

10 kV 开关柜开断对二次智能设备的电磁干扰

黎鹏¹, 黄道春¹, 阮江军¹, 牛小波¹, 朱晨光²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072;
2. 平高集团有限公司, 河南省 平顶山市 467001)

Electromagnetic Interference on Secondary Smart Devices Caused by Breaking 10 kV Switch Cabinet

LI Peng¹, HUANG Daochun¹, RUAN Jiangjun¹, NIU Xiaobo¹, ZHU Chenguang²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;
2. Pinggao Group Co., Ltd, Pingdingshan 467001, Henan Province, China)

ABSTRACT: Along with uprating the voltage class of the switchgear the electromagnetic compatibility (EMC) between the high-voltage components and the low-voltage smart devices becomes increasingly prominent, and the breaking of the circuit breaker inside the medium-voltage switch cabinet is regarded as the source of the most severe electromagnetic interference, because it could lead to the failures in the secondary control devices, therefore it is significant to research the electromagnetic interference on secondary smart devices caused by breaking the switchgear. The oscillation mode of synthetic test circuit is used to perform breaking test of 10kV switch cabinet and the acquisition of the output current signal of CT and the input current signals of smart control devices and bay smart units are carried out simultaneously. The time-frequency analysis on the acquired signals is performed to obtain the frequency band and the energy distribution situation of the interference signals. Test results show that the breaking of the switchgear leads to the transient electromagnetic interferences on CT's secondary side, smart control devices and bay smart units; the interference frequency band during the breaking and arcing process is mainly within the range from 15.625 MHz to 62.5 MHz; the maximum amplitude of the interference is four times as large as its normal value.

KEY WORDS: switch cabinet; electromagnetic interference; synthetic test; wavelet analysis; characteristic energy; frequency distribution

摘要：随着开关柜电压等级的提高，高压部分与低压智能化设备的电磁兼容问题日益突出，断路器开断被认为是中压开关柜中最严重的电磁干扰来源，它可能会造成二次控制设备出现故障，研究开关柜开断对二次智能设备的电磁干扰问题

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAA19B05)。
Project Supported by Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2009BAA19B05)。

具有重要意义。利用振荡型合成试验回路对 10 kV 开关柜进行合成开断试验，同时采集了电流互感器输出电流信号，智能操控装置和间隔智能单元输入电流信号。对采集的波形数据进行时频特性分析，得到干扰信号的频带及能量分布情况。结果表明：开关柜开断对电流互感器二次侧、智能操控装置以及间隔智能单元均产生了瞬态电磁干扰，开断燃弧过程的干扰频带主要分布在 31.25~62.5 MHz；电弧过零阶段频带主要分布在 15.625~31.25 MHz；干扰幅值最大达到正常情况下的 4 倍。

关键词：开关柜；电磁干扰；合成试验；小波分析；特征能量；频带分布

DOI : 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.01.017

0 引言

随着智能电网的发展，设备的智能化已成为当今电网发展的主要方向，二次控制、保护设备的高度集成化，增加了二次智能设备对瞬态干扰的敏感性与脆弱性^[1]。开关柜作为配电系统中保护与控制的重要开关设备，其内部结构复杂，二次装置与高压断路器距离较近，较容易遭受高压开关操作引起的瞬态高频干扰^[2-3]，而且低压部分相互之间也会发生串扰，轻则影响显示等功能，严重时会使开关柜出现误动、拒动甚至毁坏。因此研究二次智能设备在开关柜开断时的电磁干扰情况具有实际意义。

国外对开关(隔离开关、断路器)操作产生的电磁干扰问题进行了较多研究^[4-10]，重点对高电压等级的空气绝缘变电站(air insulated substation, AIS)、气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)中开关操作产生的瞬态电场及磁场进行了测量和分析；测量发现，AIS、GIS 中隔离开关和断路器操作产生的瞬态电磁脉冲上升沿可达到 ns 级，空间最大电

场强度超过 10 kV/m , 最大磁场强度超过 200 A/m , 开关操作的主导频率在 $0.5\sim120 \text{ MHz}$, 其中断路器操作与隔离开关相比, 瞬态幅值小, 主导频率高。国内的研究起步较晚, 重点以 500 kV 变电站为主^[11-13], 文献[12]中测得的隔离开关操作最大场强约为 19 kV/m , 断路器操作时最大场强约为 15 kV/m 。

对于中压开关柜的电磁干扰问题, 国外研究重点集中在重燃方面, 而国内研究较少; 文献[14-15]对 20 kV 开关柜断路器重燃时在 CT 二次侧引起的高频电流进行了测量分析, 得到由重燃引起的高频电流频率为 $1\sim3 \text{ MHz}$; 文献[16]对 40 kV 开关柜断路器多次重击穿引起的电磁干扰信号进行了测量, 并对最后一次及倒数第 2 次重燃的波形进行了分析, 分析表明干扰电流的频带范围达到 200 MHz , 辐射电场的频带范围达到 750 MHz ; 虽然电弧重燃对二次侧的干扰较大, 但断路器在燃弧开断过程中也会对二次智能设备产生高频干扰; 目前针对开关柜开断的电磁干扰研究由于现场试验的严酷性, 并未对二次侧干扰电流进行直接测量, 结果并不能直观反映干扰强弱, 因此有必要对该情况下的电流干扰情况进行研究。

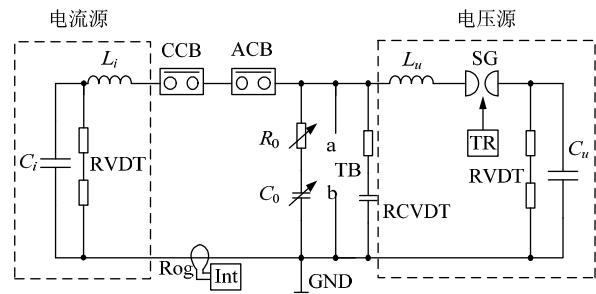
本文利用振荡型合成试验回路针对 10 kV 开关柜的电磁干扰问题进行不同条件下的合成开断试验, 采集开断过程中 CT 输出端、智能操控装置以及间隔智能单元输入的电流信号; 对采集的信号进行时频特性分析, 得到了干扰信号的频带及能量分布, 可为开关柜的抗电磁干扰性能改进提供参考。

1 试验设置与方法

1.1 试验布置

开关柜的合成开断试验布置如图 1 所示, 主要包括电流源及电压源, 两者分别用于产生大电流和高电压, 开关柜 TB 开断前, 投入电流源产生工频电流, 用于模拟开关柜开断前线路的实际电流; 开断过零前约 0.5 ms , 投入电压源产生瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)施加于断口两端, 模拟开关柜切断电流时线路产生的 TRV; 试验过程满足断路器合成试验等价性原则^[17]。

a、b 两端接开关柜 TB, 由于只能进行单相开断试验, 试验过程中将开关柜 C 相接入主回路, 图 2 为开关柜内部接线简图, CT 二次侧包括保护侧及测量端, 测量端与智能操控装置(监控开关柜内部环境情况, 如温度、湿度)相连形成测量电流回路, 保护侧与间隔智能单元(用于线路保护跳闸)相连形成

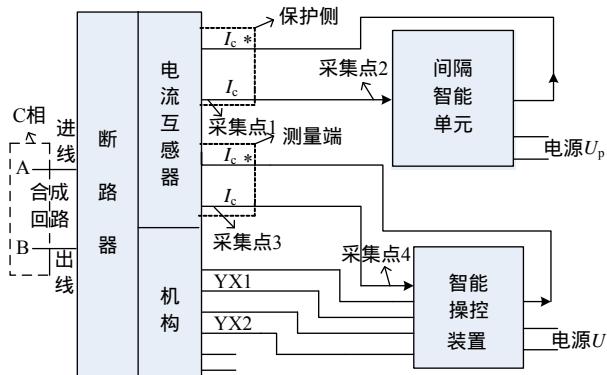


CCB—合闸断路器, 初始状态为分; ACB—辅助断路器, 初始状态为合; TB—开关柜, 初始状态为合; Rog—Rogowski 线圈, 测量主回路电流; R_0 —调频电阻; C_0 —调频电容(R_0 , C_0 共同调节 TRV 的幅值和频率); RCVDT—阻容分压器, 测量 TB 两端电压; SG—一点火球隙。

图 1 合成开断试验布置

Fig. 1 Experimental setup of synthetic breaking

保护电流回路, 两者是开关柜二次智能控制部分的核心部件, 利用分流器采集两者的输入电流以及 CT 的二次侧电流信号, 采集点 1~4 如图 2 所示。



I_c —CT 二次侧电流; YX1, YX2—开关柜断路器分合位辅助触点信号。

图 2 开关柜内部接线简图

Fig. 2 Internal wiring diagram of switch cabinet

分流器为无感电阻, 阻值约为 0.1Ω , 电感量为 nH 级, 将参数相近的分流器串入图 2 所示采集点, 由于阻值较小不会影响 CT 的正常工作; 利用带宽为 500 MHz 的 P6139B 探头采集分流器电压信号; 为减弱射频干扰信号和杂散寄生信号对测量回路的影响, 提高测量结果的准确性, 所有采集信号均经过光纤隔离采样系统进入 DPO4054 四通道 500 MHz 带宽数字示波器。

1.2 试验参数

开关柜中断路器为 ZN63A-12 型真空断路器, CT 变比为 $400:1$; 开关柜额定电压为 12 kV , 额定电流为 2 kA ; 由于本文试验主要研究开关柜开断时的电磁干扰情况, 并不需要考核断路器的开断能力, 因此只需模拟正常开断额定负荷电流即可; 试验设计的具体参数如表 1 所示。

1.3 试验方法与步骤

1) 环境噪声下的基础波形。

在不通电流的情况下, 合上 CCB、分断 ACB

表 1 试验回路参数
Tab. 1 Parameters of test circuit

电流源	电容 C_i/mF	电感 L_i/mH	充电电压 U_i/kV
	16.8	0.603	0.45
电压源	电容 C_u/uF	电感 L_u/mH	充电电压 U_u/kV
	6	17.437	6.2
调频回路	电阻 R_0/Ω	电容 C_0/uF	
	89	0.01	

及 TB, 采集 CT 保护侧及测量端的电流信号, 作为环境噪声下的基础波形, 排除开关触头机械碰撞以及环境噪声引起的干扰。

2) 开关柜正常工作状态下的波形采集。

为排除 ACB 的引入对试验结果的干扰, 对开关柜正常工作状态下的波形进行采集。开关柜的正常工作状态即投入电流源后, TB 保持闭合无任何动作, 但是为保护电流源电容器及相关设备, 需尽快将电流开断, 因此由 ACB 在第 1 个半波过零时分断电流; 在该条件下采集电流波形, 作为正常工作下的基础波形。

3) 开关柜开断状态下的波形采集。

为单独观察 TRV 对二次侧的电磁干扰情况, 开关柜开断实际线路电流的模拟(即开关柜开断状态下)分 2 种情况进行: 按设定的参数投入电流源(CCB 闭合, 分断 ACB 和 TB), 不加电压源进行开断试验, 加电压源进行开断试验。同时为将采集的波形与正常工作情况下进行对比, 需满足单一变量原则, 即开断情况下, 仍将 ACB 设定在电流的第 1 个半波动作, 时间提前开关柜 TB 0.5 ms(ACB 的刚分时间与正常工作情况一致), 两者共同分断电流。在该 2 种条件下进行重复试验, 采集电流信号, 作为开关柜开断情况下的试验波形。

上述信号均利用光纤隔离采集系统以及 DPO4054 四通道 500 MHz 带宽数字示波器采集, 示波器设置为高分辨率模式, 以最大存储深度(数据量为 10^6)采集点数并保存, 采样频率为 500 MHz。利用 Matlab 对数据进行处理, 电流信号的测量结果均换算到 100 mΩ 分流器下的结果。

2 试验结果

2.1 主回路试验参数

根据表 1 中设定的参数, 利用罗氏线圈及阻容分压器对主回路的电流及 TRV 进行测量。主回路电流峰值为 2.1 kA; 瞬态恢复电压 TRV 峰值为 9.517 kV, 恢复电压上升率为 0.24 kV/μs。

2.2 不同状态下的信号波形

未通电流时测得的信号波形如图 3 所示, 由图

可知, 未通电的情况下, 采集到的波形均在零时刻附近有较大幅值; 后经多次试验发现, 当 CCB 合闸时, 均会采集到类似波形(图 4—6 所示), 分析发现这主要由于 CCB 合闸时, 触头接触及抖动产生的噪声干扰经测量设备耦合至示波器, 该干扰信号试验中无法消除, 分析时可不予考虑。

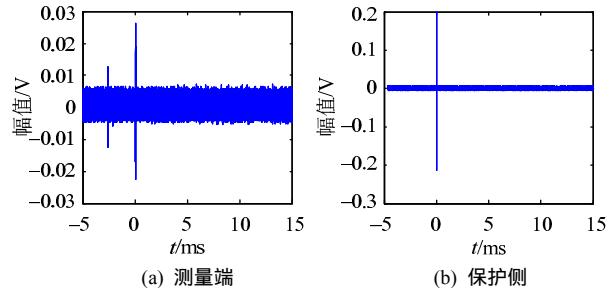


图 3 电流互感器测量端、保护侧输出信号
Fig. 3 Output signals of CT measuring and protection terminal

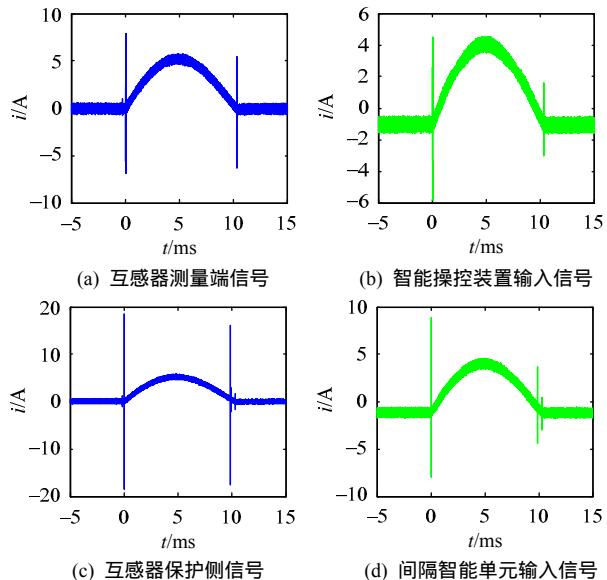


图 4 正常工作情况下的信号波形
Fig. 4 Waveforms of normal working condition

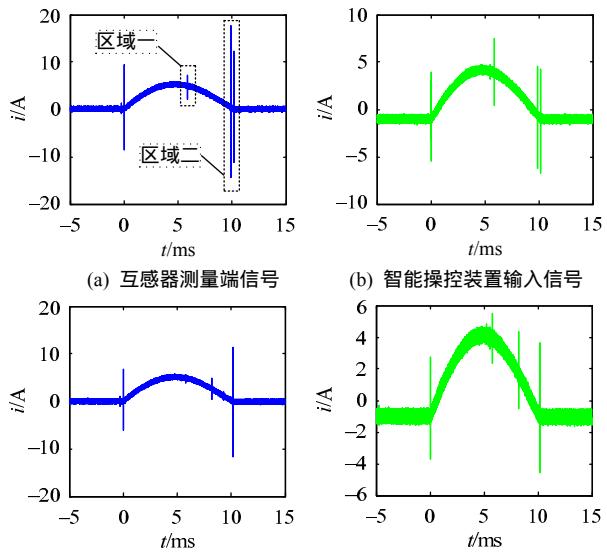


图 5 开断未施加电压源情况下的信号波形
Fig. 5 Waveforms of breaking without voltage source

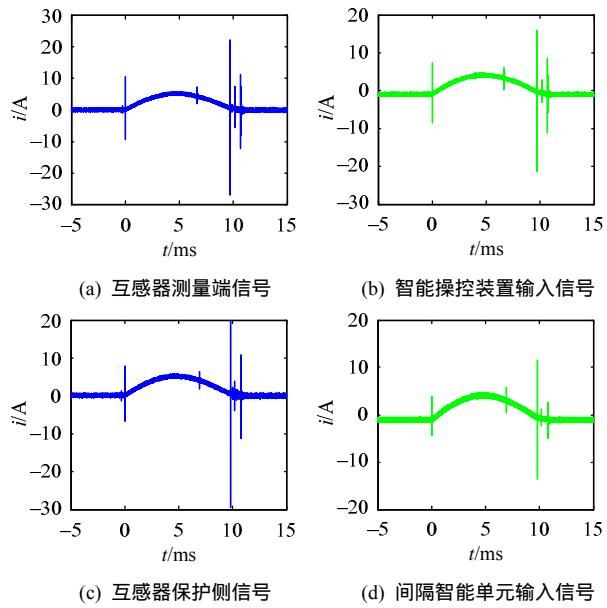


图 6 开断施加电压源情况下的信号波形

Fig. 6 Waveforms of breaking with voltage source

3 信号波形的频谱分析

3.1 小波分析

针对快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)只适用于分析平稳信号,无法同时进行时频分析、对奇异性不敏感等缺点,本文采用小波变换对信号进行分析,该方法是一种窗口(面积)大小固定但时间窗和频率窗都可以改变的时频局域化分析方法,即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率^[18],因此其可以较好地弥补FFT的不足,用于本文正常信号中的局部瞬态突变信号的检测分析。

在小波分析中,小波基的选择至关重要;本文所分析信号为瞬变脉冲信号,选择的小波基应对瞬变信号具有良好的敏感性,即具有较好的局部化能力,因此小波基应具有紧支性、正则性和足够高的消失矩,同时为减少滤波器产生的频率混叠,小波基还应具有正交性。Daubechies 系列小波已被证明具有正交性好、紧支、任意阶消失矩、对不规则信号敏感等特点^[18-19],可以较好地适用本文平稳中突变信号的分析检测,综合考虑小波基 db2~db10 的特点,通过实际效果分析,采用 db5 小波分析本文的测量信号。具体步骤如下:

将原始信号离散化后得到采样序列,若原始信号记为 A,则信号的小波分解可表示为

$$A = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + \dots \quad (1)$$

式中:A_j为低频部分信号;D_j为高频部分的信号。

第 n 层细节系数对应的频段范围为

$$(500 / 2^{n+1}, 500 / 2^n) \quad (2)$$

第 n 层逼近系数对应的频段范围为

$$(0, 500 / 2^{n+1}) \quad (3)$$

定义高频重构序列和最后一层低频重构序列的能量表达式如下:

$$P_j = \sum_{k=1}^n |d_j^k|^2, P_0 = \sum_{k=1}^n |a_0^k|^2 \quad (4)$$

式中:d_j^k为第 j 层高频小波重构序列的第 k 个分量,j 为分解层数;a₀^k为小波分解后最后一层低频小波重构序列的第 k 个分量。

将上述各层小波分解系数序列的能量进行归一化处理,构成特征能量向量,用特征能量来反映不同频带信号占总能量的百分比^[20]。

$$\mathbf{p} = [E_0, E_1, E_2 \dots E_j] \quad (5)$$

3.2 开关柜开断对互感器测量端电流的影响

CT 测量端输出电流的时域波形如图 4(a)、5(a)、6(a)所示,波形中区域一(断路器开断燃弧过程)及区域二(电弧过零阶段)产生了高频突变信号,因此重点对该 2 部分进行分析。从图 4(a)、4(c)可以看出,正常工作情况下 ACB 动作时,区域一无明显干扰成分,说明 ACB 开断燃弧过程对开关柜 CT 二次侧电流影响不大,这主要与 ACB 距 CT 距离较远有关,因此增加二次设备与断路器断口的距离可以减小高频干扰;而开关柜开断情况下,图 5(a)、6(a)中区域一出现了明显尖峰突变信号,说明开断燃弧过程的干扰是由开关柜造成的。电弧过零阶段,图 4(a)、5(a)、6(a)均出现了较大干扰突变信号,图 5(a)较图 4(a)严重,说明 ACB 开断电弧过零阶段对开关柜二次设备产生了高频干扰,当 ACB 与开关柜一起开断电流时,干扰情况有所增加;而图 6(a)中高频干扰较图 5(a)严重,说明 TRV 的投入使高频干扰信号明显增加,这与实际情况是一致的。

1) 开断燃弧阶段电磁干扰分析。

为确定图 4(a)和 5(a)中高频干扰信号的频带分布,首先对区域一的波形进行小波降噪,然后采用小波函数 db5 进行 5 层小波分解,并计算重构序列的特征能量和变化系数,结果如表 2 所示。可以看出,d3 所在的频段特征能量变化最大,为 19.35,这与小波重构后细节信号 d3 的模值最大相对应,说明开关柜开断电弧过程引起的干扰频带主要为 31.25~62.5 MHz;d4、d5 的特征能量有少许增大,说明开断过程这部分频段增加不大;d1、d2 虽然也有所增加,但它们的增加主要由环境干扰的随机性造成。

表 2 区域一波动特征能量及变化系数

Tab. 2 Characteristic energy and coefficients of variation for waveform of area			
状态	正常工作 E_1	开断(未加电压源) E_2	变化系数 E_2/E_1
a5	0.999 994 58	0.999 990 896	1.00
d5	4.76×10^{-6}	6.51×10^{-6}	1.37
d4	5.56×10^{-7}	9.35×10^{-7}	1.68
d3	8.37×10^{-8}	1.62×10^{-6}	19.35
d2	1.56×10^{-8}	2.71×10^{-8}	1.74
d1	6.73×10^{-9}	7.01×10^{-9}	1.04

2) 电弧过零阶段电磁干扰分析。

采用小波函数 db5 对区域二进行 6 层小波分解，并计算特征能量，结果如表 3 所示。正常工作与开断未加电压源情况下，d4 的特征能量最大，说明电弧过零造成的高频干扰主要分布在细节系数 d4 所在频段 15.625~31.25 MHz，频段 31.25~62.5 MHz 也有较大分布；这与区域一的结果有较大区别，主要跟电弧过零时的复杂变化有关。电弧过零时虽然电流峰值接近为零，但弧隙间仍有大量的电子及离子形成的弧后电流，且断口弧压发生突变，使瞬态干扰频段分布较广；加上电压源后，细节信号 d1、d5 所在频段能量明显增大，说明 TRV 造成的干扰主要分布在频带：125~250 MHz、7.8125~15.625 MHz；这也反映了 TRV 造成的高频干扰较为严重，所以实际线路需对 TRV 采取限制措施。

表 3 区域二波动特征能量及变化系数

Tab. 3 Characteristic energy and coefficients of variation for waveform of area					
状态	正常工作 E_1	开断		E_2/E_1	E_3/E_2
		(未加电压源) E_2	(加电压源) E_3		
a6	0.997 877 62	0.976 630 77	0.894 584 46	0.978 7	0.92
d6	1.17×10^{-4}	2.92×10^{-4}	1.59×10^{-3}	2.496	5.45
d5	5.32×10^{-5}	1.44×10^{-4}	2.84×10^{-2}	2.707	197.22
d4	1.55×10^{-3}	1.73×10^{-2}	6.26×10^{-2}	11.161	3.62
d3	3.85×10^{-4}	5.44×10^{-3}	1.24×10^{-2}	14.130	2.28
d2	1.56×10^{-5}	1.44×10^{-4}	4.33×10^{-4}	9.231	3.01
d1	1.14×10^{-7}	7.91×10^{-8}	2.06×10^{-5}	0.694	260.43

3.3 开关柜开断对互感器保护端电流的影响

CT 二次侧分测量端与保护端，两者线圈结构与功能均有所差别，保护侧量程较大，其输出电流进入间隔智能单元；有必要对保护侧的干扰情况进行分析，分析方式与前述一致。

对 CT 保护侧信号进行小波分解，并计算特征能量和变化系数，发现开关柜开断燃弧过程对 CT 保护侧造成的干扰与测量端相同，信号频带主要分布在 31.25~62.5 MHz；开关柜开断电弧过零阶段造成的高频干扰主要分布在频段 15.625~31.25 MHz；TRV 造成的频带分布主要集中在 125~250、7.8125~15.625 MHz，这与测量端的结论相一致。说明 CT

未饱和时，开关柜开断对 CT 测量端与保护侧的干扰情况相同。

3.4 开关柜开断对智能操控装置输入电流的影响

CT 测量端输出电流经导线由电缆室输入仪表室智能操控装置，电流在电缆的传输过程中，可能会遭受由开关柜开断电弧引起的辐射干扰以及导线之间的串扰；为验证这一情况，对智能操控装置的输入电流进行分析。其输入电流时域波形如图 4(b)、5(b)、6(b) 所示，对波形中区域一、区域二的信号进行 FFT，并计算其功率谱，发现在开关柜不同工作状态下，智能操控装置的输入电流较 CT 测量端输出电流高频干扰明显减少，频率改变成分均集中在 100 MHz 以下，说明开关柜开断燃弧过程以及电弧过零阶段对电缆的辐射干扰以及导线间的串扰可以忽略不计；同时，由于在传导过程中，线路电感效应对高频信号具有衰减作用^[16]，输入智能操控装置的高频成分大幅度减小，对波形有改善作用。

为进一步确定 TRV 加入后，对智能操控装置的辐射干扰情况，对图 6(a)、6(b) 区域二波形采用小波函数 db5 进行 6 层小波分解，并计算特征能量和变化系数，结果如表 4 所示。表中高频变化系数均远小于 1，说明智能操控装置输入电流波形的高频成分较 CT 测量端输出电流波形有较大减少，也进一步说明 TRV 对智能操控装置的辐射干扰不大；这反映了二次仪表室良好的屏蔽效果以及导线布置的合理性，说明高频干扰主要为经 CT 的传导耦合干扰。

表 4 特征能量及变化系数对比结果

Tab. 4 Characteristic energy and coefficients of variation

状态	特征能量 E_1	特征能量 E_2	变化系数 E_2/E_1
a5	0.894 584 46	0.984 971 64	1.101 0
d6	1.59×10^{-3}	3.21×10^{-4}	0.201 9
d5	2.84×10^{-2}	1.90×10^{-3}	0.066 9
d4	6.26×10^{-2}	1.17×10^{-2}	0.186 9
d3	1.24×10^{-2}	1.04×10^{-3}	0.083 9
d2	4.33×10^{-4}	2.46×10^{-5}	0.056 8
d1	2.06×10^{-5}	3.95×10^{-6}	0.191 7

3.5 断路器开断对间隔智能单元输入电流的影响

采用相同的方法对间隔智能单元的输入波形进行了分析，得到与智能操控装置相似的结果，说明开关柜开断过程以及 TRV 产生的高频干扰对保护侧电流传导过程中的影响很小，可以忽略不计；同时电缆的电感效应对高频成分有一定的衰减作用。进一步说明了增加断路器断口与二次智能设备间的距离可以减弱高频干扰。

4 干扰机理及电磁干扰抑制措施

4.1 干扰机理分析

开关柜开断燃弧过程可通过图7说明，当断路器触头分开时，触头之间会产生电弧，当断路器触头两端电压低于介质击穿电压时，电弧熄灭，电流被切断，即只发生单次燃弧现象；而当断路器触头两端电压高于介质击穿电压时，触头间产生电弧（即重燃一次），使电路重新导通，电容C放电形成高频电流，当电流过零时电弧熄灭，断路器断口又出现过电压，上述过程重复发生便会出现多次重燃的现象。文献[14-16]对开关柜开断的多次重燃现象进行了分析，重燃过程高频电流幅值较大，主频较低，大约为几kHz~几MHz；单次燃弧与多次重燃相比，干扰电流脉冲频率较高，达到几十MHz~上百MHz，但其幅值较小，持续时间较短，主要集中在电流过零点附近。

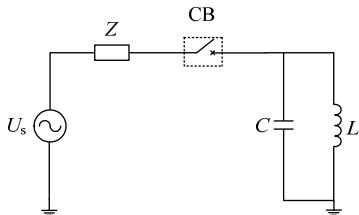


图7 开断燃弧等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit diagram of breaking arc

虽然单次燃弧与多次重燃相比引起的干扰幅值较小，但其频率很高，很可能在感性负载上产生较高的过电压，因此开关柜开断单次燃弧引起的干扰情况不应忽视。由上述分析可知，开关柜开断过程对二次智能设备的电磁干扰以传导干扰为主，因此重点对传导干扰机理进行分析。

图8为高频干扰经CT传入二次回路的等效电路^[21]，图中： C_i 、 L_i 为电流源电容和电感； C_1 、 C_2 为对地杂散电容； Z_1 为电流源回路阻抗； C_T 为互感器套管电容； C_{IN} 、 C_{2N} 分别为互感器一次侧、二次侧与法拉第屏蔽层之间的寄生电容； Z_2 、 Z_L 、 Z_D 分别为二次回路电缆波阻抗、负载阻抗以及接地阻抗。据图计算得到的二次回路干扰电流为

$$i_1 = \frac{Z_s}{Z_s + Z_r} \cdot \frac{Z_D}{Z_D + 1/j\omega C_{2N} + Z_2 + Z_L} \cdot i \quad (6)$$

$$Z_r = \frac{1}{j\omega C_{IN} + j\omega C_T} + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_{2N}} + Z_2 + Z_L\right) \cdot Z_D}{\frac{1}{j\omega C_{2N}} + Z_2 + Z_L + Z_D} \quad (7)$$

$$Z_s = \frac{Z_1}{1 + j\omega C_2 Z_1} \quad (8)$$

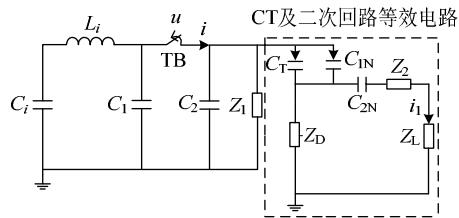


图8 高频传导干扰等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit diagram of high frequency conducted interference

稳态时， i 为电流源主回路电流，无明显波动，基本不会产生高频传导干扰；而当断路器开断燃弧时，由于电弧的燃烧，会产生高频干扰电流信号，该电流可由断路器TB的弧压及其断口等效电容 C_u 确定，即：

$$i = C_u \frac{du}{dt} \quad (9)$$

二次回路干扰电流 i_1 与断路器断口的弧压直接相关，为观测燃弧期间断口弧压的变化，对弧压波形进行了测量，波形如图9所示。可以看出，燃弧期间弧压基本稳定，无较大波动，而在起弧时刻和电流零点附近，弧压出现明显波动，特别是零点附近，幅值大幅升高，出现多次瞬变过程，该暂态过程势必会产生电磁干扰，经CT耦合在二次回路产生高频干扰电流，这与试验测量得到的CT二次回路高频信号出现位置一致，说明断路器断口弧压的瞬态变化过程是电流过零时产生较大干扰的根本原因；而断路器在开断过零时TRV比较高，因此需采取相应措施进行抑制，以降低高频干扰。同时观察时域波形可以发现，在断路器燃弧过程，干扰信号(区域一)出现的位置有些许改变，这主要与断路器固有分闸时间的分散性有关。该断路器为纵磁真空灭弧方式，但操作机构为弹簧机构，从而造成刚分时间分散性较大，使得干扰信号出现的位置发生改变所致。

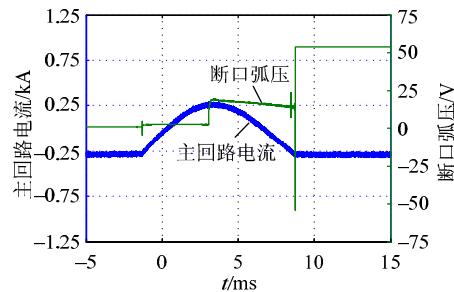


图9 断口弧压波形

Fig. 9 The arc voltage waveform of breaker

4.2 电磁干扰抑制措施

由时域波形可知，在电弧零点附近，特别是引入TRV后，由开关柜开断而引起的高频瞬态干扰

电流的最大幅值接近正常工作电流峰值的 4 倍，虽然该过程时间很短，但长期下去产生的过电压会对二次控制保护设备造成破坏，因此有必要采取措施对该高频干扰进行抑制；为对开关柜开断电流(负荷或故障)引起的瞬态高频干扰有所抑制，可从硬件系统和外部环境着手抑制高频干扰^[22]。

1) 屏蔽。进一步优化开关柜外壳体的屏蔽措施，减弱空间辐射干扰。此外，为最大程度上减小芯线共模干扰电压和差模干扰电压的幅值，屏蔽电缆的屏蔽层可选择双端接地方式^[3,23]。

2) 滤波。主要包括铁磁体磁环，低通滤波器和去耦电路^[22]。对于传导干扰，可在二次智能设备的入口处设置去耦电容，抑制高频干扰，也可在二次回路串入铁氧体磁环。针对控制器内部的串扰，在控制器硬件上可以采用隔离变压器、浪涌吸收器等抑制措施，软件方面可采用软件滤波，如设置滤波算法、看门狗电路等^[11,24]。

3) 对消法。是一种抑制电磁干扰的补偿方法，通过检测主回路(母线)上的干扰电流信号，经过变换处理后，将和干扰信号幅值相等、相位相反的对消信号注入 CT 的二次回路，抵消通过互感器耦合至二次回路上的干扰信号^[25]。

4) 增设过电压抑制装置。由以上分析可知，引入 TRV 后，二次侧干扰信号明显增大，因此实际运行中，需采取合适的措施对断路器断口的 TRV 进行抑制，如装设避雷器^[26]、断口加装并联电阻等，这不仅能抑制高频干扰，还能防止断口重燃，避免引起更大的高频干扰。

5 结论

1) 开关柜开断燃弧过程及电弧过零阶段均对互感器输出电流产生了较大电磁干扰，干扰电流幅值的最大值接近正常情况下的 4 倍。

2) 断路器在刚分时刻和电弧过零阶段，由于断口弧压的瞬态变化，对 CT 保护侧及测量端输出电流均产生了较为明显的干扰脉冲，在 CT 铁芯未饱和时，两者的干扰情况是相同的。刚分时刻干扰频带分布主要在 31.25~62.5 MHz，过零阶段频带主要分布在 15.625~31.25 MHz。

3) TRV 对互感器测量端、保护端电流产生了较大影响，干扰电流幅值明显增大，高频成分 125~250 MHz 增多，频带 7.8125~15.625 MHz 的增加也较为明显，说明瞬态过电压对二次智能设备的影响较大，实际运行中需对断口过电压采取抑制措施。

4) KYN28A-12 型开关柜控制室的总体屏蔽效

果较好，其开断过程对智能操控装置和间隔智能单元产生的高频干扰主要为经 CT 的传导耦合，主回路的辐射干扰对其影响较小。

5) 智能操控装置和间隔智能单元的输入电流较 CT 的输出电流高频干扰成分均有所减小，这主要是由于传输电缆的电感效应，使得高频信号在传播过程中有所衰减所致，也与电缆的合理布局有关。

6) 针对开关柜开断引起的高频电磁干扰，可采取滤波、屏蔽、对消法等措施进行抑制，抑制效果还需进一步验证。同时，针对不同类型故障条件下开关柜开断的电磁干扰特性，以及电弧等离子本身的电磁干扰机理还需进一步研究分析。

参考文献

- [1] 韩筛根，张重乐，邓宏芬，等. 陡降大电流形成的高梯度强磁场对智能配电设备的电磁干扰分析[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 21-25. Han Shaigen , Zhang Chongle , Deng Hongfen , et al . Analysis on electromagnetic interferences of high-gradient strong magnetic field due to steeply dropping high current in intelligent power distribution equipments[J] . Power System Technology , 2010 , 34(9) : 21-25(in Chinese) .
- [2] 杨吟梅. 变电站电磁兼容问题：二[J]. 电网技术, 1997 , 21(3) : 72-75 . Yang Yinmei . The electromagnetic compatibility problems in substations : part two[J] . Power System Technology , 1997 , 21(3) : 72-75(in Chinese) .
- [3] 刘帆,陈柏超,卞利钢.变电站二次电缆屏蔽层接地方式探讨[J].电网技术, 2003 , 27(2) : 63-67 . Liu Fan , Chen Baichao , Bian Ligang . Discussion on shielded grounding mode of cables in secondary circuits of substations[J] . Power System Technology , 2003 , 27(2) : 63-67(in Chinese) .
- [4] Fujimoto N ,Boggs S A .Characteristics of GIS disconnector- induced short risetime transients incident on externally connected power system components[J] .IEEE Trans on Power Delivery ,1988 ,3(3) : 961-970 .
- [5] Meppelink J , Diederich K , Feser K , et al . Very fast transients in GIS[J] . IEEE Trans on Power Delivery , 1989 , 4(1) : 223-233 .
- [6] Wiggins C M , Wright S E . Switching transient fields in substations[J] .IEEE Trans on Power Delivery ,1991 ,6(2) :591-600 .
- [7] Wiggins C M , Thomas D E , Nickel F S . Transient electromagnetic interference in substations[J] .IEEE Trans on Power Delivery ,1994 , 9(4) : 1869-1880 .
- [8] ARI N ,Blumer W . Transient electromagnetic fields due to switching operations in electric power system[J] . IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility , 1987 , 29(3) : 233-237 .
- [9] Daily W K , Dawalibi F . Measurement and computations of electromagnetic fields in electric power substations[J] .IEEE Trans on Power Delivery , 1994 , 9(1) : 324-332 .
- [10] Rashkes V S ,Ailes L D .Very high frequency overvoltages at air EHV substations during disconnect switch operations[J] . IEEE Trans on Power Delivery , 1996 , 11(3) : 1618-1623 .
- [11] 李清泉,李彦明,牛亚民.变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J].高电压技术, 2001 , 27(4) : 35-37 . Li Qingquan , Li Yanming , Niu Yamin . Transient electromagnetic field caused by the switching operation in substation and its

- protection[J]. High Voltage Engineering , 2001 , 27(4) : 35-37(in Chinese) .
- [12] 卢斌先 , 王泽忠 , 李成榕 , 等 . 500 kV 变电站开关操作瞬态电场测量与研究[J]. 中国电机工程学报 , 2004 , 24(4) : 133-138 .
Lu Binxian , Wang Zezhong , Li Chengrong , et al . Transient electric field measurement and research of 500 kV substation's switching operation[J]. Proceedings of The CSEE , 2004 , 24(4) : 133-138(in Chinese) .
- [13] 候俊 , 王建国 , 饶章权 , 等 . 500 kV 隔离开关操作时电流互感器二次侧干扰信号的测试与分析[J]. 电测与仪表 , 2005 , 42(6) : 41-43 .
Hou Jun , Wang Jianguo , Rao Zhangquan , et al . Testing and analysis of interference signal of current transformer's secondary side when the disconnector switch of 500 kV is operating[J]. Electrical Measurement and Instrumentation , 2005 , 42(6) : 41-43(in Chinese) .
- [14] Heydari H , Abbasi V , Faghihi F . Impact of switching-induced electromagnetic interference on low-voltage cables in substations[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility , 2009 , 51(4) : 937-944 .
- [15] Hardt N , Koenig D . Overvoltages in secondary circuits of medium-voltage switchgear generated by multiple reignitions of circuit breakers[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility , 1999 , 41(4) : 510-515 .
- [16] Burger D , Tenbohlen S , Köhler W . Impact of multiple restrikes at vacuum circuit breakers on the EMC of medium voltage switchgear[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility , Roma , Italy , 2012 .
- [17] GB/T 4473—2008 高压交流断路器的合成试验[S]. 北京 : 中国标准出版社 , 2008 .
- [18] 孙鹏 , 郑志成 , 高翔 . 基于小波分析的故障电弧检测方法[J]. 高压电器 , 2012 , 48(1) : 25-34 .
Sun Peng , Zheng Zhicheng , Gao Xiang . Arc fault detection method based on wavelet analysis[J]. High Voltage Apparatus , 2012 , 48(1) : 25-34(in Chinese) .
- [19] 杨淑英 , 王丽宏 , 杜荣花 , 等 . 电力系统暂态保护中小波基的选择与应用[J]. 电力系统及其自动化学报 . 2008 , 20(5) : 106-111 .
Yang Shuying , Wang Lihong , Du Ronghua , et al . Selection and application of mother wavelet in the electric power system transient protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA , 2008 , 20(5) : 106-111(in Chinese) .
- [20] 孙鹏 , 董荣刚 , 郑志成 . 基于小波分析信号特征频段能量变比的故障电弧诊断技术研究[J]. 高压电器 , 2010 , 46(7) : 46-56 .
Sun Peng , Dong Ronggang , Zheng Zhicheng . Technology research of arc fault diagnosis based on wavelet analysis of signal characteristics frequency band energy ratio[J]. High Voltage Apparatus , 2010 , 46(7) : 46-56(in Chinese) .
- [21] 陈磊 . 变电站开关操作暂态电磁干扰的计算与分析[D]. 济南 : 山东大学 , 2007 .
- [22] 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) .
- [23] 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) .
- [24] 杨吟梅 . 变电站内电磁兼容问题(四) : 抑制电磁干扰的措施[J]. 电网技术 , 1997 , 21(5) : 67-74 .
Yang Yinmei . Electromagnetic compatibility in substations() : measures for electromagnetic interference rejection[J]. Power System Technology , 1997 , 21(5) : 67-74(in Chinese) .
- [25] 赵治华 , 张向明 , 李建轩 , 等 . 互感耦合电磁干扰的对消方法[J]. 电工技术学报 , 2010 , 25(1) : 19-23 .
Zhao Zhihua , Zhang Xiangming , Li Jianxuan , et al . Cancellation method to control mutual-inductance coupling EMF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society , 2010 , 25(1) : 19-23(in Chinese) .
- [26] 舒胜文 , 阮江军 , 黄道春 , 等 . 三断口真空断路器的动态均压措施[J]. 电网技术 , 2010 , 34(10) : 43-48 .
Shu Shengwen , Ruan Jiangjun , Huang Daochun , et al . Dynamic voltage-sharing measures for vacuum circuit breakers with triple breaks[J]. Power System Technology , 2010 , 34(10) : 43-48(in Chinese) .



收稿日期 : 2014-06-10。

作者简介 :

黎鹏(1989) , 男 , 博士研究生 , 研究方向为输变电设备外绝缘、高压试验技术 , E-mail : lipeng19891102@126.com ;

黄道春(1976) , 男 , 博士 , 副教授 , 研究方向为输变电设备外绝缘、高压电器、电磁场数值计算及其工程应用 , E-mail : huangdc99@163.com ;

阮江军(1968) , 男 , 博士 , 教授 , 主要从事电磁多物理场分析、高电压与绝缘技术等方面的研究工作。

(责任编辑 马晓华)