

高压直流电流互感器阶跃响应试验技术研究

童悦, 邓小聘, 刘翔

(中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 由于高压直流电流互感器的暂态特性试验缺少相应检测设备, 导致该试验无法正常开展。设计了一种阶跃响应试验电源, 利用IGBT开关的高速切断能力, 通过支路切换方式, 模拟试验所需的阶跃方波电流。对电源系统进行关键参数设计和仿真, 依据仿真结果对试验电路进行了改进, 进一步提高电路的安全性和稳定性。以阶跃响应试验电源、标准互感器和被测试互感器为主搭建了试验平台。试验结果表明, 整个测试系统能够满足直流互感器暂态试验所需的试验条件。

关键词: 电流互感器; 暂态特性试验; 阶跃测试电流; 试验电源设计

Research of step response test method for HVDC current transformer

TONG Yue, DENG Xiaopin, LIU Xiang

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Because the transient characteristic test of HVDC current transformer lacks corresponding detection equipment, the test can not be carried out normally. A step response test power supply is designed. The step square wave current required for the test is simulated by using the high-speed cut-off ability of IGBT switch and branch switching mode. The key parameters of the power system are designed and simulated. According to the simulation results, the test circuit is improved to further improve the security and stability of the circuit. Step response test power supply, standard transformer and tested transformer are used as the main test platform. The test results show that the whole test system can meet the test conditions for transient test of DC transformer.

Key words: current transformer; transient characteristic test; step test current; design of test power supply

0 引言

直流输电系统发生故障时的回路阻抗非常小, 容易瞬时产生很大的故障电流, 要求控制

中国电科院创新基金 (SZ83-19-007 保护级电子式电流互感器暂态特性试验方法及装置); 湖北自然科学基金 (2018CFB189)

保护信号具有更快的采样速度和更宽的频带宽度, 这对直流互感器的暂态特性, 主要是阶跃响应能力提出了较高的要求^[1-4]。从国内直流互感器实际运行结果来看, 由于直流互感器暂态特性一直都没有得到有效的检测, 各种直流互感器设备均存在一定程度的隐患。在相关的

国家标准中^[5-7]，对直流互感器的阶跃响应试验进行了规定。其中国家标准GB/T 26216.1—2010《高压直流输电系统直流电流测量装置第1部分：电子式直流电流测量装置》明确规定电子式直流电流测量装置的阶跃响应上升时间应小于400 μs。柔性直流输电系统中的直流互感器暂态性能要求更高，阶跃响应上升时间应小于120 μs。作为直流互感器的电流阶跃响应检测系统，电流发生装置的电流阶跃上升时间比标准要求还应再小一个数量级，才能确保测量的准确性，即方波电流发生装置输出电流阶跃响应上升时间应达到10 μs量级，并且脉宽需大于5 ms，输出电流峰值要求达到3 000 A，但是目前缺少相应试验设备，导致直流互感器的暂态特性试验无法正常开展。

1 直流互感器阶跃响应试验方法研究

直流互感器暂态试验的方案如图1所示。由阶跃响应试验电源产生电流，通过导线将被测试的互感器和标准互感器串接在同一回路中，两个互感器都通过二次转化变成小信号，再对这两路小信号进行采样录波和分析计算，对比两者的差别来评价被测试的互感器的性能。这里的标准互感器在试验前必须进行标定，且应该在阶跃或雷电波信号下进行，以保证其测量动态性能。

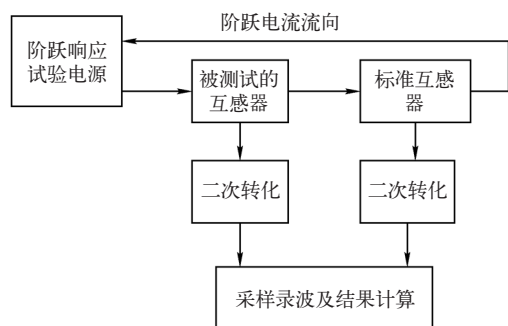


图1 直流电流互感器阶跃响应试验原理

Fig. 1 Working principle of step response of DC current transformer

直流电流互感器保护特性测试所需的波形实为矩形冲击波，必须采用特殊的电源产

生，下文将详细介绍。参考国标GB 16927.4—2014《高电压和大电流试验技术第4部分：试验电流和测量系统的定义和要求》，波形的主要测量方法和参数如图2所示。

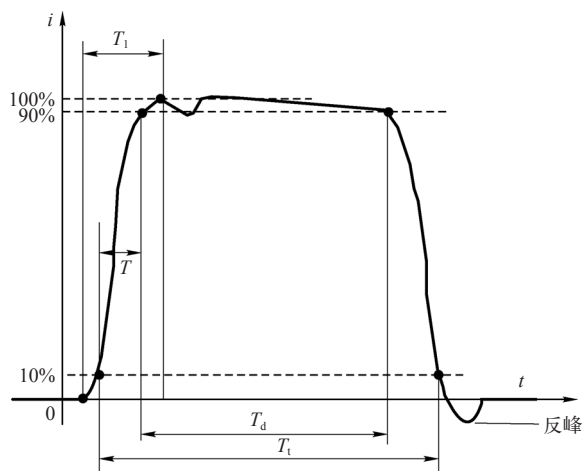


图2 阶跃电流测量方法

Fig. 2 Measuring method of step current

图2中， T_1 为波前时间 $=1.25T$ ，即为波形上升时间； T 为波形从10%上升至90%所用的时间，近似矩形的电流波形，由持续时间 T_d 和总持续时间 T_i 定义，测量的内容还包括电流峰值。通过被测互感器和标准互感器的参数对比以及响应时间对比，即可完成对被测装置的主要保护特性评估。

2 阶跃响应试验电源的设计

阶跃响应试验电源由上位机、电源控制模块、直流恒流源功率模块、储能电感、两路IGBT开关及RCD缓冲电路等构成。它通过两组IGBT开关切换恒定电流的输出路径，解决输出电流上升时间缓慢的问题，实现阶跃响应试验对电源微秒级上升时间和毫秒级持续时间的双重要求，而且能精确灵活地调整和配置阶跃电流峰值、电流维持时间等重要参数。基本电路结构如图3所示。

图3中直流恒流源提供高稳定度、低纹波的直流电流，本文设计的电流范围是0~3 000 A连接可调。电流在两路IGBT开关之间切换的逻辑如图4所示。

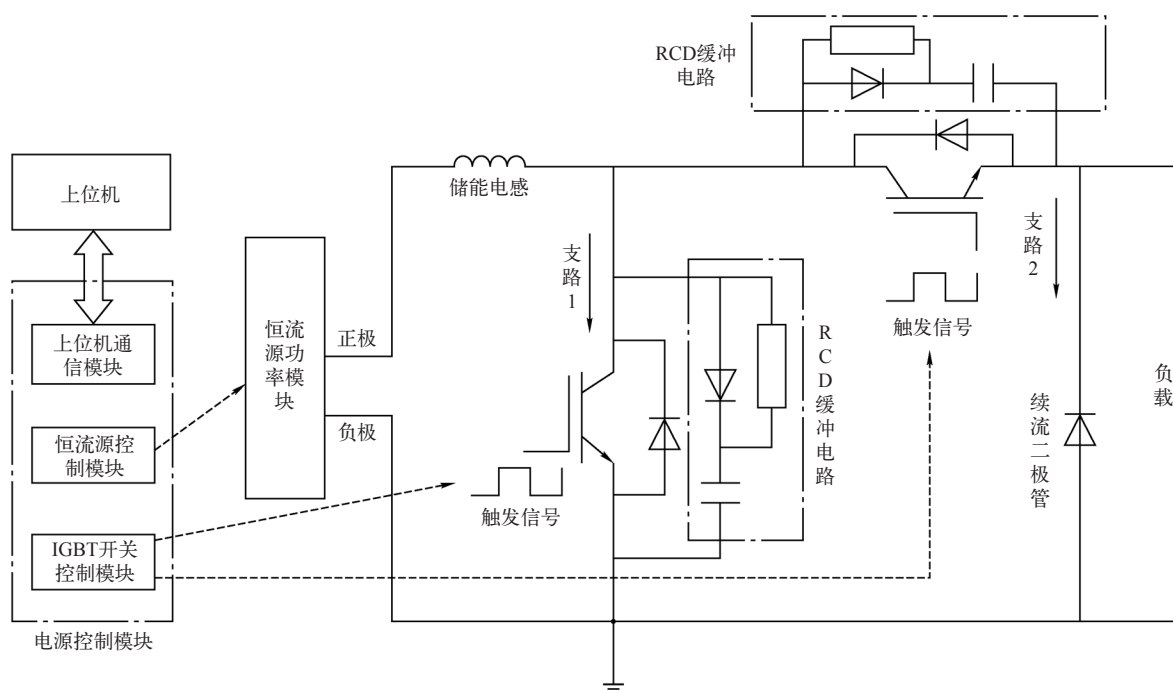


图3 直流方波源系统结构图

Fig. 3 Structure of DC step power system

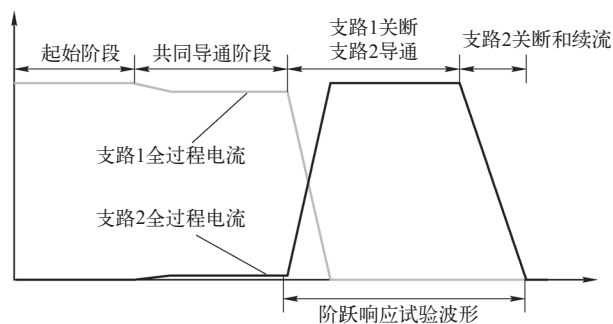


图4 阶跃响应试验电源工作逻辑

Fig. 4 Operation logic of step response test power supply

参照图3，试验电流的发出经历4个阶段：在试验的起始阶段，由上位机发送开机指令，使支路1的IGBT开关导通，此时支路1中的电流为0，然后上位机下发指定输出电流（如3 000 A），那么在支路1中就建立了一个3 000 A恒定电流的输出回路，电流由直流恒流源功率模块发出，该电流稳定度高且纹波较小；在共同导通阶段，保持支路1导通的同时，由上位机控制使支路2的IGBT导通，由于支路1和支路2所带的负载不同，支路2的回路很长还带有负载，即使它导通，流过支路2的电流还是小，

近似为0，相反支路1的回路短，没有负载，支路2导通对其电流减小的程度很低，可以认为无明显变化；在支路1关断、支路2导通阶段，由于IGBT的开断能力极强，支路1的电流在几个微秒内降为0，而支路2的电流从0上升至最大，也仅仅需要几个微秒，然后维持支路1关断、支路2导通至设定的持续时间；最后是支路2关断和续流阶段，在该阶段直接关断支路2的开关，整个电源中的电流就会从最大降为0。

3 阶跃响应试验电源的方案改进

值得注意的是，IGBT开关在切断电流的过程是硬关断，不可避免地要承受极大的反压，在实践过程中会出现IGBT因耐压不够而烧毁的情况。为此，本文对电路进行了SABER电路仿真，以便找到改进电路的方法。

仿真电路中的参数都是通过电桥实测线路中的电容、电感及电阻值，这里还把通流导线的阻抗也计算在内，因为在短路大电流工况下，它是不可忽略的。通过仿真发现，在最大

电流3 000 A工况下, 支路2的全过程电流能达到本文设计的阶跃电流动态时间, 可以作为试验电流, 仿真效果图如图5所示。

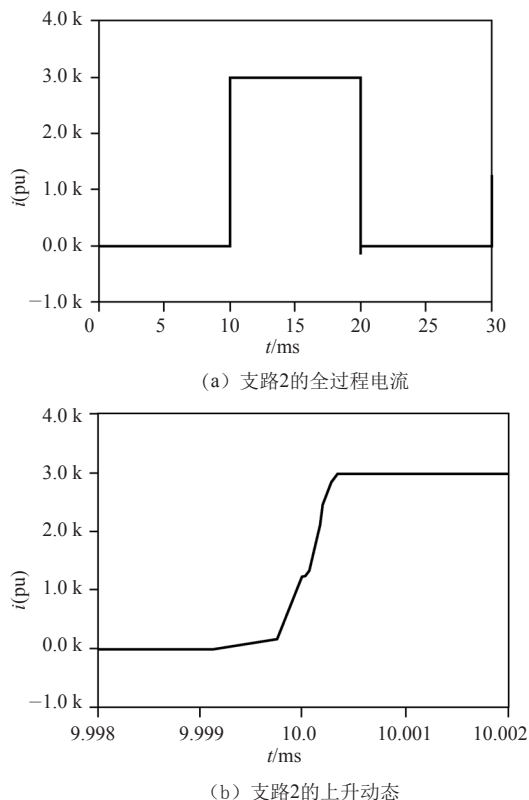


图5 阶跃响应试验电流仿真效果图

Fig. 5 Simulation effect of step response test current

支路1和支路2的IGBT均出现了很大的反压, 仿真效果如图6所示。

其中, 支路1的IGBT承受的最大反压出现在试验电流发出的第2个阶段, 即支路1关断、支路2导通时, 电压达到3 000 V, 普通IGBT是难以承受的; 支路2的IGBT承受的最大反压出现在第4个阶段, 支路2关断时, 电压达到了1 000 V。为了保证IGBT开关的安全性和提高系统的可靠性, 需要对电路结构进行改进, 改进的电路如图7所示。为了方便分析, 图7中IGBT的RCD缓冲电路未画出。

电路改进后, 支路1的IGBT开关由3支IGBT开关串联组成, 由 R_1 、 R_2 和 R_3 组成了开关管的均压电路。当支路1切断时, 通过 C_1 、 C_2 和 C_3 吸收过高的开关反压, 累积在各电容上的反压, 再通过各自己的泄放回路放掉。例如 C_2

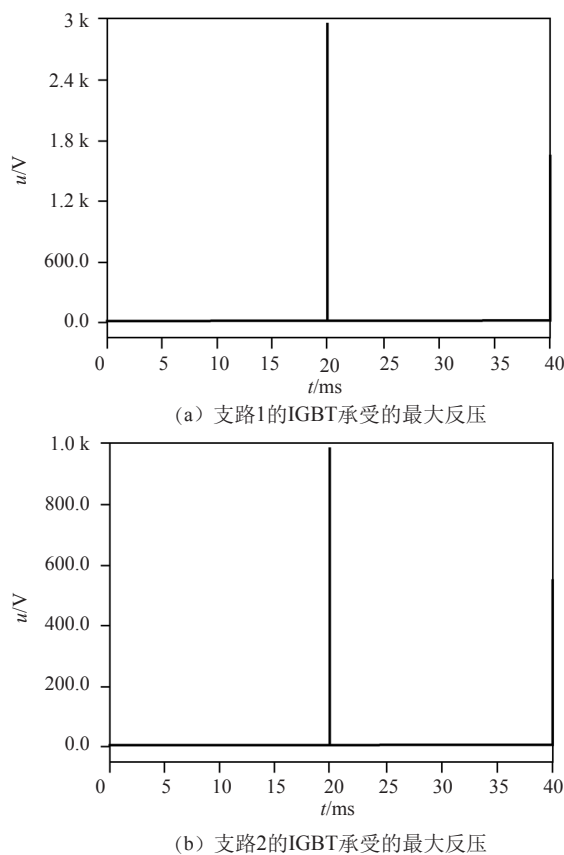


图6 试验回路中IGBT开关承受的最大反压

Fig. 6 Maximum back voltage of IGBT switch in test circuit

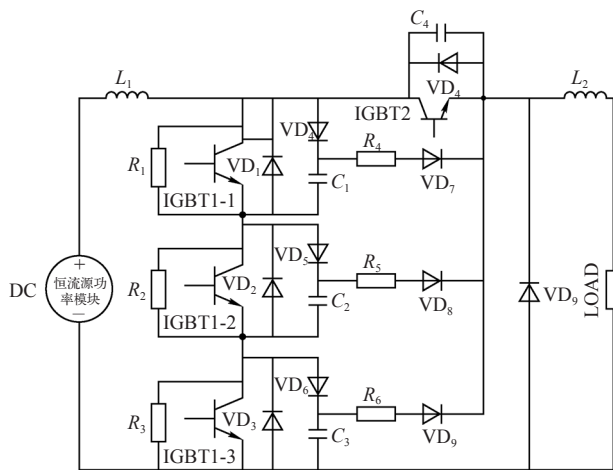


图7 直流方波源改进电路

Fig. 7 Step response test power supply improvement circuit

上的电压依次通过 R_5 、 VD_8 、 L_2 、负载和 VD_3 形成的回路, 有效抑制了IGBT1-2的反压, 其他两个串联的IGBT回路原理依此类推。另外由于支路2, 也就是试验波形所在的支路存在二极管续流, 所以IGBT关断时, 回路中的反

压并没有支路1大，普通IGBT的耐压就可以达到，这里未作改变。

4 系统自测与分析

按照图1布置和接线，将测量装置与电源系统进行了联调试验，现场试验实物图如图8所示。将电源的负载端子引出，用导线连接被测的互感器和测量所用的标准互感器。



图8 现场试验图

Fig. 8 Test site

让阶跃电流源输出电流，用示波器对比测量被测试的互感器和标准互感器输出。被测试的互感器选用的是LEM公司的零磁通电流互感器，将它环在大电流导线上。标准互感器采用的是PEM柔性探头CWT600，将其同样环在大电流导线上。其中，标准互感器在进行测试前需要进行标定，以证明标准互感器的动态性能，可在 $(8/20) \mu\text{s}$ 标准雷电流波形、3 kA电流下校准试品配套电流探头的实测比例。本项目的标定结果试验实测比例为 0.0999 mV/A ，测量结果的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=1.3 \times 10^{-2}$ ($k=2$)；时间参数测量结果的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}}=2.1 \times 10^{-2}$ ($k=2$)。

根据标定结果，PEM柔性探头的性能可作为标准互感器，输出比例1 000 A:0.1 V。

试验结果以3 000 A阶跃电流为例进行说明，用标准互感器检验阶跃电流源的输出效果，如图9和图10所示。其中3 000 A阶跃电流的波动小于3%，电流持续时间为10 ms，从试

验结果可看出暂态电流的上升时间约为 $7 \mu\text{s}$ 。完全达到了设计的指标。

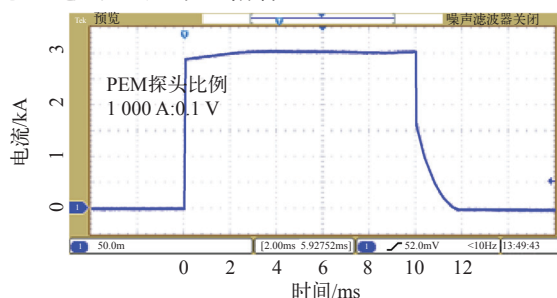


图9 阶跃电流波形全图

Fig. 9 Full picture of step current waveform

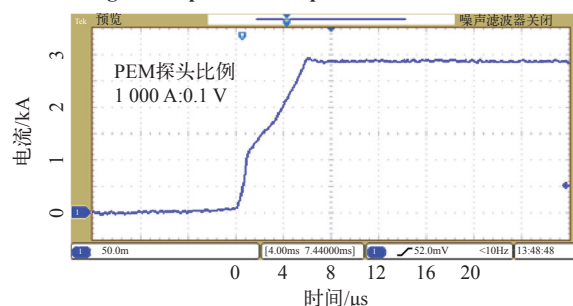


图10 阶跃电流上升动态

Fig. 10 Step current rising trend

以该试验平台为基础，对被测试的LEM零磁通电流互感器（图8中的蓝色模块）进行试验，比例为1 000 A:0.5 V，试验结果如图11和图12所示。其中蓝色曲线代表标准互感器（PEM柔性探头）的测量结果，红色曲线代表被测试互感器（LEM零磁通互感器）的测量结果。

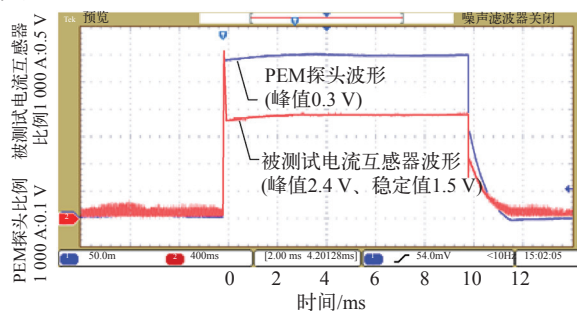


图11 标准互感器与被测试互感器阶跃全波对比

Fig. 11 Comparison of step full wave between standard transformer and tested transformer

从图11、图12中可以看出，被测试的互感器测量稳定电流的结果跟标准互感器基本一致，但在测量上升动态波形时，有较大的误差，主要表现在上升过程中测量到的电流不准确，实际测量结果存在较大误差。

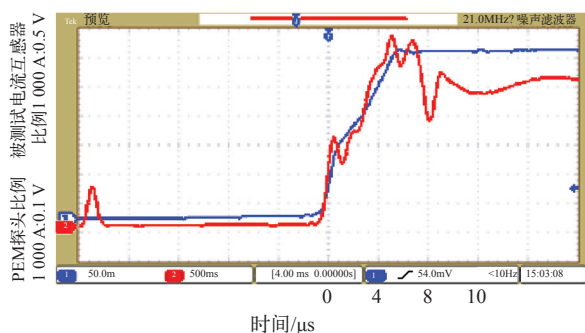


图12 标准互感器与试品互感器阶跃动态对比

Fig. 12 Step dynamic comparison between standard transformer and test transformer

5 结束语

利用IGBT开关进行支路切换方式设计的阶跃电流试验电源，能够达到阶跃电流上升时间 $10\ \mu\text{s}$ 量级、脉宽大于 $5\ \text{ms}$ 及输出电流峰值要求达到 $3\ 000\ \text{A}$ 的输出能力。

以实测电路参数为输入的SABER仿真，反映了阶跃电流生成过程中的局部过电压问题，为设备的性能改进提供了实践指导。

以阶跃电流试验电源、标准互感器和被测试互感器等设备搭建的试验平台能够实现对互感器的暂态性能的有效测试。

结合国家标准要求而进行的系统参数设计完全满足试验条件，从而为直流电流互感器的出厂试验、现场试验提供一定的理论和实践参考。

参考文献

[1] 张杰, 叶国雄, 刘翔, 等. 保护用电子式电流互感器暂态特性试验关键技术及装置研制[J]. 高电

压技术, 2017, 43(12): 3884-3891.

[2] 赵勇, 孔圣立, 罗强, 等. 电子式电流互感器暂态传变延时测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 125-129.

[3] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.

[4] 张杰, 胡媛媛, 刘飞, 等. 高压直流互感器现场校验关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 3003-3010.

[5] 互感器第二部分: 电流互感器的补充技术要求: GB/T 20840.2—2014[S].

[6] 互感器第八部分: 电子式电流互感器: GB/T 20840.8—2007[S], 2007.

[7] 高压直流输电系统直流电流测量装置第1部分: 电子式直流电流测量装置: GB/T 26216.1—2010[S]. 2010.

作者简介



童悦

童悦(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事高压大电流试验技术研究。

(收稿日期: 2019-06-03)EA