

一种用于大容量试验室的电流测量方法

汪海波^{1, 2}, 洪 深^{1, 2}, 张 玲^{1, 2}

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210000;

2. 国网电科院检测认证技术有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 大容量试验室主要对开关类、变压器类等输变电一次设备进行高压大电流试验, 试验电流从几十安培到上百千安培不等, 同时要求相关试验参数的测量满足产品对应的标准要求。大容量试验站通常采用分流器、罗氏线圈和互感器等方式进行电流测量。分流器与罗氏线圈的电流测量范围大, 互感器电流测量范围相对较小, 覆盖几十安培几千安培。提出一种适用于大容量试验站的电流测量方案并进行试验验证, 仅通过通道转换实现宽范围的电流直接测量、三角形联结变压器突发短路的相电流测量, 可满足不同产品试验电流测量的需求, 节约成本的同时省去临时接电流测量装置的工作, 避免测量设备临时接线存在的可靠性、安全性等问题, 有效提高试验效率。

关键词: 大容量试验室; 电流测量; 变压器突发短路试验; 分流器; 电流互感器

A current measurement scheme for high power laboratory

WANG Haibo^{1,2}, HONG Shen^{1,2}, ZHANG Ling^{1,2}

(1. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211000, China;

2. State Grid Power Testing and Certification Technology Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: The high power laboratory mainly tests circuit breakers and transformers, the test current ranges from tens of A ~ hundreds of kA, the measurement of relevant test parameters should meet the corresponding standard requirements of the product. Shunt, rogowski coil and current transformer are usually used for current measurement in high power laboratory. The current measurement range of shunt and rogowski coil is large, while the current measurement range of current transformer is relatively small, covering dozens of A ~ several kA. A current measurement scheme suitable for high power laboratory is proposed, which can meet the requirements of current measurement for different products test. It is unnecessary to connect the current measuring device temporarily, avoiding the problems of reliability and safety, effectively improving the high power laboratory test efficiency.

Key words: high power laboratory; current measurement; transformer short-circuit test; shunt; current transformer

0 引言

大容量试验站主要对开关类、变压器类等输变电一次设备进行高压大电流的试验, 试验电流从几十安培到上百千安培不等^[1-2], 如直

接试验的开关类产品试验电压涵盖 12 kV、24 kV、40.5 kV 及以上电压等级, 变压器类产品的试验电压涵盖 10 kV、20 kV、35 kV 及以上电压等级, 这就要求大容量试验站的测量设备能够满足各类输变电设备的不同电压等级、不

同试验电流参数的试验需求,同时要求相关试验参数的测量满足与产品相应标准的要求^[3-4]。图1为大容量试验的原理图,其中:S为试验电源(网络电源系统或者短路冲击发电机系统);MB为保护断路器,为试验电源回路的后备保护断路器;MS为合闸开关,用于试验过程中的选相合闸;L为试验回路调节阻抗器;QF为辅助断路器,用来分断变压器与试验电源回路;TP为试品变压器;I为测量电流装置,V为测量电压装置,输配电设备进行大容量试验需完整地记录电流、电压和持续时间等参数。

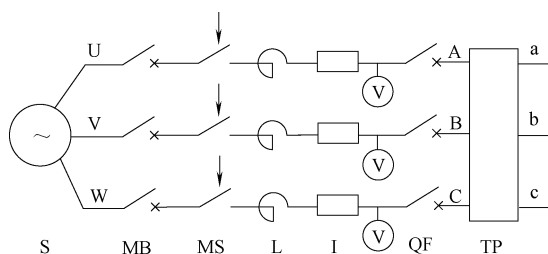


图1 大容量试验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of high power laboratory

大容量试验站通常由试验电源系统、电压转换系统、母线系统和若干试验小室组成,如图2所示。由于进行变压器突发短路、开关设备内部故障等试验过程中存在起火、爆炸等风险,大容量试验站通常将相关测量设备固定在试验回路中,与放置试品的试验小室实现物理隔离,避免试验过程因试品发生起火、爆炸等因素对测量设备造成破坏;同时考虑到经济性、便利性等因素,几个试验小室会共同使用同一组测量设备。

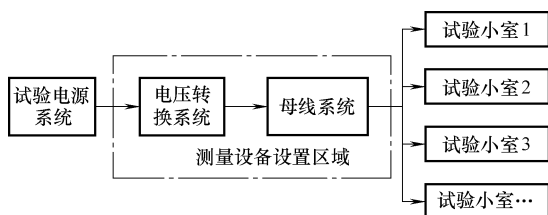


图2 大容量试验室配置图

Fig. 2 Configuration diagram of high power laboratory

试验室通常采用分流器、罗氏线圈和电流互感器进行电流测量,大部分输配电产品的试验项目均有在高电位测量电流的需要,因此三种测量装置都存在高电位测量的绝缘问题。单个分流器或罗氏线圈的电流测量范围大,覆盖从几十安培到上百千安培的试验电流测量,测量输出与实际电流值直接对应。但为满足大容量试验室几十安培到上百千安培的宽范围电流测量需求,采用分流器时需增加不同量程范围的分流器并连接到试验回路中,采用罗氏线圈时需要配置不同量程范围的罗氏线圈及配套的积分器。因此,采用分流器或罗氏线圈进行试验全范围电流测量的方案不仅成本较高,且分流器或罗氏线圈方案不能实现某些试验电流的测量,如无法直接或者转换测得三角形联结的变压器突发短路试验的绕组相电流。因此,确定三角形联结绕组相电流的另一种方法是将测量线电流的各电流互感器的二次绕组适当地相互连接^[5]。一定体积下的电流互感器量程范围相对较小,覆盖几十安培到几千安培,互感器二次侧可根据试品试验电流的测量需求进行一些测量转换^[6-7],同时互感器方案的造价低,因此以较高性价比弥补分流器或罗氏线圈的小电流测量范围。为满足不同产品试验的测量需求,试验站通常会临时布置测量设备及测量采集接线等,存在安全性与可靠性低等问题。

本文提出了一种适用于大容量试验站的电流测量方案,将分流器与互感器串联连接在同一试验回路中,仅通过通道转换实现宽范围的电流直接测量、三角形联结变压器的相电流转换测量等,提高大容量试验站运行效率。

1 电流测量方案

本文电流测量方案示意图如图3所示,由导体1、绝缘套管2、上横担3、下横担4、支架5、底架6、母线式电流互感器7、分流器8、支撑绝缘子9和连接母线10组成,其中上下横担与支架都采用铝合金型材。三台单相母

线式电流互感器分别套设在耐压等级为 52 kV 的绝缘套管上，通过绝缘套管实现母线式电流互感器与试验回路高电位的绝缘，母线式电流互感器固定在支架上，三相支架水平方向上通过上横担与下横担连接固定，竖直方向上，金属支架的底端固定连接安装在框型底架上。分流器通过支撑绝缘子实现对地绝缘与固定，绝缘套管中的导体通过连接母线与分流器电连接。当需要用罗氏线圈进行电流测量时，只需将罗氏线圈套在绝缘套管中间法兰位置实现罗氏线圈高电位测量电流时的绝缘问题。

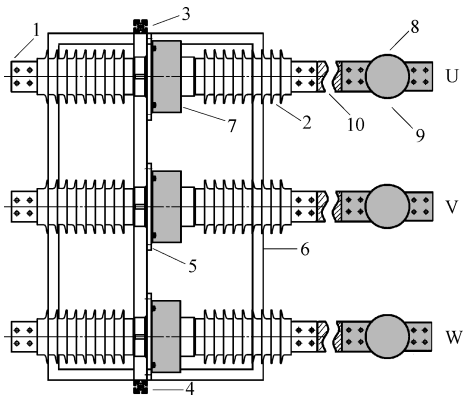


图 3 电流测量方案布置图

Fig. 3 Layout of current measurement scheme

- 1—导体 2—绝缘套管 3—上横担 4—下横担
5—支架 6—底架 7—母线式电流互感器
8—分流器 9—支撑绝缘子 10—连接母线

图 4 为对应电流测量方案的二次接线图。其中，D 为两工位转换开关；R 为精密采样电阻；a、b 和 c 为互感器对应的三个采样点；S 为分流器； a_1 、 b_1 和 c_1 为分流器对应的三个采样点。当试验电流较小时，可将转换开关置于“0”位置，a、b 和 c 三个采样点测得与一次侧三相 A、B 和 C 对应的电流值。当转换开关在“1”位置时，a、b 和 c 三个采样点通过采样电阻、互感器电流比及二次侧连接方式，可用于三角形联结变压器突发短路试验时的相电流的测量。当试验电流较大时，将数据采集通道由 a、b 和 c 转换到 a_1 、 b_1 和 c_1 ，实现由互感器测量电流转换到分流器测量。

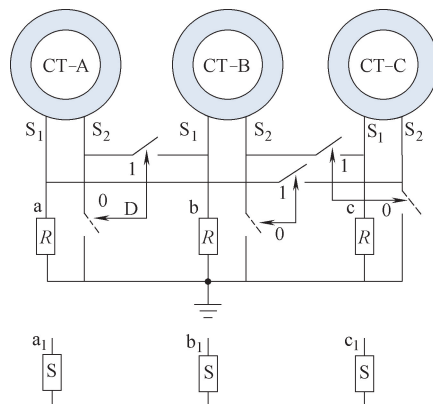


图 4 测量方案接线图

Fig. 4 Measurement scheme wiring diagram

断路器开断、变压器突发短路等试验，标准对试验电流都有非对称、峰值系数等方面的要求，因此互感器选型上要考虑以下几个因素：能准确地测量含较大直流分量的非对称电流；能够承受大于额定电流的短时峰值与短时耐受电流。本方案采用电流比为 5 000 A/1 A、0.2 s 级 TPY 型母线式互感器，峰值电流耐受为 250 kA，短时电流耐受为 100 kA/1 s。采用互感器与分流器在试验回路中串联布置的方案，当需要采用罗氏线圈测量时，可直接套在绝缘套管中间位置，解决高电位测量的耐压问题。该方案可实现测量通道的就近换接，满足大容量实验室直接试验中的几十安培到上百千安培的准确测量的需求，同时也解决了分流器与罗氏线圈对三角形联结变压器相电流不能测量的问题。

2 方案试验验证

为验证方案在上述工况的可行性，增加临时测量通道，同时采集分流器、互感器的电流，并在 Dyn11 配电变压器突发短路试验中，在变压器二次低压侧增加一路罗氏线圈（配套 10 kA 的积分器）的测量作为对比验证。

2.1 变压器突发短路电流测量验证

将转换开关置于“1”位置，进行变压器突发短路电流测量验证，变压器突发短路试验电流

测量示意图如图 5 所示。图 5 中，CT 为电流互感器；Shunt 为分流器；Coil 为罗氏线圈。

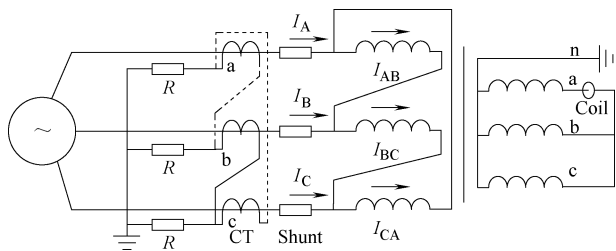


图 5 变压器突发短路试验接线图

Fig. 5 Wiring diagram of transformer sudden short circuit test

图 6 为实验室验证的变压器突发短路试验中的一次、二次电流波形。通道 1 为罗氏线圈测量的变压器二次侧 A 相绕组 I_{an} 电流，通道 2、3 和 4 为互感器测量的变压器一次侧三相绕组相电流 I_{AB} 、 I_{BC} 和 I_{CA} 。通过测量波形分析看出 I_{an} 与 I_{AB} 相位相同，两者关系为 $I_{an} = I_{AB}N$ ，其中 N 为试验变压器电压比的 $10 \text{ kV}/400 \text{ V}$ 。

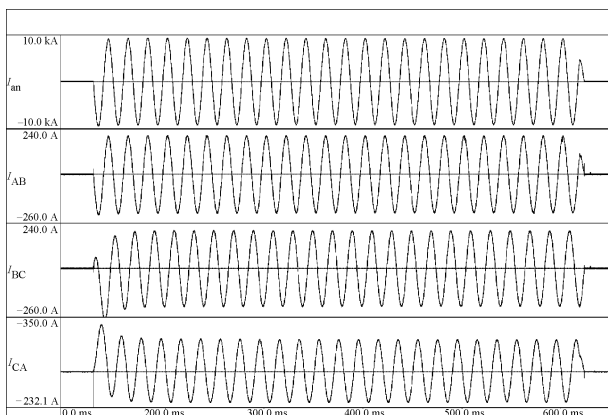


图 6 变压器突发短路一、二次电流波形

Fig. 6 Primary and secondary current of transformer

图 7 为实验室验证的变压器突发短路试验中的一次侧相电流、线电流波形。通道 1、2 和 3 为分流器测得的变压器一次侧线电流 I_A 、 I_B 、 I_C ，通道 4、5 和 6 为互感器测得的变压器一次侧绕组相电流 I_{AB} 、 I_{BC} 和 I_{CA} 。从线电流波形可以看出，辅助断路器的 A 相为首开相， I_A 首先过零，后开两相电流 I_B 、 I_C 大小相同方向相反，在辅助断路器后开两相同时分开后，

I_B 、 I_C 同时过零。由于变压器一次绕组为三角形联结方式，在辅助断路器 A 相首开后，变压器的三相绕组相电流仍然同时存在，且存在如下关系： $I_{AB} = I_{CA} = 0.5 |I_{BC}|$ ，即 A 相与 C 相绕组电流相位、幅值相同，与 B 相电流相位相反。在辅助断路器后开两相同时分开后，变压器三相电流同时为零。通过图 7 波形的对比，线电流与相电流不仅存在 $\sqrt{3}$ 倍的关系，同时存在与变压器联结相对应的相位差。相电流的转化测量是分流器与罗氏线圈不能实现的，采用电流互感器二次侧的转换测量可以实现三角形联结变压器的相电流测量。上述测量结果更加清晰地反映试验回路辅助断路器开断过程中的三相线电流、三相相电流的关系。

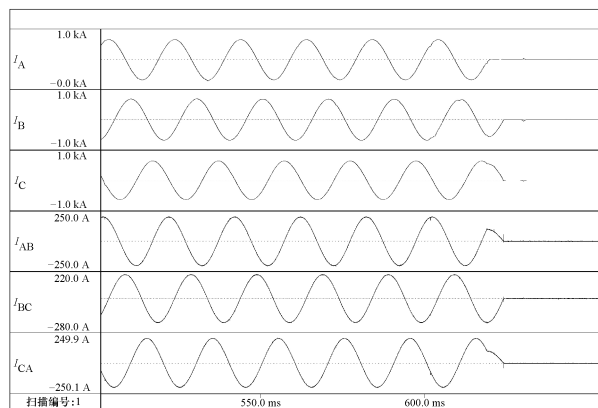


图 7 Dyn11 变压器突发短路试验一次侧线电流与相电流

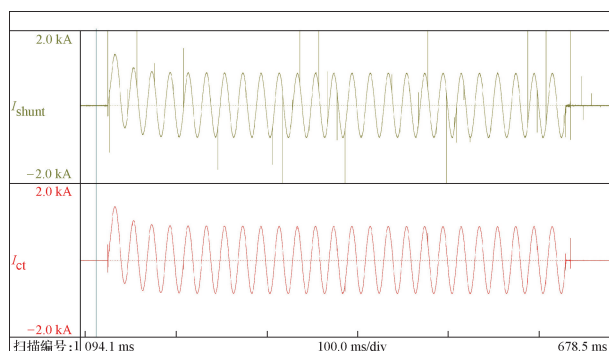
Fig. 7 Primary side line and phase current in short circuit test of Dyn11 transformer

图 6、图 7 的电流波形验证了电流互感器二次侧经过一定转换可对三角形联结绕组的变压器相电流进行准确测量。采用该电流测量方案可真实反映配电变压器试验过程中的相绕组电流，解决了用分流器和罗氏线圈不能测量配电变压器突发短路试验绕组相电流的问题。

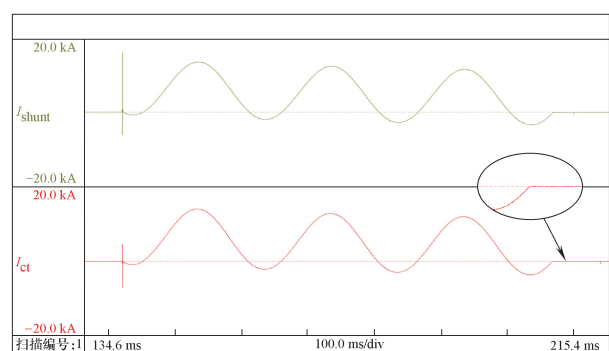
2.2 直接试验电流测量对比

转换开关置于“0”位置并进行直接电流测量对比。直接电流测量分别在有效值为 0.5 kA 、 5 kA 、 10 kA 和 20 kA 的四档试验电流下开展对比验证，且每档电流均含较大直流

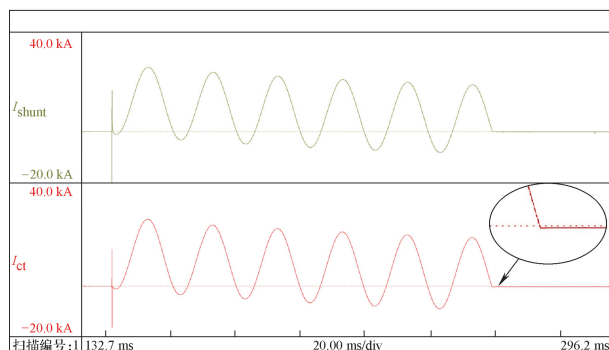
分量。如图8所示，通道1为分流器测量波形



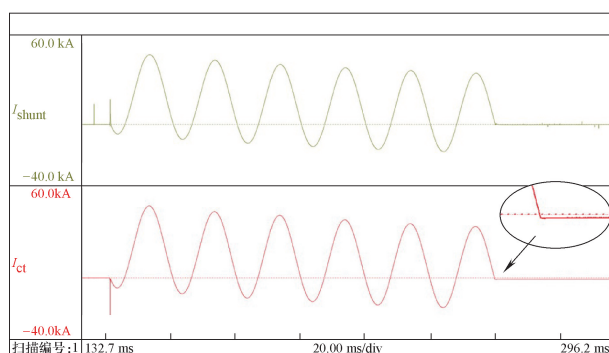
(a) 试验电流0.5 kA



(b) 试验电流5 kA



(c) 试验电流10 kA



(d) 试验电流20 kA

图8 不同电流下的测量对比

Fig. 8 Comparison of different currents

I_{shunt} ，通道2为互感器测量波形 I_{ct} 。

图8a为试验电流500 A电流波形，分流器参数160 kA对应输出4 V。当试验电流有效值为较低值500 A时，分流器输出到采集前端的电压仅为12.5 mV左右，仅为分流器额定参数的0.3%，测量准确度无法保证，且易受外部及空间的影响与干扰，如图中通道1中的分流器测量电流波形上的毛刺。图8d为试验电流为20 kA电流（峰值电流48 kA）波形，TPY型电流互感器具有抗饱和能力，但在过大的电流直流分流偏磁影响下，电流过零后的零线产生一定的偏移，零线偏移量达-0.85 kA。图8c试验电流为10 kA（峰值电流25 kA）电流波形，过零后的零线偏移量达-0.32 kA。

本文所述的电流测量方案中，试验电流50~5 000 A时可选用互感器进行电流测量；试验电流大于5 kA选用分流器进行电流测量；如采用罗氏线圈进行电流测量，只需将线圈套在绝缘套管的中间位置及搭配对应档位的积分器即可。在上述电流测量方案中只需简单切换测量采集前端的通道，即可满足不同试验方式及不同电流的测量，可有效提高大容量实验室的试验效率。

3 结束语

本文提出了一种适用于大容量试验站的电流测量方案，将分流器与互感器串联连接在同一试验回路中，仅通过通道转换实现宽范围的电流直接测量、三角形联结变压器的相电流转换测量等。通过试验，该方案可在现有几种固定参数的电流测量元件下，实现试验电流从几十安培到上百千安培范围内的电流准确测量，省去试验站配备多个电流等级的分流器、线圈，节省设备投资，也解决了临时布置电流测量设备的工作，避免测量设备临时接线存在的可靠性、安全性等问题，可有效提高大容量实验室的试验效率和保证测量结果的准确性，具有一定的推广与参考价值。**EA**

参考文献

- [1] 王安, 阎对丰, 崔东, 等. 大容量试验短时交流电流测量系统有效值的量值溯源和不确定度评定 [J]. 高压电器, 2014, 50 (4): 72-76.
- [2] 王安, 姚斯立, 阎对丰, 等. 新一代的大容量试验测量系统 [J]. 高压电器, 2012, 48 (6): 38-43.
- [3] 陈奎. 变压器短路试验方法及发展 [J]. 变压器, 2000, 37 (1): 49-53.
- [4] 陈奎. 大型变压器短路试验方法及四台变压器短路试验情况简介 [J]. 变压器, 1998, 35 (1): 12-16.
- [5] 电力变压器第 5 部分 承受短路的能力: GB 1094.5—2008 [S].
- [6] 何东升, 许呈盛, 刘光琪, 等. 电力变压器短路承受能力试验相电流精确测量方法 [J]. 电器与能效管理技术, 2018, 14 (7): 42-45.
- [7] 何东升, 林志力, 许呈盛, 等. 配电变压器突发短路试验中电流测试方法改进及应用 [J]. 电气应用, 2018, 21 (11): 50-53.

作者简介



汪海波

汪海波 (1983—) 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输配电设备大容量试验检测工作。

(收稿日期: 2021-04-14)

(上接 79 页)

- [12] 王贺, 潘奕捷, 王柏淞, 等. 多普勒展宽测温验证实验中的精确控温系统研究 [J]. 中国测试, 2020, 46 (8): 9-14.
- [13] 曾倩, 袁海文, 秦业. 报表自动生成及其在设备检测系统中的应用 [J]. 中国测试, 2010, 36 (1): 67-71.
- [14] 崔宗伟. 气缸低速摩擦力特性的研究及其建模与仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [15] 陈剑锋. 基于 LuGre 摩擦模型的气缸摩擦力实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [16] 马丽强, 李小靖, 闫杰, 等. SF₆ 密度继电器校验用的通用信号采集线的设计 [J]. 中小企业管理与科技, 2013 (1): 207-208.

作者简介



王文华

王文华 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力设备高压试验工作。

孟祥海 (1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力设备状态检测工作, 通信作者。

(收稿日期: 2021-02-26)