

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.008

GIS 隔离开关操作对电子式电流互感器的干扰分析及防护

白世军^{1,2}, 曾林翠², 荣命哲¹, 李 毅², 陈 凯², 张玉荣²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 西安西电高压开关有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 为了给 GIS 集成式电子式电流互感器的工程设计和安全运行提供理论依据, 文中以隔离开关开合造成的 VFTO 是引起电子式电流互感器受干扰的唯一干扰源和根源的结论, 分析建立了四川某工程 126 kV GIS 内部和外部暂态计算电路。选取变压器间隔 GIS 典型结构作为分析对象, 利用 EMTP 合理地选择参数并建立了 VFTO 和 TEV 仿真计算模型, 计算了 GIS 各主要节点的 VFTO 和 TEV。通过仿真计算及研究结果表明, GIS 集成式电子式电流互感器的设计应用是个系统工程, 除了要考虑电子式互感器自身的传感器部分和电子电路部分的干扰防护设计, 还要考虑 GIS 的结构布局、母线、壳体尺寸和接地等因素对 VFTO 的抑制。

关键词: 电子式电流互感器; 快速暂态过电压; 暂态地电位; EMTP

Interference Analysis and Protection of Electronic Current Transformer Caused by Disconnect Switch Operation in GIS

BAI Shijun^{1,2}, ZENG Lincui², RONG Mingzhe¹, LI Yi², CHEN Kai², ZHANG Yurong²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an XD High Voltage Switchgear Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to provide the theoretical reference for engineering design and safe operation of integrated electronic current transformer (ECT) in GIS, this paper considers that very fast transient overvoltage (VFTO) caused by disconnect switch operation is the only interference source and the root causes of the electronic current transformer with electromagnetic interference. The inside and outside transient circuits of a GIS substation in Sichuan are established by EMTP. The typical structure of the transformer interval GIS is selected as the analysis object and the reasonably parameters are chosen to establish VFTO and TEV simulation model by using EMTP. The VFTO and TEV occurred at main nodes are calculated. The calculation and research results show that the design and application of GIS integrated electronic current transformer is a system engineering. It needs to consider the overall design of GIS, suppression of VFTO in GIS structure layout, buses, the size of the shell and well-earthing and other factors. Besides the interference protection design of the sensor part and the electronic circuit part of electronic current transformer are suggested.

Key words: electronic current transformer; very fast transient overvoltage; transient earth voltage; EMTP

0 引言

电子式互感器具有体积小、重量轻、无磁饱和、无二次开路、可方便地与一次高压开关设备组合安装, 有效提高了设备集成度, 减少用地、安装运输方便等优点^[1-5], 具有广泛应用的市场前景。随着技术的不断成熟, 近年来在 AIS 变电站逐步得以成功应用, 但对于集成一体化设计安装有电子式互感器的

GIS 智能变电站, 电子式互感器采集卡安装于 GIS 设备外壳上, 采集卡及供电电源处于电磁严重污染的环境中, 在隔离开关(disconnecting switch, DS)和断路器(circuit breaker, CB)的操作时会在 GIS 内产生高达数亿赫兹的 VFTO^[2-9], 并引起壳体地电位的升高(transient earth voltage, TEV)^[10]。近年由于操作隔离开关暂态现象引起电子式互感器在多个智能变电站中采样数据异常甚至损坏等严重问题导致保护误动常有发生, 电子式互感器的可靠性依然严重

困扰着电子式互感器的大面积推广应用。

GIS用电子式互感器由于其安装位置更加接近开关设备等操作元件,长时间,近距离运行在恶劣的电磁环境中,其抗干扰能力必须受到特别的关注。电磁干扰防护的研究已经成为电子式互感器核心技术之一。文中从电子式互感器的原理、安装结构出发,以工程案例为研究点进行了 VFTO 和 TEV 模型仿真,分析了其对电子式互感器干扰的机理。在研究的基础上提出了 GIS 集成式电子式电流互感器的抗干扰措施,为电子式互感器的工程设计应用推广应用提供借鉴。

1 电子式互感器应用中的电磁干扰问题及影响

目前,智能化变电站中电子式电流互感器采用低功率 LCPT 线圈和 Rogowski 线圈组合的技术方案。LCPT 具有体积小、精度高、可带高阻抗等优点,适用于提供稳态信号,用作测量信号的获取,但其仍包含高导磁率铁心,因而存在饱和问题,过载信号无法得到保障。采用 Rogowski 线圈解决了传统电磁互感器饱和的问题,具有频率响应好、线性度高、暂态特性好等特点,用作保护信号的获取。在采用电子式互感器的变电站中已经投入运行的延安(洛川)750 kV 变电站、长春南(金城)500 kV 变电站、陕西户县新盛

330 kV 变电站、126 kV 青海城东变电站等多个智能变电站在调试投运或长期运行过程由于中出现不同程度的问题,甚至有些问题导致保护误动,而这些变电站表现出来的问题在很长一段时间内难以解决^[1]。

根据国网吉林电力有限公司现场实施小组到国内已经建成投运的智能化变电站进行实地调研结果表明:截止 2012 年 10 月份,国内共建 61 座 35~750 kV 变电站采用了电子式互感器,产品设计国内 11 个生产厂家,其中有 21 座变电站反馈出了电子式互感器问题,占总数量的 34.4%。有 11 座变电站涉及 5 个厂家采集卡受到了干扰,具体问题如下:

1)在开合隔离开关时采集器由于受到快速暂态过电压 VFTO,造成信号传输中断或硬件损坏;

2)采集器电源在分合线路隔离开关时受到干扰,导致合并单元通信出现异常;

3)隔离开关合闸操作时,电磁干扰特别严重,电子式互感器的采集单元抗干扰设计不充分,导致数据转换异常,出现个别跳点;

4)电子式互感器安装于 GIS 本体,与隔离开关等设备近,通信元件 EMC 防护处理能力不力;

5)电子式互感器采集器二次回路与一次回路共地,导致高频干扰通过接地回路引入采集器。

图 1、2 为电子式互感器在隔离开关操作时受干扰合并单元录波图。

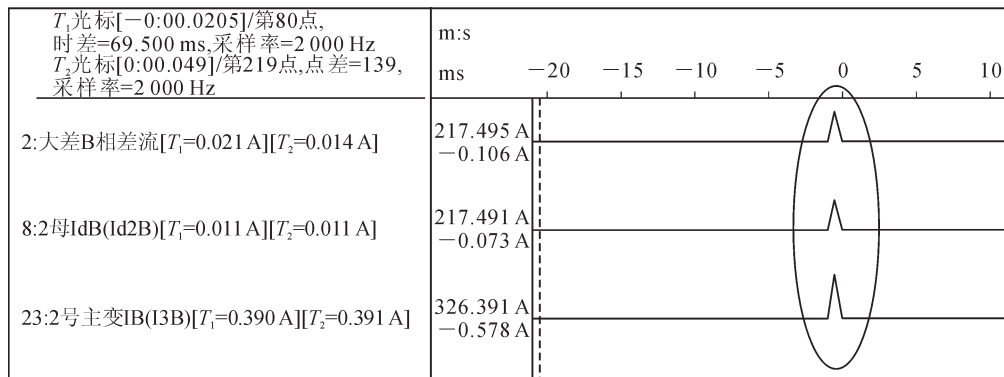


图 1 操作隔离开关时合并单元输出(单点跳变)

Fig. 1 Merging unit output when operating the disconnecting switch(single point jump)

2 电子式互感器运行干扰问题原因分析

GIS典型结构图见图 3,隔离开关操作对 GIS 电子式电流互感器暂态影响见图 4。在采用 GIS(gas insulated switchgear)的变电站中,如图 3 所示电子式电流互感器 ECT 通常与隔离开关 DS 相邻安装在 GIS 内。当 GIS 例行操作(例如隔离开关 DS 切合空载变压器)或变电站故障时,隔离开关、接地开关和断路器等一次设备动作就会产生快速暂态过程(

very fast transient, VFT),其主要表现为:如图 4 所示 GIS 母线上的快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)和过电流(very fast transient current, VFTC)、GIS 壳体上的暂态地电位(transient earth voltage, TEV)升高、外部过电压(fast transient overvoltage, FTO)和在 GIS 周围空间产生暂态电磁场(transient electromagnetic field, TEM)和电磁干扰(electromagnetic interference, EMI),这种瞬态过程会对 GIS 内的电子式互感器产生很大的影响,导致互

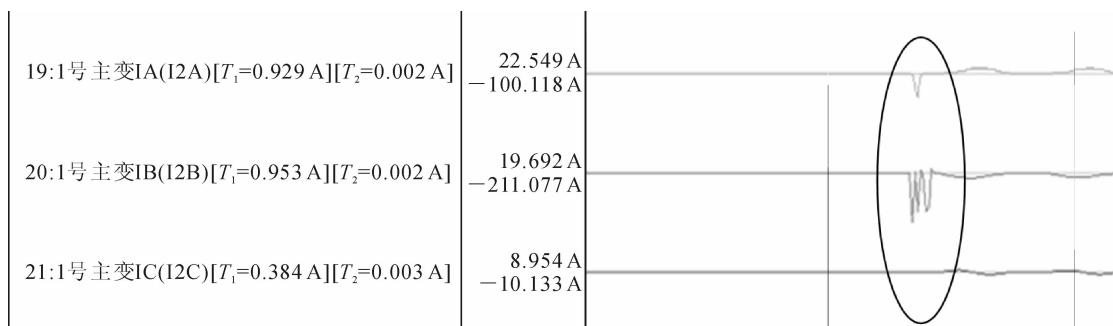


图2 操作隔离开关时合并单元输出(持续干扰)

Fig. 2 Merging unit output when operating the disconnecting switch(continuous interference)

感器不能正常运行。

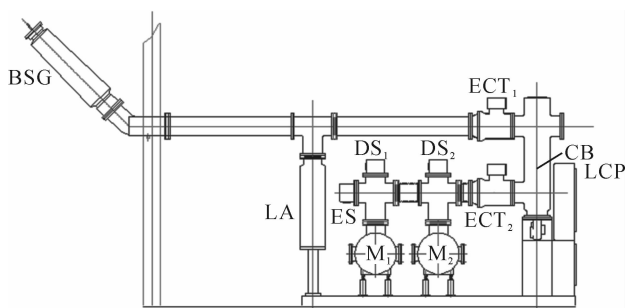


图3 GIS典型结构图

Fig. 3 Typical structure diagram of GIS

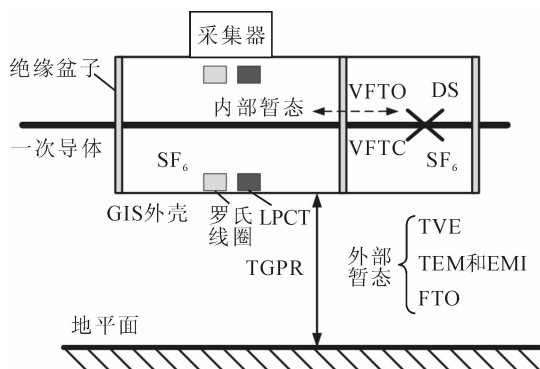


图4 隔离开关操作对GIS电子式电流互感器暂态影响

Fig. 4 Disconnecting switch operation of the transient effect of GIS electronic current transformer

如图4所示,内部暂态^[12]是指在GIS内部的暂态过程,所形成的过电压VFTO和过电流VFTC^[20]作用于GIS内部导体和壳体之间,危及GIS内部的设备,特别是电子式互感器传感器。外部暂态是由GIS内部暂态过电压波传播到GIS外部引起的,它可以危及GIS一次设备或使GIS的壳体电位TEV升高,也可以形成向外辐射的电磁波,危及敏感的二次设备,特别是安装于GIS壳体上的电子式互感器的采集卡。由GIS隔离开关操作引起的快速暂态分类及其危害见图5。

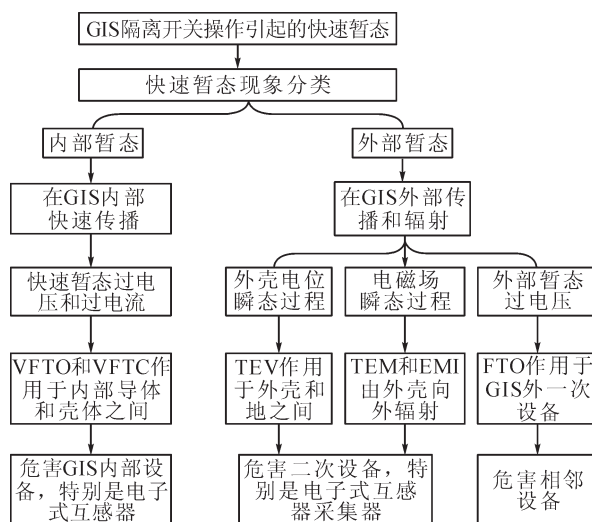


图5 GIS隔离开关操作引起的快速暂态分类及其危害

Fig. 5 Fast transient classification and damage caused by disconnecting switch operation

3 GIS 暂态模型的建立和仿真

VFTO 是影响GIS内绝缘的重要因素,对安装在一次设备本体上电子式互感器干扰等影响也不容忽视。电子式互感器采集卡安装在GIS设备外壳,采集卡及相关二次电缆处于电磁严重污染的环境中。VFTO已经成为智能变电站电子式互感器难以推广的一个技术瓶颈。为此,文中以四川某工程126 kV GIS智能变电站电子式互感器工程设计应用为研究点,对这一问题进行分析及仿真计算,分析影响VFTO和TEV的因素,提出相应的改善措施。

3.1 126 kV GIS 变电站系统

四川某工程126 kV GIS智能变电站采用集成式电子式CT的分相智能化GIS。主变和线路间隔按A、B、C相配置6台GIS ECT,母联间隔配置3台ECT。其中ECT包含两个5TPE的Rogowski线圈和一个0.2S级的低功率测量LPCT,分别满足双重化

保护的要求以及测量和计量的要求。对于保护电流和电压由两路独立的双 A/D 采集系统进行采样, 进入同一个合并单元中。主接线图见图 6, 断路器两侧独立集成安装 ECT, ECT 仅靠隔离开关安装。

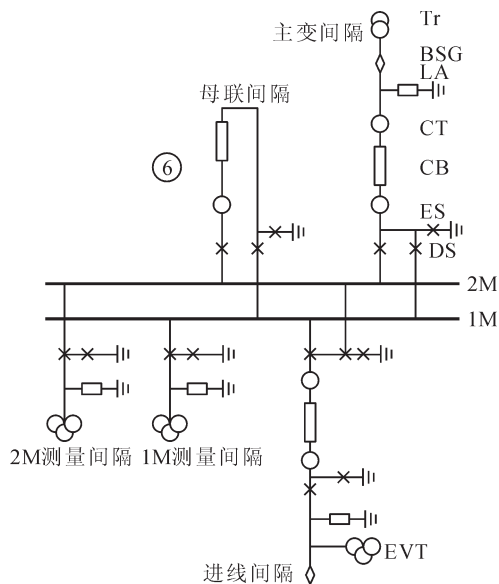


图 6 126 kV GIS 智能变电站主接线图

Fig. 6 Main wiring diagram of 126 kV

GIS intelligent substation

3.2 GIS 电气元件的等效模型

为了更准确地描述隔离开关操作时 GIS 中的电磁暂态过程, 必须将 GIS 各电气元件的暂态模型完整地表达清楚, 建立准确的 GIS 电磁暂态模型。当 GIS 出现暂态过程时, 暂态电压波一部分发生在由高压母线与壳体内壁间的波阻抗和各电气元件的等效模型所构成的内部电路中; 另一部分发生在由壳体外壁与大地间的波阻抗和架空线与大地间的波阻抗所构成的外部电路中。在计算 VFTO 和壳体 TEV 时, 这两条电路都要考虑, 因此需要建立 GIS 内部和外部暂态计算电路^[13]。

根据 GIS 变电站内部与外部暂态波过程的传播特性, 对于 GIS 内部母线导体用分布参数的传输线模型来等效, 其他一些元件设备由集中参数的等值电路表示。126 kV GIS 中部分电气元件的等效模型及其参数见表 1。

对于隔离开关, 在闭合时等效为母线的一部分和对地电容; 在断开时等效成对地集中电容; 当其进行操作时会产生电弧, 此时的电弧模型可表示为时变电阻。

$$R(t) = R_s + R_0 e^{-t/T} \quad (1)$$

式(1)中: $R_s = 0.5 \Omega$; $R_0 = 10^{12} \Omega$; $T = 1 \text{ ns}$ 。

GIS 与套管连接处示意图见图 7。

如图 7 所示, 在 GIS 与套管的连接处形成连接

表 1 GIS 各元件等效模型

Table 1 The element equivalent model of GIS

元件	等效参数	备注
母线	波阻抗	根据尺寸计算
绝缘子	对地电容	$C_s = 8 \sim 20 \text{ pF}$
断开的断路器	均压电容	$C = 200 \text{ pF}$ 左右
隔离开关的燃弧过程	时变电阻	—
气体套管	波阻抗和电容	$Z_r = 400 \Omega$, $C = 10 \sim 20 \text{ pF}$
电流互感器	串联电感及对地电容	有时忽略
接地线	分布参数或集中参数	$1.0 \mu\text{H/m}$
避雷器	集中对地电容	$C = 10 \text{ pF}$ 左右

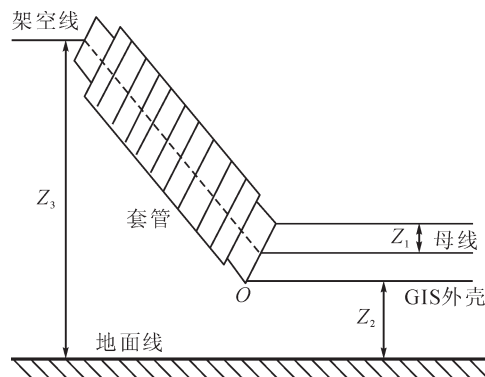


图 7 GIS 与套管连接处示意图

Fig. 7 Schematic diagram of GIS and bushing

于一点的 3 条传输线系统^[14], 分别为母线与壳体内表面间的波阻抗 Z_1 构成的回路、壳体外表面与大地间的波阻抗 Z_2 构成的回路、架空线与大地间的波阻抗 Z_3 构成的回路。在 O 点一部分电压波将耦合到壳体与地之间, 造成暂态壳体电位升高; 另一部分耦合到架空线上。对于该处的建模采用变比为 1:1 的理想变压器模型, 将 3 条传输线连接起来建模。 Z_1 为母线与壳体内表面间的波阻抗, $Z_1 = 60 \ln \frac{R_2}{R_1}$, R_1 为母线导体外半径; R_2 为壳体内半径; Z_2 为壳体外表面与大地间的波阻抗, $Z_2 = 60 \ln \frac{2h}{R_3}$; Z_3 为架空线与大地间的波阻抗, $Z_3 = 60 \ln \frac{2h_1}{r}$, h_1 为架空线离地面高度; r 为架空线半径。

利用 GIS 电气元件等效模型, 根据电气主接线图及参数来构建内部电路, 并与由壳体外壁与大地间的波阻抗 Z_2 和架空线与大地间的波阻抗 Z_3 所组成的外部电路通过理想变压器模型相连接, 即可构成描述 GIS 暂态过程的电路。图 8 是 GIS 的一种接线方式。图 8 中: Tr 为主变; BSG 为套管; ECT 为电子式电流互感器; CB 为断路器; DS 为隔离开关; ES 为接地开关; M 为主母线。因此, 根据实际的 GIS 变电站, 利用建立 GIS 暂态电路的方法, 可以计算

GIS内部各个点 VFTO 和壳体各处的 TEV 数值。

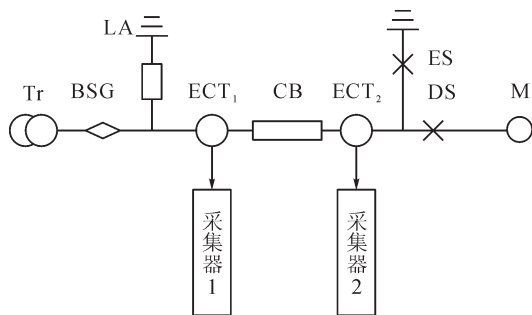


图8 主变间隔 GIS 电气主接线

Fig. 8 Transformer bay GIS electrical main wiring

3.3 VFTO 仿真及分析

文中选取图7主变间隔智能化GIS为研究仿真对象,电气接线见图8,在断路器为断开状态,操作主母线侧隔离开关DS,计算各节点上的VFTO^[15]。根据3.2节的电气元件等效模型应用EMTP^[16]建立VFTO仿真模型见图9,GIS同轴传输线按无损线模型处理,经计算得各段的波阻抗取值为 $Z_{12}=250\ \Omega$ 、 $Z_{23}=Z_{34}=61\ \Omega$; $Z_{45}=Z_{67}=75\ \Omega$; $Z_{78}=10^8\ \Omega$;外壳电阻为 $0.1\ \mu\Omega/\text{m}$,波速取 $3.0\times 10^8\ \text{m/s}$ 。

文中对VFTO模型进行仿真计算,在计算时仿真时间步长的选取非常关键。如果时间步长选取的

太大,超过模型中波在最短传输线上的传播时间,就会影响计算结果的准确度。但是,如果步长选取的太小,不仅会导致计算的时间太长,还会增大计算的工作量,并且也不能使结果更精确,只是在波形上会出现很细微的振荡,对VFTO电压的整体分析帮助很小。故合理地选择计算时间步长是准确而快速的计算VFTO的重要条件。文中计算选取的时间步长 $\Delta t=1\ \text{ns}$,仿真时间为 $2\ \mu\text{s}$ 。VFTO的EMTP仿真模型见图9。

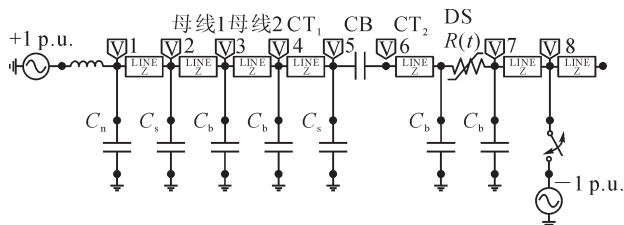


图9 隔离开关DS操作VFTO的EMTP仿真模型

Fig. 9 EMTP simulation model of disconnecting switch operation VFTO

仿真中,考虑电弧重燃最严重的极端情况^[17-19],即电源侧电压为正峰值,而被开断母线残余电荷电压为电源电压负峰值的情况,即隔离开关电源侧电压为 $1.0\ \text{p.u.}$ (89.8 kV),负载侧电压为 $-1.0\ \text{p.u.}$ (-89.8 kV),见表2。

表2 电源侧电压为89.8 kV和空载母线电压为-89.8 kV时VFTO仿真结果

Table 2 VFTO simulation results for 89.8 kV of supply side voltage and noload bus voltage of -89.8 kV

节点位置	1(变压器)	2(套管)	3(避雷器)	5(ECT ₁)	6(ECT ₂)	7(DS)	8(主母线)
VFTO幅值/p.u.	1.04	2.01	1.69	1.61	-1.23	-2.03	-2.00

从表2仿真的结果可看出,隔离开关和气体套管侧VFTO的幅值最大,最大值为 $-2.03\ \text{p.u.}$ 和 $2.01\ \text{p.u.}$ 。图10为其各重要节点VFTO波形图(横坐标为时间,纵坐标为电压与额定值的比值)。从图10中可看出,VFTO的波形复杂,其上升时间非常短。图11为节点5 ECT₁处VFTO波形;图12为节点6 ECT₂处VFTO波形;图13为隔离开关合闸快速暂态过电流VFTC波形。从图11、12可知,VFTO的幅值最大不超过 $1.61\ \text{p.u.}$,从最大幅值上来看其对电子式电压互感器和电磁式电压互感器是可接受的,特别是电磁式电压互感器的频带范围比较窄,对电子式互感器ECT主要危害是由VFTO引起的高频VFTC,其对电子式ECT的安全运行的影响是致命的。

由于受仿真所限,文中未仿真获得快速暂态过电流VFTC的幅值。文[18]中对GIS一次导体的VFTC进行了详细的研究并进行了实际测量,测量点位于文中的ECT₁和ECT₂位置,通过实验测量,可分析出,隔离开关在不同速度下分闸、合闸操作,电磁暂态过电流基本小于 $4\ \text{kA}$ (见图13)。但当隔离开关以

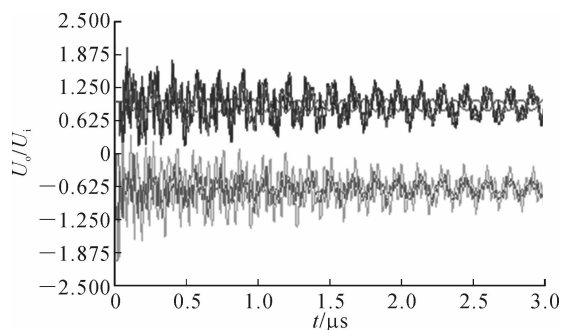


图10 GIS内部节点1-8 VFTO 波形

Fig. 10 The internal node 1-8 VFTO waveform of GIS

$1.6\ \text{m/s}$ 分闸操作时电磁暂态过电流达到 $5.6\ \text{kA}$ (是额定值的 $1.4\sim 5$ 倍)。依据国内外研究表明,电磁暂态过电流一般小于 $4\ \text{kA}$,基本符合VFTC测量结果。根据这个实际测试结果来看,在隔离开关操作过程中确实产生VFTC并通过电子式互感器传输给了保护装置,这时候断路器CB处于分闸状态,负载回路处于断开状态,正常情况下母线上没有电流信号,而保护装置收到了VFTC信号,经常会导致保护装置误动或警告,国内很多GIS智能变电站在投运

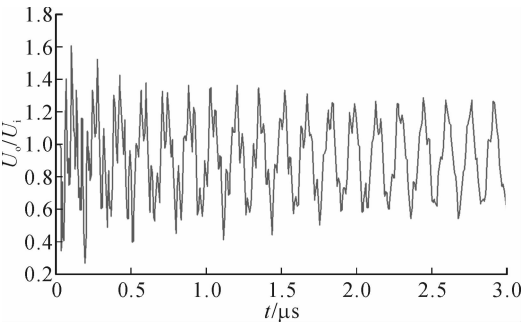


图 11 节点 5 ECT₁ 处 VFTO 波形

Fig. 11 The internal node 5 VFTO waveform of ECT₁

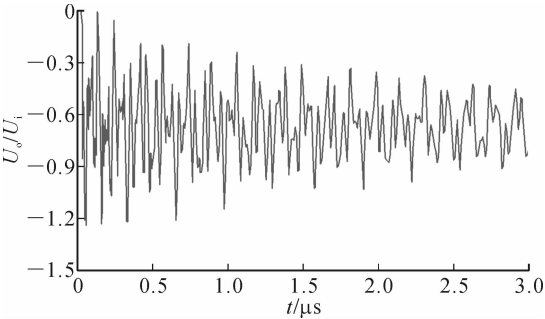


图 12 节点 6 ECT₂ 处 VFTO 波形

Fig. 12 The internal node 6 VFTO waveform of ECT₂

中都因为 VFTC 导致投运失败。

3.4 TEV 仿真及分析

模拟仿真计算取单相, 按图 7 GIS 外壳模型和图 8 的电气接线图建模, 大地设为良导体, 两个接地点 L_1 和 L_2 离地高分别为 2.295 m 和 0.29 m, 母线外直径 90 mm, 其等效电路见图 14。图 14 中: E_0

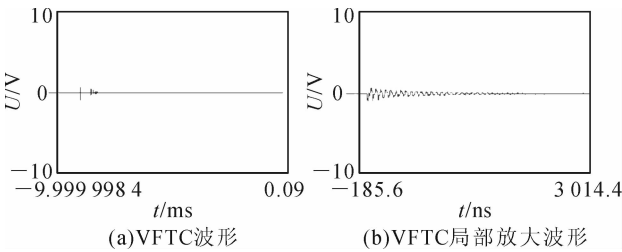


图 13 隔离开关合闸快速暂态过电流 VFTC 波形

Fig. 13 The fast transient current VFTC waveform of disconnecting switch close operation

(1.0 p.u., 0.01/5 μ s 双指数波)和 60 Ω 电阻 R_1 用于等效 GIS 内开关操作或故障下形成的 1.0 p.u. 的行波到达母线端后的情况^[19]。架空线阻抗 Z_f 取 400 Ω , 接地线电感 L 取 1.0 μ H/m, 则 $L_1=2.295 \mu$ H, $L_2=0.29 \mu$ H; CT_1 、CB 和 CT_2 分别为 201、164、173 Ω , 用 100 m 长波阻抗 M 模拟连续的外壳。计算时取外壳电阻 0.1 Ω /m, EMTP 的模拟仿真结果见图 14(图 14 中波形从左至右分别对应点 1–7 的波形)。GIS 外壳节点 1–6 TEV 仿真结果见表 3。

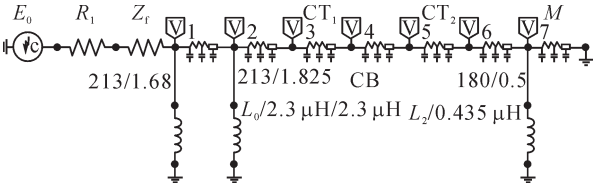


图 14 隔离开关操作 TEV 的 EMTP 仿真模型

Fig. 14 EMTP simulation model of TEV for disconnecting switch operation

表 3 GIS 外壳节点 1–6 TEV 仿真结果

Table 3 Simulation results of TEV 1–6 GIS shell

节点位置	1(套管)	2(避雷器)	3(ECT ₁)	4(断路器)	5(ECT ₂)	7(主母线)
TEV 幅值/p.u.	0.230	0.197	0.181	0.160	0.147	0.064

节点 1–6 TEV 波形见图 15–18。

从图 15–18 和表 3 中可以看出, TEV 的最大值发生在节点 1 处, 即出线套管处的壳体上, 最大幅值为 0.23 p.u.(20.6 kV)。壳体其他处的 TEV 数值离套管越远其值就越小, 最小为主母线 M 处 0.064 p.u.(5.747 kV), 这主要是由于 VFTO 在套管处耦合到壳体上电压波沿着壳体传播时会因壳体存在阻抗而发生衰减的缘故。并且, 由于壳体是接地的, 于是当电压波遇到并联的接地线时, 波头的陡度被削减了。

集成安装于断路器 CB 两侧的 ECT₁(上置)和 ECT₂(下置)处的 TEV 幅值分别达到了 0.181 p.u.(16.25 kV)和 0.147 p.u.(13.2 kV)。根据频谱特性可看出, TEV 的频率主要分布在 15、45 MHz 左右。电子式互感器采集器采用外部 DC 220 V 直流供电, 开关

电源端口的快速脉冲群干扰为 4 kV(100 kHz), 浪涌共模干扰为 4 kV, 差模为 2 kV, 干扰电压高出约 4 倍, 如无相应的防护措施, 将严重损坏采集器的供电系统。

4 在 ECT 设计上采取的措施

GIS 用电子式电流互感器由罗氏线圈传感单元、采集器以及合并单元 3 大模块构成。对于 GIS 用电子式电流互感器传感单元和采集部分通常集成安装于 GIS 壳体上, 与合并单元之间采用光纤连接。合并单元通常放置在室内, 只需满足现有的电磁兼容试验标准即可以确保不受现场电磁环境影响。所以, GIS 用电子式电流互感器的传感部分和采集部分都工作在恶劣的电磁环境中, 其运行环境的

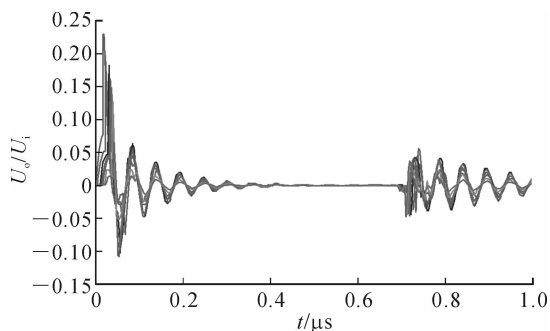


图 15 GIS 外壳上节点 1-6 TEV 波形

Fig. 15 TEV 1-6 waveform on GIS shell

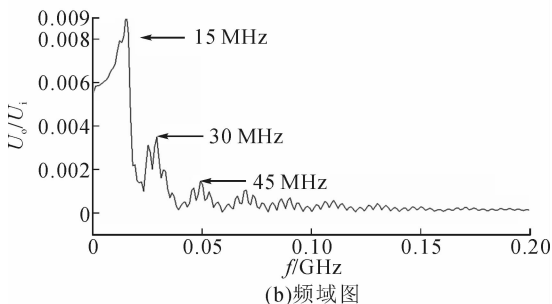
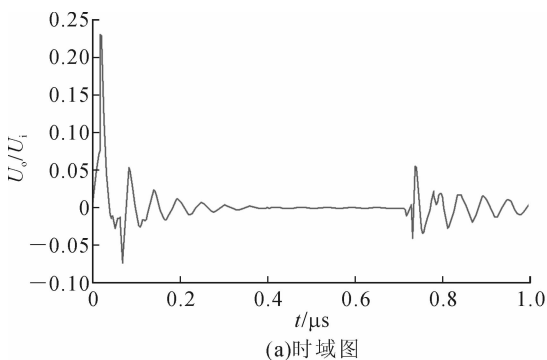


图 16 节点 1 套管处 TEV 波形

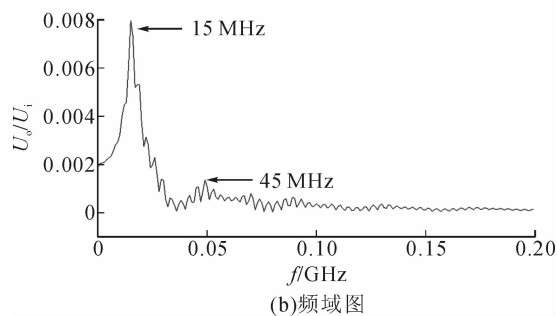
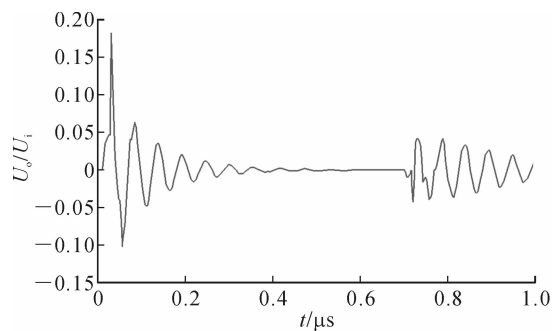
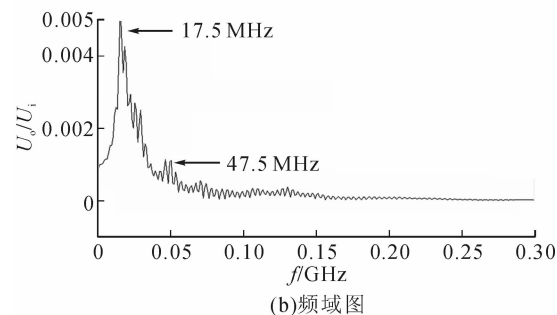
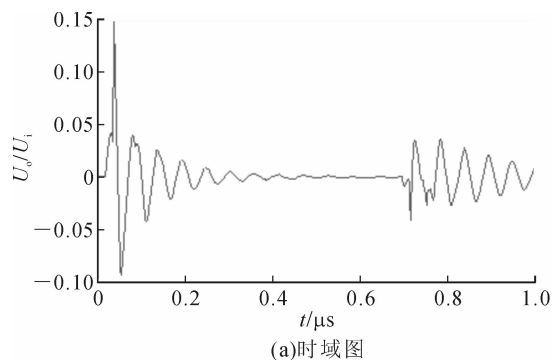
Fig. 16 TEV waveform of node 1 bushing

电磁干扰信号远远超过通过电磁兼容试验标准^[20],特别是在隔离开关操作过程中,GIS 内部产生的 VFTC、VFTO 和干扰电磁场对罗氏线圈传感器的干扰和外部产生的 TEV、TEM、EMI 和 FTO 对采集器电子电路的影响是电子式互感器设计时候应该重点考虑的问题。

4.1 GIS 整体设计部分

抑制 VFTO 大小是减小电子式互感器受干扰最主要的因素,通过仿真计算及文[17],分析了影响 GIS 各点 VFTO 幅值的主要因素为残余电荷电压、支撑绝缘子等值电容以及变压器入口等值电容对。除此之外,隔离开关的弧道电阻、GIS 母线各段长度以及其波阻抗等因素也都对 VFTO 有不同程度的影响。主要从以下几个方面进行考虑:

1) 提高隔离开关触头的分合速度,以便减小电弧重燃次数、缩短燃弧时间,从而减小 VFTO 出现的

图 17 节点 3 ECT₁ 处 TEV 波形Fig. 17 TEV waveform of node 3 ECT₁图 18 节点 5 ECT₂ 处 TEV 波形Fig. 18 TEV waveform of node 5 ECT₂

机率,降低 VFTO 幅值;

2) 采用优良的隔离开关,隔离开关加装合闸电阻,限制 VFTO 幅值;

3) 利用接地开关泄放母线残余电荷,从而减低 VFTO 幅值;

4) 采用氧化锌避雷器,避雷器的等效对地电容对高频信号有滤波作用,即使其来不及动作,也会

吸收一部分能量,对 VFTO 幅值有所限制。

VFTO 导致的壳体电位变化(TEV)会表现在采集器的电源线上,而且由此引起的干扰作用往往是破坏级的,这是由于电源线的远端是地电位或近地电位,当出现单位升高时,采集器外壳随 GIS 的外壳电位一起大幅度跳变,与电源线的正常地电位形成上万伏的瞬态电位差。通过仿真计算及文[21]降低 TEV 主要从以下几个方面进行考虑:

1)降低母线筒高度,增大母线筒直径,以减小 Z_0 和接地引下线长度;

2)沿母线长度方向增加接地引下线的数量(3 个左右较为合适);

3)采用扁而宽的接地线及与母线筒平行的金属板作接地线,降低接地线的电感;

4)各相外壳管道在进出线端部互联,可降低波阻抗,即可降低 TEV 值;

5)在母线外壳和地之间安装金属板或加装与母线筒垂直并相连的接地金属板,以屏蔽波的传播增加反射次数,可达到降低 TEV 的作用。

4.2 罗氏线圈传感器部分

通过仿真分析和文[22],罗氏线圈型电子式电流互感器的原理、结构及输出特性与传统的电磁式互感器有很大不同,快速暂态过程引起的过电压 VFTO、过电流 VFTC 和强电磁干扰等对互感器性能均会产生严重影响,为了提高测量精度和可靠性,主要从以下几个方面进行考虑:

1)提高电子式互感器绝缘和抗干扰能力,躲避 VFTO、VFTC 和电磁干扰 EMI 的影响;

2)给 ECT 设置独立的接地线,且应尽可能短而粗,这样可有效减小电位抬升;

3)提高罗氏线圈加工工艺,使线圈的匝数密度 n 和截面积 s 均匀;

4)在骨架中心绕制一圈与线圈走向相反的回线,可减小干扰磁场垂直分量的影响。

4.3 采集器电子电路部分

采集电路是电子式互感器的核心单元之一,有 VFTO 引起的各种干扰进入采集器轻则导致测量误差或者程序跑飞,重则是电子元器件永久性损坏,电磁干扰进入采集器有辐射和传导两种方式。为了提高采集器工作的可靠性,主要从以下几个方面进行考虑:

1)采集器的安装位置尽可能的低,降低隔离开关和采集箱体之间的寄生电容,可以减小壳体 TEV 对电源线的破坏性干扰;

2)信号端口采用无源低通滤波器,对共模干扰

和差模干扰进行抑制;

3)电源端口安装特殊的共、差模滤波器,主要防止 5~30 kV 量级的 TEV 引起电源侧的干扰;

4)软件上采用采样中位值滤波算法对快速秒冲群干扰进行了滤波处理,较好地对付偶然出现的脉冲性干扰进行抑制,消除了由于脉冲干扰所引起的采样值瞬时超大值导致保护误动;

5)产品结构和屏蔽方面采用双层全密封屏蔽采集箱将采集器、电源、接线端子等包围起来,防止他们受到外界电磁场的影响。

5 工程案例

对四川某工程 126 kV GIS 智能变电站集成式电子式 ECT 的设计上综合考虑了文中第 4 节介绍的措施,该站自 2013 年 10 月份建成投运以来运行安全可靠,见图 19、20。

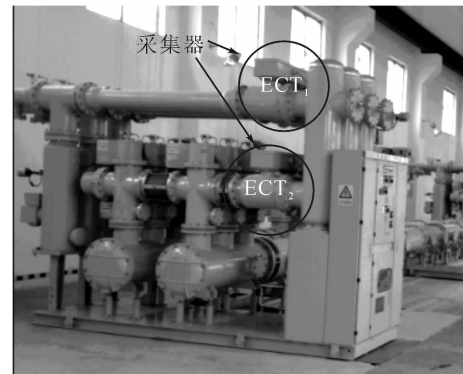


图 19 运行于四川某工程 126 kV 主变间隔智能化 GIS

Fig. 19 Run in a Sichuan 126 kV transformer bay intelligent GIS

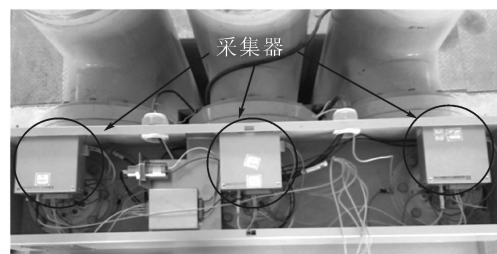


图 20 运行于四川某工程 126 kV 电子式电流互感器采集器

Fig. 20 Run in a Sichuan 126 kV ECT sampling unit

6 结语

文中首先对 GIS 集成电子式互感器现场实际应用中的电磁干扰问题及影响进行了分析,当隔离开关操作时会在 GIS 内部产生暂 VFTO、VFTC 及电磁场干扰, VFTO 反射、折射过程中会在 GIS 外部壳体上产生暂态的 TEV、TEM、EMI 和 FTO 干扰。而

内部暂态对电子式互感器传感器部分有严重干扰,外部暂态对电子式互感器采集器的干扰更为严重和苛刻。故而文中认为隔离开关的开合造成的VFTO是引起电子式互感器受干扰的唯一干扰源和根源。接着文中选取了四川某工程126 kV智能化GIS的典型结构为研究对象,建立了主变间隔GIS的EMTP仿真计算模型,研究了隔离开关操作产生的VFTO和VFTC特性,并且利用双指数波模拟单个VFTO脉冲波形,研究了TEV的特性,分析了典型因素对VFTO和TEV的影响。得出了GIS集成式电子式互感器的应用设计是个系统工程,GIS集成式电子式电流互感器的设计应用是个系统工程,除了要考虑电子式互感器自身的传感器部分和电子电路部分的干扰防护设计;还要考虑GIS的结构布局、母线、壳体尺寸和接地等因素对VFTO的抑制,同时对防干扰给出了设计建议。最后在四川某工程126 kV GIS智能变电站设计中充分考了文中分析的诸多因素,确保了该站的成功安全运行,文中所介绍的思想和方法为电子式电流互感器的设计推广应用有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 杨武志,潘济猛. 500 kV 电子式互感器工程应用研究[J]. 南方电网技术,2011,5(6):126-113.
YANG Wuzhi,PAN Jimeng. Research of 500 kV electronic instrument transformer in engineering application[J]. Southern Power System Technology,2011,5(6):126-113.
- [2] 高 鹏,马江泓,杨 妮,等. 电子式互感器技术及其发展现状[J]. 南方电网技术,2009,3(3):39-42.
GAO Peng,MA Jianghong,YANG Ni,et al. Electronic transducer technology and its current development[J]. Southern Power System Technology,2009,3(3):39-42.
- [3] POLYCARPOU A A,SOOM A,PETER J W,et al. Event-timing and shape analysis of vibration bursts from power-circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):848-857.
- [4] 翁韶芳,孙丹婷. 电子式电压互感器传感元件的分析及实验[J]. 南方电网技术,2008,2(5):55-58.
WENG Shaofang,SUN Danting. Analysis and experiment of the sensor in new electronic voltage transformers [J]. Southern Power System Technology,2008,2(5):55-58.
- [5] 罗苏南,田朝勃,赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):108-113.
LUO Sunan,TIAN Zhaobo,ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):108-113.
- [6] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [7] MEPELINK J,DIEDERICH K J,FESER K. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(1):223-228.
- [8] 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.
- [9] YAMAGATA Y,NAKADA Y,NOJIMA K. Very fast transients in 1 000 kV gas insulated switchgear[C]//IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans,LA:IEEE,1999:501-508.
- [10] BOERSMA R. Transient ground potential rises in gas insulated substations with respect to earthing systems[J]. Electra,1987,126(3):47-54.
- [11] 闫少俊. GIS 智能变电站电子式互感器技术[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
YAN Shaojun. The electronic transformer technology for GIS smart substation[M]. Beijing: China Power Press,2015.
- [12] 张桂红,郭 洁,徐燕飞. GIS 中的电磁暂态现象[J]. 高压电器,2006,42(5):349-351.
ZHANG Guihong,GUO Jie,XU Yanfei. Transient electromagnetic phenomena in GIS[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(5):349-351.
- [13] 林 莘,李 爽,徐建源. 特高压 GIS 壳体过电压特性[J]. 沈阳工业大学学报,2009,31(6):606-610.
LIN Xin,LI Shuang,XU Jianyuan. Enclosure over-voltage characteristics of UHV GIS[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2009,31(6):606-610.
- [14] AMIR 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:IEEE,1995:3-7.
- [15] 钟连宏,欧世尧,周红霞. GIS 中快速暂态过电压的分析及计算[J]. 高电压技术,2000,26(1):60-62.
ZHONG Lianhong,OU Shiyao,ZHOU Hongxia. Analysis and calculation of very fast transient overvoltage in GIS[J]. High Voltage Engineering,2000,26(1):60-62.
- [16] 吴文辉,曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
WU Wenhui,CAO Xianglin. Electromagnetic transient calculation for power system and EMTP application[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press,2012.
- [17] 田 婷. GIS 中快速暂态过电压和暂态壳体电压的研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
TIAN Ting.Study on very fast transient overvoltage and

(下转第 69 页)

- contaminated spacers in SF₆ gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3):1232-1238.
- [15] RAO M V G, KUMAR G V N, AMARNATH J, et al. Simulation of particle trajectories in a three phase common enclosure gas insulated busduct with monte carlo technique[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]: IEEE, 2008:594-597.
- [16] WATANABE K, YOSHIDA M, KON H, et al. Flash-over mechanism of SF₆-gas type termination for DC power cable[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3):849-856.
- [17] PILLAI A S, HACKAM R. Optimal electrode-solid insulator geometry with accumulated surface charges[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984(4):321-331.
- [18] 陈 济. 导电颗粒对绝缘子表面电场和电荷积聚影响的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2006.
CHEN Ji. Study on the influences of conducting particles on surface electric fields and surface charge accumulation of insulator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [19] MAZUREK B, CROSS J D, HEESWIJK R G, et al. The effect of a metallic particle near a spacer on flashover phenomena in SF₆[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(2):219-229.
- [20] 李岩松, 李世延, 仇仔来, 等. 绝缘子表面固定金属颗粒放电特性研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(15):33-36.
LI Yansong, LI Shiyan, QIU Zilai, et al. Study on discharge characteristics of fixed metal particles on GIS insulator surface[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(15):33-36.
- [21] QI B, LI CR, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3):792-800.
- [22] 汪 枫, 邱毓昌, 张乔根, 等. 气—固交界面绝缘子表面电荷的观测与分析[J]. 绝缘材料, 2002(4):37-40.
WANG Feng, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen, et al. Observation and analysis of surface charge accumulation at the gas-solid interface of insulator[J]. Insulating Materials, 2002(4):37-40.
- 马径坦(1993—), 男, 西安交通大学电气工程学院博士研究生在读, 主要从事高电压绝缘技术研究工作。
-
- (上接第 62 页)
- transient enclosure voltage in GIS [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [18] 张志远. GIS 开关操作对电子式互感器的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Zhiyuan. Research on the influence of GIS switching operation on electric transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] DICK E P, FUJIMOTO N. Transient ground potential rise in gas-insulated substations-problem identification and mitigation[J]. IEEE Transactions on PA& S, 1982, 101(10):3610-3615.
- [20] 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.
FENG Limin, WANG Xiaobo, JIANG Xin, et al. Research on the EMC modeling within the GIS in the EHV substations[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4):97-102.
- [21] 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, 2009, 26(6):43-45.
ZHONG Lianhong, HE Jingliang. The calculation and analysis of transient grounding potential rise in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2009, 26(6):43-45.
- [22] 徐 迪, 苏 光. GIS 中快速暂态过程对罗氏线圈型有源电子式互感器影响的分析[J]. 电力电气, 2011, 30(21):48-55.
XU Di, SU Guang. The analysis of the effect of the fast transient process in the GIS on the active electronic transformer of the Rogowski[J]. Electric Power, 2011, 30(21):48-55.
- 白世军(1981—), 男, 西安交通大学电气工程学院在职博士研究生, 获得中国机械工业科学技术奖二等奖 1 项、中国专利优秀奖 1 项、出版专著 1 部(副主编)。主要研究方向为智能变电站电磁兼容、电子式互感器及电力设备故障诊断与状态评估。
- 荣命哲(1963—), 男, 担任西安交通大学委员会委员, 常委, 副校长, 电气工程学院教授, 博士生导师。国家自然科学基金委创新群体带头人, 973 首席科学家, 国家杰出青年科学基金获得者, 教育部长江学者特聘教授, 国务院电气工程学科评议组成员。1984、1987、1990 年于西安交通大学电气工程学科分获工学学士、硕士和博士学位。主要围绕电力开关设备基础理论、优化设计和运行状态监测与寿命评估三个层次展开研究工作。