

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.019

一种新型低压断路器大电流试验设备*

张昊¹, 谢秋慧¹, 蔡春皓¹, 傅培刚^{1*}, 赵勇¹, 朱明磊²,
居洪泉¹, 吴非¹, 郑轮¹

(1. 上海出入境检验检疫局, 上海 200002; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对低压断路器大电流检测设备的功耗高和自动化水平低等方面的问题,对低压断路器相关检测标准和目前设备存在问题进行了归纳,提出了一种针对低压断路器新型大电流试验设备。在对新型设备的结构进行简述的基础上,分析了设备中气缸压力和接触电阻之间的关系,得出了设备在保证材料寿命的条件能够减小测试功耗的结论。对设备中的电流回路的结构进行研究,得出了设备特殊结构有利于提高测试电压和优化设备中变压器设计的结论。对设备运行方式进行了总结,提出了一种基于该设备的自动化流水线方案。利用新型样机对低压断路器进行过流检测试验。研究表明,该设备有效降低测试功耗,新型设备在满足测试要求的基础上具有小体积、低功耗和高自动化水平的效果。

关键词: 低压断路器过流检测; 设备机械结构; 测试功耗

中图分类号: TM561; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)04-0476-07

Novel large current test equipment for low voltage circuit breakers

ZHANG Hao¹, XIE Qiu-hui¹, CAI Chun-hao¹, FU Pei-gang¹, ZHAO Yong¹, ZHU Ming-lei²,
JUN Hong-quan¹, WU Fei¹, ZHENG Lun¹

(1. Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200002, China

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems of high power consumption and low automation level in the traditional equipments measuring low voltage circuit breakers, the related testing standards and the existing problems of the traditional equipments were summarized, and a novel machinery structure of current detection equipments for low voltage circuit breakers was investigated. Based on a brief introduction to the proposed equipment structure, the relationship between the cylinder pressure and the contact resistance was analyzed, and the conclusion was obtained that the power consumption of the equipment was reduced with its long material life. Based on the research on the path of the current loop in the proposed equipment, the conclusion was obtained that the test voltage was improved and the design of the transformer in the equipment was optimized because of its special structure. Based on the summary of the operation mode, a new automated assembly line project based on this device was presented. The over current characteristics of low voltage circuit breakers were tested by the proposed equipment. The research results indicate that the power consumption of the proposed equipment is lower than the traditional ones. The proposed equipment has characteristics of small size, low power consumption and high automation level on the condition of meeting the test requirements.

Key words: low voltage circuit breaker overcurrent detection; equipment mechanical structure; test power consumption

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家质检总局科技计划资助项目(2014K190)

作者简介: 张昊(1982-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事进出口机电产品检验监管研究. E-mail: zhangh@shciq.gov.cn

通信联系人: 傅培刚, 男, 研究员. E-mail: fupg@shciq.gov.cn

0 引言

低压断路器是指主触头接入额定电压不超过交流 1 000 V 或者直流 1 500 V 的断路器产品。低压断路器非常重要性能就是分断过载或者短路电流,测试低压断路器分断特性需要对被测试产品施加规定值的电流。低压断路器大电流试验设备就是为了满足这一类的检测需求。

本研究首先总结低压断路器产品的国家标准相关规定,明确大电流检测设备在低压断路器检测工作中的适用范围和重要性,简述行业检测设备的基本原理和存在问题。在此基础上,本研究提出一种低压断路器大电流检测设备的结构和技术方案,这种方案可以实现低功耗、高精度和高可靠性的检测效果。该设备可以满足检验单位和企业两方面检测工作的实际需求,提高行业检测装备技术水平。

1 检测技术现状

1.1 国家和企业检测标准

国家质检总局针对低压断路器产品主要制定了以下一些标准:国家标准 GB 14048.1 是低压开关设备和控制设备的标准总则,国家标准 GB 14048.2 是针对低压断路器制定的产品标准,该标准是在国家标准 GB 14048.1 的基础上,根据低压断路器产品的种类和规格规定了针对低压断路器产品所适用的检测的试验类型,方法和合格标准。国家标准 GB 17701—2008 是针对设备内的断路器制定的检测标准。另外在家用领域的低压断路器领域的国家标准相对数量比较多,这里不一一列举。

针对断路器的温升试验、短延时特性、长延时特性、机械特性和瞬时特性的 5 项试验,不仅是产品相关质检机构重要的试验项目,而且是每个产品出厂时必须的实验项目。这 5 个试验项目都是需要对被测试产品施加规定的测试电流。经过课题组的调研,目前在国内主要低压断路器生产企业工厂上述 5 项试验中,其中长延时试验、温升试验是由一台设备完成,而其他 3 个试验分别由专门的试验台架完成。在企业的实际工序中,短延时试验每次试验时间通常为几分钟,而一个低压断路器产品通常需要进行多次短延时试验,不断的调整产品设置,才能获得合格的产品性能。长延时试验和温升试验,每个开关都需要进行数个小时,电流在 1~1.3 倍额定电流。测试设备的能耗是低压断路器生产企业的主要能耗。根据项目组的调研结果,

一个断路器的测试能耗要占到产品成本的 3%~5%,而某些大规格的低压断路器的测试能耗甚至占到产品成本的 8%~10%。降低设备测试功耗有利于降低产品成本,提高产品市场竞争力。

1.2 基本测试原理

此类设备中的电气部分是向被测试断路器提供稳定的测试电流,这就需要一个恒流测试装置。在短延时和长延时试验中,当被测试断路器被通过规定的电流值时(1~2 倍额定电流),不同电流规格产品的测试电压都是在 0.5 V~2 V 之间变化。大型低压断路器测试电源二次侧电流非常高,而测试电压非常低。因此行业普遍采用基于降压变压器的方案。该方案是将常压交流电源的几百伏电压通过变压器转换成次级几伏的输出电压,输出电流也就从几十 A 转换为上千 A。

除了降压变压器以外,检测设备电气部分中还包括一个常压交流电源和电流互感器两个主要部件,其中电流互感器是将电流采样信号送到常压电源的控制器,形成反馈回路。常压交流电源主要有两种不同技术方案。早期的一种可调电源方案是采用步进电机带动自耦式调压器^[1]。近几年随着电源零部件成本的不断下降,出现了一种基于交流数控电源的测试方案^[2-5],设备电气主回路结构如图 1 所示。

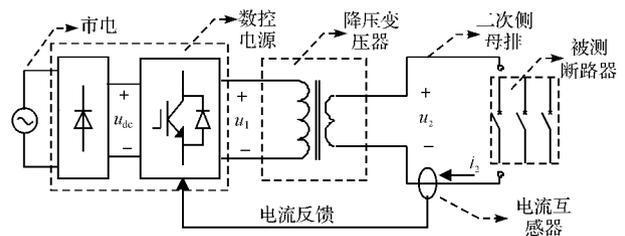


图 1 设备电气主回路结构

根据调研结果,这种测试方案在 2013 年开始在行业内大面积推广,目前国内大部分规模生产企业已经完成以电子式数控电源替代调压器电源的技术改造^[6]。

设备测试过程中,测试电流的精度存在两大干扰因素—温度和电网电压。测试过程中,被测产品的温度会不断上升,其温度的变化会引起测试回路电阻上升,需要电源不断的提高输出电压用来稳定电流。变压器的输入电压来自于电网,当电网电压出现严重的波动时,数控电源内部的直流母线电压 u_{dc} 会出现相应的波动。如果数控电源采用开环的控制方式,那么变压器输出输入电压 u_1 和 u_2 会出现同样的波动,测试电流 i_2 也会出现波动,降低了检测精度。因此,数控电源内部设计有一个反馈控制系统,根据电流 i_2 的反

馈值实时调整电源逆变部分的输出电压 u_1 的值。设备中电源调节输出电压 u_1 的控制频率远高于被测产品温度变化和电网电压变化的速度,可以保证设备输出电流的精度。

1.3 目前存在问题

早期此类设备是采用电缆或者导条将测试电源(降压变压器的二次侧)与被测产品连接在一起,电缆接头与被测试产品接线端子用产品自带的螺丝旋紧实现可靠接触。目前行业内主流的设备机械方面是采用大电流测试夹具的方案,这种设备需要测试人员将被测试产品安装到夹具上就可以由夹具进行自动压接。

大电流测试夹具是一种依靠气动元件实现自动压紧的导体结构。基于大电流测试夹具的设备如图 2 所示。

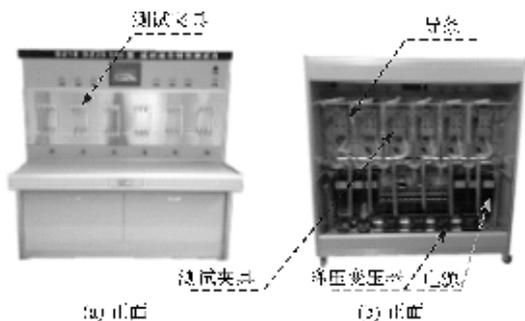


图 2 基于大电流测试夹具的设备

夹具在设备中的安装位置需要考虑工人操作的方便,通常被安装于设备的上部;而设备中的测试电源(包括变压器)体积大重量重,通常被安装于设备的底部。因此现有设备中夹具与测试电源相对位置都比较远,这样就需要用长导条和柔性电缆将测试电源母排(即降压变压器出线母排)与夹具中的导体部分进行连接。现有的设备中,长导条的设计使得整个测试回路的导体长度超过 2.5 m,增大了测试设备的内阻,也提高了测试功耗。综上所述,设备的功耗问题在目前的测试方案中是很难解决的。另一方面,这种测试方法的属于半自动化生产设备,还不能设计成为全自动化生产线。

2 新型设备机械结构

2.1 结构简述

本研究所提出的大电流检测设备的机械结构如图 3、图 4 所示,主要针对 800 A 以上低压断路器产品。需要补充说明的是以下文中括号内的数字为零件编号。

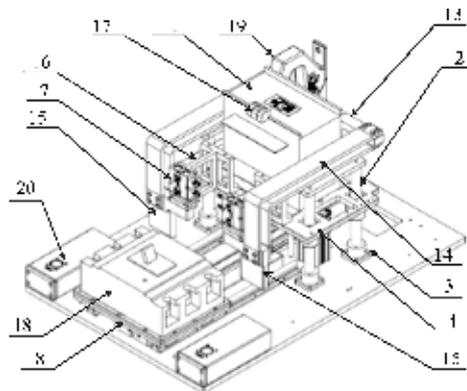


图 3 设备等轴视图

对应于图 3 和图 4,被测试断路器(18)上放置在水平滑台(8)上,水平滑台由四个滑块(9)安装在两根导轨(10)上,水平滑台(8)底部有卡扣与定位电缸(11)的活塞杆连接,水平滑台(8)由定位电缸(11)推动沿水平方向运动。根据被测试断路器(18)的三相母排的不同位置尺寸,定位电缸设计有 4 个定位点,可以对三相母排分别进行测试。

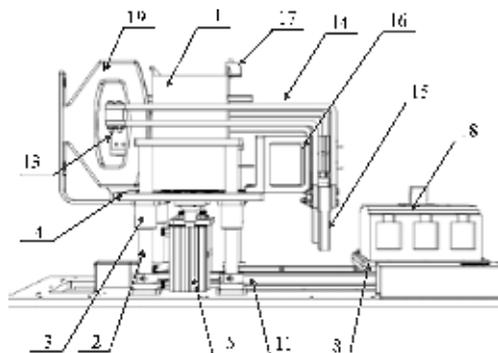


图 4 设备左侧视图

降压变压器(1)安装于升降平台(4)上,变压器两个出线母排(12)分别连接一个 L 型铜块 A(13)的一端,两个铜块 A(13)的另一端分别连接一根具有弹性的叠片式母排(14),母排(14)为两根并联的 L 型导体结构。两根母排的另一端分别连接有一个 L 型铜块 B(15),两个铜块 B(15)的底部水平中心距等于被测试断路器同一相接线母排的中心距。升降平台(4)底部有 4 个导套(3)分别固定在 4 根导柱(2)上并且可以由主汽缸(5)推动着上下运动。降压变压器(1)、升降平台(4)和大电流回路母排连接在一起(下节图 6 所示的部分),当主汽缸(5)推动升降平台(4)时图 6 中几部分保持联动关系。两个 L 型铜块 B(15)上分别安装有一个压紧汽缸(7),两个压紧汽缸(7)分别通过一块角铁(16)固定在升降平台(4)上。数控电源输出线与降压变压器一次侧接线端子(17)相连;降压变压器二次侧出线母排(12)与 L 型铜块 A 连接处安装有一

个电流互感器(19),电流互感器(19)二次侧出线连接到数控电源的反馈信号输入端。

该设备工作过程如下:操作人员将被测试断路器产品放置在水平滑台上的条件下,同时双手按下两个启动按钮(20),启动测试过程。机台内部的 PLC 会首先控制配合电磁阀(6),驱动定位气缸(11)将水平滑台(8)定位到预先设定的位置,使得产品的某一相母排在垂直方向分别与两个 L 型铜块 B(15)对齐。在水平滑台运动到位停止的情况下,主气缸(5)下压,主气缸(5)下压完成后在控制两个压紧气缸(7)下压,使得两个 L 型铜块 B(15)分别与一个断路器接线母排连接,完成压接过程。PLC 会通过通讯总线启动检测电源,试验完成后控制主气缸(5)和两个压紧气缸(7)上升,主气缸(5)运动到位并停止后控制定位气缸(11)将水平滑台(8)推到起始位置,结束测试过程。

2.2 气缸压力与接触电阻

L 型铜块 B(15)与被测产品的母排之间需要有足够的压力才能减小接触电阻。理论上,接触电阻 R_s 是由收缩电阻 R_m 和表面膜电阻 R_j 之和。收缩电阻是指当电流在流经接触面区域时,从原来截面较大的导体突然转入截面很小的接触点,电流发生剧烈收缩现象所引起的电阻效应;表面膜电阻是由于两个导体接触表面氧化膜层及其他污染物所引起的电阻。此外,实际通过低电阻测试仪测量接触面的接触电阻时,都是在接触点的引出端进行的。因此实际测得的接触电阻还包含接触表面以外接触件和引出导线本身的附加导体电阻 R_c 。接触电阻可以分为收缩电阻 R_m 和表面膜电阻 R_j ,此外实际测量过程中还包括一部分母排的导体电阻 R_c ,如下式所示:

$$R_s = R_m + R_j + R_c \quad (1)$$

工程中用来解析接触电阻的公式如下式所示:

$$R_j = \frac{K}{F^m} \quad (2)$$

式中:K—根据接触面的形状、面积和污损程度决定的一个常数; m —与材料有关的一个参数,铜材料的 m 一般在 0.7 ~ 0.8。

式(2)表明,表面膜电阻 R_j 随着压力 F 的增大不断减小。

当压力 F 超过一定数值之后,表面膜电阻 R_j 在 R_s 中所占的比例就非常小了。

根据实验的结果,在一定的压强范围内,接触电阻 R_s 随压力 F 的增加先是快速下降。当压强超过一定数值时, R_s 的值趋于稳定,即表面电阻测试值和压强的曲线是具有拐点。通过实验发现,L 型铜块 B(15)与

被测产品的母排之间压力需要被设计在 120 N 以上,才能充分减小回路中的接触电阻。通过减小接触电阻和传导电阻,不仅可以降低测试功耗,而且可以降低相同测试电流条件下所需的测试电压。在设备中一次侧数控电源的电压输出能力有限的条件下,较小的设备内阻可以使得设备具有更大的电流输出能力。设备在运行过程中测试电流精度要经受电网电压波动和导体温升两方面的干扰,设备本身更强的电流输出能力使得测试电流精度在整个测试过程中得到保证。

2.3 形变材料应力

L 型铜块 B(15)与被测产品的母排之间需要有足够的压力,这就需要测试主回路有导体能够发生形变位移,而发生明显形变的零部件就是图 3 中的层叠式母排(14)。形变施加在层叠式母排上的张力不能使得材料出现断裂。这方面分析形变材料寿命内容的属于材料力学的范畴^[7]。

层叠式母排材料应力分析结果如图 5 所示。

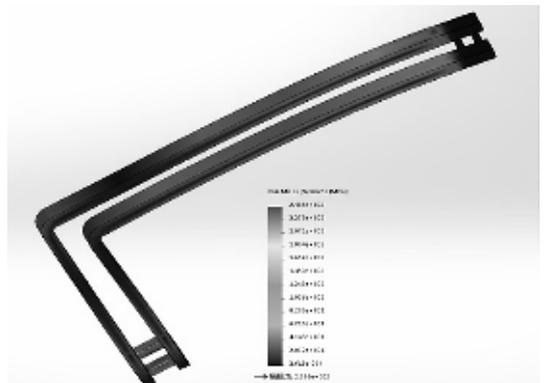


图5 层叠式母排材料应力分析结果

材料受到挤压或者拉伸引起的形变,等效为材料内部张力,材料内部的张力可以分解为 9 个方向的向量。VonMises 应力是基于剪切方向应变能的一种等效应力,是遵循材料力学第四强度理论(形状改变比能理论)。它用应力等值线来表示模型内部的应力分布情况,可以清晰描述出一种外因在整个模型中引起的变化,从而使分析人员可以快速的确定零部件模型中的最容易出现断裂的区域。ANSYS 或者 Solidworks 等有限元仿真软件都可以分析形变材料中的 Von Mises 等效应力。

本研究采用 Solidworks 软件自带有限元分析插件对层叠式母排进行仿真分析。仿真作了以下假设:以母排与 L 型铜块 A 的相连的一端为固定支点,母排的另一端施加了 397 N 的拉力,发生了 20 mm 的位移。其中 397 N 的拉力是气缸在 0.8 MPa 气压下的最大推力,20 mm 的位移远大于实际设备中的 3 mm ~ 5 mm。

这样的仿真参数设计也是为了保证设备安全性和寿命的方面有足够的裕量。从仿真的结果来看,最大 Von Mises 应力出现在叠片式母排(14)与 L 型铜块 A(13)的连接处,最大值为 248 N/mm^2 。在 20 mm 的形变位移条件下,最大 Von Mises 应力小于叠片式母排的张力强度的极限 255 N/mm^2 。在位移量小于 5 mm 的情况下,Von Mises 应力远小于该零件的张力强度。因此层叠式母排(14)可以承受长时间的反复形变位移,保证了设备寿命。

3 设备电气性能分析

将设备测试状态下测试电流流过的元件单独画出的结果如图 6 所示。

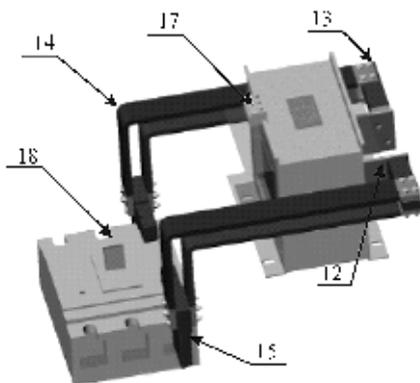


图 6 测试状态下大电流回路部分元件

变压器二次侧电路的回路结构与传统设备有很大的区别。传统设备的中变压器出线母排直接向上连接夹具,而设备的出线母排首先环绕变压器另外两个铁柱如图 6 所示,这就改变了变压器的输出电压。

如果降压变压器的二次侧电流超过 1000 A ,那么二次侧母排的截面积就会比较大,母排通常采用一块完整母排经过 2 次弯折构成的,其等效匝数约为 $3/4$ 匝。为了给产品提供足够的测试电压,变压器每一匝线圈的感应电压就要被设计得足够大。这就造成变压器铁芯截面积变大,不利于变压器结构的优化,造成变压器体积变大和成本提高。本研究所推荐的测试压机机械结构可以将施加在被测试断路器两端电压提高为变压器输出电压的两倍。这一点在工程中具有很高的应用价值,它可以保证变压器优化设计的基础上提高变压器输出电压范围。

本研究推荐的设备结构,其二次侧回路母排从变压器输出端开始,首先通过两组相同的 L 型铜块 A 和导条分别包围了变压器 EE 型铁芯的左、右两个铁柱。设备中变压器铁心的横截面如图 7 所示。

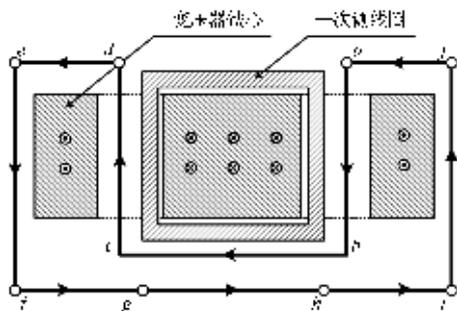


图 7 变压器铁心截面磁场方向及电流回路

图 7 中标出来各个铁柱中磁场的方向。其中,流过母排 $a-b-c-d$ 的电流所产生的另一半磁密经过左侧铁柱与母排 $d-e-f-g$ 交链,而另一半磁密经过右侧铁柱与母排 $h-i-j-a$ 交链。图 7 中, $g \sim h$ 是流过低压断路器产品,这部分电流回路产生的磁场不会交链到变压器铁芯中属于漏磁部分。因变压器二次侧母排产生的主磁密是由回路中 3 部分母排构成的,其中母排 $a-b-c-d$ 中磁密一分为二穿过了另外两部分母排,母排 $h-i-j-a$ 和母排 $d-e-f-g$ 折算匝数时只能分别等效为 $3/8$ 匝,整个二次侧回路等效匝数为 $3/2$ 匝。采用同样规格的变压器,本研究推荐的设计相比图 2 中传统结构,变压器二次侧的输出电压要提高 1 倍,这就更有利于优化变压器设计,降低变压器自身的损耗。产品测试过程中主要的损耗来自于测试电缆或者母排,而这一部分电能主要消耗在电缆或者母排的导体电阻。导体电阻和导体长度成线性正比例关系,本研究推荐的设备中导体长度为传统设备导体长度的 $20\% \sim 30\%$,因此大大减小了测试功耗。

4 设备自动化方案

低压断路器的全自动检测生产线对于行业有着重要的意义,已经有这方面的研究^[8-12]。基于测试夹具的设备生产线是很难提高自动化水平,无法实现全自动化生产。不同于目前的设备,基于本研究推荐的这种电流检测设备可以构成针对低压断路器的全自动生产线。

自动测试流水线方案图如图 8 所示。

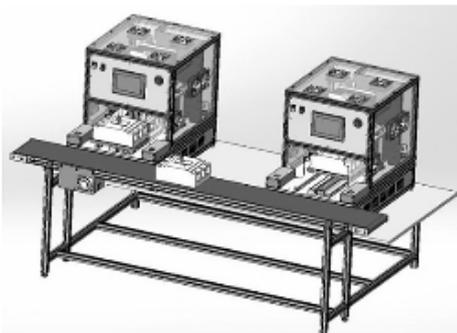


图 8 自动测试流水线方案图

一条低压断路器自动化流水线由多个设备构成,每个设备也可以被称为一个检测站位。低压断路器产品在全自动生产线上流动,当产线上某个设备处于空闲状态时,产品会被推入设备中的水平滑台中,水平滑台在设备内水平运动机构的驱动下进入机台内部,实施定位压接。测试的过程中会对产品进行扫码,测试结束后结果会通过网络存储在服务器上。产品出站后会在流水线终端进行二次扫码,判断产品是否合格,未被检测的产品会再次进入流水线。上述自动化流水线是基于测试设备的特殊设计结构,能够减免人工安装被测产品的流程。检测产线的产能可以由产线上设备的数量任意调配,而产线也不会因为一两个设备的故障而出现停产的情况。

5 样机及实验结果

笔者按照本研究第2节的机械结构设计了一套低压断路器大电流测试台,其最大输出电流为2 000 A,实物如图9所示。

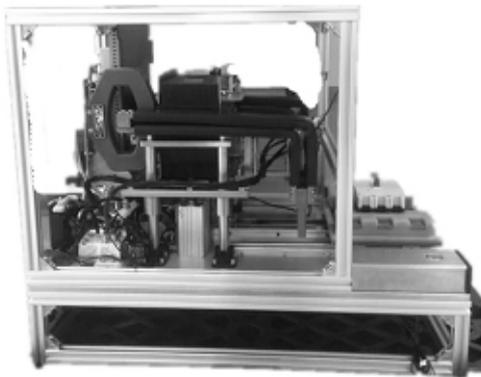


图9 低压断路器大电流测试台实物图

该试验台水平方向采用大推力伺服电缸,电缸定位精度为0.02 mm,最大速度为2 m/s,最大可以推动60 kg的重物。垂直方向采用两个大气缸推动变压器上升,垂直下压过程依靠变压器的自身60 kg重量将大气缸中的气体;垂直方向的压紧气缸选用双轴气缸,在缸内气压达到0.6 MPa的条件下压力可以达到377 N,这个压力足够可以使得L型铜块B与断路器之间的接触电阻减小“拐点”以下。

本研究采用图9的设备对规格为400 V、800 A的三相低压断路器产品进行检测,将被测试的产品安放在水平滑台上,按下启动按钮,设备就开始进行自动测试流程。设备输出电流 i_2 波形(变压器二次侧输出电流)如图10所示。电流有效值为1 600 A(被测试产品的2倍额定电流)。

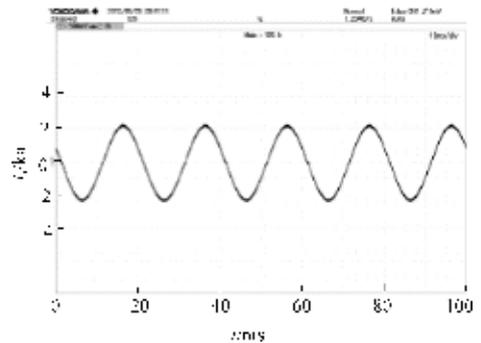


图10 测试电流波形

本研究根据一次侧电源,测试功率。对额定800 A的低压断路器产品最大需要1 600 A的测试电流,以满足短延时测试的需求。按照这类恒流源产品的设计规格,满足上述测试要求的电流源的输出功率会被设计在4 kW以上,实际输出功率会在3 kW左右。在1 600 A的测试试验中降压变压器一次侧的电流 i_1 和电压 u_1 的有效值分别是7.1 A和152 V,变压器一次侧输入功率为1.08 kW。相比传统设备,在1 600 A测试电流的条件下本设备的测试功率降低了60%,达到了减小测试损耗的目的。另一方面设备体积更小,更容易在质检单位推广。

6 结束语

本研究首先分析行业内大电流检测设备的技术发展现状,从电气原理的角度阐述设备控制测试电流基本原理,并从机械角度指出现有设备存在高功耗和自动化程度低的问题。本研究推荐一种新型一体化的装置结构,使得大电流试验中的电流回路长度变短,降低了大电流试验的设备功耗,并且能够提高企业自动化生产水平。笔者从减小接触电阻的角度,探讨了设备在压接过程中气缸所需释放的压力。在课题组搭建的试验样机的基础上,本研究对额定800 A的低压断路器产品进行测试,结果显示新型设备的测试功耗减少60%以上。

本研究所所述的设备体积小,功耗低,压接过程自动化水平高,易于在自动化生产线中进行推广,同时也易于在场地有限的检测机构等单位推广。

参考文献(References):

- [1] 邓本再,谢玉梅. 断路器延时校验用程控恒流装置[J]. 工业仪表与自动化装置,1997,27(4):40-42.
- [2] 张 昊,谢秋慧,蔡春皓,等. 一种新型低压断路器过流检测方案[J]. 机电工程,2015,32(2):285-289.
- [3] 金良盛,郑于海. 大电流恒流源系统的设计与实现[J]. 机

- 电工程,2013,30(9):1127-1132.
- [4] 叶 鹏,朱翔鸥,陈仕荣. 小型断路器测试专用恒流源 [P]. 中国:CN203054024U,2013-07-10.
- [5] 杨万生,杨良瑞,牛 萦,等. 断路器大电流特性试验供电系统[J]. 电气技术,2012(6):32-36.
- [6] 王铁镰,徐卫生,张远矩. 数字式全自动塑壳断路器保护特性检测台[J]. 低压电器,2007(17):45-47.
- [7] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [8] 李春海,伍萍辉,曾 成,等. 塑壳断路器延时特性自动检测系统[J]. 电子设计工程,2011,19(24):133-135.
- [9] 邵斌. 新颖的开关电器自动检测生产线[J]. 低压电器,2010(22):38-42.
- [10] 于二团. 塑料外壳式断路器检测生产线中的自动化技术[J]. 电气时代,2009,29(10):108-109.
- [11] 陆青峰. 基于 PLC 的万能式断路器大电流检测系统实现[J]. 低压电器,2010(4):43-48.
- [12] 许广龙,曾成,杨磊等. 万能式断路器大电流试验自动测试系统[J]. 低压电器,2010(5):24-26.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张 昊,谢秋慧,蔡春皓,等. 一种新型低压断路器大电流试验设备[J]. 机电工程,2016,33(4):476-482.

ZHANG Hao, XIE Qiu-hui, CAI Chun-hao, et al. Novel large current test equipment for low voltage circuit breakers[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):476-482.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 463 页)

- [7] PERPINIAS, I. I.; PAPANIKOLAOU, N. P.; TATAKIS, E. C. Applying fault ride through capability to single phase grid connected PV systems[C]//Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015 17th European Conference. Geneva:IEEE,2015:1-10.
- [8] EL MOURSI M S, WEIDONG X, KIRTLEY J L. Fault ride through capability for grid interfacing large scale PV power plants[J]. **Generation, Transmission & Distribution, IET**,2013,7(9):1027-1036.
- [9] RODRIGUEZ P, TIMBUS A V. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2007,54(5):2583-2592.
- [10] XIAOQIANG, ZHANG G X, WANG B C, et al. Asymmetrical Grid Fault Ride-Through Strategy of Three-Phase Grid-Connected Inverter Considering Network Impedance Impact in Low-Voltage Grid[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2014,29(3):1064-1068
- [11] 施向前,耿乙文,黄尊臣,等. 光伏电站低电压穿越技术研究[J]. 电测与仪表,2015,52(8):61-66.
- [12] 漆汉宏,王晓娜,魏艳君,等. 消除有功振荡的改进低电压穿越方法[J]. 电工技术学报,2014,29(S1):416-423.
- [13] 国家标准化工作委员会. GB/T 19964—2012,光伏电站接入电力系统技术规范[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [14] 孔祥平,张 哲,尹项根,等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):65-74.
- [15] 翦志强,司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14):1-5.

[编辑:张 豪]