

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.007

# 基于传输线网络的特高压变电站智能组件端口 电磁骚扰的建模仿真

刘骁繁<sup>1,2</sup>, 焦重庆<sup>1</sup>, 崔翔<sup>1</sup>, 嵇建飞<sup>3</sup>

(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.国网江苏省电力公司  
经济技术研究院,南京 210008; 3.国网江苏省电力公司电力科学研究院,南京 211103)

**摘要:**随着智能化 GIS 设备的发展,GIS 设备上集成了大量电子设备。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。笔者首先基于传输线网络理论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,然后通过验证实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各传感器端口和智能组件各端口及端口间的骚扰电压进行了仿真研究。计算结果显示,各骚扰电压受接地方式的影响较大;通过选择合适的接地方式,可以有效地抑制开关操作电磁骚扰。

**关键词:**变电站;GIS;开关操作;地电位升;传输线网络

**中图分类号:**TM63

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2016)06-049-09

## Modeling and analysis of disturbance voltage induced on the intelligent electronic device ports based on the transmission-line network in ultra high voltage gas insulated substations

LIU Xiaofan<sup>1,2</sup>, JIAO Chongqing<sup>1</sup>, CUI Xiang<sup>1</sup>, JI Jianfei<sup>3</sup>

(1.State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, P.R.China; 2.State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, P.R.China; 3.State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, P.R.China)

**Abstract:** With the development of intelligent GIS equipment, a lot of electronic equipments are integrated on the GIS. The very fast transient electromagnetic disturbance (VFTED) resulted from the GIS switching operation has potential impact on the electronic equipment by the electromagnetic coupling between the VFTED and the circuit of “sensor-cable-intelligent electronic device (IED)”. In this paper, a theoretical model based on the transmission-line network was established first to calculate the coupling of the ground potential rise produced by switching operations to the circuit of “sensor-cable-IED”. Then the validation of this model was verified when it was used to a simple configuration. Finally, based on this model, the disturbance voltages on the sensor/IED ports and those between the IED ports were calculated and the suppression effectiveness of the grounding of the cable shield layer on the disturbance voltages was

**收稿日期:**2016-07-10

**基金项目:**国家电网公司科技项目(JB71-16-008)。

Supported by the Scientific Project of State Grid Corporation of China(JB71-16-008).

**作者简介:**刘骁繁(1990-),男,华北电力大学硕士研究生,主要从事电力系统电磁兼容方面的研究,(E-mail)liuxiaofanhd@163.com。

investigated. The results show that the grounding modes have great influence on disturbance voltage. By choosing the appropriate grounding mode, electromagnetic disturbance caused by switching operations can be effectively suppressed.

**Keywords:** substation; GIS; switching operation; ground potential rise; transmission-line network

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<sup>[1]</sup>,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<sup>[2-3]</sup>。

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<sup>[4-9]</sup>。

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 500 kV 及以下变电站,主要是对汇控柜到控制室段二次电缆的建模仿真<sup>[10-18]</sup>,对特高压变电站传感器到智能组件段的电磁兼容问题研究尚未见诸报道。尤其需要注意的是,目前已有的计算研究多是针对单通道传输线,而单通道传输线模型不能很好地描述汇控柜智能组件处包括 GIS 管道各处传感器汇集而来的二次电缆。为此,笔者首先基于传输线网络理论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,然后通过验证实验证明了该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各传感器端口和智能组件各端口及端口间的骚扰电压进行了仿真研究。计算结果显示,各骚扰电压受接地方式的影响较大;通过选择合适的接地方式,可以有效地抑制开关操作电磁骚扰。

## 1 地电位升对智能组件耦合的传输线网络模型

图 1 为特高压“传感器—二次电缆—智能组件”模拟试验平台。试验平台在套管 2 处接入 1 100 kV 交流线电压,套管 1 处不带电,隔离开关 DS1 断开,操作隔离开关 DS2 进行分合闸操作。分别在隔离开关旁 A 点、分支母线末端 B 点和电源侧套管下 C 点设立模拟传感器,在套管 2 旁设立模拟汇控柜。试验选用 KVVP 四芯电缆,电缆穿包塑金属软管按电缆沟方向布置,电缆两端分别在模拟传感器和模拟汇控柜内。针对开关操作通过地电位升对智能组件端口产生电磁骚扰问题,对特高压“传感器—二次电缆—智能组件”试验平台进行了建模仿真。

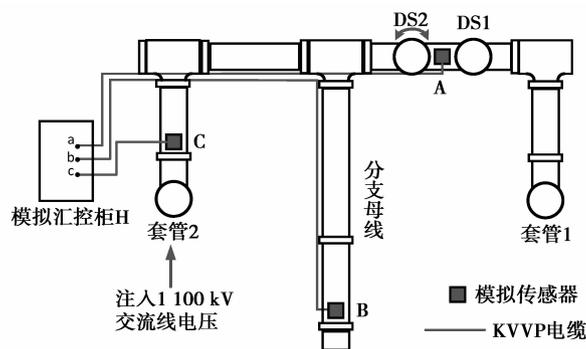
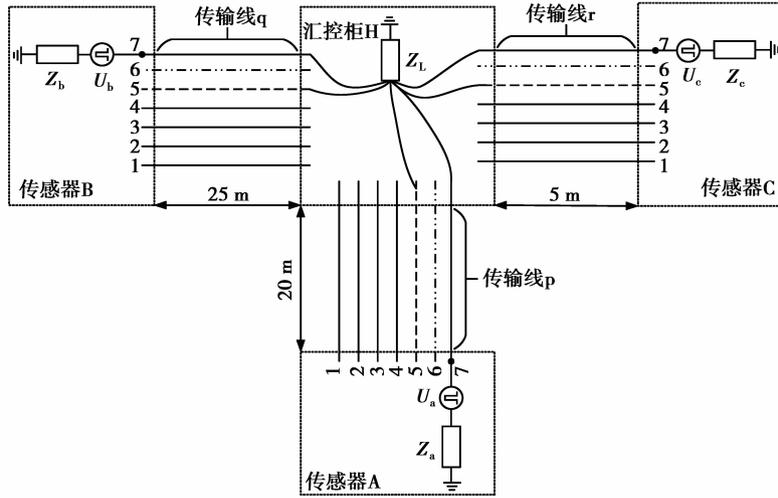


图 1 “传感器-二次电缆-智能组件”试验回路示意图

Fig.1 The diagram of “sensor-cable-IED” test circuit

一般将这种若干传输线相互连接构成的结构称作传输线网络。可以将该试验回路等效为图 2 中的 3 条“7+1”传输线构成的传输线网络模型(电缆屏蔽层在汇控柜单点接地)。传输线 p、q、r 分别为试验回路中的 Aa、Bb、Cc 段,其中的 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。电缆屏蔽层统一在汇控柜单点接地。将地电位升对该传输线模型的耦合等效为传感器对地加入试验中 A、B、C 各点所测的 TEV,其中  $U_a$  的时域波形如图 3 所示,各点 TEV 的最大峰值如表 1 所示;并假设汇控柜处无地电位升。

KVVP 电缆的单位长参数由试验测量获得;各传感器处的接地阻抗由矩量法提取;汇控柜处的接地阻抗设为  $0.1 \Omega$ 。



1,2,3,4—芯线; 5—屏蔽层; 6—铠装; 7—包塑金属软管

图 2 传输线网络模型

Fig.2 The transmission-line network model

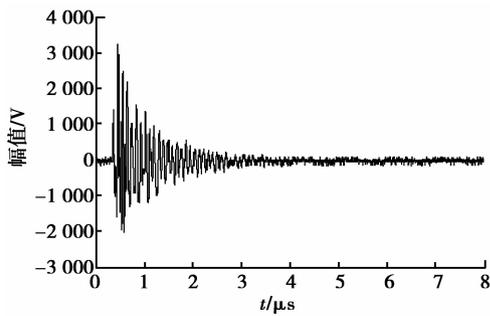


图 3 实测 TEV 微脉冲波形

Fig.3 The measured micro-pulse waveform of TEV

表 1 传感器 TEV 最大峰值

Table 1 The peak value of TEV

位置	最大峰值/V
A	3 237.5
B	5 687.5
C	5 082.5

## 2 电缆和接地支柱宽频参数的测量和提取

“传感器—二次电缆—智能组件”试验回路使用的二次电缆型号为 KVVP<sub>2-22</sub>,该电缆是变电站中常用的一种双屏蔽二次电缆。基于文献[19]中介绍的测量方法,利用阻抗分析仪测量屏蔽电缆终端短路和开路两种情况下各导体之间的输入阻抗,进而可以得到屏蔽电缆的单位长串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵。测试现场如图 4 所示。该测量方法获得的单位长阻抗参数幅频特性如图 5 所示。

通过矩量法可提取各传感器处接地支柱的阻抗频响特性。首先,根据实际的物理结构,建立接地支柱的物理模型;然后,在每个频点下向模型中注入正弦电流,计算出模型的电压差;最后,电压除以电流得到该频点下的阻抗。计算多个频点,获得频率范围内的阻抗频响特性。图 6 为传感器 C 处的接地支柱及其物理模型。图 7 为计算获得的  $Z_c$  频率特性曲线。

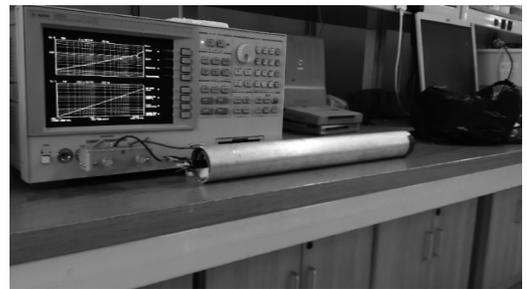


图 4 电缆参数测试现场

Fig.4 The test scene of cable parameters

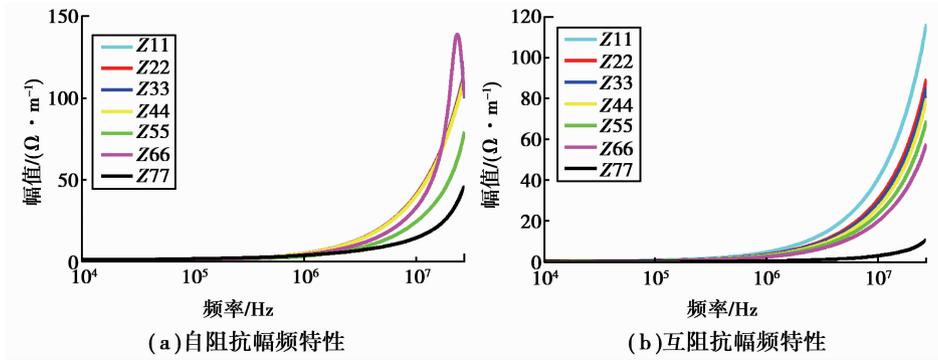


图 5 被测电缆的单位长阻抗参数幅频特性

Fig.5 Magnitude-frequency characteristics of the unit length impedance

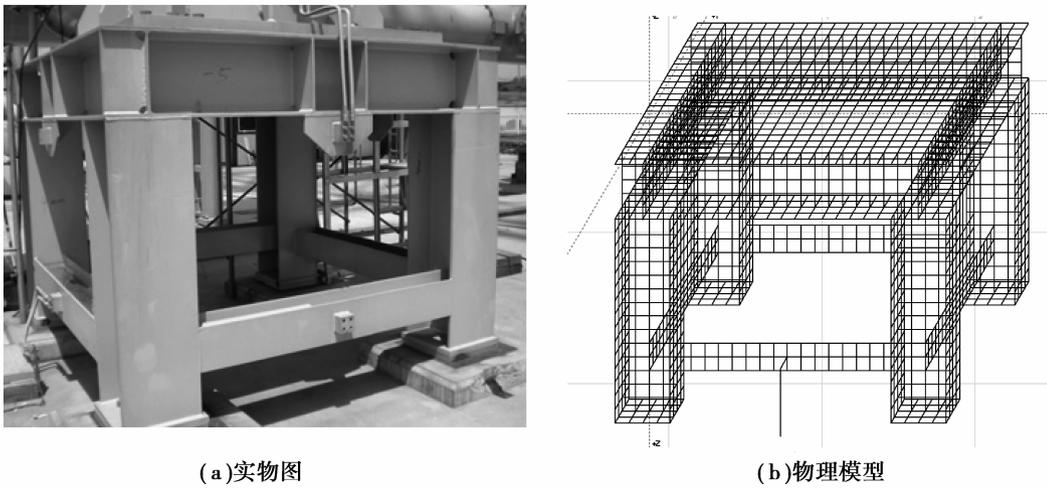
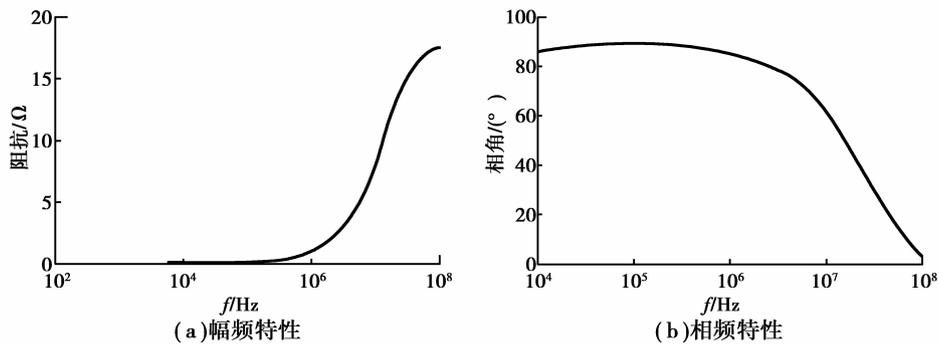


图 6 传感器 C 处的接地支柱实物图及其物理模型

Fig.6 The photo and physical model of the ground pillar near the sensor C

图 7  $Z_c$  的阻抗频响特性Fig.7 Frequency characteristic of  $Z_c$ 

### 3 验证实验

验证实验回路如图 8 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 9 所示。验证实验测量了 4 种接地方式下始末两端红色芯线对铝管的电压:1)始末两端屏蔽层浮地,负载开路;2)电缆屏蔽层在末端单端接地,两端负载开路;3)电缆屏蔽层在始端单端接地,两端负载开路;4)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 种接地方式下的红色芯线对地电压。

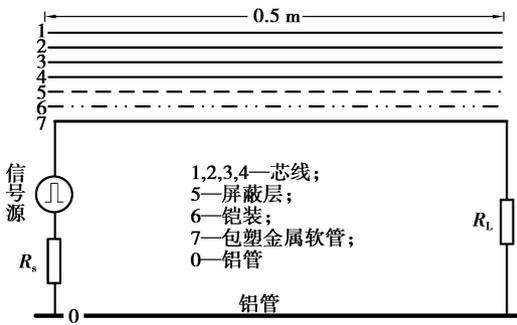


图 8 验证试验示意图

Fig.8 The diagram of verification test

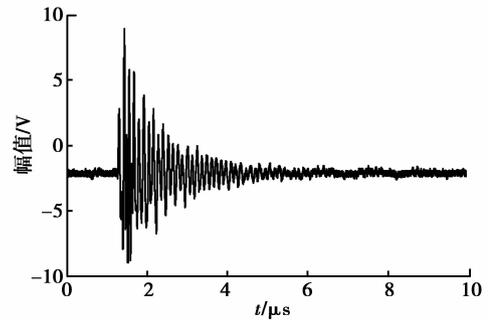


图 9 信号源输出波形

Fig.9 The output voltage waveform of the signal source

图 10 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。可以看到,实测电压与仿真电压波形的幅值和整体趋势较为一致。

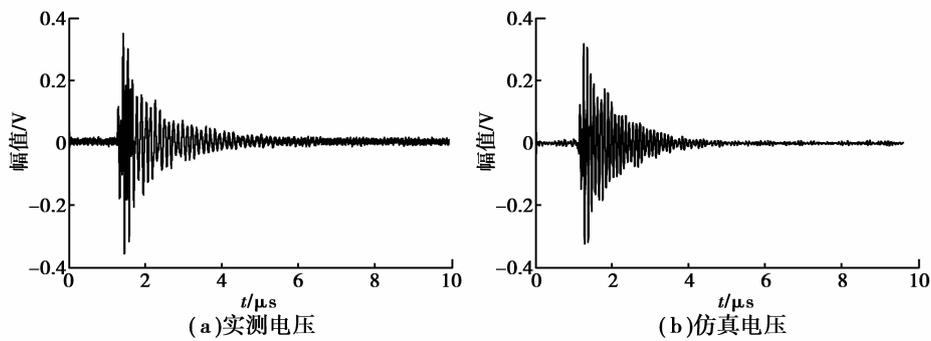


图 10 实测电压与仿真电压的时域波形

Fig.10 Time-domain waveforms of the measurement voltage and the simulation voltage

对 4 种接地方式下实测电压和仿真电压的最大峰值进行统计,结果如图 11 所示。可以看到,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。这里导致误差的可能原因有:验证实验所用的 KVVP 电缆为了方便接线,较 0.5 m 的铝管稍长;对实验回路施加激励电压的夹具会对测量带来一定影响。

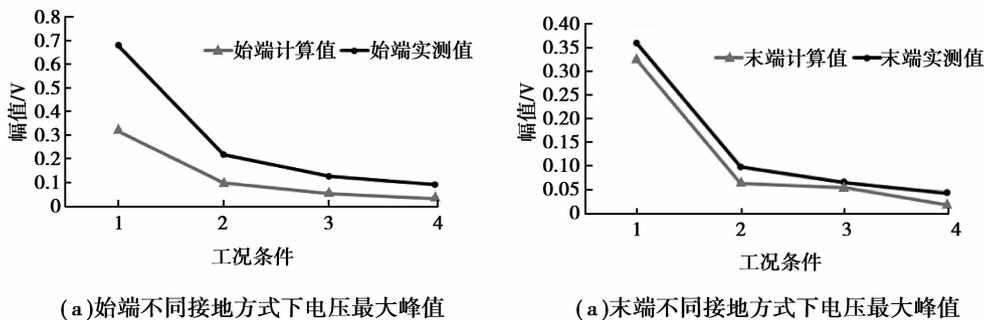


图 11 始末两端 4 种接地方式下实测和仿真电压的最大峰值

Fig.11 The peaks of the measurement voltage and the simulation voltage at the two ends for four kinds of grounding methods

通过验证实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“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。

## 4 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 1)双端浮地、2)汇控柜处单端接地、3)传感器处单端接地、以及 4)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 12 为接地方式 2 下仿真得到的传输线 p 传感器和汇控柜两端电缆单芯线骚扰电压时域波形。可以看到,传感器端骚扰电压最大峰值约为 4 300 V,智能组件端骚扰电压约为 2 200 V。图 13 为仿真电压波形的频谱图,传感器端电压主频包括 5.86, 10.76, 23.71 MHz,智能组件端电压主频包括 5.86, 10.76, 23.71 MHz。

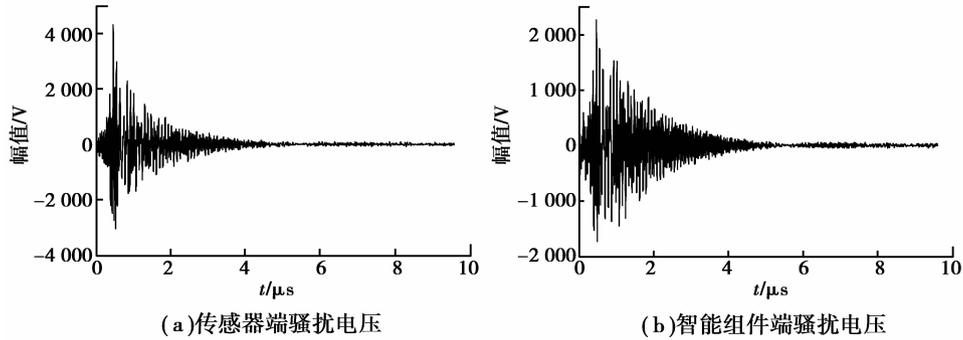


图 12 接地方式 2 下单芯线骚扰电压时域波形

Fig.12 Time-domain waveform of the single line simulation voltage by Grounding Mode 2

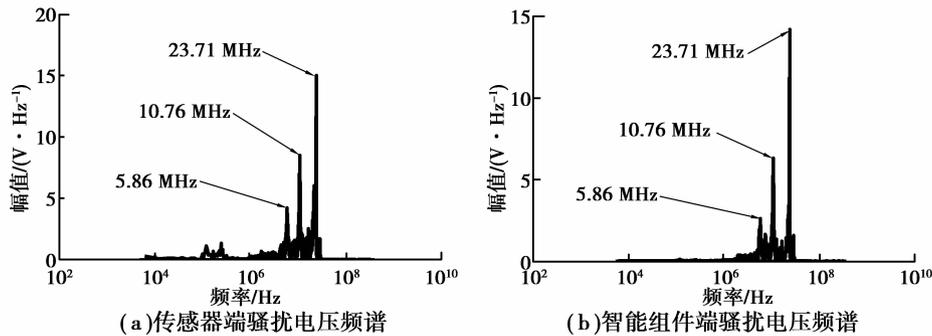


图 13 接地方式 2 下单芯线骚扰电压频谱图

Fig.13 The spectrum of simulation voltage by Grounding Mode 2

根据式(1),这里设定红色芯线(即图 2 中的传输线 1)对地为  $u_1$ ,黄色芯线(即图 2 中的传输线 2)对地为  $u_2$ ,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表 2 所示。

$$u_c = \frac{u_1 + u_2}{2}, \quad (1a)$$

$$u_d = \frac{u_1 - u_2}{2}. \quad (1b)$$

表 2 传感器和智能组件端口骚扰电压的最大峰值

Table 2 The peak of the disturbance voltage on the ports of the sensor and the IED

端 口	类型	骚扰电压/V			
		方式 1	方式 2	方式 3	方式 4
传感器 A 端	$u_c^{Ap}$	3 998.2	2 369.6	952.1	532.3
	$u_d^{Ap}$	2 254.5	2 153.6	753.0	346.3
汇控柜 p 端	$u_c^{Hp}$	4 297.2	1 665.4	682.1	506.9
	$u_d^{Hp}$	1 051.5	965.5	498.7	246.4

续表 2

端 口	类型	骚扰电压/V			
		方式 1	方式 2	方式 3	方式 4
传感器 B 端	$u_c^{Bq}$	7 236.2	2 331.1	1 036.6	494.5
	$u_d^{Bq}$	1 554.3	1 538.7	487.9	326.4
汇控柜 q 端	$u_c^{Hq}$	7 634.7	1 714.8	583.4	340.8
	$u_d^{Hq}$	1 134.0	954.0	425.5	178.8
传感器 C 端	$u_c^{Cr}$	3 155.0	2 398.2	1 339.4	525.1
	$u_d^{Cr}$	1 262.1	1 068.1	660.0	168.4
汇控柜 r 端	$u_c^{Hr}$	2 418.2	1 062.4	677.1	214.5
	$u_d^{Hr}$	691.0	468.3	570.2	139.7

从表 2 中可以看到,1)骚扰电压受接地方式的影响较大,在接地方式 1 下,传感器 B 处及汇控柜 q 端共模骚扰电压有 7 000 V 以上;接地方式 2 下,对端口骚扰电压有一定的抑制效果,在接地方式 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。2)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也有 2 200 V 左右,但一般较共模骚扰电压小。3)各传感器处的端口骚扰电压相比较,接地方式 1 中传感器 B 处的共模骚扰电压较 A、C 大,最大峰值达 7 236 V;接地方式 2、3、4 下,传感器 A、B、C 三处的端口骚扰电压较为接近。4)智能组件处的各端口骚扰电压相比较,接地方式 1、2、4 下智能组件 r 端的骚扰电压较 p、q 端小,接地方式 3 下智能组件 p、q、r 三个端口的骚扰电压相差不大。

汇控柜智能组件包括 GIS 管道各处传感器汇集而来的二次电缆,其端口间的骚扰电压也是电磁兼容研究中值得关注的一点。重点统计了各端口芯线间骚扰电压  $u_{wire}$ 、屏蔽层间骚扰电压  $u_{shield}$  以及芯线对屏蔽层骚扰电压  $u_{wire-shield}$ 。由式(2)得到的骚扰电压最大峰值如表 3 所示,式中的 p、q 为智能组件对应端口,1, 2, ..., 5 为对应传输线。

$$u_{wire}^{pq} = \frac{u_{p1} + u_{p2} + u_{p3} + u_{p4}}{4} - \frac{u_{q1} + u_{q2} + u_{q3} + u_{q4}}{4}, \tag{2a}$$

$$u_{wire-shield}^{pq} = \frac{u_{p1} + u_{p2} + u_{p3} + u_{p4}}{4} - u_{q5}, \tag{2b}$$

$$u_{shield}^{pq} = u_{p5} - u_{q5}。 \tag{2c}$$

表 3 智能组件端口间骚扰电压的最大峰值

Table 3 The peak of the disturbance voltage between the ports of the IED

类 型	骚扰电压/V			
	方式 1	方式 2	方式 3	方式 4
$u_{wire}^{pq}$	8 445.1	1 217.7	3 617.2	292.2
$u_{wire-shield}^{pq}$	8 549.2	649.3	3 589.6	262.0
$u_{wire-shield}^{qp}$	8 346.5	1 282.4	3 650.1	286.4
$u_{shield}^{pq}$	8 400.0	0	3 621.4	0
$u_{wire}^{pr}$	5 523.7	1 531.6	5 347.7	439.4
$u_{wire-shield}^{pr}$	4 775.4	649.3	4 706.4	262.0
$u_{wire-shield}^{rp}$	4 965.9	1 483.1	5 500.0	372.7
$u_{shield}^{pr}$	4 494.5	0	4 897.6	0
$u_{wire}^{qr}$	9 406.9	1 794.1	5 002.5	504.2
$u_{wire-shield}^{qr}$	9 243.3	1 282.4	5 242.1	286.4
$u_{wire-shield}^{rq}$	9 391.3	1 483.1	4 734.8	372.7
$u_{shield}^{qr}$	9 153.3	0	4 978.0	0

从表 3 中可以看到,1)端口间骚扰电压受接地方式的影响较大,接地方式 1、3 下端口间各骚扰电压明显大于接地方式 2、4。其中,接地方式 1 下端口间各骚扰电压幅值最大,qr 间各骚扰电压超过 9 000 V;接地方式 4 下端口间各骚扰电压幅值最小,基本不超过 500 V。2)因为汇控柜端屏蔽层接地后  $u_{p5} = u_{q5} = u_{r5}$ ,可以观察到接地方式 2、4 下屏蔽层间骚扰电压  $u_{\text{shield}}$  为 0;且有  $u_{\text{wire-shield}}^{\text{pq}} = u_{\text{wire-shield}}^{\text{pr}}$ ,  $u_{\text{wire-shield}}^{\text{qp}} = u_{\text{wire-shield}}^{\text{qr}}$ ,  $u_{\text{wire-shield}}^{\text{rp}} = u_{\text{wire-shield}}^{\text{rq}}$ 。

结合表 2、表 3 来看,1)接地方式 1 下智能组件处的端口和端口间骚扰电压幅值最大,接地方式 4 下智能组件处的端口和端口间骚扰电压最小。2)接地方式 3 下的传感器和智能组件端口骚扰电压虽然较方式 1、2 小,但端口间骚扰电压较大。选择这种接地方式需对智能组件端口间的骚扰电压做一定抑制措施。

## 5 结 论

首先基于传输线网络理论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,然后通过验证实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各传感器端口和智能组件各端口及端口间的骚扰电压进行了仿真研究。主要结论如下。

1)从传输线网络理论出发,将“传感器—二次电缆—智能组件”试验回路等效为三段“7+1”传输线构成的传输线网络,分别通过测量和矩量法提取 KVVP 电缆及接地支柱参数,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,通过比对验证实验测量结果和计算结果,验证了计算模型的有效性。

3)对不同屏蔽层接地方式下的各传感器端口和智能组件各端口及端口间的骚扰电压进行了仿真计算。计算结果显示,各骚扰电压受接地方式的影响较大:屏蔽层双端浮地条件下各骚扰电压幅值最大,双端接地各骚扰电压幅值最小,汇控柜单端接地和传感器单端接地介于两者之间。其中,传感器单端接地下的传感器和智能组件端口骚扰电压虽然较汇控柜单端接地小,但智能组件端口间骚扰电压较大。选择这种接地方式需对智能组件端口间的骚扰电压做一定抑制措施。

### 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.  
HUANG Yizhuang. EMC technology for IED in substations[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 6-9.(in Chinese)
- [2] 肖保明,傅静波. 智能变电站智能组件电磁干扰分析与测试[J]. 安全与电磁兼容,2014(3):23-26.  
XIAO Baoming, FU Jingbo. Analysis EMI and test of intelligent component in smart substation[J]. Safety & EMC, 2014 (3): 23-26.(in Chinese)
- [3] 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.  
LIU Xiaofan, CUI Xiang, WU Hengtian, et al. Simulation experimental study on disturbance voltage of the sensor and the intelligent electronic device due to gas insulated substation switching operations[J]. Smart Grid, 2015, 3(1):67-73.(in Chinese)
- [4] 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.  
LIU Xiaofan, CUI Xiang, WU Hengtian, et al. Measurement and analysis on electromagnetic disturbance of intelligent electronic device current transformer ports due to switching operations in a 500 kV gas insulated substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5):1709-1718.(in Chinese)
- [5] 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.  
ZHANG Zhongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang, et al. The effects of operations of the disconnector switch on the secondary circuits in gas insulated substations[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 5-7.(in Chinese)
- [6] 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(31):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(31): 1-11.(in Chinese)

- [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.  
CUI Xiang. A review of CIGRE'2002 on power system electric-magnetic compatibility[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(4): 1-5.(in Chinese)
- [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.  
QI Lei, CUI Xiang. Prediction of electromagnetic interference on the shielded cable due to the switching operation in substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 46-51.(in Chinese)
- [11] Uglešić I, Hutter S, Milardić V, et al. Electromagnetic disturbances of the secondary circuits in gas insulated substation due to disconnector switching[C]// International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA. [S.l.]: IPST, 2003: 1-6.
- [12] Kostin M K, Matveyev M V, Ovsyannikov A, et al. Some results of EMC investigation in Russian substations[C]// CIGRÉ Session. [S.l.]: GIGRÉ, 2002: 36-103.
- [13] Wiggins C E, Thomas D E, Nickel F S, et al. Transient electromagnetic interference in substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1869-1884.
- [14] 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
- [15] Miri A M, Binder C. Investigation of transient phenomena in inner and outer systems of GIS due to disconnector operation[C]// International Conference on Power Systems Transients. Lisbon, Portugal: [s.n.], 1995, 95: 71-76
- [16] 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.  
ZHONG Lianhong, HE Jingliang. Calculation and analysis of transient ground potential rise in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(6): 43-45.(in Chinese).
- [17] 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.  
ZHANG Weidong, CHEN PEilong, CHEN Weijiang, et al. Measurement and simulation of disturbance voltage generated by vf to in uhv gis substation on the secondary cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 187-196.(in Chinese)
- [18] Hu R, Cui X, Zhang W D, et al. Transient enclosure voltage (TEV) measurement system of UHV GIS and TEV statistical characterization[C]// 2012 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). Rome, Italy: IEEE, 2012: 1-6.
- [19] 齐磊, 崔翔, 卢铁兵, 谷雪松. 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): 122-126.  
QI Lei, CUI Xiang. Measurement of distributed parameters and transient analysis of shielded cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 119-123.(in Chinese)