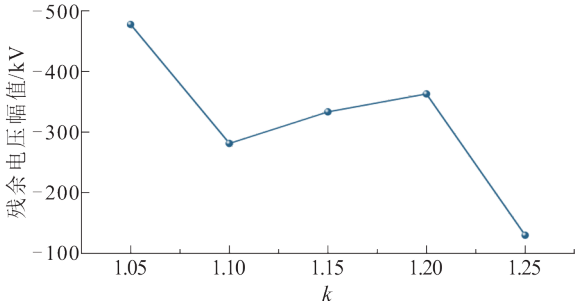


图 11 分闸末次残余电压与 k 的关系

Fig.11 Relationship between the last breaking trapped charge voltage and k

由图 11 可得，分闸末次残余电压均为负极性，这是因为考虑极性效应后，负极性击穿电压小于正极性击穿电压，故分闸末次间隙电压更易达到负极性击穿的条件。此外，随着 k 的增大，末次残余电压幅值呈减小趋势，且 k =1.05 时残余电压幅值最大。

3.3.2　v 的影响规律仿真分析

设定 k=1.2，分别取不同的速度 v 进行仿真计算，结果如图 12、13 所示。

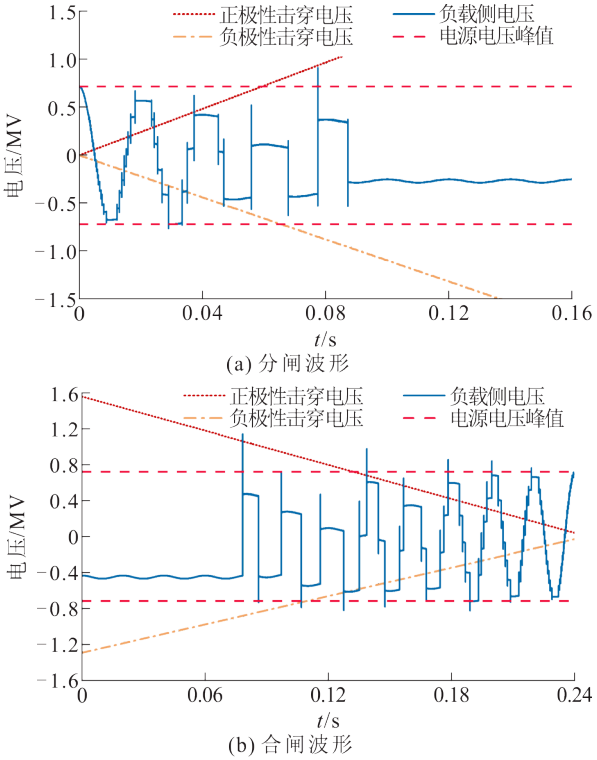


图 12　v=0.52 m/s 时负载侧电压波形

Fig.12　Load-side voltage waveform when v=0.52 m/s

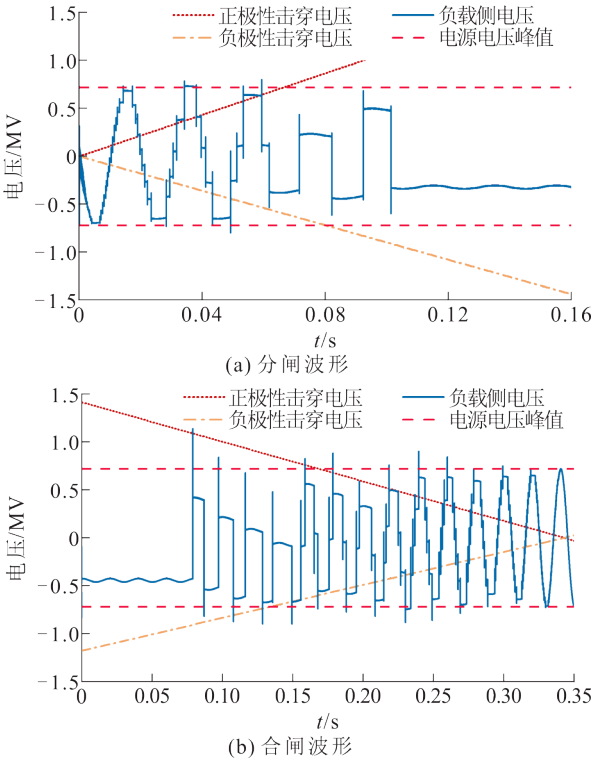


图 13　v=0.42 m/s 时负载侧电压波形

Fig.13　Load-side voltage waveform when v=0.42 m/s

表 3　残余电压与 VFTO 的统计

Table 3　Statistics of trapped charge voltage and VFTO

v/(m·s^{-1})	分闸		合闸	
	末次残余电压/ kV	VFTO/MV	首次残余电压/ kV	VFTO/MV
0.32	−189	1.26	413.25	1.32
0.42	−240	1.12	427.87	1.36
0.52	−286	1.37	468.57	1.41
0.62	−366	1.46	443.82	1.38
0.72	−480	1.34	467.84	1.42

对比图 7 和图 12、13 可得，正负极性击穿电压绝对值大于 U_m 后，随着 v 的减小，正负极性残余电压均逐渐增大，其变化规律保持不变。但残余电压的幅值会受速度的变化而发生改变。表 3 统计了分闸末次、合闸首次击穿时的残余电压及 VFTO 幅值随速度变化的结果。

由表 3 可知，随着操作速度的增大，分闸末次与合闸首次击穿后的残余电压幅值显著增大。尽管 VFTO 幅值并非随速度单调递增，但在较高速度下其总体水平更高。因此，采用慢速隔离开关有助于抑制 VFTO。

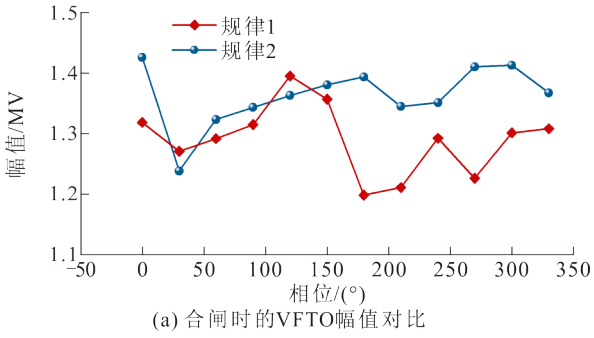
综上可知，速度不会影响残余电压的变化趋势，但会影响每次击穿后残余电压大小，进而导致在操作速度较快时，残余电压水平相应提高，而残余电压作为影响 VFTO 幅值的关键初始条件，其水平的提升会进一步推动 VFTO 幅值升高。

4　残余电压对 VFTO 的影响

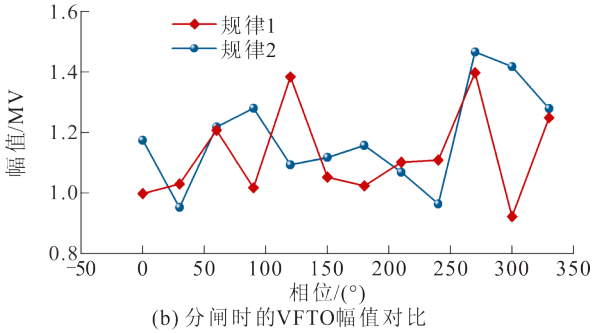
4.1　VFTO 幅值变化特性

由第 3.2.1 节的分析可知，随着 k 的变化，当击穿电压超过电源电压峰值后，分合闸过程中残余电压主要呈现 2 种变化规律：变化规律 1 为正负极性残余电压均逐渐增大；变化规律 2 为正极性残余电压逐渐增大、负极性残余电压逐渐减小。

为明晰残余电压对 VFTO 的影响，本节基于残余电压的 2 种变化规律进行仿真计算，研究了不同相位条件下分合闸操作中 VFTO 的幅值特征，仿真中以 30°为间隔对相位进行取样，计算结果见图 14。



(a) 合闸时的VFTO幅值对比



(b) 分闸时的VFTO幅值对比

图 14 不同残余电压变化规律下 VFTO 幅值对比

Fig.14 Comparison of VFTO magnitudes under different trapped charge voltage variation patterns

由图 14 可知，在残余电压的 2 种变化规律下，分合闸操作过程中 VFTO 幅值在规律 2 下的变化整体高于规律 1 下的变化。这表明：k 值较大时，有助于抑制分合闸操作产生的 VFTO，从而更有利于 GIS 设备的绝缘防护。

此外，计算结果表明，在 2 种变化规律下对隔离开关分合闸操作的 24 组数据中，最大过电压的分布具有不确定性。对于分闸，有 3 次 VFTO 的最大值未发生在末次击穿，其中在规律 1 下出现 2 次，在规律 2 下出现 1 次；合闸操作中有 1 次未出现于首次击穿，发生在规律 1 下。

总体来说，这些过电压最大值主要发生在倒数第 2 次击穿，且该现象更易在变化规律 1 的工况下出现，如图 15 所示。

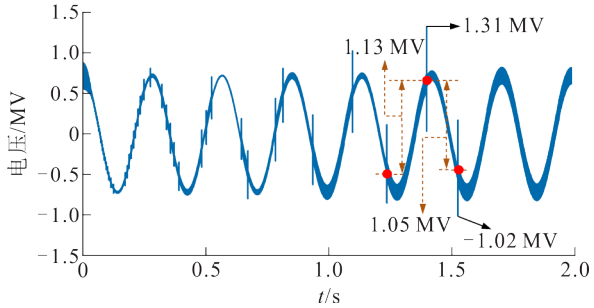


图 15 残余电压变化规律 1 下的电源侧电压波形

Fig.15 Source-side voltage waveform for trapped charge voltage variation pattern 1

由图 15 可知，VFTO 的最大幅值并非出现于分闸的末次击穿，而是由倒数第 2 次正极性击穿所产生。其原因在于：此次击穿前触头间隙电压高于末次击穿前的电压，该间隙电压可近似表示为 2 次击穿前高频振荡过程起始时刻的电压差。由于 VFTO 击穿瞬间间隙所承受的电压是影响其幅值的关键因素，因此更高的间隙电压最终导致了更大的过电压幅值。此外，当间隙发生了工频峰峰值击穿时，则会产生最严重的 VFTO。

4.2 VFTO 最严重的击穿情况

在图 14 中对比了 2 种不同残余电压变化趋势下的 VFTO 幅值，在残余电压第 2 种变化规律下，其产生的 VFTO 幅值相较于第 1 种变化规律时更高。根据第 3.2 节分析可知，这是由于 k 较小、接近于 1 时，其间隙极性效应会减弱，正负极性残余电压幅值会持续增大，进而导致产生的 VFTO 幅值更大，更易形成较严重的过电压。以分闸过程为例进行说明，如图 16 所示。

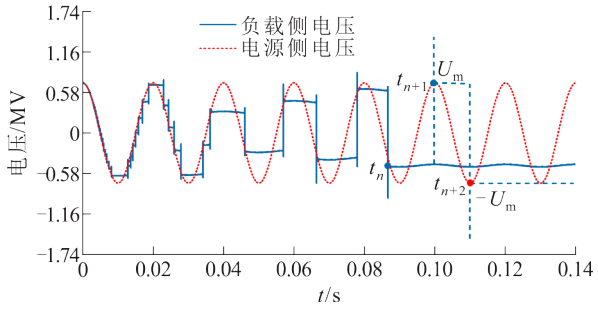


图 16 残余电压变化规律 2 下的重燃过程

Fig.16 Reignition process for trapped charge voltage variation pattern 2

由图 16 可知，正负极性的残余电压幅值呈增大趋势，在 t_n 时刻重燃结束，此刻产生的 VFTO 幅值为本次操作中的最大值，但该工况并非最严重情况。若重燃持续发展(如图 16 长虚线所示)，则正负极性残余电压幅值继续增大，在这种变化规律下，电源侧电压和负载侧残余电压有可能在某一时刻达到理论最大值，即发生峰峰值击穿。假设负载侧残余电压在 t_{n+1} 时刻达到最大值 U_m，电源侧电压在 t_{n+2} 达到负最大值 $-U_m$，间隙击穿前两端的电压差达到最大，则在 t_{n+2} 时刻会发生最严重击穿情况，产生 VFTO 理论最大值。

当残余电压呈现图 17 所示的变化规律时，正极性残余电压幅值呈增大趋势，而负极性残余电压幅值呈减小趋势，在 t_n 时刻重燃结束。

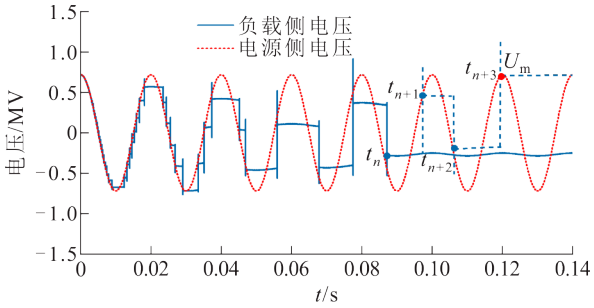


图 17　残余电压变化规律 1 下的重燃过程

Fig.17　Reignition process for trapped charge voltage variation pattern 1

同理若重燃继续发生(如图 17 长虚线所示)，假设在 t_{n+3} 时刻击穿前电源侧电压达到最大值 U_m，而负载侧负极残余电压幅值持续衰减无法到达负最大值 $-U_m$，在此规律下，分闸末次不会出现最严重的击穿情况。

综上，在残余电压变化规律 1 下，分闸末次阶段和合闸初始阶段出现最严重的击穿情况概率较低。反之，在残余电压变化规律 2 下，分合闸过程更容易发生最严重的 VFTO 击穿情况。

5　结论

本文考虑了击穿电压的极性效应，建立了描述隔离开关多次重燃的电弧模型，通过仿真与试验结果对比证明了该模型的准确性。基于数学解析与仿真相结合的方法，研究了重复击穿过程中残余电压的变化规律及其对 VFTO 的影响，得出了以下结论：

1）在击穿电压极性效应的影响下，分合闸操作过程中残余电压主要呈现 2 种变化规律，变化规律 1(当 k 较大时)：正负极性残余电压均逐渐增大；变化规律 2(当 k 较小、趋近于 1 时)：正极性残余电压逐渐增大，负极性残余电压逐渐减小。

2）计算结果表明，在残余电压变化规律 2 下，VFTO 的最大幅值分布具有不确定性，不一定发生在分闸末次击穿或合闸首次击穿。此外，在该规律下，分合闸过程中产生的 VFTO 幅值较大，还可能会发生最严重的击穿情况，这对 GIS 设备绝缘构成严重威胁。

3）击穿电压比值 k 是影响 VFTO 的可控参数，增大 k 可以降低高幅值 VFTO 出现的概率。因此，在隔离开关设计中，可通过优化触头结构、绝缘介质特性等方式作为降低 VFTO 水平的参考措施。

4）此外，隔离开关操作速度较快时，产生的 VFTO 幅值通常更高，其原因是速度提升会增大重燃过程中每次击穿后的残余电压幅值，而残余电压水平提升会进一步推动 VFTO 幅值升高。

参考文献　References

[1] 王欢，刁赢龙，吴细秀，等. 抑制 VFTO 用阻尼母线设计与抑制效果验证[J/OL]. 高电压技术，2025：1-9[2025-08-14]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20250315.
WANG Huan, DIAO Yinglong, WU Xixiu, et al. Design of damping bus for VFTO suppression and verification of suppression effect[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-9[2025-08-14]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250315.

[2] LIANG Z D, LIN C J, LIANG F W, et al. Designing HVDC GIS/GIL spacer to suppress charge accumulation[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 645-651.

[3] 胡方言，丁登伟，孙强，等. 采用 GIS 局部放电 UHF 传感器的宽频带电压测量方法[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3234-3244.
HU Fangyan, DING Dengwei, SUN Qiang, et al. Wide-band voltage measurement method by using GIS partial discharge UHF sensor[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3234-3244.

[4] 朱厚达，李红斌，邬雄，等. 基于高阻镀层母线的智能量测设备强电磁防护方法[J/OL]. 高电压技术，2025：1-12[2025-10-19]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20251284.
ZHU Houda, LI Hongbin, WU Xiong, et al. Suppression method against strong electromagnetic interference for intelligent measuring equipment based on busbar with high-resistance coating[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-12[2025-10-19]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520. hve. 20251284.

[5] 林晓华. 考虑残余电荷分布非均匀性特快速暂态精细模型研究[D]. 保定：华北电力大学，2015.
LIN Xiaohua. Research on the accurate simulation model of VFTO considering non-uniform distribution of residual charge[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2015.

[6] 孟涛，林莘，徐建源. 分段电弧模型下 VFTO 的计算与分析[J]. 电工技术学报，2010，25(9)：69-73.
MENG Tao, LIN Xin, XU Jianyuan. Calculation of very fast transient over-voltage on the condition of segmental arcing model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 69-73.

[7] 张建功，王红超，赵军，等. 基于分段电弧模型的多次重燃弧 VFTO 计算与分析[J]. 高压电器，2016，52(5)：14-19，26.
ZHANG Jiangong, WANG Hongchao, ZHAO Jun, et al. Calculation and analysis of multiple restrikes VFTO based on piecewise arc model[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 14-19, 26.

[8] 郝莎，徐建源，林莘. 隔离开关电弧流体数学模型研究与应用[J]. 电工技术学报，2021，36(13)：2710-2718.
HAO Sha, XU Jianyuan, LIN Xin. Study on the application of fluid arc model in disconnector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2710-2718.

[9] 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 in UHV GIS[D]. Zhenjiang, China: Jiangsu University, 2021.

[10] ZHANG Y Z, CHEN X Y, CUI H, et al. Research on VFTO simulation analysis of 1 000 kV GIS test circuit considering dynamic arcing model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(6): 6952-6959.

[11] 宋坤宇，刘春. 考虑时变间隙电容的隔离开关 VFTO 过程仿真[J].

电网技术，2018，42(9)：3078-3085.
SONG Kunyu, LIU Chun. Simulation of VFTO process for isolating switch based on time-varying capacitor[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3078-3085.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 伍绍铖，王力农，高嘉辰，等. 正极性操作冲击电压下组合空气间隙放电物理模型[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1389-1401.
WU Shaocheng, WANG Linong, GAO Jiachen, et al. Physical model of combined air gaps under positive switching impulse[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1389-1401.

[15] 段韶峰，赵琳，李志兵，等. GIS 中 VFTO、VFTC 统计特性试验和仿真方法研究[J]. 电网技术，2015，39(12)：3634-3640.
DUAN Shaofeng, ZHAO Lin, LI Zhibing, et al. Experimental and simulation study on statistical characteristics of VFTO and VFTC in GIS[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3634-3640.

[16] ZHANG L, WANG S, SUN L, et al. Prediction model of voltage-time characteristics for SF_6 long gap under VFTO and lightning impulse voltage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 880-885.

[17] 王磊，陈维江，岳功昌，等. 特高压气体绝缘开关设备的隔离开关残余电荷电压仿真分析[J]. 高电压技术，2014，40(12)：3911-3917.
WANG Lei, CHEN Weijiang, YUE Gongchang, et al. Simulation analysis of potential caused by trapped charge in disconnector of UHV gas insulated switchgear device[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3911-3917.

[18] 郝莎. 隔离开关多次重复击穿电弧及其高频暂态过电压特性研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2020.
HAO Sha. Study on disconnector repeated arc and high frequency transient characteristics of the generated overvoltage[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2020.

[19] 史可鉴. GIS 中隔离开关电机操动机构及控制方法研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2016.
SHI Kejian. Research on motor actuator and control method used in GIS disconnector[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2016.

[20] 李云阁，尚勇，韩彦华，等. 关于极快速暂态过电压(VFTO)研究的现状[J]. 电网与清洁能源，2024，40(10)：1-12.
LI Yunge, SHANG Yong, HAN Yanhua, et al. Current progress in research on very fast transient overvoltage (VFTO)[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 1-12.

[21] 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.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. High-voltage alternating current disconnectors and earthing switches: GB/T 1985—2023[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2023.

[22] IEC. High-voltage switchgear and controlgear-part 102: alternating current disconnectors and earthing switches: IEC 62271-102[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2022.

[23] 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.

[24] MOSTAFAVI S, MOUSAVIMAJD S. Providing a combined solution to reduce very fast transient overvoltages in gas insulated substations[J]. Electric Power Systems Research, 2024, 228: 109981.

[25] 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 suppressing very fast transient overvoltage by optimizing the switching speed of disconnector[D]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2017.

[26] ZHANG Y Z, CHEN X Y, SI J J, et al. Study on joint simulation of very fast transient overvoltage and transient enclosure voltage in 1 000 kV GIS[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(5): 3415-3428.

[27] 刘卫东，汪林森，陈维江，等. 特高压 GIS 特快速暂态过电压试验重复击穿过程研究[J]. 高电压技术，2011，37(3)：644-650.
LIU Weidong, WANG Linsen, CHEN Weijiang, et al. Investigation of the VFTO related repeated breakdown processes in UHV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 644-650.



刘　青(通信作者)
1978—，女，博士，教授，硕导
主要从事电力系统电磁暂态仿真和电力系统过电压及其防护的研究工作
E-mail: liuqing623@xust.edu.cn

LIU Qing
Ph.D., Professor
Corresponding author



罗　浩
1998—，男，硕士生
主要从事特快速暂态过电压的仿真计算
E-mail: 23206232108@stu.xust.edu.cn

LUO Hao

收稿日期　2025-08-15　在线出版日期　2025-12-02　　编辑　程子丰