

## GIS隔离开关动作引起的暂态地电位升建模仿真研究

李佳慧

引用本文:

李佳慧. GIS隔离开关动作引起的暂态地电位升建模仿真研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 105-111.

LI Jiahui. Research on Modeling and Simulation of Transient Ground Potential Rise Caused by GIS Disconnecter Action[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(增刊1): 105-111.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 某核电站新增联络变VFTO计算与分析

VFTO Calculation and Analysis of the New Interconnecting Transformer in a Nuclear Power Station

南方能源建设. 2016, 3(z1): 55-60 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.013>

#### 架空进出线的220 kV GIS紧凑型户内布置方案研究

220 kV GIS Compact Indoor Layout Research with Overhead Line

南方能源建设. 2017, 4(z1): 73-77,83 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.S1.014>

#### 大功率激光系统中气体开关工作气压的初步研究

Research on Working Gas Pressure of Spark Gap Switch in High Power Laser System

南方能源建设. 2016, 3(2): 131-135 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.026>

#### 专用负荷开关在500kV变电站的应用分析

Application Analysis of Load Break Switch in 500 kV Substation

南方能源建设. 2015, 2(1): 115-119 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.022>

#### 110 kV半高型布置变电站的改造实践

Modification Practice of a 110 kV Half-height Layout Substations

南方能源建设. 2016, 3(2): 88-91,95 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.017>

# GIS 隔离开关动作引起的暂态地电位升 建模仿真研究

李佳慧<sup>✉</sup>

(广州电力设计院有限公司, 广东 广州 510610)

**摘要:** [目的] 大量气体绝缘金属封闭开关设备 (Gas Insulated Switchgear, GIS) 的投入使用产生了严重的电磁干扰, 尤其是GIS中隔离开关在切合小容性电流等操作时, 不具有灭弧能力, 从而导致触头间介质发生多次击穿, 电压陡波在紧凑的管道空间内迅速来回折反射叠加形成特快速暂态过电压 (Very Fast Transient Voltage, VFTO)。[方法] 本文采用适用于求解暂态地电位升的传输线模型, 结合ATP-EMTP软件对VFTO及产生暂态地电位升 (Transient Ground Potential Rise, TGPR) 进行了分析计算。[结果] 计算得到仿真模型中不同测点处的TGPR为582~762 V, 通过与文献结果对比, 误差分析的最大误差为3.77%。[结论] 研究结果验证了仿真计算的正确性。

**关键词:** 气体绝缘金属封闭开关设备; 隔离开关; 电弧模型; VFTO; TGPR

中图分类号: TM7; TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0105-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Research on Modeling and Simulation of Transient Ground Potential Rise Caused by GIS Disconnecter Action

LI Jiahui<sup>✉</sup>

(Guangzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510610, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] Massive usage of gas-insulated metal-enclosed switchgear (GIS) has caused serious electromagnetic interference, especially when the isolating switch in GIS is operated with small capacitive current, it does not have arc extinguishing ability, so it leads to multiple breakdowns of the dielectric between the contacts, and the voltage steep waves are rapidly refracted back and forth in the compact pipeline space to form a very fast transient overvoltage(VFTO). [Method] In this paper, a transmission line model suitable for solving transient ground potential rise was used, combined with ATP-EMTP software to analyze and calculate VFTO and transient ground potential rise(TGPR). [Result] The simulation is obtained and the TGPR at different measuring points in the model is 582~762 V. By comparing with the literature results, the error analysis shows that the maximum error is 3.77%. [Conclusion] The result verifies the correctness of the simulation calculation.

**Key words:** gas insulated switchgear; isolating switch; Arc model; VFTO; TGPR

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

在智能坚强电网的大力发展下, GIS因占地面积小、运行可靠性和装备智能化程度高的优点, 被广泛应用在对输电线路的控制、切换、测量中。目前我国新建设并投入使用的变电站普遍采用GIS设

备<sup>[1]</sup>, 但是隔离开关操作导致的VFTO通过GIS管道内部电气传导造成设备暂态电位(电流)升高, 以及通过对邻近空间的电磁感应产生辐射电磁场, 会造成严重的电磁干扰问题<sup>[2]</sup>。在全球范围内, 有半数以上的变电站曾经由于TGPR现象引起事故,

高频的事故造成了巨大的损失<sup>[3]</sup>。

GIS系统内部复杂，VFTO信号随机性强，理论研究只能给出其发展规律，而仿真研究受到误差等影响，均不能完全代替实验。实验可为理论研究提供支撑，同时可校验仿真计算的正确性，是必不可少的一环。文献[4]调节开关分合闸速度的252 kV GIS隔离开关VFTO的试验平台，通过测量开关端口两端电压、电弧电流，调整开关分断速度，研究隔离开关的击穿特性、熄弧机制对VFTO的影响以及二次侧设备的抗扰度。文献[5-8]研究了超高压GIS的TGPR仿真计算方法，探讨了超高压GIS中TGPR的特性。文献[9-13]则探讨了对于特高压TGPR现象的抑制措施研究。综上所述，国内外对于TGPR的研究理论及仿真中，均不能很好的解决地TGPR带来的影响，在实际操作过程中存在各种问题，因此迫切需要开展该方向的研究工作。

本文以研究GIS隔离开关动作产生的VFTO为出发点，重点对传导干扰产生的特快速暂态过电压和暂态地电位升进行分析计算，采取了理论仿真结合实验的技术路线。

## 1 隔离开关动作引起的电磁骚扰特性研究

从广义的电磁兼容三要素（电磁骚扰源、耦合途径、敏感设备）出发，电磁骚扰源VFTO、传导干扰和辐射干扰、电子式互感器等敏感设备构成了隔离开关动作引起的电磁兼容问题中的三个要素。

### 1.1 GIS隔离开关动作过程及VFTO电磁骚扰源分析

GIS中隔离开关动作属于常规操作，主要起到隔离电源、改变运行方式进行倒闸操作、接通和切断小电流电路的作用。

由于动触头的移动速度较慢，约为 $(1\pm 0.2)$  m/s，因此隔离开关动作时触头间隙介质会发生反复击穿引发数十次甚至上百次的电弧重燃现象。每一次击穿导致的电弧重燃均会使触头间的过电压波在几个纳秒内瞬间跌落，产生的电压陡波在GIS管母线和设备上传播并来回折反射形成幅值、频率很高的特快速暂态过电压，对GIS设备造成电磁干扰。

实际上，VFTO骚扰源信号是经过上百次的电弧重燃形成的，因此整个暂态过程为很多个单次燃弧过程的信号叠加，持续时间在毫秒级。实验

表明暂态过程不仅发生在隔离开关内部，过电压信号也同时通过传导干扰和辐射干扰对系统的设备而造成电磁干扰，因此需要对VFTO信号的电磁干扰耦合途径进行分析。

### 1.2 考虑开关电容效应的分段电弧模型

本文提出构建一个新的分段电弧模型，其中预击穿过程用指数时变电阻模型表示，燃弧和熄弧过程分别用Cassie电弧模型和Mayr电弧模型表示。

实际情况下电弧会经历多次的重燃，因此需要在单次电弧模型的基础上进一步建立电弧的全时段仿真模型，从而得到全时段的VFTO仿真信号。由文献[9]可知， $SF_6$ 介质恢复强度随触头间距 $l$ 变化的试验数据，得到 $U_b$ 与 $l$ 的近似函数关系：

$$U_b(l) = -1.772 \times 10^7 l^2 + 1.271 \times 10^7 l - 1643 \quad (1)$$

式中 $U_b$ 单位为V， $l$ 单位为m。假设动触头移动速度为 $v$ （单位m/s），以隔离开关分闸操作为例有 $l=vt$ ，上式可进一步改写为：

$$U_b(t) = -1.772 \times 10^7 v^2 t^2 + 1.271 \times 10^7 vt - 1643 \quad (2)$$

当动触头移动速度以加速度 $a$ 增大时，根据 $v=at$ ，上式变为：

$$U_b(t) = -1.772 \times 10^7 a^2 t^4 + 1.271 \times 10^7 at^2 - 1643 \quad (3)$$

因此重燃判据可设定为通过式(2)计算得到 $t$ 时刻的介质恢复强度 $U_b$ ，再与同时刻触头两端的电压差 $\Delta U$ 进行比较，当满足 $U_b > \Delta U$ 时，则认为电弧重燃。过程如图1所示。

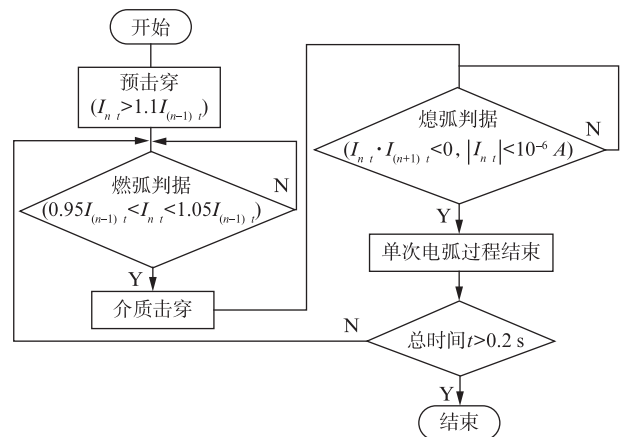


图1 电弧全时段模型的逻辑判断流程图

Fig. 1 The logic judgment flow chart of the arc full-time model

## 2 VFTO电磁骚扰源仿真分析

### 2.1 VFTO电磁骚扰源系统模型整体搭建

参考实际的GIS系统设备结构，搭建隔离开关

动作产生 VFTO 的 GIS 电磁骚扰源系统模型。GIS 电磁骚扰源系统模型等效图如图 2 所示。

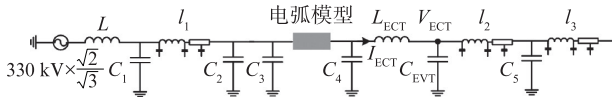


图 2 系统模型等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of system model

图中  $L$ 、 $C_1$  分别为变压器等效电感和电容， $C_2$  为变压器到隔离开关段套管的等效电容， $C_3$ 、 $C_4$  为隔离开关两侧盆式绝缘子的等效对地电容， $C_5$  表示负载侧元件的等效电容； $L_{ECT}$  为电子式电流互感器的等效电感， $C_{EVT}$  为电子式电压互感器的等效电容。 $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  分别表示靠近母线和电缆出线的长度；隔离开关整体用电弧模型代替。

参考系统模型的等效图在 ATP-EMTP 软件中搭

建某电压等级下 VFTO 电磁骚扰源系统仿真模型如下图 3 所示，其中  $V_1 \sim V_7$  为该节点处电压测点。

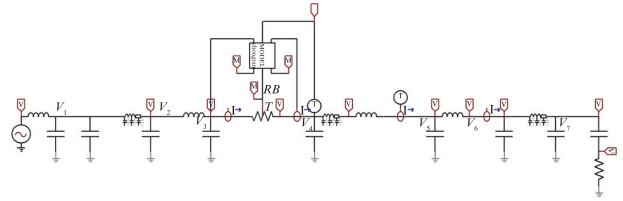
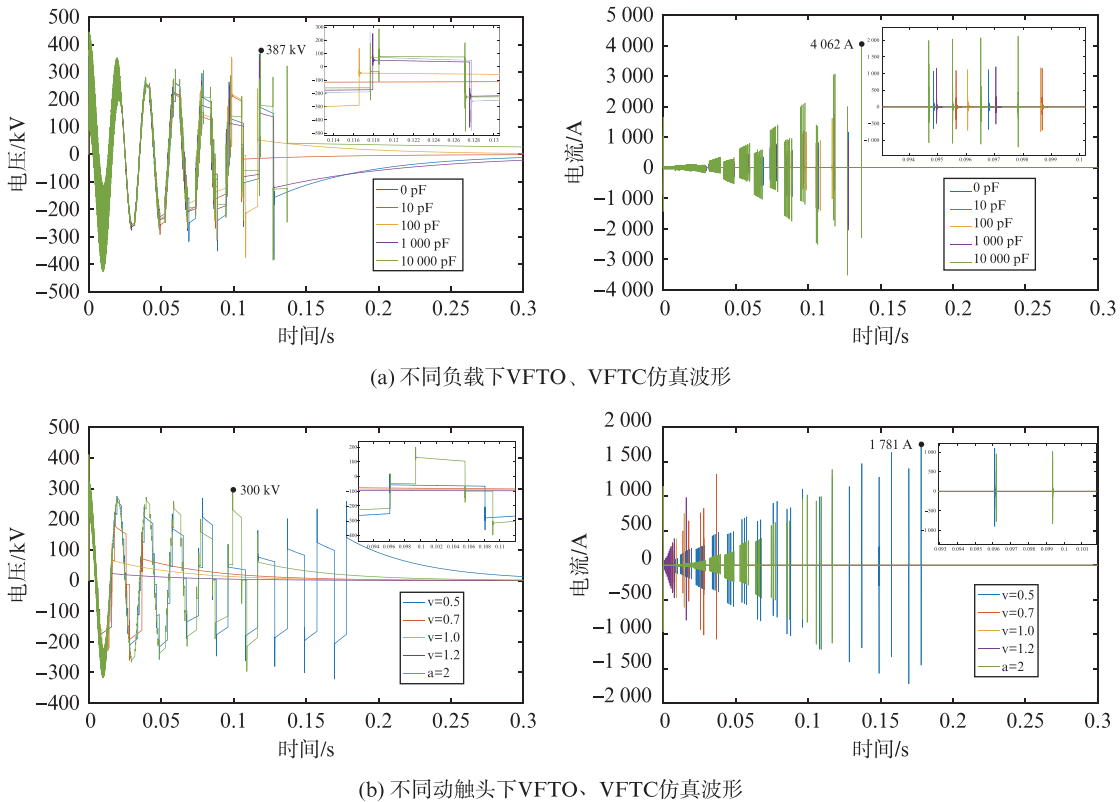


图 3 ATP-EMTP 软件中搭建的系统仿真模型

Fig. 3 The system simulation model built in ATP-EMTP software

### 2.2 VFTO 仿真结果及波头陡度分析

在 ATP-EMTP 软件中使用优化设计后的模拟隔离开关动作产生 VFTO 的 GIS 电磁骚扰源系统模型进行仿真，得到与实际测量相符的 VFTO 全时段仿真波形。互感器端 ( $V_5$  处) 过电压在不同负载及动触头速度下的波形如图 4 所示。



(a) 不同负载下 VFTO、VFTC 仿真波形

(b) 不同动触头下 VFTO、VFTC 仿真波形

图 4 电压互感器处过电压、过电流不同负载及动触头速度下信号

Fig. 4 Signal of overvoltage and overcurrent at voltage transformer under different loads and moving contact speed

由图 4 可知，隔离开关动作产生的 VFTO 会造成互感器对地电位以及流过的电流大幅抬升，在负载电容空载，动触头速度以  $2 \text{ m/s}^2$  增加时，所产生的 VFTO 最大。

定义 VFTO 信号的波形陡度为  $D$ ，电弧被瞬间击穿时的电压差为  $\Delta U_c$ ，穿时间为  $\Delta t_c$ ，表示电弧被击穿的瞬间电压下降的剧烈程度，满足式 (4)，分析如图 5 所示。



$$D = \frac{\Delta U_c}{\Delta t_c} \quad (4)$$

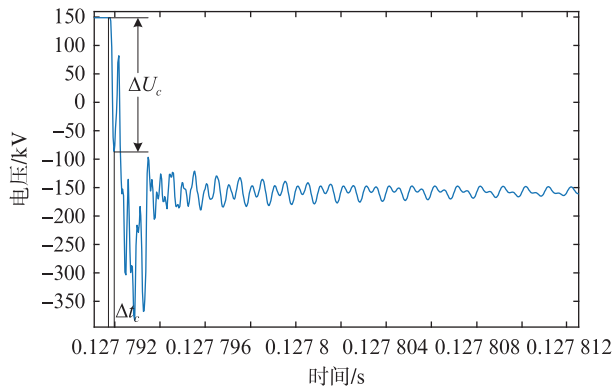


图5 最大过电压处单次燃弧波形

Fig. 5 Single arcing waveform at maximum overvoltage

上图中的最大过电压发生在最后一次燃弧处，记波形陡度为 $D_1$ ，计算得到 $D_1=2.54 \text{ MV}/\mu\text{s}$ 。同理计算最后十次燃弧的波头陡度 $D$ ，计算结果如下表1所示。

表1 最后十次燃弧的VFTO波头陡度

Tab. 1 VFTO wave front steepness for the last ten arcs

计算次数/次	1	2	3	4	5
$D/(\text{MV} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	2.54	2.67	2.15	1.85	1.69
计算次数/次	6	7	8	9	10
$D/(\text{MV} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	1.47	1.33	1.05	0.80	0.62

从表1数据可以发现，VFTO信号的波头陡度达到了 $\text{MV}/\mu\text{s}$ 级，其中燃弧过程中 $D$ 最大为 $2.67 \text{ MV}/\mu\text{s}$ 。总体上随着弧隙暂态过程的进行，VFTO信号的波头陡度表现为逐渐增大的趋势。说明尽管最大过电压只出现在最后一次燃弧过程，但在前续的燃弧过程中波头陡度已经达到了很大的数值，整个VFTO的暂态过程中互感器都会受到反复的冲击电压的作用，对设备工作造成影响。

### 3 GIS变电站暂态地电位升实验仿真研究

#### 3.1 TGPR的基本机理

GIS分合隔离开关时产生的暂态接地电位升(TGPR)通常表现为GIS外壳的电位在短时间内迅速上升，电压幅值范围 $10 \sim 100 \text{ kV}$ 左右。研究表明，GIS中TGPR引起的事故占50%以上，造成设备故障且对检修人员带来人身伤害。TGPR产生的原因如下：一是GIS内介质击穿造成的，击穿 $\text{SF}_6$ 气体使电压极速升高，引起高频振荡；二是由于母线对地击穿造成的；三是外部电容器放电引起的；四是

于在高频下，GIS外壳连接处反射的行波造成的。

隔离开关在分合时的充放电时间极短，因此TGPR常使母线电流突降。同时受到外接地导线的影响，以及线路终端和内部电感、电容的存在，常使输出电流波形产生振荡。震荡幅度在很大程度上决定于母线的几何尺寸。线路终端处和内部电感、电容的存在，常使波形产生振动。震荡幅度也在较大程度上决定着母线的几何宽度。而由于集肤效应，电流被迫沿导线表面通过，因此需要将GIS机壳的内表面看成一个特殊的电压通路。但许多接地连接线由于其外部结构的原因，从而需要把GIS机壳的内部表面视为一条特定的电流路线。而许多接地连接线因为其外部构造的因素，其有效连接电流往往呈现极为强感性，这也造成了在GIS机壳上形成了非常高的暂态电流。

GIS的TGPR主要有以下一些危害：

1) 对变电站工作人员的生命安全造成危害。科学研究已经证实，典型的变电站布置的电击强度已超过了目前由生物医学知识所确定的人类身体所能允许的极限值。

2) 暂态高压会击穿二次设备线路。

3) GIS外壳上电压的急速增加，可能引起对GIS的电气击穿。

#### 3.2 暂态地电位升建模仿真研究

GIS内部暂态过电压在壳体断口处传递到筒体外壳，外壳接地，暂态波在接地处进行折反射；其次暂态波 $U_0$ 进入地线到达参考零点产生负反射，行波到外壳接地点会限制行波幅值上升。外壳波阻抗 $Z_1$ 与地线波阻抗 $Z_3$ 并联分流，降低了外壳接地点处暂态波的幅值，幅值降低系数为 $2Z_3/Z_1+Z_2$ ， $Z_2$ 与接地引线长度成正比。TGPR原理图如图6所示：

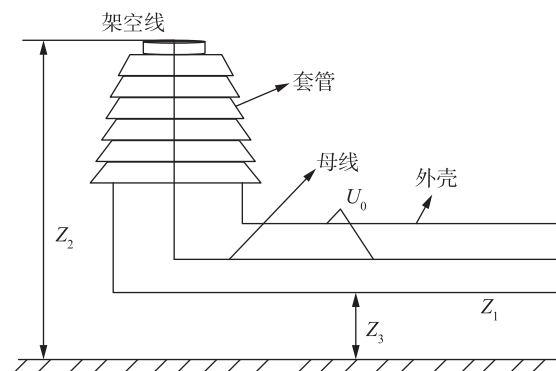


图6 母线结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of bus structure

图 6 中： $U_0$  为 VFTO 激励源， $Z_1$  为母线对外壳的波阻抗， $Z_2$  为套管外侧架空线路的波阻抗， $Z_3$  为母线外壳对地的波阻抗。

$$\begin{cases} Z_1 = 60 \ln \frac{R_1}{R_2} \\ Z_2 = 60 \ln \frac{2h}{R_3} \\ Z_3 = 60 \ln \frac{2h_1}{r} \end{cases} \quad (5)$$

式中：

- $R_1$ ——母线半径 (m)；
- $R_2$ ——壳体内半径 (m)；
- $h$ ——壳体距地高度 (m)；
- $R_3$ ——壳体外半径 (m)；
- $r$ ——架空线半径 (m)；
- $h_1$ ——架空线距地高度 (m)。

根据 Dick 等人提出的传输线模型<sup>[18]</sup>得到模拟计算的等效电路，如图 7 所示。

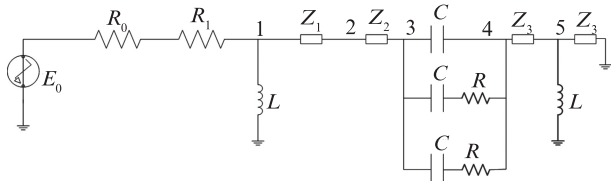


图 7 GIS 外壳电位计算模型

Fig. 7 GIS shell potential calculation model

将开关操作时得到的 VFTO 赋值引入到 GIS 暂态地电位升的仿真模型中  $E_0$  作为激励源，根据变电站线路模型搭建暂态地电位升的模型，模型如图 8 所示，图中  $F$  元件将 VFTO 模型中  $V_6$  节点的电压幅值引入暂态地电位升的模型中作为激励源，如图 9 所示。 $R_1$  (350  $\Omega$ ) 为架空线对地波阻抗， $Z$  为外壳对地波阻抗，接地线用电感  $L$  (1.5  $\mu\text{H}$ ) 等效。结点 3、4 间电容  $C$  (20 pF) 和电阻  $R$  (1  $\Omega$ ) 为绝缘法兰高频暂态模型。

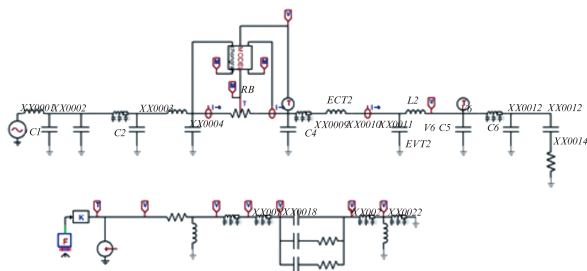


图 8 隔离开关分闸时 TGPR 仿真模型

Fig. 8 TGPR simulation model for isolator switch

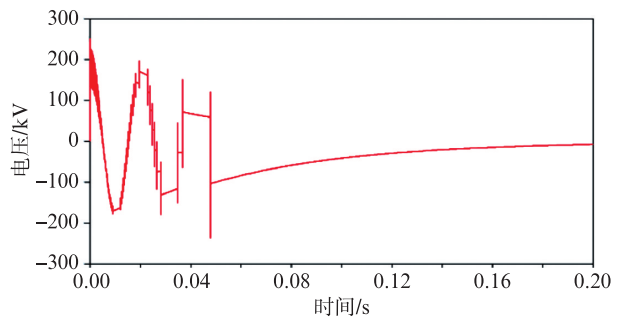


图 9 隔离开关分闸时 VFTO

Fig. 9 VFTO when disconnecter is opened

根据以上模型，仿真得到某电压等级下变电站 1 号位置隔离开关分闸时 GIS 地电位升的幅值如图 10 所示。由图 10 可以看出，隔离开关分闸时暂态地电位升最大幅值约为 -765 V，脉冲持续时间约为 46.03 ms。

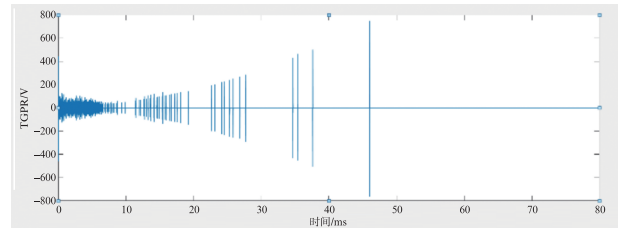


图 10 隔离开关分闸时 TGPR 幅值

Fig. 10 TGPR amplitude of disconnecting switch

变电站隔离开关分闸时仿真数据，通过仿真的数据波形分析得到了分闸时隔离开关的地电位升幅值、脉冲持续时间。具体数据如表 2 所示：

表 2 隔离开关分闸时的 TGPR 幅值与时间

Tab. 2 The amplitude and time of TGPR when the isolator switches

测点	幅值/V	脉冲持续时间/ms
1#	765	46.03
3#	582	82.1
4#	659	75.4
5#	668	100.8

将 ATP-EMTP 仿真结果与实验数据<sup>[20-21]</sup>对比，验证仿真模型的正确性，对比如表 3 所示：

表 3 隔离开关分闸时的 TGPR 误差分析

Tab. 3 TGPR error analysis of disconnecting switch

编号	仿真值/V	试验值/V	误差/%
1#	765	795	3.77
3#	582	600	3.00
4#	659	664	0.75
5#	668	673	0.74

从表3中可知, ATP-EMTP下对TGPR的误差最大值为3.77%, 误差在允许范围之内, 验证了模型的正确性。

#### 4 结论

本文对GIS隔离开关动作引起的电磁骚扰特性进行分析, 包括隔离开关动作产生VFTO的机理及特性、和暂态地电位升的理论进行了分析并通过仿真及现场试验得到了验证, 主要结论如下:

1) 提出并仿真新电弧模型下VFTO信号的过电压幅值、频率分布都与实际试验相符合, 相比定值电阻、时变电阻模型接近实际试验, 能够提高仿真VFTO信号的准确度。

2) 搭建了某电压等级下动触头移动速度、负载侧等效电容负载大小对VFTO电磁骚扰源系统仿真模型。得出在动触头以 $2\text{ m/s}^2$ 的加速度做分合闸运动且负载侧空载的情况下, VFTO信号最为强烈, 其中过电压幅值达到了 $387\text{ kV}$ , 过电流幅值达到了 $1\ 913\text{ A}$ 。电压信号波头陡度最大值为 $2.67\text{ MV}/\mu\text{s}$ , 整体达到了 $1\text{ MV}/\mu\text{s}$ 级, 分析结果表明通过VFTO电磁骚扰源系统模型仿真得到的VFTO信号强度强烈。

3) 采用传输线模型理论, 结合ATP-EMTP软件对VFTO产生的TGPR进行仿真计算。仿真模型中测点处的TGPR幅值范围为 $582\sim 762\text{ V}$ , 与文献中试验测量数据(暂态地电位升 $600\sim 800\text{ V}$ )基本相符, 验证了仿真计算的正确性。

#### 参考文献:

- [1] 舒印彪. 加快建设坚强智能电网推动能源生产和消费革命[J]. 中国科技产业, 2018(5): 10. DOI: 10.16277/j.cnki.cn11-2502/n.2018.05.004.  
SHU Y B. Accelerate the construction of a strong smart grid and promote the revolution of energy production and consumption [J] China Science and Technology Industry, 2018(5): 10. DOI: 10.16277/j.cnki.cn11-2502/n.2018.05.004.
- [2] 赵军, 陈维江, 张建功, 等. 智能变电站二次设备对开关瞬态的电磁兼容抗扰度要求分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1687-1695. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.05.037.  
ZHAO J, CHEN W J, ZHANG J G, et al. Analysis of electromagnetic compatibility immunity requirements of secondary equipment of intelligent substation for switching transient [J]. High Voltage Technology, 2015, 41(5): 1687-1695. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.05.037.
- [3] BUROW S, STRAUMANN U, KOHLER 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. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2328013.
- [4] 王磊, 刘衍, 冯宇, 等. 特高压GIS变电站VFTO波形衰减仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 45-51. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181520.  
WANG L, LIU Y, FENG Y, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation [J] Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 45-51. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.one hundred and eighty-one thousand five hundred and twenty.
- [5] SZEWCZYK M, KUNIEWSKI M, PIASECKI W, et al. Determination of breakdown voltage characteristics of 1 100 kV disconnecter for modeling of VFTO in gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2151-2158. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2513080.
- [6] 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. DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2502458.
- [7] 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. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.03.013.  
LIU W D, WANG L S, CHEN W J, et al. Investigation of the VFTO related repeated breakdown processes in UHV GIS [J]. High Voltage Technology, 2011, 37(3): 644-650. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2011.03.013.
- [8] 林集明, 曾昭华. 利用避雷器限制500 kV系统操作过电压[J]. 高电压技术, 1984(3): 3-9+11. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.1984.03.002.  
LIN J M, ZENG Z H. Using lightning arrester to limit operating overvoltage of 500 kV system [J]. High Voltage Technology, 1984(3): 3-9+11. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.1984.03.002.
- [9] 周甜, 康兵, 舒乃秋, 等. VFTO作用下电子式互感器辐射电磁场数值计算与分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(4): 52-57. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2017.04.008.  
ZHOU T, KANG B, SHU N Q, et al. Numerical calculation and analysis of radiated electromagnetic field of electronic transformer under the action of VFTO [J]. China Southern Power Grid Technology, 2017, 11(4): 52-57. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2017.04.008
- [10] 胡榕, 崔翔, 陈维江, 等. 特高压气体绝缘开关设备瞬态外壳电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5244-5258. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.025.  
HU R, CUI X, CHEN W J, et al. Experimental research on the characteristics of transient enclosure voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear [J]. Proceedings of the CESS, 2014, 34(29): 5244-5258. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.025.

- [11] 文习山, 蓝磊, 许军, 等. 三峡电站允许地电位升高试验研究 (I) [J]. 电网技术, 2003, 27(2): 9-12. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2003.02.003.  
WEN X S, LAN L, XU J, et al. Experimental research on allowable ground potential rise of the three gorges power station(I) [J]. Power Grid Technology, 2003, 27(2): 9-12. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2003.02.003.
- [12] 蓝磊, 文习山, 许军, 等. 三峡电站允许地电位升高试验研究 (II) [J]. 电网技术, 2003, 27(3): 5-7+22. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2003.03.002.  
LAN L, WEN X S, XU J, et al. Experimental research on allowable ground potential rise of three gorges power station(II) [J]. Power Grid Technology, 2003, 27(3): 5-7+22. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2003.03.002.
- [13] 陈楠, 文习山, 蓝磊, 等. 微机保护装置过电压耐受能力试验分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2902-2906. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.12.008.  
CHEN N, WEN X S, LAN L, et al. Analysis of overvoltage tolerance test of microcomputer protection device [J]. High Voltage Technology, 2010, 36(12): 2902-2906. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.12.008.
- [14] 谭波, 杨建军, 鲁海亮, 等. 接地网电位升对 10 kV 避雷器的反击仿真分析 [J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1265-1272. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.05.036.  
TAN B, YANG J J, LU H L, et al. Simulation analysis of counterattack of 10 kV surge arrester caused by grounding grid potential rise [J]. High Voltage Technology, 2013, 39(5): 1265-1272. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.05.036.
- [15] 崔少青. 接地网工频短路时最大允许地电位升的确定 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2011, 31(4): 61-64+70. DOI: 1672-1098(2011)04-0061-04.  
CUI S Q. Determination of the maximum allowable ground potential rise when the grounding grid is short-circuited at power frequency [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011, 31(4): 61-64+70. DOI: 1672-1098(2011)04-0061-04.
- [16] 卢江平, 杨兰均, 贾涛, 等. 1 100 kV GIS 隔离开关分合容性小电流试验中的暂态电压测量 [J]. 高压电器, 2009, 45(6): 106-109+114. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2009.06.019.  
LU J P, YANG L J, JIA T, et al. Transient voltage measurement in the small current test of 1 100 kV GIS disconnector switching capacitors [J]. High Voltage Electrical Appliances, 2009, 45(6): 106-109+114. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2009.06.019.
- [17] 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. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.07.043.  
DUAN S F, LI Z B, ZHAN H M, et al. Experimental research on ultra-fast transient overvoltage and ultra-fast transient current characteristics in 252 kV GIS [J]. Power Grid Technology, 2015, 39(7): 2046-2051. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.07.043.
- [18] 陈建. GIS 中陡波前过电压特性及影响因素的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2006. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2011.30.036.  
CHEN J. Study on the characteristics and influencing factors of steep wave front overvoltage in GIS [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006. DOI: 10.13535/j.cnki.11-4406/n.2011.30.036.
- [19] 陈灏. GIS 外壳环流和暂态地电位升高的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
CHEN H. Research on GIS shell circulation and transient ground potential rise [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [20] 陈泰羽. 混合无功补偿变电站 GIS 外壳环流及暂态地电位升高研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.  
CHEN T Y. Research on GIS shell circulation and transient ground potential rise in hybrid reactive power compensation substation [D]. Jinan: Shandong University, 2019.

---

 作者简介:


李佳慧

李佳慧 (通信作者)

1984-, 女, 湖北赤壁人, 三峡大学输电线路专业学士, 主要从事送电线路电气设计 (e-mail) ljh20034052@163.com。

(责任编辑 郑文棠)