

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.013

## GIS 操作电磁骚扰的三维全波仿真及电弧模型影响分析

贾文达<sup>1</sup>, 曹志伟<sup>2</sup>, 王继豪<sup>2</sup>, 颜庆<sup>2</sup>, 黄金军<sup>3</sup>, 郭俊<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 3. 国家电网有限公司直流技术中心, 北京 100052)

**摘要:** 气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 操作产生的瞬态地电位抬升 (transient ground potential rise, TGPR) 以及空间电场, 对站内人员安全以及二次设备的稳定运行构成严重威胁。GIS 操作中电弧模型会对 TGPR 和空间电场的仿真计算精度产生影响。因此, 文中建立 GIS 三维瞬态电场仿真模型, 基于时域有限积分法, 研究不同的开关电弧模型及其参数对 TGPR 和空间电场仿真结果的影响。分析结果表明, 采用理想开关模型和定值电阻模型, TGPR 和空间电场的仿真波形幅值较高, 而采用类双曲线模型, TGPR 和空间电场的仿真脉冲波形幅值最低。采用指数模型和分段电阻模型, TGPR 和空间电场的仿真波形及其幅值与实测结果几乎一致。在分段电阻模型中, 随着稳态电阻增大, TGPR 和空间电场的脉冲幅值降低; 然而, 当电弧模型的等效长度和等效半径变化时, TGPR 和空间电场的脉冲幅值基本保持不变。

**关键词:** 气体绝缘开关设备 (GIS); 瞬态地电位抬升 (TGPR); 三维瞬态电场仿真模型; 时域有限积分; 空间电场; 电弧模型

中图分类号: TM86; TM154.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)06-0134-09

## 0 引言

气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 作为全封闭式组合电器, 具有占地面积小、运行安全可靠、维护工作量小及检修周期长等优点, 已在我国电网建设中得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。GIS 进行开断操作时, 开关触头间隙因击穿而产生特快速暂态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO), 该 VFTO 耦合至 GIS 壳体后, 经 GIS 外壳传导进入接地网, 引起瞬态地电位抬升 (transient ground potential rise, TGPR)<sup>[6-11]</sup>。同时, VFTO 在传播过程中还会向 GIS 周围空间辐射, 形成瞬态空间电磁场<sup>[12-17]</sup>。GIS 操作引起的电磁暂态现象具有高幅值、宽频带、短持续时间的特点。这些现象不仅威胁 GIS 本身, 还可能通过传导耦合和辐射耦合侵入二次系统, 威胁电网的安全可靠运行。电压等级越高, GIS 操作引起的电磁骚扰现象越严重, 二次设备受影响的概率越高<sup>[18-19]</sup>。因此, 研究 GIS 操作产生的电磁暂态现象, 对保障电气设备的安全可靠运行具有重要意义。

目前, 国内外学者主要通过现场实测和计算机建模仿真研究 GIS 操作引起的电磁暂态现象。然而, 现场测试机会相对较少, 且易受环境因素的干

扰, 因此建立准确的 GIS 试验回路模型进行仿真分析尤为重要。GIS 操作产生的 TGPR 和空间电场波形受开关分合闸速度、相位等多种因素影响, 同时还需考虑电弧模型的建立。

开关操作产生的电弧变化过程受电场、磁场、气流等多种因素影响。使用多物理场耦合模型对电弧建模更符合其真实发展情况, 但该模型涉及的物理量较多、计算复杂, 在电磁骚扰仿真中应用较少。为简化电弧模型, 在计算 VFTO、TGPR 和空间电磁场时, 常将电弧等效为一个电阻。如文献<sup>[20]</sup>将电弧等效为时变电阻, 计算 GIS 外壳暂态电压; 文献<sup>[21]</sup>采用双指数电阻修正模型等效电弧, 分析 GIS 壳体暂态电压及 VFTO 波形特性; 文献<sup>[22-23]</sup>通过电阻等效电弧建立电路模型, 计算开关操作产生的瞬态电压和电流, 并基于此建立空间电磁场模型计算瞬态空间电磁场分布。以上研究主要通过电路模型计算开关操作过电压。电路模型计算速度快, 但难以反映空间细节, 仿真结果的准确度相对较低, 且建立宽频等效电路难度较高。计算电磁场时需要额外建立电磁场模型进行联合仿真, 这将进一步降低仿真结果的准确度。为更准确地研究 GIS 操作引起的外部电磁骚扰, 需要建立三维电磁场模型对 GIS 操作进行全波仿真。

基于三维电磁场仿真模型, 文献<sup>[24]</sup>采用有限元法对 GIS 内部 VFTO 进行时域计算; 文献<sup>[25-26]</sup>研究导体表面电荷分布及电弧模型半径对 VFTO 的影响; 文献<sup>[27]</sup>建立单相 GIS 真型模拟试验回路

收稿日期: 2025-05-11; 修回日期: 2025-07-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFE0115700); 国家电网有限公司总部科技项目 (5500-202316163A-1-1-ZN)

的三维电磁场模型,并应用时域有限积分(finite integration time domain, FITD)方法仿真获得 GIS 暂态壳体电压;文献[15]建立 GIS 的三维电磁场模型,采用 FITD 分析开关操作瞬态空间电磁场的时域波形及分布特性。上述研究中的三维电磁场模型均将电弧建模为具有时变电导率的介质,依据等效电阻以及假设的电弧结构计算得出电导率。在此建模方法下,作为导电介质的电弧,其等效电阻模型对仿真结果具有显著影响。因此文中建立 GIS 三相回路的三维电磁场仿真模型,采用 FITD 方法,研究不同电弧模型及其参数对 GIS 操作产生的 TGPR 与空间电场的影响。

## 1 仿真模型

### 1.1 基于 FITD 的三维全波仿真

三维电磁场仿真可以模拟 GIS 操作时瞬态电磁骚扰的产生和传播过程。文中建立 330 kV GIS 三相试验回路的三维仿真模型,使用 CST-MWS 软件进行仿真。CST-MWS 软件采用 FITD 电磁场数值计算方法,对 TGPR 和空间电场进行仿真计算。

电磁场数值计算方法的核心是麦克斯韦方程组。然而区别于其他电磁场数值计算方法, FITD 法从麦克斯韦方程组的积分形式出发,将麦克斯韦积分方程组在时间和空间上离散化为网格方程组,在给定的边界条件下按照设置的时间步长对网格依次进行求解得到电场量以及磁场量。麦克斯韦方程组的积分表达式为:

$$\begin{cases} \oint_l \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\oint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} \\ \oint_l \mathbf{H} d\mathbf{l} = \oint_s \left( \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) d\mathbf{S} \\ \oint_s \mathbf{D} d\mathbf{S} = \int_V \rho dV \\ \oint_s \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $\mathbf{H}$  为磁场强度;  $\mathbf{D}$  为电位移矢量;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度;  $\mathbf{J}$  为电流体密度矢量;  $\rho$  为电荷体积密度;  $l$  为环路积分路径;  $S$  为闭合曲面;  $V$  为积分电荷体积。

如图 1 所示, CST-MWS 软件在进行 FITD 计算时,将计算域剖分为大量的由基网格和伴随网格组成的正交六面体网格单元。在基网格的平面上定义各棱边上的电压  $v_i$ 、 $v_j$ 、 $v_k$ 、 $v_l$  和平面磁通量  $b_n$ ; 在伴随网格的平面上定义各棱边上的磁压  $m_i$ 、 $m_j$ 、 $m_k$ 、 $m_l$  和平面电通量  $d_n$ 。麦克斯韦积分方程组在每个

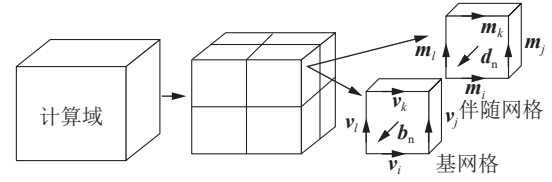


图 1 CST-MWS 中 FITD 网格剖分

Fig.1 Mesh generation of FITD in CST-MWS

网格上都进行离散,如式(1)中的第一项可离散为:

$$v_i + v_j - v_k - v_l = -\frac{\partial b_n}{\partial t} \quad (2)$$

定义矩阵  $\mathbf{C}$  为离散旋度算子,  $\mathbf{V}$  为电压, 则式(2)可表示为:

$$\mathbf{C}\mathbf{V} = -\frac{\partial \mathbf{b}_n}{\partial t} \quad (3)$$

同样地, 对式(1)中的其余三项进行离散可得:

$$\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{M} = \frac{\partial \mathbf{d}_n}{\partial t} + \mathbf{j} \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{K}}\mathbf{d}_n = \mathbf{q} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}\mathbf{b}_n = 0 \quad (6)$$

式中:  $\tilde{\mathbf{C}}$  为伴随离散旋度算子;  $\mathbf{M}$  为磁压矩阵;  $\mathbf{j}$  为离散后的电流矩阵;  $\tilde{\mathbf{K}}$  为伴随离散散度算子;  $\mathbf{K}$  为离散散度算子;  $\mathbf{q}$  为离散后的电荷矩阵。

设置相应的边界条件, 求解离散化的麦克斯韦积分方程组, 便可以在离散的网格空间中解决电磁场问题。

### 1.2 GIS 三相试验回路模型

330 kV GIS 三相试验回路仿真模型如图 2 所示。对模型结构进行简化, 简化后的模型主要包括 GIS 外壳、中心导杆、母线、SF<sub>6</sub> 气体、断路器、隔离开关、套管支架、土壤、接地网、出线套管等部件。接地网设置为深埋于土壤中, GIS 支架通过接地引下线与接地网相连接, 等效地网模型如图 3 所示。

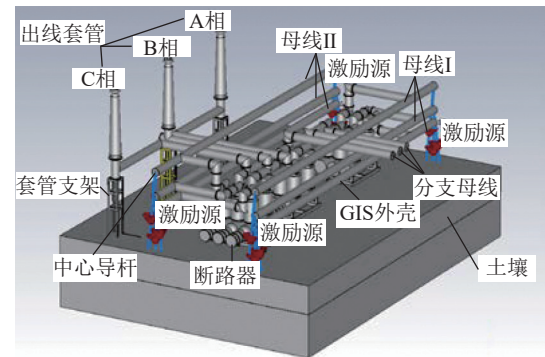


图 2 330 kV GIS 三相试验回路仿真模型

Fig.2 The simulation model of 330 kV GIS three-phase circuit

此外, 在建模与仿真过程中, 作出如下假设:

(1) 采用集总直流电压源作为激励源。由于开

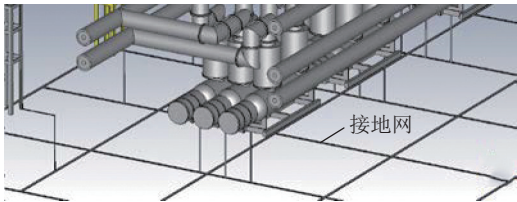


图3 接地网等效模型

Fig.3 The equivalent model of ground grid

关操作时触头间隙击穿时间很短,期间电压基本保持不变,因此,在仿真模型的母线与土壤之间施加集总直流电压源作为激励源。此假设中,激励源的幅值直接影响仿真结果的幅值,但对仿真结果的波形主频率影响很小,因其主要由系统本身的结构决定。

(2) 将 GIS 中的开关结构等效为一段圆柱体。该假设简化了开关的复杂几何结构,通过设置该圆柱体材料属性来模拟开关的状态。该假设对仿真结果的波形主频率影响较小,因其主要受 GIS 母线长度的影响。

(3) 将电弧区域等效为具有时变电导率的介质。GIS 操作产生的电弧是产生电磁骚扰的源头。准确描述电弧过程需要综合考虑电场、磁场、气流等多个物理场。然而,文中主要研究不同电弧模型及其参数对瞬态电磁骚扰仿真结果的影响,而非电弧过程本身。因此,在当前研究目标下,该电弧等效模型具备足够的精度。

1.2.1 仿真激励

三相回路中各相电压幅值会因为相位不同而存在差异,文中选取 B 相电压达到峰值时刻的三相电压值作为激励源。

在时域仿真中,若将激励直接设置为直流源,  $t = 0$  时电压会发生阶跃突变,此突变会对仿真结果造成一定影响。为减小该阶跃突变产生的影响,采用等效余弦波作为电压源波形。在  $t$  大于电源充电至稳定值所需的时间  $t_0$  后,电压源输出保持恒定。因此,仿真采用的电压源激励的时域表达式为:

$$U_x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 0.5U_{x0}(1 - \cos(\pi t/t_0)) & 0 \leq t \leq t_0 \\ U_{x0} & t > t_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $U_x$  为激励相位  $x$  的电压源;  $U_{x0}$  为激励相位  $x$  母线电压幅值。

1.2.2 开关模型

文中所建立的模型为三维仿真模型,无法直接对断路器和隔离开关的开断过程进行建模。假设开关操作产生的电弧为一段圆柱体,对于已断开或闭合的断路器、隔离开关,则将其等效为与 GIS 中心导

杆半径相同的圆柱体,如图 4 所示。通过为这些等效圆柱体设置不同的电导率材料属性,模拟断路器、隔离开关的开断状态,具体材料设置如表 1 所示。

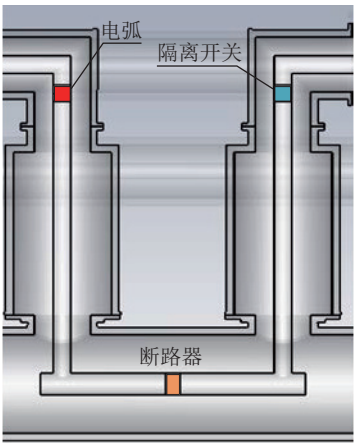


图4 隔离开关和断路器等效模型

Fig.4 The equivalent model of disconnector switch and circuit breaker

表 1 模型中开关开断状态

Table 1 The interruption state of the switch in the model

开关类型	是否动作	开关状态	等效材料
断路器	是		电弧
	否	闭合	铝
		断开	SF <sub>6</sub>
隔离开关	是		电弧
	否	闭合	铝
		断开	SF <sub>6</sub>

1.3 电弧数学模型

在 GIS 操作过程中,由于触头运动速度较慢,触头间隙可能发生多次电弧击穿和重燃现象。根据文献[12, 28]所述, GIS 操作暂态过程的全过程波形由多个单次击穿脉冲波形叠加组成。在同一位置处,不同的单次击穿脉冲波形基本相似,仅幅值存在差异,且主要频率成分也基本一致。由于各单次击穿脉冲相互独立,且文中主要研究电弧模型对 GIS 操作产生的 TGPR 和空间电场的影响,因此重点针对单次燃弧过程的电磁暂态特性进行仿真计算和分析研究。

将单次击穿时的电弧等效为电阻,传统的电弧等效数学模型主要包括:理想开关模型、定值电阻模型、时变电阻模型<sup>[29-31]</sup>。

1.3.1 理想开关模型

理想开关模型认为开关仅存在断开和闭合两种状态,开关操作只存在状态切换。当开关断开时,触头间电阻为无穷大;当开关闭合时,触头间隙为零且不产生电弧。



### 1.3.2 定值电阻模型

定值电阻模型在理想开关模型的基础上进行改进,将电弧等效为一个阻值恒定的电阻,其阻值通常取 2~5  $\Omega$ 。该模型考虑了弧道电阻的阻尼作用,但所等效的定值电阻难以准确模拟电弧的非线性动态变化过程。

### 1.3.3 时变电阻模型

GIS 操作时,触头间隙击穿产生的电弧变化是一个高度非线性的动态过程。国内外学者通过对实测燃弧数据进行拟合,推导出多种电弧的时变电阻模型。目前采用较多的时变电阻模型为指数模型、类双曲线模型和分段电阻模型。

(1) 指数模型的数学表达式为:

$$R_{\text{arc}}(t) = R_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + r \quad (8)$$

式中:  $R_{\text{arc}}$  为开关弧道电阻;  $\tau$  为指数模型中的击穿时间常数,取  $\tau = 1 \text{ ns}$ ;  $R_0$  为指数模型中的绝缘电阻,取  $R_0 = 10^{12} \Omega$ ;  $r$  为指数模型中的稳态电阻,取  $r = 0.5 \Omega$ 。

(2) 类双曲线模型的数学表达式为:

$$R_{\text{arc}}(t) = \begin{cases} 2Z \left( \frac{t_1}{t} - 1 \right) & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t \geq t_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$t_1 = \frac{1.0 \sim 1.5}{p} \quad (10)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (11)$$

式中:  $Z$  为 GIS 母线波阻抗;  $t_1$  为类双曲线模型中的击穿时间常数;  $p$  为 GIS 内部气体压强,约为 0.3~0.4 MPa;  $L_0$  为 GIS 母线单位长度的电感;  $C_0$  为 GIS 母线单位长度的电容。

(3) 分段电阻模型的数学表达式为:

$$R_{\text{arc}}(t) = R_1 e^{\frac{t}{\tau_1}} + R_2 e^{\frac{t}{\tau_2}} \quad (12)$$

式中:  $\tau_1$  为分段电阻模型中的击穿时间常数,取  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ;  $\tau_2$  为分段电阻模型中的熄弧时间常数,取  $\tau_2 = 1 \mu\text{s}$ ;  $R_1$  为分段电阻模型中的绝缘电阻,取  $R_1 = 10^{12} \Omega$ ;  $R_2$  为分段电阻模型中的稳态电阻,是可变参数,取  $R_2 = 0.5 \Omega$ 。

电弧的实际物理发展过程包含预击穿、燃弧和熄弧 3 个发展阶段。式(8)、式(9)中,指数模型和类双曲线模型所等效的弧道电阻值随着时间单调递减。说明这 2 个模型仅能表征电弧的预击穿和燃弧阶段。分段电阻模型则考虑电弧预击穿、燃弧和熄弧 3 个阶段,可完整模拟电弧发展的全过程。

### 1.3.4 电弧电导率设置

GIS 仿真模型中电弧电导率为:

$$\sigma_{\text{eq}} = \frac{l_{\text{eq}}}{R_{\text{arc}} \pi a^2} \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{\text{eq}}$  为设置材料的电导率;  $l_{\text{eq}}$  为等效电弧的长度,取  $l_{\text{eq}} = 0.11 \text{ m}$ ;  $a$  为等效电弧的半径,取  $a = 0.06 \text{ m}$ ,也为中心导杆半径值。

### 1.4 三维仿真模型的验证

在土壤模型中选取一点作为零电位参考点。布置 2 个测点,1 个用于测量 GIS 操作时断路器支架接地点到参考零电位之间的电位差;1 个用于测量 GIS 操作产生的瞬态电场。测点具体布置如图 5 所示。

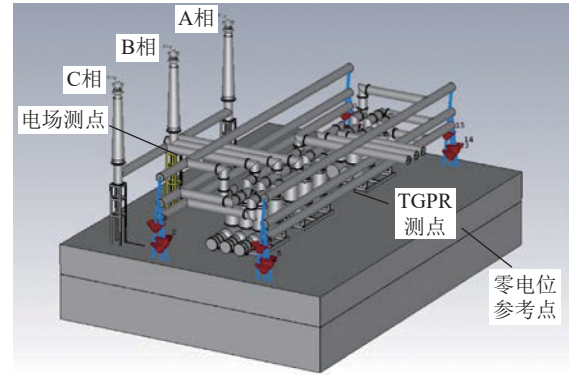


图 5 TGPR 和空间电场测点分布

Fig.5 The positions of TGPR and spatial electric field measurement points

330 kV GIS 三相回路仿真模型建立后,设置模型的仿真激励、边界条件以及各部分材料属性。为验证所搭建的 GIS 三相回路模型的正确性,文中首先将电弧等效为指数模型进行研究。TGPR 和空间电场的仿真脉冲波形如图 6 所示。TGPR 和空间电场的现场实测脉冲波形如图 7 所示。

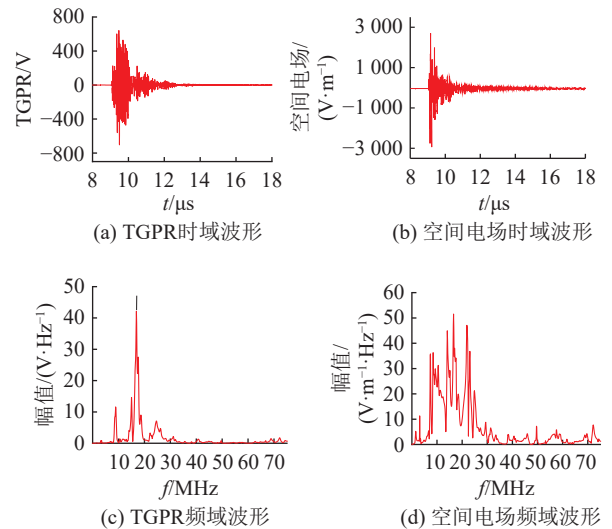


图 6 TGPR 和空间电场仿真脉冲波形

Fig.6 The simulation pulse waveforms of TGPR and spatial electric field

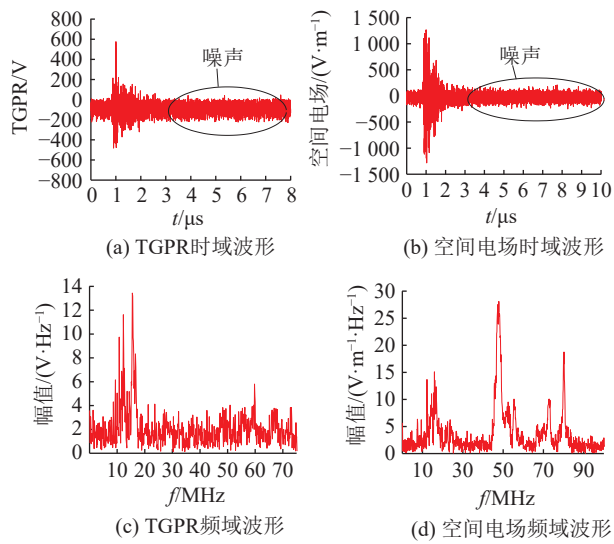


图7 TGPR 和空间电场实测脉冲波形

Fig.7 The actual measured pulse waveforms of TGPR and spatial electric field

由图6和图7可知, TGPR 和空间电场单脉冲波形均为衰减振荡波, 该波形的幅值、主频、脉冲持续时间如表2和表3所示。TGPR 波形特征基本一致, 其主频在 20 MHz 以内吻合度较好, 脉冲持续时间基本一致; 空间电场的主频在 20 MHz 以内吻合度较好, 其脉冲持续时间也基本一致。

表2 TGPR 单脉冲波形参数

Table 2 The single pulse waveform parameters of TGPR

数据种类	幅值/(V·m <sup>-1</sup> )	主频/MHz	脉冲持续时间/μs
仿真数据	704	8.9、15、16.9	3
实测数据	576	10.7、12.2、15.5	3

表3 空间电场单脉冲波形参数

Table 3 The single pulse waveform parameters of spatial electric field

数据种类	幅值/(V·m <sup>-1</sup> )	主频/MHz	脉冲持续时间/μs
仿真数据	2 940	14.1、16.6、21.9	2
实测数据	1 280	15.9、47.9、80.2	2

仿真与实测数据在单脉冲持续时间上一致性较好, 但仿真数据的幅值略高于实测值。这是因为仿真是基于 B 相电压峰值时刻的激励, 而实际测试时难以精确地在相电压达到峰值瞬间进行开关操作。尽管波形幅值存在偏差, 但主频和单脉冲持续时间的一致性验证了所搭建的三维电磁模型结构的正确性。

2 电弧模型和电导率对 TGPR 和空间电场的影响

由于现场试验条件限制, 仅布置了 1 个 TGPR

测点, 即 1.4 节中选取的 TGPR 测点(下文称为测点 1), 其位置与实际 TGPR 测点位置接近。为弥补测点数量限制并增强研究普适性, 增加 TGPR 测点 2, 用于观测 B 相出线套管支架接地点与零电位参考点之间的电位差。

根据 1.3 节所述, 分段电阻模型在理论上能够得到相对准确的仿真结果。然而, 文中的三维电磁仿真主要研究电弧单次击穿过程。为系统评估电弧单次击穿时不同电弧模型及其参数对仿真结果的影响, 须对不同电弧模型以及其参数进行深入研究。

2.1 不同电弧模型对 TGPR 和空间电场的影响

根据式(13)计算得出不同电弧模型下的电导率随时间变化曲线, 如图8所示。图8中, 在开关触头间隙未发生击穿时, 电弧电导率几乎为 0, 在数纳秒后发生击穿, 电弧电导率迅速上升。当电弧电导率上升到一定值时, 指数模型下的电弧电导率将保持不变, 而分段电阻模型下的电弧电导率开始缓慢下降直至趋于 0。

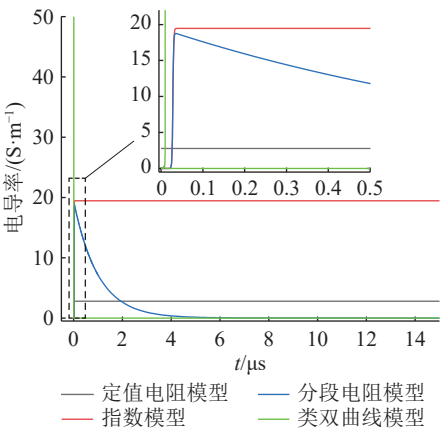


图8 不同电弧模型的电弧电导率波形

Fig.8 Waveforms of arc conductivity on different arc models

保持其他条件与设置不变, 分别将电弧等效为理想开关模型、定值电阻模型、分段电阻模型和类双曲线模型进行仿真, 不同电弧模型下测点 1 的 TGPR 波形如图9所示, 空间电场波形如图10所示。

仿真得到的 TGPR 和空间电场波形均为衰减振荡波。理想开关模型下波形衰减较慢, 且波形衰减后仍有明显振荡; 定值电阻模型和时变电阻模型下波形衰减速度较为接近且快于理想开关模型, 原因是弧道电阻的存在加速了衰减过程。由图9、图10中各波形衰减后的尾波部分可知, 时变电阻模型的尾波幅值较小。

不同电弧模型下的仿真 TGPR、空间电场波形幅值如表4所示。从表4中可以看出, 不同模型对应的仿真波形幅值存在显著差异。理想开关模型

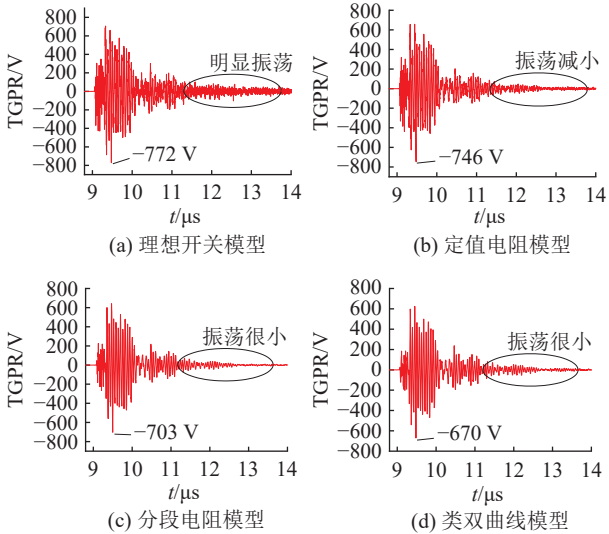


图9 不同电弧模型下的TGPR波形

Fig.9 Waveforms of TGPR on different arc models

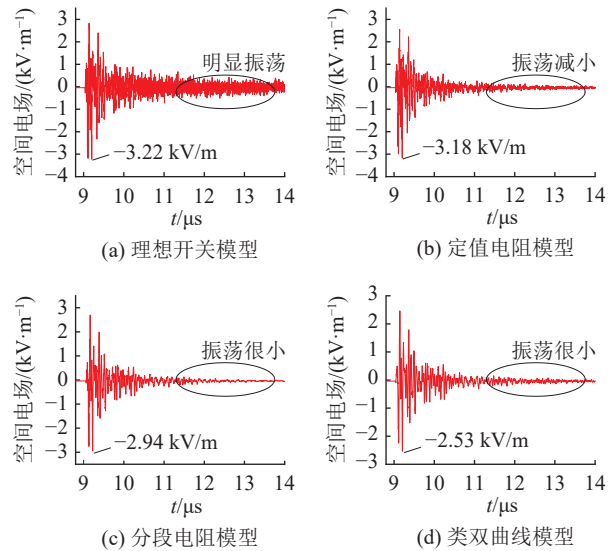


图10 不同电弧模型下的空间电场波形

Fig.10 Waveforms of spatial electric field on different arc models

对应的仿真波形幅值高于定值电阻模型。类双曲线模型对应的仿真波形幅值最低。此外,指数模型和分段电阻模型的仿真波形及脉冲幅值几乎一致。对比指数模型和分段电阻模型,两者在预击穿与燃弧阶段的特性几乎相同,但分段电阻模型中考虑了电弧的熄弧过程,该过程降低了衰减阶段波形的幅值。

综合对比不同电弧模型的仿真结果,在仿真GIS操作产生的TGPR和空间电场时,若仅考虑波形幅值,采用指数模型和分段电阻模型可以计算得到较为一致的波形幅值结果。然而当进一步考虑电弧发展的全过程时,分段电阻模型更加符合实际。基于以上对比分析,为更准确地研究电弧模型参数对仿真结果的影响,后续研究将采用分段电阻

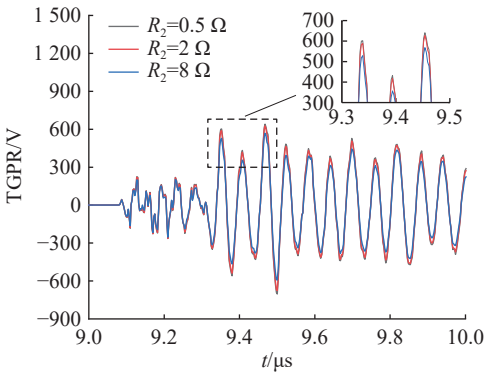
表4 不同电弧模型下TGPR和空间电场幅值

Table 4 Amplitudes of TGPR and spatial electric field on different arc models

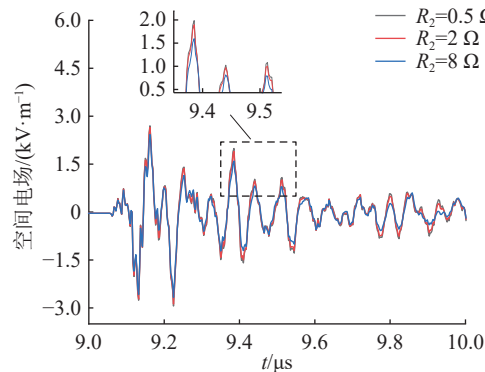
电弧模型	TGPR幅值		空间电场幅值/(kV·m <sup>-1</sup> )
	测点1/V	测点2/kV	
理想开关模型	772	1.28	3.22
定值电阻模型	746	1.15	3.18
指数模型	704	9.90	2.94
类双曲线模型	670	7.17	2.53
分段电阻模型	703	9.90	2.94

模型等效电弧。

文中分析分段电阻模型中稳态电阻对仿真响应幅值的影响。稳态电阻 $R_2$ 表征电弧燃烧状态下的弧阻,为可变参数。在仿真中保持其余设置不变,通过改变 $R_2$ 的值,研究其对TGPR和空间电场仿真结果的影响。首先设定 $R_2 = 0.5 \Omega$ 进行仿真计算。该数值与指数模型的稳态燃弧电阻一致,为文献中普遍采用的值。 $R_2 = 0.5 \Omega$ 时,仿真结果较实测结果偏大。因此,考虑增大 $R_2$ 进行仿真计算,当 $R_2$ 增大至 $8 \Omega$ 时,测点1的TGPR仿真幅值与实测结果接近。图11为 $R_2$ 分别取 $0.5、2、8 \Omega$ 时,测点1的TGPR和空间电场的仿真结果,其波形幅值如表5所示。



(a) TGPR时域波形



(b) 空间电场时域波形

图11 不同稳态电阻下TGPR和空间电场波形  
Fig.11 Waveforms of TGPR and spatial electric field on different values of steady resistance

表 5 不同稳态电阻下 TGPR 和空间电场幅值  
Table 5 Amplitudes of TGPR and spatial electric field on different values of steady resistance

$R_2/\Omega$	TGPR幅值		空间电场幅值/( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )
	测点1/V	测点2/kV	
0.5	703	9.90	2.94
2	676	9.59	2.88
8	593	8.52	2.67

由图 11 和表 5 可见,  $R_2$  对 TGPR 和空间电场的幅值影响较大, 脉冲波形幅值随  $R_2$  增大而减小, 原因是  $R_2$  表征电弧击穿状态下的电阻, 其阻值增大导致耗能增加, 从而使波形幅值降低。

## 2.2 电弧电导率对 TGPR 和空间电场的影响

### 2.2.1 电弧长度对响应幅值的影响

由式(13)可知, 当电弧电阻和电弧半径一定时, 电弧电导率与电弧长度成正比关系。取电弧半径  $a = 0.06 \text{ m}$ , 基于式(13)计算得到不同电弧长度下的电导率。在上述条件和参数设置下, 对不同电弧长度进行仿真, 得到的 TGPR 和空间电场脉冲波形几乎一致, 如图 12 所示。

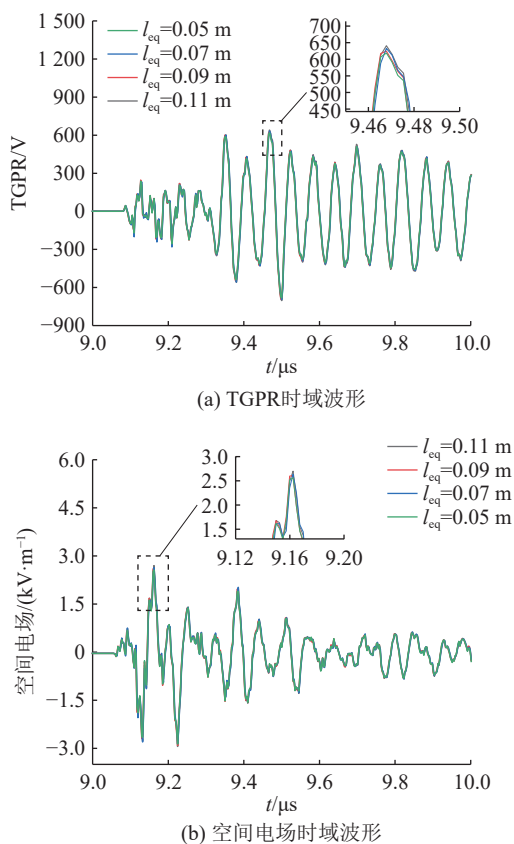


图 12 不同电弧长度下 TGPR 和空间电场波形  
Fig.12 Waveforms of TGPR and spatial electric field on different arc length

不同电弧长度下的仿真波形幅值如表 6 所示, TGPR 和空间电场幅值的偏差很小, 波形幅值随电

弧长度的变化仅有略微变化, 说明电弧长度对 TGPR 和空间电场的仿真结果影响很小。

表 6 不同电弧长度下 TGPR 和空间电场幅值  
Table 6 Amplitudes of TGPR and spatial electric field on different arc length

$l_{eq}/\text{m}$	TGPR幅值		空间电场幅值/( $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ )
	测点1/V	测点2/kV	
0.05	682	9.50	2.87
0.07	695	9.81	2.85
0.09	692	9.48	2.91
0.11	703	9.90	2.94

### 2.2.2 电弧半径对响应幅值的影响

由式(13)可知, 当电弧电阻和电弧长度一定时, 电弧电导率与电弧半径的平方成反比关系。取  $l_{eq} = 0.11 \text{ m}$ , 基于式(13)计算得到不同电弧半径下的电导率。在上述条件和参数设置下, 对不同电弧半径进行仿真, 得到的 TGPR 和空间电场脉冲波形几乎一致, 如图 13 所示。

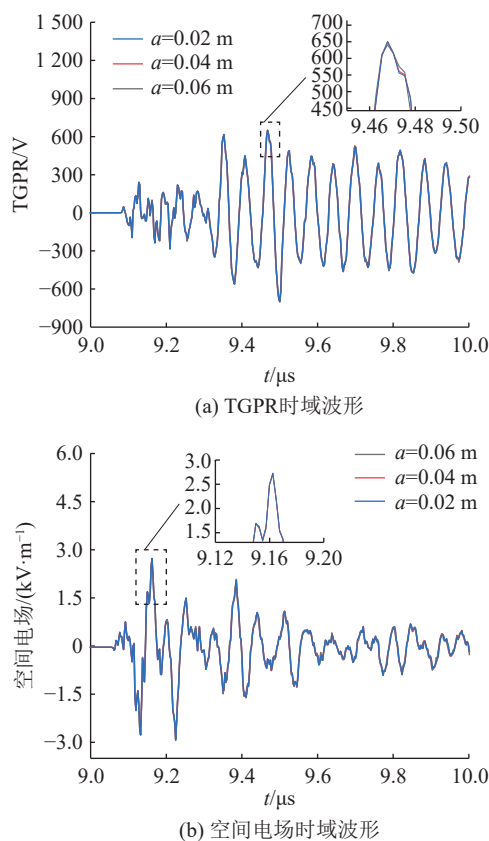


图 13 不同电弧半径下 TGPR 和空间电场波形  
Fig.13 Waveforms of TGPR and spatial electric field on different arc radius

不同电弧半径下的仿真波形幅值如表 7 所示。TGPR 和空间电场幅值的偏差很小, 当电弧半径发生变化时, 波形的幅值几乎不变, 说明电弧半径对 TGPR 和空间电场的仿真结果影响很小。



表 7 不同电弧半径下 TGPR 和空间电场幅值  
Table 7 Amplitude values of TGPR and spatial electric field on different arc radius

a/m	TGPR幅值		空间电场幅值/(kV·m <sup>-1</sup> )
	测点1/V	测点2/kV	
0.02	698	9.92	2.90
0.04	698	9.98	2.91
0.06	703	9.89	2.94

3 结论

文中建立 GIS 三相试验回路仿真模型,采用基于 FITD 的全波电磁仿真方法对 GIS 操作产生的 TGPR 和空间电场进行仿真计算,研究不同电弧模型及其参数对仿真结果的影响。得到以下结论:

(1) 基于实际工程应用搭建 GIS 三相试验回路仿真模型,仿真所得到的单脉冲波形与现场实测结果在幅值、持续时间、频谱等关键参数上吻合度较高,验证了所建立仿真模型的正确性。

(2) 在仿真 GIS 操作产生的 TGPR 和空间电场时,考虑到实际电弧发展过程,采用分段电阻模型等效电弧,可以得到相对准确的结果。

(3) 在分段电阻模型中,当稳态电阻增大时,TGPR 和空间电场的脉冲幅值降低;而当电弧模型的等效长度和等效半径变化时,TGPR 和空间电场的脉冲幅值几乎不受影响。

参考文献:

[1] 朱佩龙,欧张力,林复明. 大电流气体绝缘金属封闭开关设备的三工位隔离开关设计[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 297-301.  
ZHU Peilong, OU Zhangli, LIN Fuming. Design of three position disconnecter for high current gas insulated metal-enclosed switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 297-301.

[2] 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.  
WANG Lei, LIU Yan, FENG Yu, et al. Simulation research on VFTO waveform attenuation in UHV GIS substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 45-51.

[3] 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(S1): 105-111.  
LI Jiahui. Modeling and simulation of transient ground potential rise caused by GIS disconnecter action[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(S1): 105-111.

[4] 严伟,郑毅,张科乾,等. 气体绝缘开关柜支柱绝缘子电场分析及优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2024(4): 149-156,163.  
YAN Wei, ZHENG Yi, ZHANG Keqian, et al. Electric field analysis and structure optimization of post insulator in gas insulated switchgear[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4): 149-156,163.

[5] 吴文海,吴晟玮,沈丰慧,等. 252 kV 环保型 GIS 双断口真空断路器并联电容的电场分析计算[J]. 高压电器, 2024, 60(9):

114-125.  
WU Wenhai, WU Shengwei, SHEN Fenghui, et al. Electric field analysis and calculation of parallel capacitors for 252 kV environment-friendly GIS double-break vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(9): 114-125.

[6] 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.

[7] 余银钢,潘天红. 新型双机构快速机械开关断路器结构与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 144-153.  
YU Yingang, PAN Tianhong. Structure and performance analysis of a new type of fast mechanical switch circuit breaker with a double mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 144-153.

[8] 林岑,邱炜,周波,等. 一起 110 kV GIS 设备自由金属颗粒放电缺陷及解体分析案例[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 214-220.  
LIN Cen, QIU Wei, ZHOU Bo, et al. Discharge defect of free metal particle of 110 kV GIS equipment and its disassembly analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 214-220.

[9] 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.

[10] VISAKAN S, RAO M M, KUMAR M, et al. Experimental study of fast transient currents in gas insulated substation[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2019, 20(6): 20180099.

[11] XUE H Y, AMETANI A, MAHSEREDJIAN J. Very fast transients in a 500 kV gas-insulated substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 627-637.

[12] 孔旭,郭飞,梁涛,等. 220 kV GIS 中断路器关合空载变压器所产生 VFTO 辐射电场的测量与波形特征分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 5087-5093, 5134.  
KONG Xu, GUO Fei, LIANG Tao, et al. Measurement and analysis of the transient radiation electric field excited by the breaker when closing the unloaded transformer in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 5087-5093,5134.

[13] 陈维江,赵军,边凯,等. GIS 变电站开关操作瞬态电磁骚扰研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4935-4948, 4996.  
CHEN Weijiang, ZHAO Jun, BIAN Kai, et al. Research progress on transient electromagnetic disturbance due to switching operations in GIS substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4935-4948,4996.

[14] 焦宇峰,饶旭妮,成林,等. 110 kV AIS 隔离开关操作产生的瞬态磁场特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 15-20, 26.  
JIAO Yufeng, RAO Xuni, CHENG Lin, et al. Research on characteristic of transient magnetic field generated by 110 kV AIS disconnecting switch's operation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 15-20,26.



- [15] 付胜军. GIS 变电站开关操作空间电磁场分布特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.  
FU Shengjun. Research on spatial electromagnetic field distribution characteristics of switching operation in GIS substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [16] 张国宝, 柯艳国, 黄伟民, 等. 基于电磁瞬态过程的 GIS 隔离开关分合位置确认方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 70-75.  
ZHANG Guobao, KE Yanguo, HUANG Weimin, et al. Study on opening and closing position confirmation method of GIS disconnecter based on electromagnetic transient process[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 70-75.
- [17] 江金洋, 张相杰, 尹心, 等. 750 kV GIS 变电站开关操作电磁暂态特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 147-153.  
JIANG Jinyang, ZHANG Xiangjie, YIN Xin, et al. Study on electromagnetic transient characteristics during switching operation of 750 kV GIS substation[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 147-153.
- [18] 贺家慧, 张丹丹, 张露, 等.  $\pm 500$  kV 换流站工频电磁环境测量与实验室模拟[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 10-16.  
HE Jiahui, ZHANG Dandan, ZHANG Lu, et al. Measurement and laboratory simulation of power frequency electromagnetic environment of  $\pm 500$  kV converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 10-16.
- [19] 褚磊, 饶旭妮, 成林, 等. 110 kV AIS 隔离开关分合操作瞬态电场的模拟实验研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 85-90.  
CHU Lei, RAO Xuni, CHENG Lin, et al. Simulated experimental study on transient electric field of 110 kV AIS disconnecter during opening and closing operation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 85-90.
- [20] 林莘, 李爽, 徐建源, 等. 超高压 GIS 暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 12-17, 25.  
LIN Xin, LI Shuang, XU Jianyuan, et al. Simulation of transient enclosure voltage in EHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 12-17, 25.
- [21] 王奎钢, 何铮, 康超, 等. GIS 抽水蓄能电站 VFTO 下壳体电位抬升特性及影响因素研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 125-131.  
WANG Kuigang, HE Zheng, KANG Chao, et al. Study on characteristics and influencing factors of potential rise of enclosure under VFTO in GIS at pumped storage power station[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 125-131.
- [22] 代晓娣. 变电站快速暂态过电压下空间瞬态电磁场的研究和分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.  
DAI Xiaodi. Research and analysis of spatial transient electromagnetic field under fast transient overvoltage in substation[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [23] 赵雪, 林莘, 郝莎, 等. 气体绝缘变电站空间电磁场计算[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 219-224, 232.  
ZHAO Xue, LIN Xin, HAO Sha, et al. Calculation of spatial electromagnetic field in GIS substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 219-224, 232.
- [24] SMAJIC J, HOLAUS W, KOSTOVIC J, et al. 3D full-Maxwell simulations of very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1514-1517.
- [25] LU B X, SHI Y X, LIN X H, et al. 3D full Maxwell research for effect of initial electromagnetic field on very fast transient overvoltage in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(6): 3319-3327.
- [26] 卢斌先, 周娜, 石雨鑫. 电弧三维电磁场模型参数对 GIS 中 VFTO 的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 953-959.  
LU Binxian, ZHOU Na, SHI Yuxin. Effect of arcing model parameter on VFTO in GIS in 3D electromagnetic field simulations[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 953-959.
- [27] 李顺杰, 焦重庆, 张荐. 特高压气体绝缘开关设备瞬态外壳电压的全波仿真[J]. 电气工程学报, 2016, 11(2): 10-15, 32.  
LI Shunjie, JIAO Chongqing, ZHANG Jian. Full-wave simulation of transient enclosure voltage due to ultra high voltage gas insulated substation switching operations[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(2): 10-15, 32.
- [28] 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.  
HU Rong, CUI Xiang, CHEN Weijiang, et al. Experimental research on the characteristics of transient enclosure voltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5244-5258.
- [29] 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.
- [30] 郑记玲. 252 kV GIS 中隔离开关电弧模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
ZHENG Jiling. The research on the arc model for disconnectors in 252 kV GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [31] 宋坤宇, 刘春, 王增彬. VFTO 仿真中隔离开关电弧模型研究[J]. 电工技术, 2020(11): 17-22.  
SONG Kunyu, LIU Chun, WANG Zengbin. Research on arc model of disconnecting switch in VFTO simulation[J]. Electric Engineering, 2020(11): 17-22.

作者简介:



贾文达

贾文达(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为强电磁环境对电子电气系统的耦合作用机理 (E-mail: 3122304201@stu.xjtu.edu.cn);

曹志伟(1974), 男, 硕士, 工程师, 从事调相机运检技术管理、发电机及调相机故障机理研究工作;

王继豪(1992), 男, 硕士, 工程师, 从事调相机故障机理研究工作。

(下转第 154 页)

## Review of virtual power plant in new power system

GAO Ming<sup>1</sup>, ZENG Pingliang<sup>2</sup>, FENG Yongchao<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Energy Storage Group Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 2. Department of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** With the increasing depletion of traditional fossil fuels, new energy sources such as wind and solar power become the main energy sources for building new power systems. Distributed energy resources including wind and solar power, exhibit strong characteristics of randomness, volatility, and intermittency. Their large scale grid integration poses many challenges to the stable operation of the power grid. Virtual power plant (VPP) which possess a strong ability to aggregate and regulate various types of resources, can participate in grid operation and scheduling, thereby promoting the consumption of clean energy. This article first summarizes the definition of VPP and provides an overview of the current research status both domestically and internationally. It also reviews the current status and trends of energy development in China. Secondly, the control methods and architecture of VPP are summarized, and the current VPP models are classified into four categories: VPP optimization scheduling model, VPP participation in bidding and tendering model, VPP participation in demand-side response model, and VPP model considering system risk. Various algorithms for solving VPP models are reviewed. Finally, the future prospects of VPP are discussed, especially the economic benefits of VPP participation in the electricity market. This article provides a comprehensive summary and generalization of the current research on VPP, offering references for future research in this field.

**Keywords:** renewable energy resource; distributed energy resource; virtual power plant (VPP); demand-side response; unit combination; VPP model

(编辑 吴昊)

(上接第 142 页)

## Effect of the arc model on electromagnetic interference caused by GIS switch operations in 3D full wave simulation

JIA Wenda<sup>1</sup>, CAO Zhiwei<sup>2</sup>, WANG Jihao<sup>2</sup>, YAN Qing<sup>2</sup>, HUANG Jinjun<sup>3</sup>, GUO Jun<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China; 3. HVDC Technical Center of SGCC, Beijing 100052, China)

**Abstract:** Transient ground potential rise (TGPR) and transient electromagnetic field generated by the switching operation of gas insulated switchgear (GIS) pose a great threat to the safety of the personnel in the station as well as the stable operation of the secondary equipment. The arc model has a great influence on the simulation calculation of TGPR and transient electromagnetic field. In this paper, a three-dimensional transient electromagnetic simulation model of GIS is established, and the effects of different arc models and model parameters on the simulation results of TGPR and spatial electric field are investigated by applying the finite integration time domain method. Through the analysis, it is found that the simulated waveform amplitude is higher under the ideal switching model and constant resistance model, and the simulated waveform amplitude is lowest under the hyperbola-like model. The simulated waveforms and pulse amplitudes under the exponential and segmented resistance models are almost the same. In the segmented resistance model, the amplitudes of TGPR and spatial electric field tend to decrease when the variable parameter of steady resistance increases. The waveform amplitudes of TGPR and spatial electric field are almost unaffected when the equivalent length and equivalent radius of the arc model change.

**Keywords:** gas insulated switchgear (GIS); transient ground potential rise (TGPR); three-dimensional transient electromagnetic simulation model; finite integration time domain; spatial electric field; arc model

(编辑 吴昊)