

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.014

GIS 拐弯段的补偿电容研究

金银燮^{1,2}, 崔翔¹, 吴恒天¹

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 金策工业综合大学电气工程系, 朝鲜 平壤)

摘要: 在气体绝缘组合电器设备(GIS)中, 隔离开关操作所产生的特快速瞬态过电压(VFTO)可能会对GIS内部绝缘结构造成影响。为了研究VFTO波形及其规律, 建立GIS内部准确的计算模型非常重要。文中分别采用电磁场全波方法(时域有限差分法)和传输线方法, 对GIS拐弯段即L型GIS进行了建模与计算。传输线方法由于其方法本身限制, 无法考虑拐弯段电磁波畸变产生的影响, 而电磁场全波方法从麦克斯韦方程出发, 建立三维电磁场模型, 能够考虑各种特殊结构情况下电磁场畸变情况。文中利用FDTD即时域有限差分法进行全波求解计算并和传输线方法进行对比, 计算结果表明对同一段L型GIS, 两种建模方法的却存在较大差异。为了修正传输线方法, 通过比较两种方法的计算结果, 在传输线模型中增加了L型GIS部分的补偿电容, 来表示电磁波在L型GIS结构处的畸变影响。通过对1 000 kV及500 kV含有L型拐弯段的GIS管道计算, 获得了两种电压等级情况下GIS拐弯段的最佳补偿电容值分别5 pF与7.5 pF。

关键词: L型GIS结构; 补偿电容; 时域有限差分法; 传输线方法; 特快速瞬态过电压

Compensation Capacitor for Curved Part of GIS

JIN Yinxie^{1,2}, CUI Xiang¹, WU Hengtian¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical Engineering, Kim Cheak University of Technology, Pyongyang, Democratic People's Republic of Korea)

Abstract: In gas-insulated substation(GIS), very fast transient overvoltage (VFTO) generated by the switching operation has a great impact on the insulation structures in GIS. In order to study the VFTO waveform and calculate the magnitude of VFTO, an accurate GIS pipe model is necessary. In this paper, both the transmission line method and the full-wave electromagnetic field method(finite-difference time-domain (FDTD)method)are used to establish a model of L-type GIS, respectively. The transmission line method and the FDTD method are employed to calculate the full waveform of VFTO, while their results are quite different. To modify the transmission line method, a compensation capacitor is added to the L-type section of GIS in the transmission line model to reveal the distortion of electromagnetic wave at the section. Calculations of the L-type section of GIS pipe under the voltages of 1 000 kV and 500 kV show that the optimum capacitance of the compensation capacitor is 5 pF and 7.5 pF, respectively.

Key words: L-type GIS pipe; compensation capacitor; FDTD; transmission line method; VFTO

0 引言

在气体绝缘组合电器(GIS)内部, 隔离开关操作所发生的特快速瞬态过电压(VFTO)可能会对GIS内

部绝缘结构造成影响。为了保护电气设备和维护电网正常运行, 需要对VFTO的特性进行研究^[1-18]。目前研究VFTO主要有试验测量和仿真计算两种方法, 对于仿真计算方法而言, 关键是建立GIS准确的计算模型, 国内外对VFTO已进行了大量的研究, 采用的主要方法是基于传输线模型的电路仿真方法,

收稿日期:2015-06-23; 修回日期:2015-07-19

基金项目:国家电网公司科技项目(GYB17201400111)。

Project Supported by the State Grid Corporation of China(GYB17201400111).

文中称为传输线方法。文[2-6]中介绍了 GIS 母线、盆式绝缘子、套管、开关操作电弧等电路等效模型,并采用电磁场计算方法提取等效电容参数。文[8-9]中采用三维时域有限差分法(FDTD),文中为电磁场全波方法,直接计算了 VFTO 波形,并提取了隔离开关的电容值以及分析了抑制套管辐射电磁场的措施。目前,对 VFTO 的建模仿真研究更多地集中在 VFTO 的最大幅值、数十纳秒至数百纳秒的波形、重复击穿放电特性等方面,建模过程中主要提取元件的低频参数,忽略了元件的高频特性,如盆式绝缘子、电晕放电防护屏、GIS 拐弯部分(文中称为 L 型 GIS)等。由于其电容值仅在几 pF 至几十 pF 以及传输时间多小于 2 ns,因此在大量的 GIS 建模仿真中都忽略小电容元件及短母线等,而主要用集总参数电容、电阻及传输线模型来进行建模^[9]。然而有时为进一步减小 GIS 变电站的占地面积,GIS 存在多个 L 型 GIS 连接段,特别在研究特高压 GIS 内部 VFTO 传输特性和规律时需要考虑小电容的元件的高频特性。

从已发表的国内外文献中,尚未见到考虑 L 型 GIS 后对 VFTO 传输特性影响的研究报道。根据电磁场理论,传输线方法仅适用于以 TEM 模式传输的电磁场的计算。而在 L 型 GIS 中,其传输的电磁场不再完全是 TEM 模式^[10-12],用传输线方法对 L 型 GIS 进行计算将会造成较大模型误差,进而影响整个 GIS 内部 VFTO 传输特性的仿真精度。因此需要采用电磁场全波方法。

传输线方法具有模型简单、计算速度快的优点,但不适用于复杂场域的建模计算;电磁场全波方法具有适用于复杂场域的建模计算的优点,但模型复杂、计算速度慢。研究两种方法的差异,通过电磁场全波方法计算结果,用补偿电容的方法修正传输线的计算结果,充分发挥传输线方法计算 GIS 内部 VFTO 的优势,无疑具有重要的学术价值和应用意义。

文中首先采用基于时域有限差分法的电磁场全波方法,分别对直线型 GIS 和 L 型 GIS 内部的瞬态电磁场进行时域分析,并根据瞬态电磁场的计算结果计算 VFTO 及电流;然后通过与传输线方法的计算结果进行对比,研究两种计算模型和仿真方法的在考虑 L 型 GIS 后对 VFTO 传输特性的影响,参考 PCB 电路板中弯折微带线的处理方式^[13-15],进而提出了一种用补偿电容的方法修正传输线的计算结果。

1 时域有限差分法计算有效性

1.1 时域有限差分法

时域有限差分法主要用来计算瞬态电磁场^[7,19-20]。

其核心思想是把带时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为差分形式,模拟出电子脉冲和理想导体作用的时域响应。

麦克斯韦旋度方程如下。

$$\begin{cases} \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: E 为电场强度, V/m; D 为电通量密度, C/m²; H 为磁场强度, A/m; B 为磁通量密度, Wb/m; J 为电流密度, A/m²; J_m 为磁流密度, V/m²。

对电场与磁场函数关于时间与空间的一阶偏导数取中心差分近似。

在时域有限差分法离散中电场和磁场各节点的空间排布从著名的 Yee 元胞得出^[7]。由 Yee 元胞可知,每一个磁场分量由 4 个电场分量环绕;同样,每一个电场分量由 4 个磁场分量环绕。这种电磁场分量的空间取样方式不仅符合法拉第感应定律和安培环路定律的自然结构,而且这种电磁场各分量的空间相对位置也合适于麦克斯韦方程的差分计算,能够恰当地描述电磁场的传播特性。此外,电场和磁场在时间顺序上交替抽样,从而可以在时间上迭代求解,而不需要进行矩阵求逆运算。由给定相应电磁问题的初始值与边界条件,利用 FDTD 方法就可以逐步推进地求得以后各个时刻空间电磁场的分布。

对电磁场 E 和 H 分量在时间和空间上采用半步长交替网格的离散形式,应用这种离散方式将时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程,并在时间轴上逐步推进地求解空间电磁场。

X 方向的电场迭代方程见式(2)。

$$\begin{aligned} E_x^{n+1}(i, j, k) = & \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \sigma \Delta t} E_x^n(i, j, k) + \\ & \frac{\Delta t}{(\varepsilon + \sigma \Delta t) \Delta y} [H_z^{n+1/2}(i, j, k) - H_z^{n+1/2}(i, j-1, k)] - \\ & \frac{\Delta t}{(\varepsilon + \sigma \Delta t) \Delta z} [H_y^{n+1/2}(i, j, k) - H_y^{n+1/2}(i, j, k-1)] \end{aligned} \quad (2)$$

为了在有限计算区域模拟无界空间中的电磁问题,必须在计算区域的截断边界上设置吸收边界条件。吸收边界条件从简单的插值边界,已经发展了多种吸收边界条件。目前比较广泛采用的有 Mur 吸收边界,以及近几年发展起来的完全匹配层(PML)吸收边界。

用 FDTD 方法分析电磁问题时通常要考虑对激励源的模拟,即选择合适的入射波形式以及用适当方法将入射波加入到 FDTD 迭代中。从源随时间变

化看有两类激励源:一类是时间周期变化的时谐波源,另一类是脉冲函数形式的波源。文中计算时采用时间周期变化电源。

当采用 FDTD 方法计算传输线时,电磁场和电路结合仿真电阻、电容、电源、非线性电容等元件。这种集总电路文件在电磁场网格中的位置见图 1。

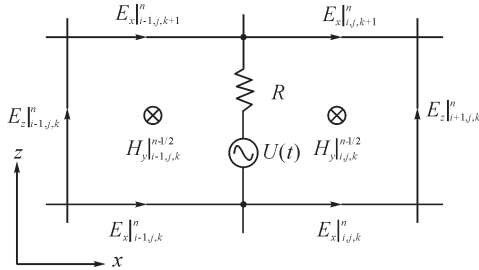


图 1 电路元件在网格中的位置

Fig. 1 Place of circuit element in mesh

电压与电流从电场和磁场计算结果采用式(3)可以直接计算。

$$\begin{cases} U_{ab} = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \\ I = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可得,总的电流包括通过单元的自由空间位移电流以及流过单元的电流,也就是说这种方法能计算除了电导电流以外位移电流,所以比集总参数方法更准确。

1.2 时域有限差分方法和传输线方法的比较

为了验证时域有限差分法计算结果的正确性,分别用 FDTD 方法计与传输线方法计算结果进行对比,计算对象是 1 000 kV 直线型 GIS 管道。

FDTD 仿真计算时边界条件是管道周围所有的 6 个面采用完全匹配层(PML)吸收边界。为了防止电磁波的散射,管道末端封闭。GIS 外壳与中心导杆之间连接了电源、电阻。GIS 管道的中心导杆与外部导体都是良导体,仿真中 GIS 母线电源为高频正弦波,负载电阻 50 Ω , 计算负载端口的电压。计算频率范围为 5~140 MHz。

两种方法的计算结果对比见图 2。图 2 中 U 代表电压幅值误差随频率变化, α 代表相位误差随频率变化。误差由式(4)定义。 U_u 为传输线法计算电压值, U_{fhd} 是电磁场全波计算值, T 为周期。

$$\begin{cases} \Delta U = \frac{|U_u - U_{fhd}|}{U_{fhd}} \times 100\% \\ \Delta \phi = \frac{|\phi_u - \phi_{fhd}|}{T} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

采用 FDTD 计算结果与采用传输线方法的误

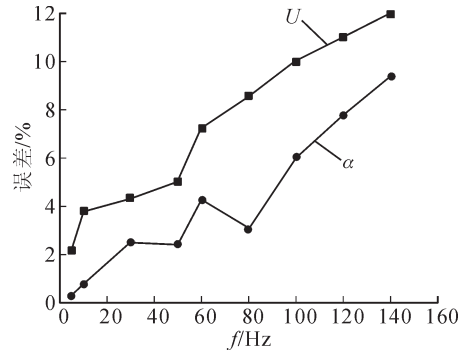


图 2 电压和相位误差随频率变化趋势

Fig. 2 The error change of voltage magnitude and phase on frequency

差,电压误差平均 8.06%、相位误差平均 4.04%。电源频率较小的时候,误差较小。电源频率增加,误差增加。存在误差的原因是传输线方法无法考虑 GIS 内部端部空间存在的三维电磁场反射。

1.3 FDTD 法计算 L 型 GIS 管道时域响应

采用 FDTD 方法计算 1 000 kV 典型管道仿真模型见图 3,有两处 L 型弯折。计算时边界条件 6 个面都完全匹配层(PML)吸收边界,为了防止电磁波的外向的散射,管道末端封闭。GIS 外壳与中心导杆之间连接了电源、电阻。GIS 管道的中心导杆与外部导体都为良导体。

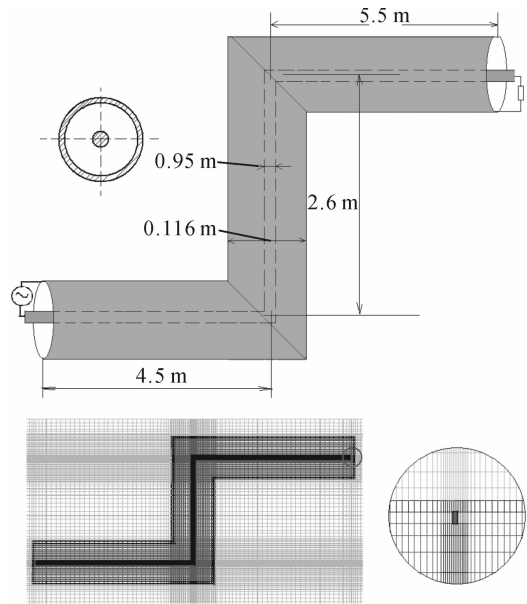


图 3 GIS 弯管用 FDTD 方法仿真模型

Fig. 3 Analysis model of GIS curve bus for FDTD

现有的传输线方法无法体现电磁波在 L 型弯折处的畸变情况,为了确认直线型 GIS 和 L 型 GIS 确实存在区别,用时域有限差分法计算了两种模型管道的电磁场及电压、电流,其中直线型管道长度跟 L 型管道总长度相同。

计算频率为 5~140 MHz, 电压幅值和相位误差特性随频率变化特性见图 4。

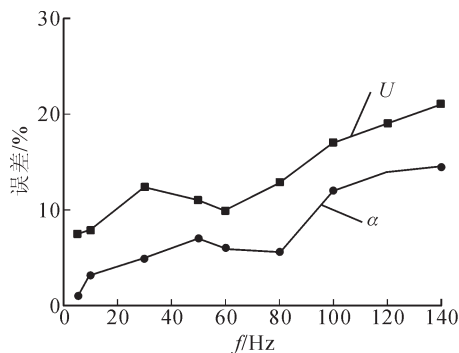


图 4 电压和相位误差随频率变化趋势

Fig. 4 The error change of voltage magnitude and phase on frequency

从图 4 可知, 电源频率较低时, 电压及相位的误差较小。随着频率增加, 误差也逐渐增加。从 5~140 MHz 电压幅值的平均误差是 13.2%, 相位误差 7.6%。故在计算含有较高频率成分的 VFTO 时, 需要考虑 L 型 GIS 管道弯折部分带来的影响。

2 L 型 GIS 母线仿真计算

计算 L 型 GIS 母线最好方法是用电磁场全波方法。其计算更加准确, 但比电路法计算量大, 需要时间更长。

文中采用 FDTD 电磁场计算及电路法仿真对比两种方法计算之间的误差, 在电路中增加补偿电容以抵消此误差, 校正电路的末端响应, 使得电路方法计算更加准确。

VFTO 的能量主要集中在数百 kHz 至数十 MHz 范围, 高频电磁场导体透入深度较小, 导体间的位移电流效应比较明显, 也就是说, 导体间容抗比较小, 感抗比较大, 所以多数外观尺寸在数米以内的电气元件都是用集总参数电容表示。对于几何尺寸远大于电磁波波长的元件, 如 GIS 母线、架空线、电缆等都采用传输线模型。故可以在电路中增加补偿电容来表征 L 型 GIS 管道弯折部分的影响。

图 3 中 1 000 kV GIS 母线有三个直线型管道部分, 每个直线型管道之间有 L 型弯折。在电路中, 这些弯折部分以补偿电容等效。直线型管道部分采用 π 型集总参数传输线模拟。 π 型集总参数传输线的参数见式(5)、(6)。

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{r_s}{r_w}} = \frac{2\pi \times 1.002 \times \frac{10^{-9}}{36\pi}}{\ln \frac{0.475}{0.058}} =$$

$$2.647 \times 10^{-11} \text{ F/m} = 2.647 \times 10^{-8} \text{ F/km}; \quad (5)$$

$$L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_w} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln \frac{0.475}{0.058} = 2 \times 10^{-7} \times 2.1029 =$$

$$4.2057 \times 10^{-7} \text{ H/m} = 0.42057 \times 10^{-3} \text{ H/km}. \quad (6)$$

式(5)、(6)中, ϵ_0 的介电常数为 1.002, 电阻 R_0 忽略不计。

L 型 GIS 母线电路模型见图 5。根据管道本体结构和传输线理论, 补偿电容取 0.1~50 pF。在此范围内调整补偿电容的电容值, 来计算使电压与相位误差最小的电容值。

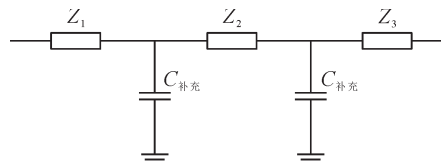


图 5 GIS 母线的弯管部分的集总参数回路

Fig. 5 Modeling circuit of GIS bus including curve pipe

2.1 电阻负载电压和相位随补偿电容值的变化趋势

调整补偿电容值, 计算负载电阻端口的电压与相位。采用式(4)计算误差。负载电阻电压和相位随补偿电容变化特性见图 6。

图 6(a)、(b)是频率从 10~70 MHz 变化时, 电压误差及相位误差特性。可以看出所有频率下的电压误差特性均是凹形曲线, 存在某一特定最小值。

当电源频率为 10 MHz, 无补偿电容, 电压误差为 2.3%, 补偿电容值增加, 电压误差减小, 补偿电容值 4 pF 时达到最小值 0.16%, 之后误差反而增加, 补偿电容值 60 pF 误差增加到 46.9%。当 50 MHz, 无补偿电容, 电压误差 6.9%, 补偿电容值 3.5 pF 及 29.5 pF 时分别最小值 0.06% 及 0.16%, 然后一直增加, 补偿电容值 60 pF 时候达到 37%。相位误差变化趋势跟电压误差趋势类似, 同为凹形曲线。相位误差小于电压误差, 误差最小时的补偿电容取值, 跟电压误差最小时接近。电源频率为 10 MHz, 无补偿电容, 相位误差 0.392%, 误差最小时的补偿电容值为 4 pF, 误差最小值 0.058%。频率为 50 MHz, 无补偿电容, 相位误差 0.565%, 误差最小的补偿电容值 4 pF, 相位误差最少值 0.035%。当电源频率不高时, 电压和相位误差均较小, 但是随着电源频率提高两种误差增加。

图 6(c)、(d)是当电源频率从 90~140 MHz 变化时, 负载电压误差及相位误差特性随补偿电容值特性曲线。频率为 100 MHz, 无补偿电容, 电压误差 18.1%, 相位误差 8.87%, 随补偿电容值增加, 电压误差减小, 补偿电容值达到 2 pF 时, 电压误差最小为 0.635%, 补偿电容值 5 pF 时, 相位误差最小为 2.43%。频率为 140 MHz, 无补偿电容, 电压误差为

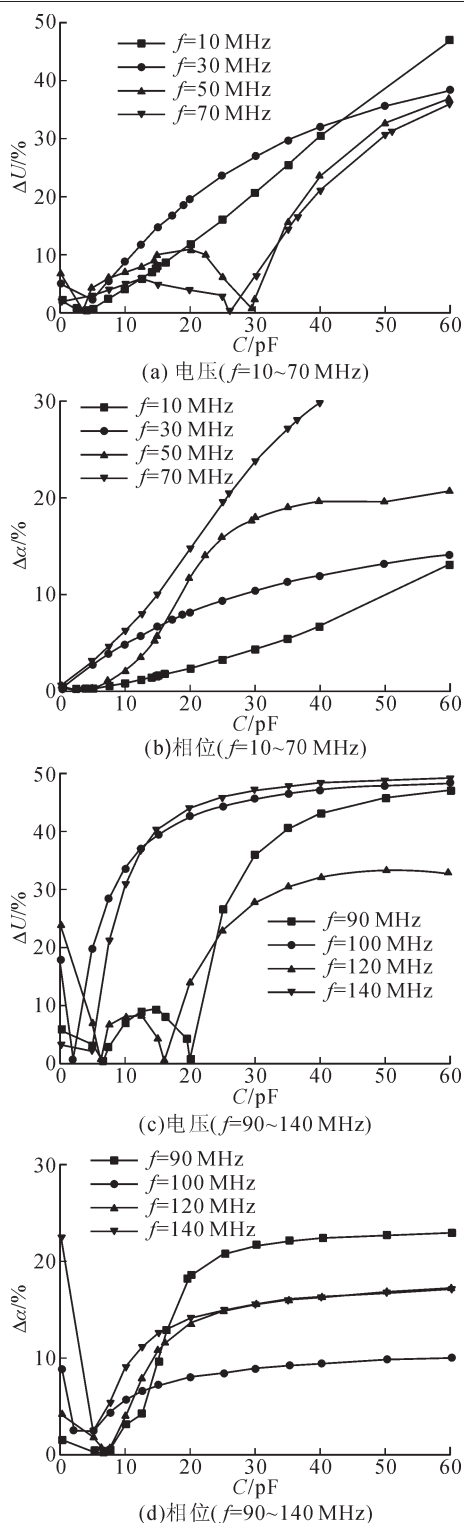


图6 电压与相位误差相电容值的趋势

Fig. 6 Voltage and phase error tendency on capacitance
3.31%, 相位误差 22.6%, 随补偿电容值越增加, 电压误差减小, 补偿电容值 5 pF 时, 电压误差最小为 2.075%, 相位误差为 2.466%, 之后随补偿电容值增加, 误差逐渐增加。电源频率较高时, 误差特性曲线较陡, 误差较小的电容值区间很窄。

2.2 选择适当的补偿电容

VFTO 的主要特点之一是频带较宽。随频率变

化的误差最小时补偿电容值见表 1, 误差最小(误差大约 0.01%~0.1%左右)的电容均一般为数 pF, 一般随频率增加误差最小的电容值增加, 1 000 kV 的电容值比 500 kV 小。使电压误差最小的补偿电容值可能出现两个。

表 1 误差最小的补偿电容值

f/Hz	1 000 kV		500 kV	
	ΔU 最小	$\Delta \alpha$ 最小	ΔU 最小	$\Delta \alpha$ 最小
5	7.5	0.0	5.0	12.5
10	3.0	3.0	7.0	7.0
30	5.0	0.0	7.5	0.0
50	3.5(29.5)	3.5	6.5(34.5)	6.5
70	0.0(26.0)	0.0	2.0(40.0)	0.0
90	6.5(20.0)	6.5	10.0(24.3)	10.0
100	2.0	5.0	3.3	10.0
120	6.3(16.0)	7.5	10.5(15.0)	15.0
140	5.0	5.0	5.0	12.5

图 7(a)、(b)分别为当补偿电容值从 0~60 pF 变化时 1 000 kV 及 500 kV GIS 管道电压与相位平均误差特性。

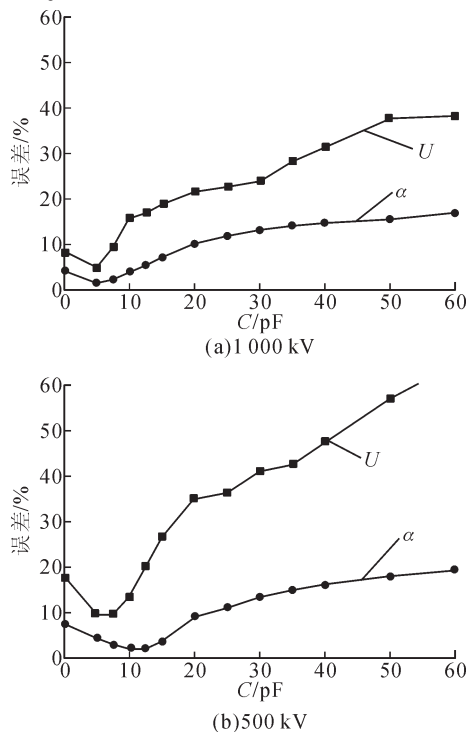


图7 电压与相位平均误差特性

Fig. 7 Voltage and phase average error curve
对于 1 000 kV 典型模型可见电压误差特性是凹形特性, 当补偿电容值 5 pF 时具有最小值。

补偿电容值大约 5 pF 左右时, 相位误差特性具有最小值 1.5%, 电压平均误差 5.0% 接近最小值, 故最合适的补偿电容值 5 pF。相比无补偿电容情况

下,电压平均误差 8.39%,减小 3.39%。相位平均误差 4.3%,减小 2.8%。对于 500 kV 典型模型,当补偿电容值 7.5 pF 时具有最小值。当补偿电容值大约 7.5~12.5 pF 左右时,相位误差特性具有最小值。此时,电压平均误差 9.5%,无补偿电容计算电压平均误差 17.8%,减小 8.3%。相位平均误差 2.8%,无补偿电容电压平均误差 7.5%,减小 4.7%。

故 1 000 kV 与 500 kV 典型 GIS 管道的弯折部分建模时补偿电容值分别选择 5 pF 与 7.5 pF。

3 结论

气体绝缘变电站中由于开关操作所产生的特快速瞬态过电压(VFTO)对 GIS 电气设备的绝缘结构造成极大的影响,因此有必要对其准确的计算。

文中从 L 型 GIS 管道弯折部分建模的角度出发,研究基于传输线理论采用补偿电容作为弯管的模型,计算最合适的补偿电容值,为 GIS 变电站中 VFTO 仿真计算提供依据。

1)深入研究 VFTO 时,必须考虑 GIS 管道的 L 型 GIS 的弯折部分,忽略 L 型弯折部分,产生误差 8.9%。故需要建立更加准确的 L 型 GIS 电路模型。

2)确认采用时域有限差分方法计算 GIS 管道的正确性。对简单的直线型 GIS 管道,采用时域有限差分方法与传输线方法计算电压与电流,两个结果的电压与相位平均差异为 8.06%、4.04%,验证了时域有限差分法有效性。但是采用时域有限差分方法计算需要时间较长。

3)用传输线等值电路加补偿电容的电路进行仿真计算。GIS 管道的直线部分由 π 型集中参数计算,弯折部分用从导线到接地连接的补偿电容模拟。

4)弯折部分采用补偿电容模拟时,随电源频率增加,电压与相位误差均增加。在整个电源频率范围内的电压及相位误差小于无补偿电容的情况。电压随补偿电容值误差曲线为凹形曲线,存在最佳补偿电容值使得误差最小。根据计算结果,对于 1 000 kV 管道最合适的补偿电容值为 5 pF,电压平均误差及相位误差分别减小 3.39%、2.8%。对于 500 kV 管道最合适的补偿电容值为 7.5 pF,电压平均误差及相位误差分别减小 8.3%、4.7%。电源频率 100 MHz 以上计算时误差增加。

参考文献:

[1] 陈维江,颜湘莲,王绍武,等. 气体绝缘开关设备中特快

速瞬态过电压研究的新进展[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(11):1-11.

CHEN Weijiang,YAN Xianglian,WANG Shaowu,et al. Recent progress in investigations on very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(11):1-11.

[2] 王娜,林莘,徐建源,等. 特高压 GIS 变电站中快速暂态过电压仿真及其特性分析[J]. 高电压技术,2012,38(12):3310-3315.

WANG Na,LIN Xin,XU Jianyuan,et al. Simulation and characteristics analysis of very fast transient overvoltage in gas insulated substation with ultra high voltage[J]. High Voltage Engineering,2012,38(12):3310-3315.

[3] 徐建源,司秉娥,林莘,等. 特高压 GIS 中隔离开关的电场及参数计算[J]. 高电压技术,2008,34(7):1324-1329.

XU Jianyuan,SI Bing'e,LIN Xin,et al. Electric field numerical analysis and parameter calculation of ultra-high voltage GIS disconnecter[J]. High Voltage Engineering,2008,34(7):1324-1329.

[4] 杨钰,王赞基,邵冲. GIS 母线结构及参数对 VFTO 波形的影响[J]. 高电压技术,2009,35(9):2306-2312.

YANG Yu,WANG Zanji,SHAO Chong. Effect of GIS bus structure and parameters on VFTO waveform[J]. High Voltage Engineering,2009,35(9):2306-2312.

[5] 谷定燮,修木洪,戴敏,等. 1 000 kV GIS 变电所 VFTO 特性研究[J]. 高电压技术,2007,33(11):27-32.

GU Dingxie,XIU Muhong,DAI Min,et al. Study on VFTO of 1 000 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering,2007,33(11):27-32.

[6] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 第2版.西安:西安电子科技大学出版社,2005.

GE Debiao,YAN Yubo. Finite-difference time-domain method for electromagnetic waves[M]. The 2nd Edition. Xi'an: Xi'an Xidian University Press,2005.

[7] 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.

[8] RAO M M,THOMAS M J,SINGH B P. Electromagnetic field emission from gas-to-air bushing in a GIS during switching operations[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2007,49(2):313-321.

[9] 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.

[10] GAO Wensheng,DING Dengwei,ZHAO Dongbo,et al. Propagation properties of high-frequency electromagnetic wave through typical in-field GIS structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(6):2476-2484.

[11] YOSHIMURA M,MUTO H,NISHIDA C,et al. Propagation properties of electromagnetic wave through t-branch in GIS[J].

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2):328-333.
- [12] OKABE S, KANEKO S, YOSHIMURA M, et al. Partial discharge diagnosis method using electromagnetic wave mode transformation in gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(3):702-709.
- [13] SHIUE Guanghua, GUO Weida, LIN Chienmin, et al. Noise reduction using compensation capacitance for bend discontinuities of differential transmission lines[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2006, 29(3):560-569.
- [14] BAHARAK M I, RAMAHI O M. Wideband circuit model for planar EBG structures[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2010, 33(1):169-179.
- [15] HILL A, TRIPATHI V K. Analysis and modeling of coupled right angle microstrip bend discontinuities[C]//IEEE MTT-S International Conference on Microwave Symposium Digest. Long Beach, CA, USA:IEEE, 1989:1143-1146.
- [16] SHU Yinbiao, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Experimental research on very-fast transient overvoltage in 110 kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):458-466.
- [17] BOGGS S A, CHU F Y, FUJIMOTO N, et al. Disconnect switch induced transients and trapped charge in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power App. Syst., 1982, PAS-101(10):3593-3602.
- [18] MEPELINK J, DIEDERICH K J, FESER K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1):223-233.
- [19] HOSHINO T, MARUYAMA S, SAKAKIBARA T. Simulation of propagating electromagnetic wave due to partial discharge in GIS using FDTD[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):153-159.
- [20] ORLANDI A, CLAYTON R. FDTD analysis of lossy, multi-conductor transmission lines terminated in arbitrary loads[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3):388-399.

金银燮(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统的电磁兼容、电机与电器电磁场分析及节能等研究工作。

(上接第 78 页)

- ZHOU Kai, WU Guangning, DENG Tao, et al. The measurement of TSC in nano composite insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18):76-82.
- [20] 周力任, 吴广宁, 高波, 等. 聚酰亚胺薄膜中电荷运输机理和空间电荷特性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12):6-11.
- ZHOU Liren, WU Guangning, GAO Bo, et al. Charge transport mechanism and space charge characteristic in polyimide film[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12):6-11.
- [21] CARPI F. Dielectric elastomer cylindrical actuators: Electromechanics modeling and experimental evaluation[J]. Master. Sci. Engi. C, 2004(24):555-562.
- [22] TANAKA T, KOZAKO M, FUSE N, et al. Proposal of a multi-core model for polymer nanocomposite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4):669-681.
- [23] 郭洁琳, 张逸凡, 孙强, 等. GIS 用微纳米 Al_2O_3 /环氧树脂复合材料制备及性能研究[C]//第十四届全国工程电介质学术会议论文集.[S.L.]:IEEE, 2013:101-105.
- GUO Jielin, ZHANG Yifan, SUN Qiang, et al. Analysis of production and properties of micro and nano- Al_2O_3 /epoxy resin composites for GIS[C]//Proceedings of the 14th National Conference on Engineering Dielectrics.[S.L.]:IEEE, 2013:101-105.
- [24] 罗杨, 吴广宁, 刘继午, 等. 表面放电对聚酰亚胺薄膜材料的电气损伤特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25):187-195.
- LUO Yang, WU Guangning, LIU Jiwu, et al. Electrical damage characteristics of polyimide film caused by surface discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25):187-195.

刘洋(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事方波脉冲条件下局部放电特性研究(通信作者)。

吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高压电气设备的教学与研究工作。