气体绝缘变电站就地智能组件端口电磁骚扰建模和仿真

GIS变电站结构紧凑，因电子设备与一次设备高度融合，使得电子设备电磁兼容问题显得尤为重要。GIS设备开关操作产生的特快速瞬态电磁过程主要经由传感器－电缆－智能组件这段电路对电子设备产生电磁影响。对某500 kV变电站内汇控柜智能组件端口的骚扰电压展开了测量研究。应用多导体时域频域变换法（TDFD）对传感器和汇控柜智能组件端口骚扰电压进行了建模仿真。并比较了仿真结果与测量结果的异同，验证了模型的有效性。

徐　强[1]　嵇建飞[1]　刘骁繁[2]　吴　珺[1]/1.国网江苏省电力公司　2.华北电力大学电气与电子工程学院

徐　强/高级工程师

关键词/Keywords

变电站·
GIS设备·
开关操作·
骚扰电压·
时域频域变换法·

气体绝缘变电站（GIS变电站）结构紧凑，由于在GIS外壳上装有很多传感器，并通过屏蔽电缆与GIS外壳附近汇控柜内的智能组件连接，使得电子设备与一次设备高度融合，其电磁兼容问题显得尤为突出[1]。

安装在GIS外壳上的传感器的信号和电源电缆经包塑金属软管、集线槽和电缆沟到汇控柜内的智能组件，电信号在智能组件中转换为光信号，然后由光缆上传至控制室。因此，GIS设备开关操作产生的电磁骚扰主要作用于GIS外壳上的传感器、连接电缆和GIS外壳附近的智能组件[2]。

GIS设备开关操作产生的特快速瞬态电磁过程在GIS内部的中心导杆和外壳内表面之间传播，遇到外壳不连续处，如盆式绝缘子及套管，GIS内部的瞬态电磁波就会产生电磁泄漏，引起GIS设备的瞬态外壳电压（TEV）并产生瞬态电磁场。这些瞬态电磁场耦合到屏蔽电缆上，就会在传感器和智能组件端口产生电磁骚扰。同时，TEV与智能组件处的地电位有一个很大的瞬态电位差，这一电位差施加在屏蔽电缆两端，在其屏蔽层上产生瞬态电流，通过屏蔽电缆的转移阻抗在传感器和智能组件上产生电磁骚扰。此外，对于电流互感器（CT）、电压互感器（PT）等，由于和一次系统有直接的电气连接或磁耦合，GIS内部的特快速瞬态电磁过程也会经传导耦合对二次系统产生电磁骚扰[4-12]。

目前，国内外已对变电站电磁兼容问题开展了大量研究[8]，对传统变电站的研究较为成熟，并已有相关的国际导则和标准[3-4]。但对智能变电站特别是GIS设备传感器及智能组件的电磁兼容问题研究较少，已经开展的研究主要是计算GIS外壳附近平行放置屏蔽电缆的骚扰电压[15]。为此，本文对某500 kV变电站内汇控柜智能组件端口的骚扰电压展开了测量研究。应用多导体时域频域变换法（TDFD）对传感器和汇控柜智能组件端口骚扰电压进行了建模仿真，并比较了仿真结果与测量结果的异同，验证了模型的有效性。

试验研究

1. 测量系统

本文自制的电磁瞬态测量系统主要由电压分压器、示波器、光纤控制系统、逆变器、锂电池和屏蔽箱构成。分压器选择品致（Pintech）公司生产的P6039A型号高压探头；示波器选择横河（Yokogawa）公司生产的DLM2054型

中国知网 https://www.cnki.net

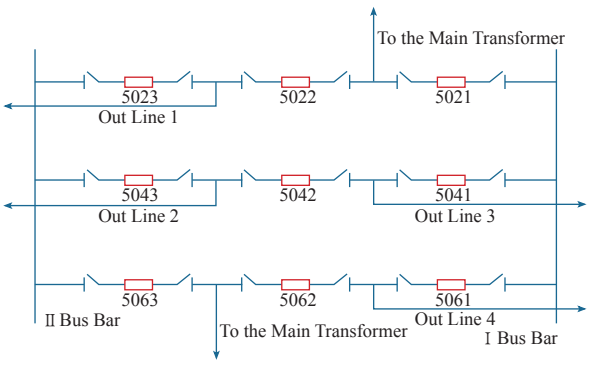
号示波器。测量系统可以测量电压不高于40 kV、最高频率低于80 MHz的瞬态电压信号，分压比为1 000∶1，屏蔽效能在80 MHz～1 GHz范围内高于40 dB。现场应用时，测量系统整体放置在汇控柜内，汇控柜密闭良好且具有很好的电磁屏蔽效果，光纤控制系统一端通过网线与示波器相连，另一端通过光纤传送到远端经光电转化后接到笔记本本计算机上。图1为测量系统在变电站现场的照片。

图1　放置在汇控柜内的测量系统

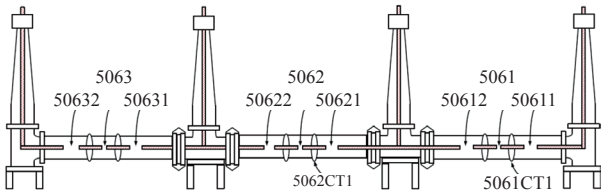
2. 测量位置

图2a为某500 kV气体绝缘变电站主接线图。图2b为本文测量位置示意图，测量数据分别如下：

1）隔离开关50611分、合闸操作时电流互感器5061CT1和5062CT1在汇控柜内端口上的骚扰



（a）某500 kV气体绝缘变电站的一次主接线图



（b）测量位置示意图

图2　500 kV变电站一次主接线图和测量位置分布图

电压。

2）断路器5061和5062合闸操作时，5062CT1在汇控柜内端口上的骚扰电压。

3）断路器5061和5062分闸－合闸－分闸操作时5062CT1在汇控柜内端口上的骚扰电压。

建模方法

从多导体传输线理论出发，可以将GIS设备“传感器－KVVP电缆－汇控柜智能组件”等效成“7＋1”传输线，如图3所示。为了简化电路，各导线间的互阻抗未画出。具体到求解该多导体传输线问题，有以下三个步骤：

1）确定单位长度的阻抗和导纳参数。

2）确定多导体传输线方程的通解。

3）结合终端条件确定通解中的待定函数或待定系数。

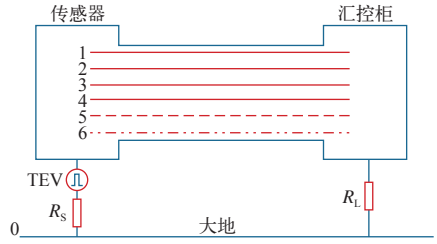


图3　GIS设备“传感器－KVVP电缆－汇控柜智能组件”系统

1～4—芯线　5—屏蔽层　6—铠装　7—包塑金属软管　0—大地

目前，三同轴测量系统已被广泛应用于屏蔽电缆的转移阻抗和转移导纳测量。应用文献[16]提出的一种简便测试方法测量得到了屏蔽电缆的单位长参数。

在频域，多导体传输线模型可由如下电报方程描述

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}z}=-ZI \tag{1}$$

中国知网 https://www.cnki.net

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}z}=-YU \tag{2}$$

将式（1）表征的一阶耦合相量MTL方程两边关于传输线的位置z微分并相互代换，可将其转化为解耦的二阶常微分方程

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}z^2}U(z)=ZYU(z) \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}z^2}I(z)=YZI(z) \tag{4}$$

基本的求解思路是，利用变量变换，将式（3）、式（4）的二阶微分方程解耦成n组独立形式的传输线方程，运用求解技术对每组独立的传输线求解，再通过变量变换，将求解结果变换回原始的电压和电流。可以得到它的解为

$$U(z)=Z_cT_I(e^{-rz}I_m^+ +e^{rz}I_m^-) \tag{5}$$

$$I(z)=T_I(e^{-rz}I_m^+ -e^{rz}I_m^-) \tag{6}$$

式中，T_I为变换矩阵；Z_c为特征阻抗矩阵。

由式（5）和式（6）给出的相量MTL方程的通解包含$2n$个待定常数，它们由$n\times1$向量I_m和I^-_m给出。因此，需要$2n$个附加的约束方程来求解。这些附加约束方程由$z=0$和$z=L$处的终端条件提供，电源和负载阻抗被分别包含在传输线两端的终端网络中。

简单的终端条件下，可以用戴维南等值和诺顿等值来获得终端网络，更一般的情况下，如下的混合形式

$$Y_SU(0)+Z_SI(0)=P_S \tag{7}$$

$$Y_LU(0)+Z_LI(0)=P_L \tag{8}$$

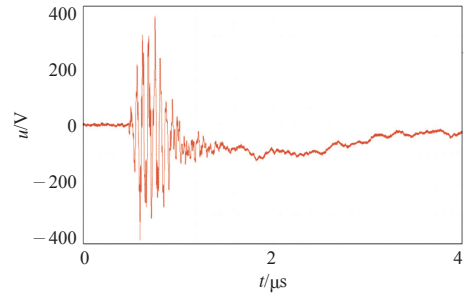
将式（5）、式（6）代入上式，可以得到

$$\begin{pmatrix}(Y_SZ_C+Z_S)T_I & (Y_SZ_C-Z_S)T_I\\ (Y_LZ_C-Z_L)T_Ie^{-rL} & (Y_LZ_C+Z_L)T_Ie^{rL}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}I_m^+\\ I_m^-\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}P_S\\ P_L\end{pmatrix} \tag{9}$$

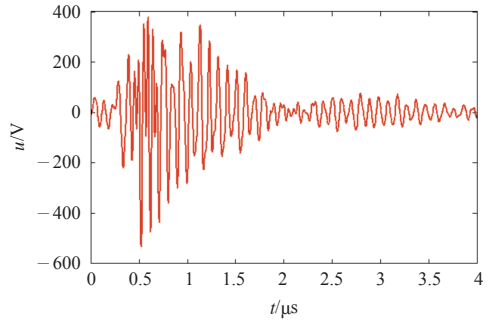
一旦这组关于I_m^+和I_m^-的$2n$个联立方程被解出，代入式（5）和式（6），便可求出沿传输线任何位置z处的电压和电流值。

仿真结果与分析

图4为测量和仿真得到的汇控柜组件端口骚扰电压时域波形。可以看到，仿真波形的幅值及前期波形和实测相仿，区别在于仿真波形后期衰减较慢。图5为测量波形和仿真波形的频谱图，仿真波形的频谱主要集中在3.64～20.6 MHz，实测波形的主频范围要更大一些，在0.25～40 MHz。整体来说，仿真与实测波形大致趋势和主要频率成分

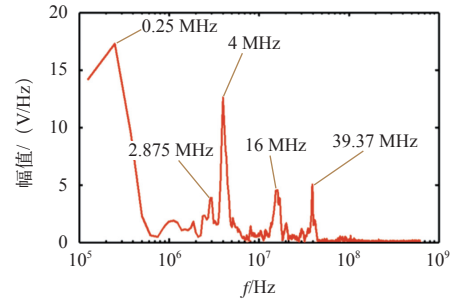


（a）测量波形

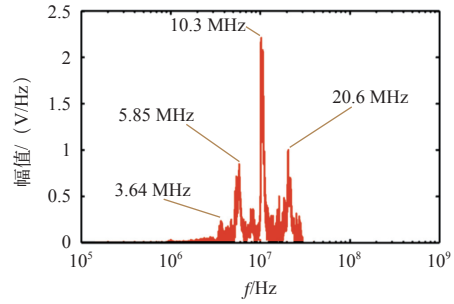


（b）仿真波形

图4　汇控柜组件端口骚扰电压时域波形



（a）测量波形的频谱图



（b）仿真波形的频谱图

图5　汇控柜组件端口骚扰电压的频谱分析

中国知网　https://www.cnki.net

基本一致。

结束语

本文对某500 kV变电站内汇控柜智能组件端口的骚扰电压展开了测量研究。应用多导体时域频域变换法（TDFD）法对传感器和汇控柜智能组件端口骚扰电压进行了建模仿真，并比较了仿真结果与测量结果的异同。仿真与测量结果相比较，波形的幅值和大致趋势以及主要频率成分基本一致，计算准确度满足工程计算要求，建立的等效电路模型和时域频域变换法的多导体传输线计算方法可用于计算GIS设备汇控柜组件端口的骚扰电压。

参考文献

[1] 黄益庄．变电站智能电子设备的电磁兼容技术 [J]．电力系统保护与控制，2008，36 (15)：6-9．

[2] 于同伟，杨兴超，葛维春，等．智能变电站智能组件电磁兼容控制技术的分析与研究 [J]．电气应用，2014 (5)：34-37．

[3] 张重远，梁贵书，崔翔，等．GIS隔离开关操作对二次设备的影响 [J]．高电压技术，2002，28 (2)：5-7．

[4] 张重远，梁贵书，崔翔．GIS电站内传导干扰计算模型的建立 [J]．高压电器，2003，39 (4)：11-13．

[5] Rao M M，Thomas M J，Singh B P．Transients induced on control cables and secondary circuit of instrument transformers in a GIS during switching operations [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2007，49 (2)：313-321．

[6] Rao M M，Thomas M J，Singh B P．Electromagnetic field emission from gas-to-air bushing in a GIS during switching operations [J]．IIEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，2007，49 (2)：313-321．

[7] Okabe S，Takami J，Nojima K．Circuit models of gas insulated switchgear elements for electromagnetic wave leakage analysis [J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Elecertricl Insulation，2008，15 (5)：1439-1448．

[8] 崔翔．2002年国际大电网会议系列报道——电力系统电磁兼容研究进展 [J]．电力系统自动化，2003，27 (4)：1-5．

[9] 闫格，吴细秀，田芸，等．开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述 [J]．高压电器，2014，50 (2)：119-130．

[10] 冯利民，王晓波，姜欣，等．超高压变电站GIS电磁兼容建模研究 [J]．高压电器，2014，50 (4)：97-102．

[11] 齐磊，崔翔．变电站开关操作对屏蔽电缆电磁干扰的预测 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (9)：46-51．

[12] 于刚，何金良，茆必成．开关操作暂态电压对变电所的电磁干扰 [J]．电工技术杂志，2002 (12)：19-21．

[13] IEC 61000-4-12 Electromagnetic compatibility (EMC)–part 4-12：testing and measurement techniques - ring wave immunity test [S]．

[14] IEC 61000-4-18 Electromagnetic compatibility (EMC)–part 4-18：testing and measurement techniques-damped oscillatory wave immunity test [S]．

[15] 张卫东，陈沛龙，陈维江，等．特高压GIS变电站VFTO对骚扰电压的实测与仿真 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (16)：187-196．

[16] 齐磊，崔翔，卢铁兵，等．屏蔽电缆的分布参数测量及瞬态分析 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (6)：119-123．

（收稿日期：2014－12－10）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

中国知网 https://www.cnki.net