第 49 卷 第 6 期：2644-2651 高电压技术 Vol.49, No.6: 2644-2651
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220649

直流接地极线路用电流互感器暂态特性现场试验与分析

朱梦梦[1]，马御棠[1]，罗　强[2]，何兆磊[3]，廖耀华[1]，唐　标[1]
（1. 南方电网云南电网有限责任公司电力科学研究院，昆明 650217;
2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司，镇江 212009;
3. 云南电网有限责任公司计量中心，昆明 650200）

摘　要：直流接地极线路用电流互感器的暂态阶跃特性及其现场试验方法对系统控制保护和故障检测定位等具有重要意义。为此结合接地极系统实际，提出一种带电运行中人工短路与停电下阶跃响应特性的组合现场试验方案。首先，在接地极系统带电运行情况下，通过人工短路故障验证互感器暂态传变特性对保护的适应性。然后，开展了直流电流互感器阶跃响应现场同步闭环测试系统研制，通过模块化并联和内置式标准波形溯源调节方法提升阶跃电流源输出准确度，其输出参数为：阶跃幅值 0~600 A 可调，上升时间≤30 μs，脉宽最大为 100 ms。依托该试验系统，在富宁换流站对接地极直流电流互感器的阶跃响应时间、上升时间和延迟时间等参数进行了测试。结果表明，该方法可有效评估接地极直流电流互感器阶跃响应特性。

关键词：暂态特性；瞬时人工短路；阶跃响应；等效；现场试验

Field Test and Analysis of Transient Characteristics of Current Transformer for DC Grounding Electrode Lines

ZHU Mengmeng[1], MA Yutang[1], LUO Qiang[2], HE Zhaolei[3], LIAO Yaohua[1], TANG Biao[1]
(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., China Southern Power Grid, Kunming 650217, China;
2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China;
3. Measurement Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, China)

Abstract: The transient step characteristics and field test methods of current transformers for DC grounding lines are of great significance for the control and protection of system and the detection and location of faults.For this reason, this paper proposes a combined field test scheme of step response characteristics under artificial short circuit and power failure in live operation, combined with the reality of the grounding electrode system. First of all, under the live operation of the grounding electrode system, the adaptability of the transient transmission characteristics of the transformer to the protection is verified through artificial short circuit faults. Then, the field synchronous closed-loop test system for DC current transformer step response is developed, and the output accuracy of step current source is improved through modular parallel connection and built-in standard waveform traceability adjustment method. Its output parameters are as follows: step amplitude 0~600 A adjustable, rise time ≤30 μs, and the maximum pulse width is 100 ms. Based on the test system, the step response time, rise time, delay time and other parameters of the grounding electrode DC current transformer are tested in the Funing converter station in China. The results show that the method can be employed to effectively evaluate the step response characteristics of the grounding electrode DC current transformer.

Key words: transient characteristics; instantaneous artificial short circuit; step response; equivalent; field test

基金资助项目：云南省重大科技专项计划项目(202202AD080004)；云南省技术创新人才培养对象项目(202205AD160005)；云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20220161)
Project supported by Major Science and Technology Projects in Yunnan Province(202202AD080004), Yunnan Technological Innovation Talent Training Object Project(202202AD080004), Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd.(YNKJXM20220161).

0　引言

直流接地极及其线路是直流输电工程的重要组成部分[1-5]，特别是在出现故障或扰动后，其直流控制保护系统是否正确动作，故障定位是否准确，绝缘在线监测系统是否可靠等，都对系统的正常运行、监测至关重要[6-7]，而接地极系统直流电流互感器的暂态测量准确性是保障上述系统可靠运行的基础环节[8-12]。一般在直流工程投运前需要对接地极系统进行调试，其直流电流互感器的暂态性能指标是否满足要求需要进行现场测试验证，但由于现场试验技术难度大、安全风险高，一直以来没有成熟的现场试验方法和相关技术方案。

文献[13]提出了一种基于模块交错并联的暂态控制和变压器一体化设计，开展了外置式高稳定直流标准试验电源和直流互感器数字校验仪的研制。文献[14]开展了传统交流电网保护用电子式电流互感器的暂态特性试验方法研究和装置研制。文献[15]开展了柔性直流输电用直流电流互感器保护特性试验技术研究及其测量装置研制。近年来，在直流互感器现场测试中，人们对直流电流互感器稳态准确度和频率响应开展了相关试验，也积累了现场实操经验，但对接地极用直流电流互感器暂态特性现场试验方法、试验装备和同步闭环测试技术等问题未开展系统性研究，缺少现场试验数据及暂态测量特性分析。而传统的直流互感器稳态检测技术和装备受异地多点同步大电流标准量值传输的限制，无法满足现场暂态特性检测要求，迫切需要一种接地极线路用直流互感器暂态特性现场检测方法和试验系统。

针对以上问题，本文提出一种接地极直流电流互感器暂态特性现场等效试验方法，开展了基于绝对延时的阶跃响应现场试验技术研究和关键设备研制，并在实际换流站中进行了接地极线路故障下互感器暂态特性对控保系统动作的试验，以及直流电流互感器阶跃响应关键参数测量。

1　直流接地极运行工况及其电流互感器暂态特性分析

1.1　直流接地极线路运行工况与人工短路试验分析

一般直流接地极线路的控制保护系统是通过站端安装的两只直流电流互感器量测实时电流信号 I_{dee1} 和 I_{dee2}，图 1 展示了接地极线路 2 发生接地故障后的等效电路[3,6,10]。其中 U_{M1} 和 U_{M2} 分别为直流

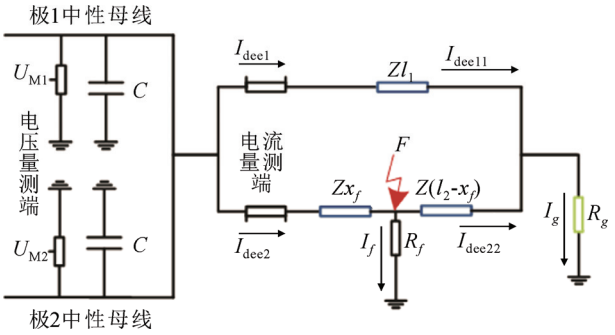


图 1　直流接地极线路接地故障等效电路

Fig.1　Equivalent circuit of DC grounding electrode line grounding fault

电压互感器量测的极 1 和极 2 中性母线电压，C 为其线路吸收电容，I_{dee1} 和 I_{dee2} 为直流电流互感器量测的接地极线路流入极址电流，l_1 和 l_2 为接地极线路长度，I_{dee11} 和 I_{dee22} 为线路流出的电流。F 为故障点，x_f 为故障点到电流量测端的距离，R_f 为故障过渡电阻，I_f 为故障电流，R_g 为极址电阻，I_g 为极址电流。由图 1 可知，接地极系统其中一条线路发生接地故障后，由于线路回路阻抗变化，接地极线路量测端感知到的电流发生突变，接地极系统一般采用不平衡保护策略进行相应的动作，具体计算为

$$\begin{cases} \left|I_{dee1}-I_{dee2}\right|>\Delta \\ \Delta=0.02I_N \end{cases} \tag{1}$$

式中：I_N 为额定电流。在接地极运行时检测到两只互感器的电流差值 Δ 满足式(1)时，同时且持续时间为 t_1，则进行移相重启，若故障持续时间超过 t_2 时，则进行闭锁。在双极运行时采用极平衡方法，消除接地点的故障电流，以降低直流停运闭锁的概率和对接地点危害。可见，接地极直流电流互感器对暂态信号传变准确与否是接地极线系统开展故障检测、保护控制与故障定位的前提基础。在直流工程投运前的调试阶段，为更好开展直流接地极电流互感器暂态特性试验以及检验直流接地极系统保护动作可靠性，课题组在永富直流工程接地极线路开展了瞬时人工短路试验，图 2 为实际采集到的故障暂态电流波形。

从图 2 中可知，其电流谐波分量明显，在故障保护动作正确过程中，是电流经受突然变化的时刻开始达到最高值并维持其稳态值为止的一个长时间(ms 级以上)持续过程。整个接地极线路故障过程的电流波形可近似等效为方波电流，其初始上升阶段可等效为单位阶跃响应，且电流信号上升沿带有一

定程度过冲和高频振荡。

1.2 接地极线路直流电流互感器暂态响应指标分析

国内多数换流站接地极使用零磁通电流互感器，随着技术不断发展，近年来新建直流工程中的接地极会使用基于分流器原理的直流电子式互感器进行电流信号测量[16-18]，国家标准也对其暂态响应特性做出规定：其中 GB/T 26216.1—2010 中规定阶跃响应上升时间为 400 μs，在 2019 年最新颁布国家标准中将其修改为 250 μs，并增加“<100 μs(柔性直流输电系统适用)”，此外标准中对最大过冲、趋稳时间也明确了技术指标参数。对于直流电流互感器暂态响应特性而言，图 3 展示了典型的阶跃响应过程[19-20]。

图 3 中 u 为输入变量；U_0 为输入变量初始值；U_s 为输入变量阶跃幅值；V 输出变量；V_0、V_∞为施加阶跃前后输出变量的稳态值；v_m 为超调(量)；$2\Delta v_s$ 为规定允差；t_{sr} 为阶跃响应时间；t_s 为建立时间；t_t 为死区时间。其中 a 代表周期特性，b 代表非周期特性。试验时应在直流电流互感器一次侧施加阶跃电流(一般不小于额定电流的 10%)，并在二次侧记录测量的电流曲线，并满足上述要求。此外根据国家标准规定，直流电流互感器的阶跃响应试验应在额定负荷和原装传输电缆下进行。

综上分析，通过在接地极直流电流互感器一次注入大小可调的快速上升、长脉宽阶跃电流，进行其阶跃响应特性关键参数测量，验证其是否满足设计指标要求。此外，除了开展直流电流互感器阶跃响应试验外，还应模拟直流接地极线路故障情况下作用在互感器上的特征波形，以验证直流电流互感器对故障暂态信号传变准确性及直流接地极系统保护的正确动作。

2 现场阶跃响应试验系统及关键技术

2.1 接地极直流电流互感器阶跃响应现场试验方法

在换流站中接地极直流电流互感器的安装位置距离保护控制室相比其他互感器而言是最远的，直流控保系统运行不依赖于同步信号进行，其直流互感器合并单元的实时采样值处理未关联同步对时信号，故不能采用外部同步信号进行对时。结合以上分析，本文提出一种基于绝对延时的接地极直流电流互感器阶跃响应特性现场同步测量试验系统，如图 4 所示。

图 4 展示的试验系统主要由上位机、直流阶跃

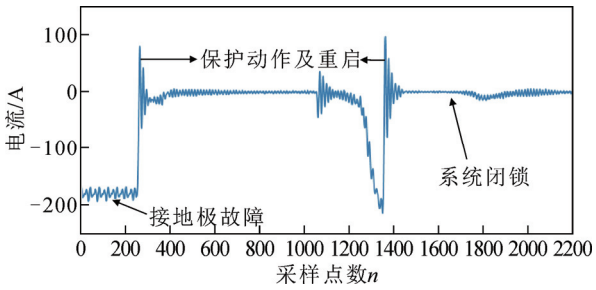


图 2 接地极线路故障实际波形

Fig.2 Actual waveform of grounding electrode line fault

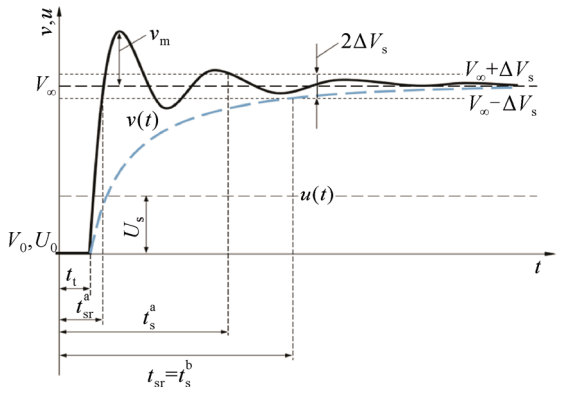


图 3 典型直流电流互感器阶跃响应过程

Fig.3 Step response process of typical DC current transformer

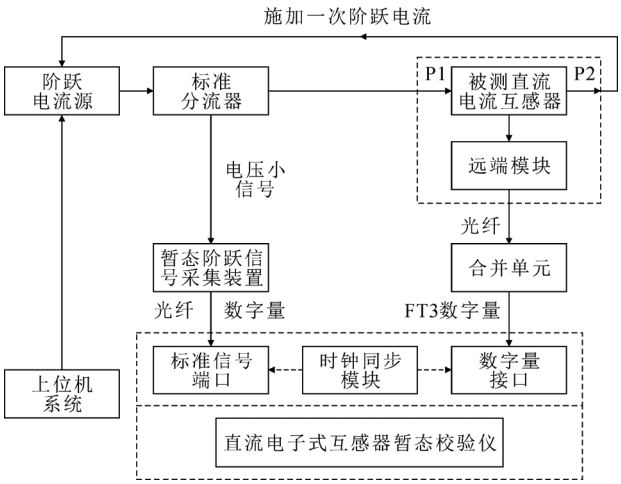


图 4 直流电流互感器阶跃响应试验系统

Fig.4 Step response test system of DC current transformer

信号源、功率放大器、暂态阶跃信号采集装置和直流电子式互感器暂态校验仪等组成。其中上位机根据试验需要产生所需的阶跃大电流并施加至被测直流电流互感器，校验仪同步接收暂态阶跃信号采集装置的标准信号和通过光纤从直流电流互感器的合并单元引出的被测数字量信号，将采集到的信息上传至校验仪的数据分析处理单元进行阶跃响应关键

参数处理和计算。

2.2　基于模块化并联和内置式标准波形溯源调节的阶跃电流源

从以上分析可知，在进行直流互感器阶跃响应试验中，高品质的阶跃大电流生成和暂态信号的高准确度采集处理是阶跃响应特性现场试验的关键之处。为了获得可控调节脉宽的暂态阶跃大电流，本文提出了一种基于模块化并联和内置式标准波形溯源调节的阶跃电流源实现技术，如图 5 所示。

首先，在上位机中设置试验所需的阶跃电流信号，然后通过主控制器和 FPGA 控制 DAC 芯片，将阶跃电流数字信号转化为暂态阶跃小电压信号，并采用线性功率放大器实现阶跃大电流输出。线性功率放大器采用推挽式电路，最大输出电流可达 600 A。为了提升阶跃大电流的输出准确度，阶跃电流源由 2 个独立功放模块并联输出，并通过内置式高精度标准分流器将线性功率放大器输出电流转成小电压信号，然后采用 ADC 数据回采模块完成信号回采。为保证调节过程的精确性，系统采用独立的 FPGA 分别控制数据输出模块的 DAC 和信号回采模块的 ADC，实现数据源与测试接收数据分离。

由于线性功率放大器对暂态阶跃高频信号的放大会出现一定程度失真现象，本文提出了一种基于 Hausdorff 距离(Hausdorff distance，Hd)d_{H} 的阶跃电流波形调节方法[21-22]。试验系统上位机的设置电流信号为 $I_{\mathrm{sc}}(a_i)$，回采的电流信号为 $I_{\mathrm{hc}}(b_j)$，i=1，2，3，…，m；j=1，2，3，…，n；m 和 n 为信号采样个数，将两个阶跃电流信号的 Hd 定义为

$$d_{\mathrm{H}}(I_{\mathrm{sc}},I_{\mathrm{hc}})=\max\left\{d(I_{\mathrm{sc}},I_{\mathrm{hc}}),d(I_{\mathrm{hc}},I_{\mathrm{sc}})\right\} \tag{2}$$

式中，$d(I_{\mathrm{sc}}，I_{\mathrm{hc}})$和 $d(I_{\mathrm{hc}}，I_{\mathrm{sc}})$分别表示为

$$d(I_{\mathrm{sc}},I_{\mathrm{hc}})=\max_{m}\min_{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left\|I_{\mathrm{sc}}(a_j)-I_{\mathrm{hc}}(b_j)\right\| \tag{3}$$

$$d(I_{\mathrm{hc}},I_{\mathrm{sc}})=\max_{\mathrm{n}}\min_{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\left\|I_{\mathrm{hc}}(b_j)-I_{\mathrm{sc}}(a_j)\right\| \tag{4}$$

式中，‖•‖表示欧氏距离。Hd 值越小，则表征两个波形的相似程度越高，也就说明实际功率放大器输出波形与设置电流信号越高度逼近。

其阶跃电流波形调节具体过程如下：首先在阶跃电流源装置上位机设置输出的阶跃电流 I_{sc}，将通过高精度分流器回采第 1 次输出的电流 I_{hc1} 转换为小电压信号，采用高速 ADC 进行精确采集并实现数据的离散化。然后，将采集到的实际阶跃电流数据回传至主控制器，计算设置输出电流与第 1 次回采电流波形的 d_{H1}，并根据设置门槛值 α 判断输出电流是否逼近设置的阶跃电流。若不满足要求，通过参数调节修正后，再次回采第 2 次输出电流 I_{hc2} 并计算 d_{H2}，一般情况循环 4 次以内可以实现波形高度逼近。当循环至 5 次时，若无法满足设置的门槛值 α，此时不再进行波形调节，直接输出阶跃电流。通过以上的步骤，不断将波形进行修正逼近，以便输出高品质阶跃电流波形，具体流程见图 6。

为了验证阶跃电流源的输出性能，搭建了阶跃电流源性能验证系统，通过阶跃电流源的系统软件配置输出一次阶跃电流，经过功率放大器产生对应的阶跃电流，输出不同幅值的电流，其脉宽最大为 100 ms，电流最大值为 600 A。采用直流电子式互感器暂态校验系统采集运算得到试验结果，试验中互感器校验仪的采样频率为 500 kHz，上升时间确定为阶跃幅值的 10%到 90%所需的时间。图 7 为输

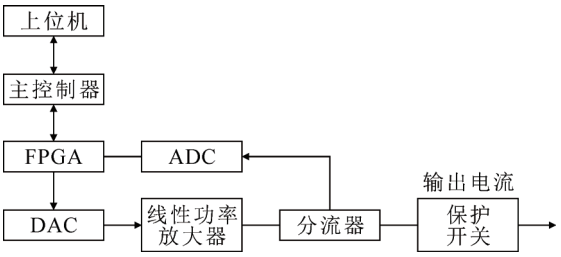


图 5　阶跃电流源工作原理图

Fig.5　Working principle diagram of step current

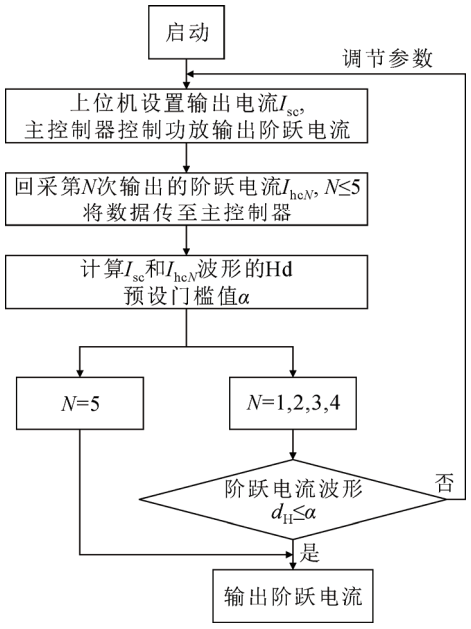


图 6　基于 Hausdorff 距离的阶跃电流波形调节流程图

Fig.6　Flow chart of step current waveform adjustment based on Hausdorff distance

出阶跃电流为 600 A 时的波形图，阶跃高值信号598.752 A，误差小于0.5%，阶跃上升时间为27.8 μs，过冲小于11.8%。

对不同大小的阶跃电流参数进行了全面测试验证，如表1所示。

从表1中可以看出，阶跃电流源输出100 A到600 A时，其上升时间小于30 μs，满足接地极线路直流电流互感器暂态特性现场试验要求。

2.3 阶跃响应关键参数计算

阶跃响应现场试验中关键的参数为阶跃幅值、上升时间、延迟时间、过冲幅值、趋稳时间等，图8为现场实际录波得到的阶跃电流整体信号和局部放大下的阶跃高值、低值信号。

互感器校验仪在数据处理计算过程中，假设阶跃电流的低值信号为 D_1，其采样点为 n_1 个；阶跃高值信号为 D_2，其采样点为 n_2 个，阶跃高值信号和阶跃低值信号的提取采用平均值法。考虑到工程现场阶跃电流波形易受干扰，在选取采样信号时，应该滤除异常数据。通过阶跃高值和阶跃低值计算得出阶跃幅值 D，然后计算 10%阶跃电流信号为 $D_{10\%}$，其对应的时刻为 t_1，90%阶跃电流信号为 $D_{90\%}$，其对应的时刻为 t_2，则阶跃响应上升时间为 $t=t_1-t_2$。同理，通过标准阶跃信号和被测直流互感器输出阶跃信号所对应的10%的时刻，计算暂态延时时间 t_d。阶跃响应的过冲及趋稳时间计算在此不再赘述。

3 现场暂态特性试验与结果分析

3.1 暂态试验系统构建及一次回路分析

富宁换流站接地极线路用直流电流互感器额定电流为3000 A，额定电压为75 kV，合并单元采样率为10 kHz，并采用FT3通信协议。其中阶跃响应的设计指标是按照国家标准GB/T 26216.1—2010规定要求[23]，最大过冲小于 20%，上升时间(达到阶跃高值90%的时间)小于400 μs，趋稳时间(幅值误差不超过阶跃值1.5%)小于5 ms。

由于接地极线路用直流电流互感器安装位置离地高，与之联结的管母不易拆除，现场挂接一次大电流导线及其回路阻抗影响着工程现场试验安全性和工作效率。根据现场试验要求，采用设计的专用抱箍固定在接地极电流互感器所连接的一次管母线上，试验大电流导线依次连接抱箍和阶跃电流源，互感器校验仪通过光纤采集被测直流电流互感器合

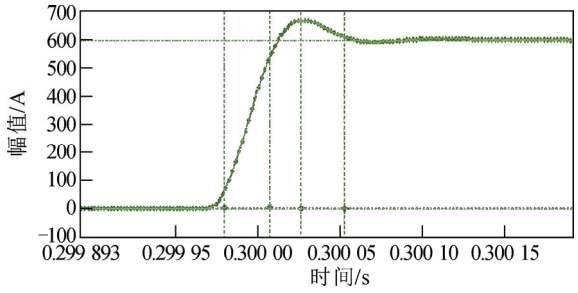


图7 阶跃电流为600A时的波形图

Fig.7 Waveform diagram when the step current is 600A

表1 不同阶跃电流下特性参数指标

Table 1 Characteristic parameters under different step currents

设置电流/A	阶跃高值/A	过冲/%	上升时间/μs
100	99.683	9.9	28.8
200	199.427	10.3	28.3
300	299.295	11.1	28.0
500	499.234	12.8	28.9
600	598.752	11.8	27.8

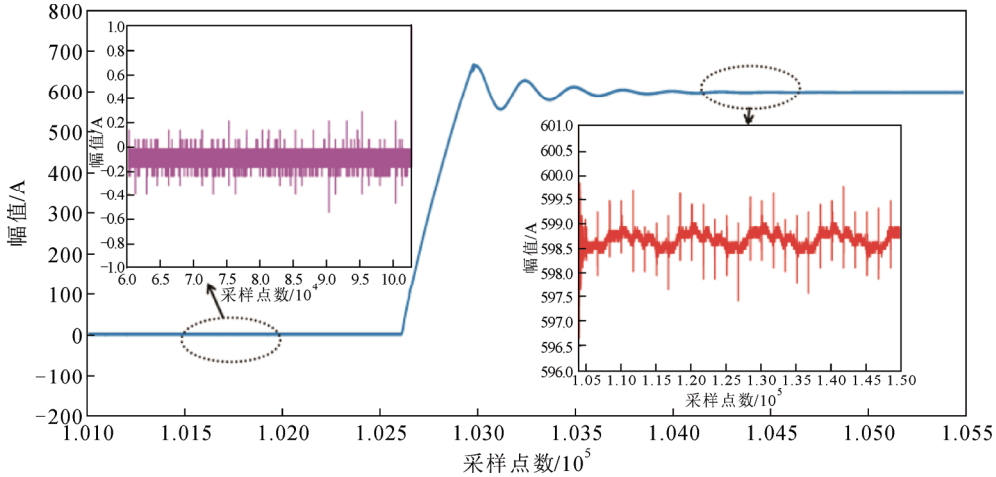


图8 阶跃高值和低值信号局部放大图

Fig.8 Local enlarged view of step high value and low value signals

并单元数字量信号，暂态阶跃信号采集装置实现标准信号的准确获取并经过光纤传送至校验仪，被测信号和标准信号在校验仪统一时序下完成同步采集，并完成阶跃响应关键参数的计算。

试验中快速上升的阶跃电流频率高，因此一次回路的阻抗随之增大，将现场阶跃响应试验升流过程的一次回路等效为如图 9 所示电路。

图 9 中 R、L 分别为试验一次回路的等效电阻和电感，其包括被试品直流电流互感器、大电流导线、标准器以及抱箍和试验导线接触等其他环节的等效电阻电感，R_1 为电源内阻。试验中施加阶跃电流源 $I(s)$为单位阶跃信号，其复频域象函数表示为 $1/s$，则试验一次回路电流 $I_L(s)$表达式为

$$I_L(s)=\frac{1}{s}\frac{R_1}{R+sL+R_1} \tag{5}$$

对式(5)两端进行拉氏反变换，可得到试验一次回路电流的时域表达式为

$$i_L(t)=\frac{R_1}{R+R_1}(1-e^{-\frac{R+R_1}{L}t}) \tag{6}$$

令时间常数 $\tau=L/(R+R_1)$，可将式(6)改写为

$$i_L(t)=\frac{R_1}{R+R_1}(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \tag{7}$$

从式(7)可知，试验一次回路的电流与时间常数有关，其自由分量随指数衰减，从工程现场角度分析，回路电感 L 大小影响阶跃电流陡度，即上升时间。若一次试验回路呈纯阻性，则不影响阶跃电流上升时间，当试验一次回路存在电感，则会随着电感值变大使得阶跃电流上升时间增大。图 10 为试验回路电感值 L 变化时阶跃电流的上升时间示意图。

3.2　试验结果分析

课题组按照现场作业风险管控要求，将一次和二次系统进行相应的隔离[23]。在阶跃电流源系统的上位机中配置所需的试验电流，选取互感器额定电流的 10%和 20%两个测试点开展试验，图 11 展示了施加阶跃电流为 300 A 时的波形，其中蓝色线代表标准阶跃电流波形，带圆点的红色线代表被试互感器输出的阶跃电流波形。通过计算可以得出，被测直流电流互感器过冲为 13.9%，趋稳时间为 2.57 ms，上升时间相对于标准阶跃信号的误差为 29.5 μs，延迟时间为 494 μs。图 12 展示了施加阶跃电流为 600 A 时的波形，其中被测直流电流互感器的过冲为 4.9%，趋稳时间 0.84 ms，上升时间相对于标准阶跃信号的误差为 27.6 μs，延迟时间为 487 μs。

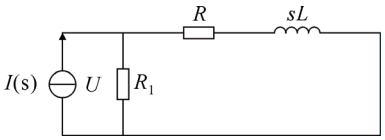


图 9　现场阶跃响应试验升流过程的一次回路等效电路

Fig.9　Equivalent circuit of primary circuit in the process of rising current in field step response test

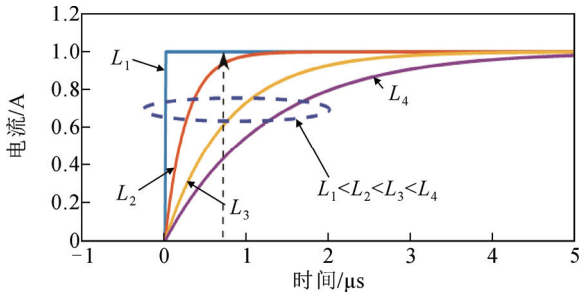


图 10　阶跃电流随着一次回路电感增大示意图

Fig.10　Curve of step current increasing with primary loop inductance

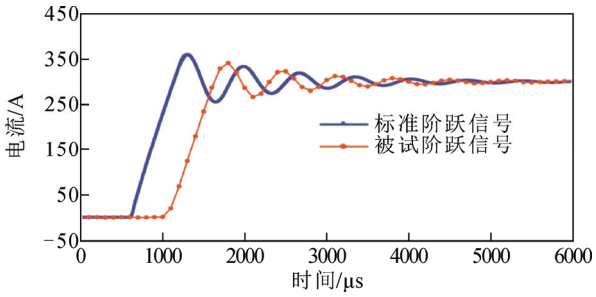


图 11　阶跃电流为 300 A 时的现场阶跃试验波形

Fig.11　Field step test waveform when the current is 300 A

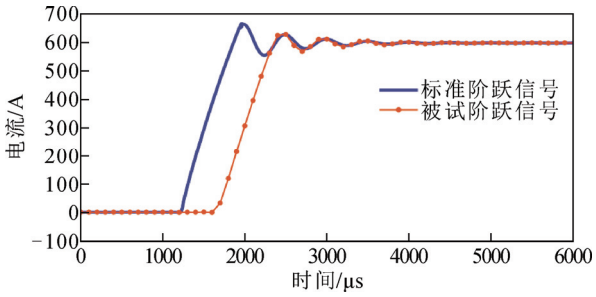


图 12　阶跃电流为 600 A 时的现场阶跃试验波形

Fig.12　Field step test waveform when the current is 600 A

从图 11 和图 12 可以看出，阶跃电流在上升过程中存在振荡，主要是由于现场试验回路中的电感和电容谐振引起。在工程现场获得高质量的阶跃电流波形，可以通过减小试验一次导线的长度来降低振荡。同时，为了提高暂态阶跃电流上升时间，可

以通过优化试验一次回路达到降低电感分量，实现功率放大器输出陡上升、长脉宽阶跃电流的要求。

在开展现场阶跃响应时，由于换流站现场的试验条件和安全管控等因素，未能将试验设备吊装至接地极线路用直流电流互感器附近管母联结处开展阶跃响应试验，而是通过在直流互感器管母两侧固定抱箍，然后联结一次大电流导线，阶跃电流源和校验仪等设备放置地面，这样势必造成一次电流回路的电感增大。实质上直流电流互感器现场阶跃试验升流过程是由被试设备与导线、电流源等组成的闭合回路，可近似等效为通过时变电磁场的单匝线圈，其通过抱箍联结电流导线而形成的矩形回路面积影响着回路等效电感值的大小。为了获得上升时间更小的阶跃电流波形，尽可能优化一次回路面积来减小电感。图 13 和图 14 分别展示了通过改变回路面积后阶跃响应试验波形。

图 13 中阶跃电流上升时间比较快，但由于阶跃电流源调节时间短造成过冲比较大。而图 14 中上升时间相较于图 13 的阶跃电流上升时间变大，给阶跃电流源调节时间长，因此使得阶跃电流源输出最大过冲基本控制在 5%左右，满足现场试验要求。同时，课题组在现场还开展了阶跃电流在达到稳态值后叠加谐波分量等多组试验，由于篇幅所限，在此不再赘述。

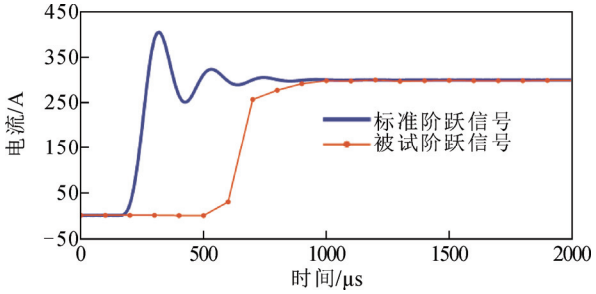


图 13 阶跃电流上升时间为 62 μs

Fig.13 Rise time of step current is 62 μs

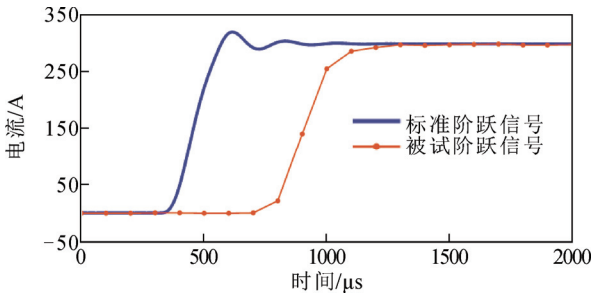


图 14 阶跃电流上升时间为 153 μs

Fig.14 Rise time of step current is 153 μs

4 结论

1）通过开展现场人工短路故障试验，验证了接地极线路用直流电流互感器对故障暂态信号传变准确性及保护的正确动作。

2）采用模块化并联和内置式标准波形溯源调节技术研制的现场阶跃电流源，提升了阶跃电流源输出准确度，实现了快速上升、长脉宽的暂态阶跃电流。暂态阶跃响应电流最大值 600 A，上升时间小于 30 μs，持续时间最大 100 ms，满足直流接地极线路电流互感器暂态响应试验技术要求。

3）在换流站开展了直流接地极电流互感器现场阶跃响应试验，并对关键参数进行了测量，验证了整体试验方案可行性和暂态特性试验技术，表明已具备开展接地极直流电流互感器暂态特性现场试验和指标分析能力。

参考文献 References

[1] 饶 宏，张东辉，赵晓斌，等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2481-2488.
RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, et al. Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.

[2] 辛保安，郭铭群，王绍武，等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化，2021，45(22)：1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.

[3] 张怿宁，束洪春，翟永昌，等. 基于两种算法融合的接地极线路故障测距[J]. 高电压技术，2016，42(8)：2633-2641.
ZHANG Yining, SHU Hongchun, ZHAI Yongchang, et al. Fault location for grounding electrode line based on fusion of two algorithms[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2633-2641.

[4] 饶 宏，吴 为，周保荣，等. 云南电网与南网主网交直流系统相互影响及异步联网方案研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(11)：3470-3476.
RAO Hong, WU Wei, ZHOU Baorong, et al. Study of AC/DC power system interaction and asynchronous connection between Yunnan power grid and the rest of CSG[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3470-3476.

[5] 马为民，张云晓，卢亚军. 双极-地制高压直流输电系统单极接地故障扰动在极间的传递机制[J]. 高电压技术，2019，45(12)：3978-3983.
MA Weimin, ZHANG Yunxiao, LU Yajun. Inter-pole transmission mechanism of pole-to-ground fault disturbance in bipolar-ground HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3978-3983.

[6] 夏泠风，周 挺，许 斌，等. 高土壤电阻率条件下的高压直流输电接地极系统接地电阻限值分析[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1720-1728.
XIA Lingfeng, ZHOU Ting, XU Bin, et al. Analysis of ground resistance limitation value of HVDC electrode system under high soil resistivity condition[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1720-1728.

[7] 张东寅，范志华，许汉平，等. LCC 与 FH-MMC 混合直流输电系统直流单极接地故障穿越控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2072-2080.

ZHANG Dongyin, FAN Zhihua, XU Hanping, et al. DC pole-to-ground fault ride-through strategy of hybrid HVDC system based on LCC and hybrid MMC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2072-2080.

[8] 张福轩，郭贤珊，常忠廷，等. 张北关键设备短时电流试验方法[J]. 高电压技术，2020，46(2)：682-689.
ZHANG Fuxuan, GUO Xianshan, CHANG Zhongting, et al. Short-time current test method of key equipment for Zhangbei DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 682-689.

[9] 叶　杰，汤广福，赵成勇. 多电压等级柔性直流电网建模与稳定性分析[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1433-1441.
YE Jie, TANG Guangfu, ZHAO Chengyong. Modeling and stability analysis for flexible DC power grid with multi-voltage levels[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1433-1441.

[10] 张　平，杨朋威，汤汉松，等. 直流电压测量装置暂态阶跃响应性能现场测试技术[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(9)：143-149.
ZHANG Ping, YANG Pengwei, TANG Hansong, et al. Field test technology of the transient step response features of a DC voltage measuring device[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 143-149.

[11] 岳国良，穆永保，贾志辉，等. 直流接地极精细大地模型的勘探与计算[J]. 高电压技术，2021，47(11)：3901-3912.
YUE Guoliang, MU Yongbao, JIA Zhihui, et al. Exploration and calculation of very fine geodetic model for DC grounding electrodes[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 3901-3912.

[12] 罗苏南，王　耀，丁　晔，等. 柔性直流输电用±500 kV 直流全光纤电流互感器研制及测试[J]. 高压电器，2017，53(6)：48-55.
LUO Su'nan, WANG Yao, DING Ye, et al. Development and test of ±500 kV DC fiber optical current transducer for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 48-55.

[13] 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.
ZHANG Jie, HU Yuanyuan, LIU Fei, et al. Critical technology of on-site calibration system for DC electronic instrument transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 3003-3010.

[14] 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.
ZHANG Jie, YE Guoxiong, LIU Xiang, et al. Critical technology and equipment development of transient characteristics test on electronic current transformer for protection[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3884-3891.

[15] 张　杰，姚　俊，姚翔宇，等. 柔性直流输电用直流电流互感器保护特性试验技术研究及其测量装置研制[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2159-2164.
ZHANG Jie, YAO Jun, YAO Xiangyu, et al. Critical technology and equipment development of protection characteristics test of DC current transformer for VSC-HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2159-2164.

[16] 周　峰，李　鹤，李文婷，等. 大电流测量传感技术综述[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1905-1920.
ZHOU Feng, LI He, LI Wenting, et al. Review of high current measurement and sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.

[17] 肖　燕，李　军，庞福滨，等. 基于合成概率法的光学电流互感器运行可靠性[J]. 电网技术，2022，46(1)：336-342.
XIAO Yan, LI Jun, PANG Fubin, et al. Operation reliability of optical current transformer based on synthetic probability[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 336-342.

[18] 庞福滨，袁宇波，戴　锋，等. 基于琼斯矩阵的反射型光纤电流传感器误差分析[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4298-4305.
PANG Fubin, YUAN Yubo, DAI Feng, et al. Error analysis of reflective fiber optic current transducer based on jones matrix[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4298-4305.

[19] 国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 互感器　第14 部分：直流电流互感器的补充技术要求：GB/T 20840.14—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Instrument transformers—part 14: additional requirements for current transformers for DC applications: GB/T 20840.14—2022[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2022.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 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：GB/T 16927.4—2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. High voltage and high current test techniques -part 4: definitions and requirements for test currents and measuring systems: GB/T 16927.4—2014[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2014.

[21] 唐冬来，倪平波，张　捷，等. 基于离散弗雷歇距离的户变关系识别方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(6)：223-230.
TANG Donglai, NI Pingbo, ZHANG Jie, et al. Identification method for relationship between household transformers based on discrete frechet distance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 223-230.

[22] 王雪菲，李　京，陈　平，等. 基于行波波形综合相似度比较的电缆故障选线[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(1)：51-59.
WANG Xuefei, LI Jing, CHEN Ping, et al. Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 51-59.

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 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]. 北京：中国标准出版社，2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. DC current measuring device for HVDC transmission system—part 1: electronic DC current measuring device: GB/T 26216.1—2010[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011.

[24] 马御棠，黄曹炜，王　科，等. 交、直流输电线路人工接地短路电流地线分流的测量及频率分析[J]. 高电压技术，2017，43(12)：3914-3921.
MA Yutang, HUANG Caowei, WANG Ke, et al. Measurement and frequency analysis of short current and its ground wire shunting at artificial grounding fault on AC and DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 3914-3921.



朱梦梦(通信作者)
1986—，男，博士生，高工
从事交、直流互感器检测与故障诊断技术方面的研究工作
E-mail: 396923800@qq.com

ZHU Mengmeng
Ph.D. candidate
Senior engineer
Corresponding author



马御棠
1986—，男，博士生，高工
从事防灾减灾、过电压与绝缘配合等研究工作
E-mail: hvmyt@qq.com

MA Yutang
Ph.D. candidate
Senior engineer

收稿日期　2022-05-05　修回日期　2022-10-18　　编辑　曹昭君