变电站地电位升对智能组件的耦合计算模型

随着智能化GIS设备的发展，GIS设备上集成了大量电子设备，这些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－二次电缆－智能组件”这段电路对电子设备产生电磁影响。首先建立了开关操作产生的地电位升对“传感器－二次电缆－智能组件”回路的耦合计算模型，然后通过验证试验证明了计算模型的有效性和准确性，最后对不同屏蔽层接地方式下的传感器和智能组件端口电磁骚扰进行了仿真研究。

刘海军[1] 刘骁繁[2] 雷林绪[1] 赵鹏程[1] 焦重庆[3]/1.国网智能电网研究院 2.江苏省电力公司电力经济技术研究院 3.华北电力大学电气与电子工程学院

刘海军/高级工程师

关键词/Keywords

变电站·
GIS·
开关操作·
地电位升·
骚扰电压·

0 引言

智能化GIS设备的发展，使得GIS设备上集成了大量电子设备，如电子式互感器、状态传感器、操作控制器和集中单元等。这些电子设备通过二次电缆与GIS外壳附近汇控柜内的智能组件连接[1]，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特快速瞬态电磁过程主要经由“传感器－二次电缆－智能组件”这段电路对电子设备产生电磁影响[2-4]。

GIS设备开关操作产生的特快速瞬态过电压在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，在GIS壳体上将耦合行波，并在GIS壳体上传播、折反射和叠加，使得GIS上传感器和汇控柜内智能组件的地电位有一个很大的瞬态电位差，这一电位差施加在二次电缆两端，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[5-9]。

目前，国内外对变电站电子设备电磁兼容问题的计算研究集中在传统变电站，主要是对汇控柜到控制室段二次电缆的建模仿真[10-12]。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。为此，首先建立了开关操作产生的地电位升对“传感器－二次电缆－智能组件”回路的耦合计算模型，然后通过验证试验证明了计算模型的有效性和准确性，最后对不同屏蔽层接地方式下的传感器和智能组件端口电磁骚扰进行了仿真研究。

国家电网公司科技项目（SGRI-BB-71-13-003）：220 kV、500 kV变电站地电位升高对智能组件的危害及防护措施研究。

1 试验回路等效模型

从多导体传输线理论出发，将某实际变电站GIS设备“传感器－二次电缆－智能组件”等效成“7＋1”传输线，如图1所示。其中，传输线1～6分别对应KVVP电缆的4根芯线、屏蔽层和铠装，传输线7为包塑金属软管及两端的传感器、汇控柜箱体，这里忽略箱体对传输线的影响。它们与大地组成“7＋1”传输线。传输线长度为20 m。在传感器对地施加实测获得的外壳电位升（Transient Enclosure Voltage，TEV），如图2所示，汇控柜视为良好接地无地电位升。为简化计算，传感器处接地电阻设为10 Ω，汇控柜处为1 Ω。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

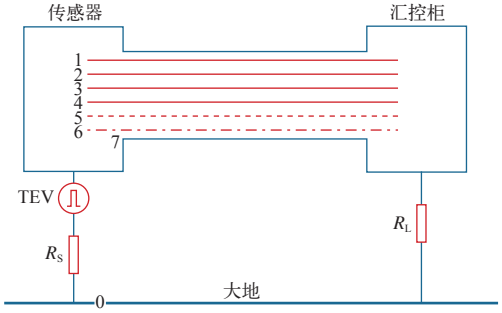


图1　“传感器－二次电缆－智能组件”传输线模型示意图

1，2，3，4—芯线　5—屏蔽层　6—铠装　7—包塑金属软管　0—大地

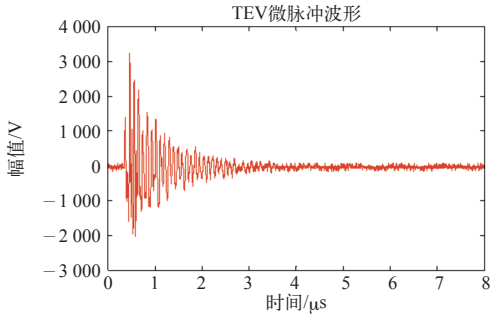


图2　实测TEV微脉冲波形

2　验证试验

验证试验回路如图3所示，使用铝管模拟理想大地，信号源采用泰克公司型号为AFG3101的信号发生器。该信号发生器输出波形如图4所示。验证试验测量了4种接地方式下始末两端红色芯线对铝管的电压：始末两端屏蔽层浮地，负载开路；电缆屏蔽层在末端单端浮地，两端负载开路；电缆屏蔽层在末端单端接地，两端负载开路；始末两端屏蔽层接地，负载开路。相应地，用所提出的计算模型计算了4种接地方式下始末两端红色芯线对地电压。

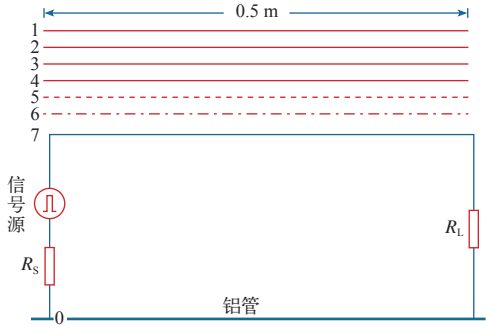


图3　验证试验示意图

1，2，3，4—芯线　5—屏蔽层　6—铠装　7—包塑金属软管　0—铝管

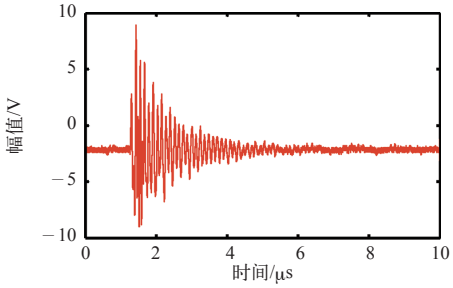


图4　信号源输出波形

图5为接地方式1下末端红色芯线对铝管的实测电压与仿真电压的时域波形。可以看出，实测电压与仿真电压波形的幅值和整体趋势较为一致。

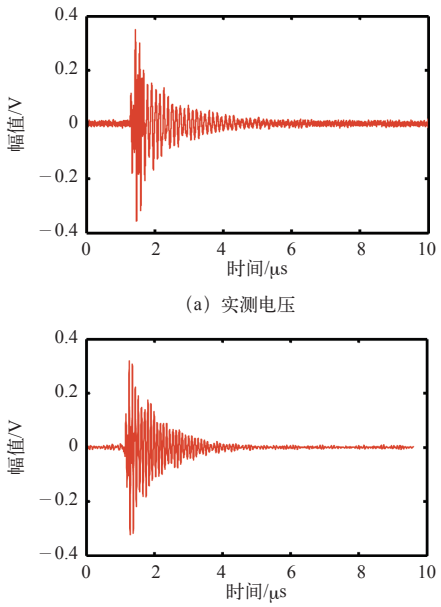
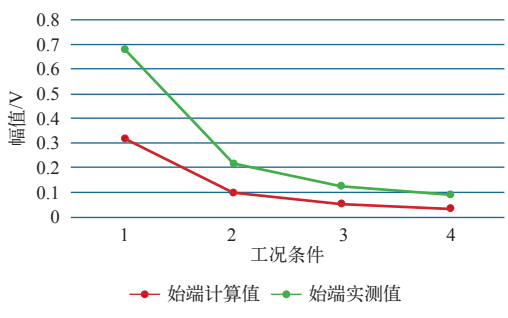


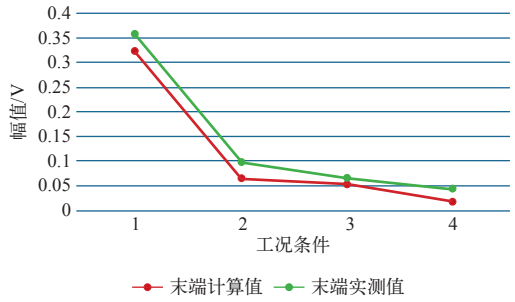
图5　实测电压与仿真电压的时域波形

4种接地方式下实测电压和仿真电压的最大峰值如图6所示。可以看出，除接地方式1下的始端外，其余7种情况实测和仿真的最大峰值都极为接近，仿真值相对实测值偏小。这里导致误差的原



（a）始端不同接地方式下电压最大峰值

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



（b）末端不同接地方式下电压最大峰值

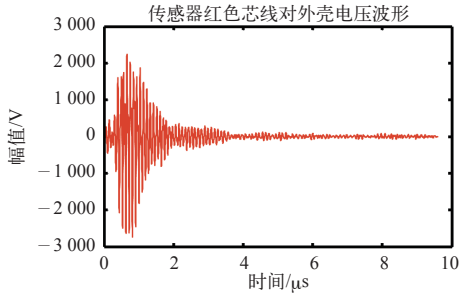
图6　始末两端4种接地方式下实测和仿真电压的最大峰值

因可能有：验证试验所用的KVVP电缆为了方便接线，较0.5 m稍长；对试验回路施加激励电压的夹具和回路始端的阻抗不匹配等。

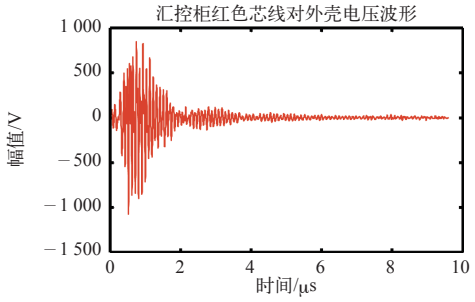
通过验证试验和计算仿真的对比，可以认为计算模型是有效和准确的。接下来对某实际变电站“传感器－二次电缆－智能组件”模拟试验平台进行了计算研究和分析。

3　仿真计算结果

在传感器和智能组件两端负载开路，电缆屏蔽层双端浮地、汇控柜处单端接地、传感器处单端接地和双端接地的条件下对两端端口骚扰电压进行了仿真计算。图7为接地方式2下仿真得到的传感器和智能组件端电缆单芯线骚扰电压时域波形。可以看出，传感器端骚扰电压约为2 500 V，智能组件端骚扰电压约为1 000 V。图8为仿真电压波形的频谱图，传感器端电压主频包括5.85 MHz、7.78 MHz、10.8 MHz、16.2 MHz和20.6 MHz，智能组件端电压主频包括5.85 MHz、8.31 MHz、10.8 MHz、20.7 MHz和27.2 MHz。

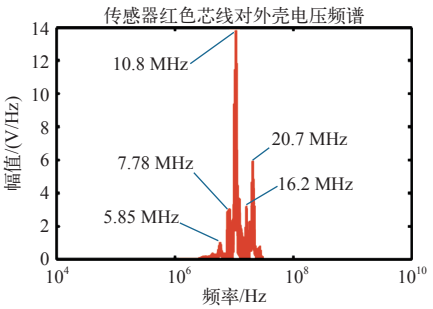


（a）传感器端仿真电压波形

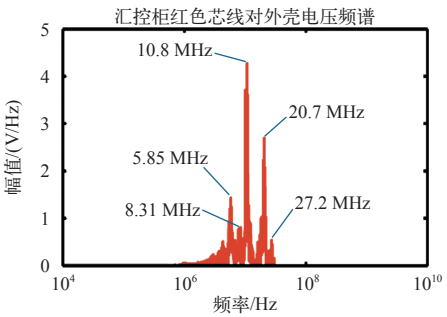


（b）智能组件端仿真电压波形

图7　单芯线仿真电压的时域波形



（a）传感器端仿真电压频谱



（b）智能组件端仿真电压频谱

图8　仿真电压的频谱图

根据式（1）、式（2），这里设定红色芯线对外壳电压为u_a，黄色芯线对外壳电压为u_n，计算4种接地方式下端口的共模、差模骚扰电压，得到的骚扰电压最大峰值如下表所示。

$$u_c = \frac{u_a + u_n}{2} \tag{1}$$

$$u_d = \frac{u_a - u_n}{2} \tag{2}$$

表　传感器和智能组件端口骚扰电压的最大峰值

接地方式	传感器/V		智能组件/V	
	u_c	u_d	u_c	u_d
1	2 820	353.2	2 702	341.3
2	2 441	309.0	801.2	327.5
3	308.0	50.8	400.4	44.4
4	142.1	20.3	49.7	21.7

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从表中可以看出，共模骚扰电压受接地方式的影响较大，接地方式1下共模骚扰电压为2 800 V左右；引起差模骚扰电压的原因是电缆芯线绕制时的不对称所导致的不平衡参数，严重时两端口差模骚扰电压为350 V左右，但相对于共模骚扰电压，一般小一个量级；接地方式3及方式4下，传感器和智能组件端口两种骚扰电压的抑制较为明显，通过选择合适的接地方式，可以有效地抑制两种骚扰电压。

4 结束语

首先建立了开关操作产生的地电位升对“传感器－二次电缆－智能组件”回路的耦合计算模型，然后通过验证试验证明了计算模型的有效性和准确性，最后对不同屏蔽层接地方式下的传感器和智能组件端口电磁骚扰进行了仿真研究，获得了传感器和智能组件端口骚扰电压的时域及频域特性。其主要结论如下。

1）从多导体传输线理论出发，将某实际变电站“传感器－二次电缆－智能组件”回路等效为“7＋1”传输线，建立了地电位升对“传感器－二次电缆－智能组件”回路的耦合计算模型。

2）在实验室搭建了验证试验回路，通过比对验证试验测量结果和计算结果，可以认为计算模型是有效和准确的。

3）对不同屏蔽层接地方式下的传感器和智能组件端口电磁骚扰进行了仿真计算。计算结果显示，共模骚扰电压受接地方式的影响较大，接地方式1下两端口共模骚扰电压为2 800 V左右；严重时两端口差模骚扰电压为350 V左右，但相对于共模骚扰电压，一般小一个量级；通过选择合适的接地方式，可以有效地抑制两种骚扰电压。

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] 肖保明，沈雪梅，姜宁浩，等．智能变电站智能组件电磁干扰分析与测试 [C]．中国电机工程学会年会，成都，2013．

[3] 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．

[4] 刘骁繁，崔翔，吴恒天，等．GIS设备开关操作对其传感器和智能组件端口骚扰电压的模拟试验研究 [J]．智能电网，2015，3 (1)：67-73．

[5] 刘骁繁，崔翔，吴恒天，等．500 kV气体绝缘变电站开关操作对智能组件电流互感器端口电磁骚扰的实测及分析 [J]．高电压技术，2015，41 (5)：1709-1718．

[6] 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．

[7] 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，2007，22 (3)：1505-1513．

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

[9] 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．

[10] 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．

[11] 钟连宏，贺景亮．GIS 暂态地电位升高的计算与分析 [J]．高电压技术，2000，26 (6)：43-45．

[12] 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．

（收稿日期：2015－07－15）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net