

大电流恒流源系统的设计与实现^{*}

金良盛¹, 郑于海^{2*}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江省机电
设计研究院有限公司 计算机所, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对断路器检测试验中对大电流恒流源系统的特殊要求,并为了能更准确、更方便、更可靠地检测断路器的使用性能,设计了一种基于多磁路变压器和 PLC 控制的大电流恒流源系统。该系统通过控制多磁路变压器输入端磁路的投入,使输出端获得全程分级连续可调的电压;系统采用反馈控制,通过电流互感器和 PLC,输出电流和目标电流作负反馈比较,实现了“输出电流无限接近于目标电流且保持稳定”,控制过程分为调零、内阻测量、多磁路投入、调压和稳流;根据系统的反馈控制策略,设计了三菱 PLC 的控制梯形图和上位机的软件程序;通过分别控制输入电压和试验内阻的变化,测试了系统的稳流性能。研究表明,该大电流恒流源系统使用界面友好方便、性能可靠、响应快、精度高。

关键词:多磁路;变压器;恒流源;PLC

中图分类号:TP24;TM44

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1127-06

Design and application of constant current source system

JIN Liang-sheng¹, ZHENG Yu-hai²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;
2. Computer Department, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the special requirements of the constant current source for circuit breaker testing, and in order to detect the circuit breaker more accurately, more conveniently and more reliably, a system was designed based on the multi-magnetic transformer and PLC control. The magnetic circuit input of the multi-magnetic transformer was controlled for getting continuously adjustable voltage. A feedback control was used in the system, and through the current transformer and the PLC, the output current and the target current were compared and made infinitely close, and the control process was divided into zero adjustment, resistance measurement, multiple magnetic circuit input, voltage adjustment and current stability. According to the feedback control system, the control ladder diagram of Mitsubishi PLC and PC software program was designed. By controlling input voltage and resistance, the performance of currency stability was tested for the system. The results indicate that the system is reliable, fast response and high accuracy and the interface of the system is friendly and convenient.

Key words: multi-magnetic; transformer; constant current source; PLC

0 引 言

塑壳断路器是一种广泛应用于国民经济各个部门的低压电器元件,当电器线路或用电设备发生超载、短路等故障时,其脱扣器应能及时动作将电路切断,当电

气线路或用电设备处于正常状态时,其脱扣器不应误动作保证电路接通^[1]。调查发现断路器运行中的故障 70% 是机械方面的原因,19% 是辅助电路和控制电路上的电故障,8.3% 是绝缘问题引起的故障^[2]。因此,需要对它进行可靠性试验:操作可靠性、瞬动保护

收稿日期:2012-11-16

基金项目:浙江工业大学研究生创新基金资助项目(CXJJ201308)

作者简介:金良盛(1988-),男,浙江桐庐人,主要从事电机一体化方面的研究. E-mail:jinliang3515@163.com

通信联系人:郑于海,男,高级工程师. E-mail:32908745@126.com

可靠性和过载保护可靠性^[3]。在断路器可靠性试验过程中,需要对试品施加一定的试验电流。

早期的断路器试验大电流主要通过调压器与大电流变压器的组合、晶闸管调压和磁性调压等几种模式获得。对于大功率调节系统,采用调压器时存在造价高、压降大、过载能力低和体积庞大等问题,其他两种方式存在导致系统谐波产生和干扰电网等问题,往往需要手动调节试验电流,不仅费时费力,而且自动化程度和测试精度也不高^[4]。由于发电机系统具有独立性强、利用率高、试验电压等参数易于调节及可改变频率等特点,国外试验室大都采用冲击发电机作为试验电源,有的同时还引入电网。荷兰 KEMA 试验站的低压电器实验室的分断能力为 6 00 V/200 kA,德国 K-M 公司试验站的低压电器试验室的分断能力为 400 kA^[5]。国外学者倾向于断路器现场故障诊断系统的研究,Polycarpou 等^[6]利用非破坏性振动诊断技术来验证断路器的机械条件,此外国外学者还致力于研究各种应用仿真软件,用来帮助监测和提高断路器的可靠性^[7-8]。

20 世纪 80 年代,上海电气科学研究所^[9]研制推出了一种名为多磁路调压变压器的新型大功率调压系统,能够适应电气设备强电流测试需要。随着多磁路变压器技术的发展,断路器的可靠性试验逐步形成以多磁路变压器为核心的控制试验模式。李践飞等^[10]开发了一个以工控机和 PLC 为控制核心,由多磁路变压器和电动调压器产生大电流的断路器测试系统,检测电流精度达到 $\pm 1\%$,试验电流精度达到 $\pm 5\%$ 。石建国^[11]将图形化编程软件 LabVIEW 和工控机结合起来,采用虚拟仪器的思想和二次调流方式设计了大电流检测系统,检测效果和效率都较好。

针对断路器试验对大电流恒流源的需求和传统大电流恒流源系统的不足,本研究设计基于多磁路变压器和 PLC 控制的交直流恒流源系统,采用负反馈控制多磁路变压器磁路的投入,该系统实现输出一定范围内连续可调的电压,进而输出稳定电流。

1 系统介绍和技术要求

该系统采用工控机和 PLC 的控制方式,以多磁路变压器配合电动调压器输出所需的试验电流,能够根据断路器测试要求输出 0~1 000 A 的大电流。系统通过良好的人机界面实时监控试验过程,系统主要技术要求如下:

(1)能够自动调节多磁路变压器的输出电流,在

输入电压变化和断路器内阻变化的情况下具有自动修正功能,输出电流的精度达到 0.9%;

(2)通过人机界面能够对测试过程进行实时监控,输出试验的测试结果;

(3)系统发生故障时,自动判断故障发生的部位,并提示用户做出相应的判断。

2 多磁路变压器原理

多磁路变压器如图 1 所示,本体由两个 1/6 输出的小磁路和两个 1/3 输出的大磁路共 4 个等同互感磁体构成,通过在输入端有选择地控制各磁路的投入,可以使输出端电压以 1: 2: 3: 4: 5: 6 的级数递增。然后,在产生 1/6 输出的磁路中接入一个同等容量的调压器,以便在每一个级差范围内进行五级连续调压,进而获得全程分级连续可调的效果^[12]。



图 1 多磁路变压器

多磁路调压变压器的优点:用相当于常规调压系统 1/6 容量的调压器就可以获得相同的调压效果,同时因 1/6 衰减作用使电压电流调整过程的稳定性大为提高,且具有使电磁应力和热效应的分散作用,特别适用于强电流大功率的工作系统。

3 试验电流稳定的影响因素

在断路器的可靠性检测中,需要精确且较为稳定的电流。影响检测电流稳定的因素有:

(1)市网电压的波动。多磁路变压器系统的输入为市网电压,输入电压的波动引起多磁路变压器输出电压的波动,从而影响试验电流的稳定。

(2)试品内阻的变化。在可靠性试验过程中,由于对试品长时间施加电流,电流的热效应使试品温度升高,试品内阻发生变化,输出电压不变,试验电流必然产生变化。

(3)检测系统内阻的变化。整个检测系统也在一定的阻值,长时间通大电流产生的温升效应也会使电路阻值发生变化,影响试验电流的稳定。

4 恒流源系统的设计

4.1 系统整体结构

系统主要由上位机、PLC 控制器、伺服电机系统、多磁路调压机构组成,系统结构如图 2 所示。

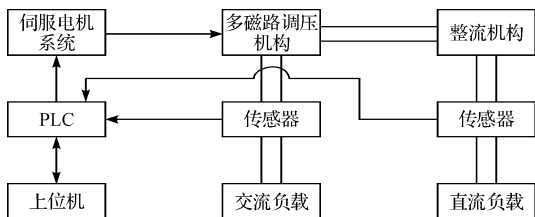


图 2 系统结构

在进行低压电器试验时,用户通过上位机设定目标电流和恒流试验的时间,上位机将这些设定信息传送给 PLC。PLC 根据输入的信息确定多磁路变压器磁路的投入,接着经过恒流控制算法输入相应脉冲,驱动伺服电机系统控制调压器(容量相当于整机容量的 1/6),输出电压为磁路投入和调压器电压总和,通过整流机构形成交流和直流两路输出。同时,传感器将试品负载上的电流和电压信号反馈输入到 PLC 中,通过驱动调压器对因温度和输入电压波动等因素引起的电流变化进行实时补偿,试品负载能够迅速获得恒定的试验电流。

4.2 系统恒流控制过程

整个变压恒流系统的控制过程分为 5 个阶段:调零过程、内阻测量过程、多磁路投入、调压过程、电流保持过程,控制流程如图 3 所示。

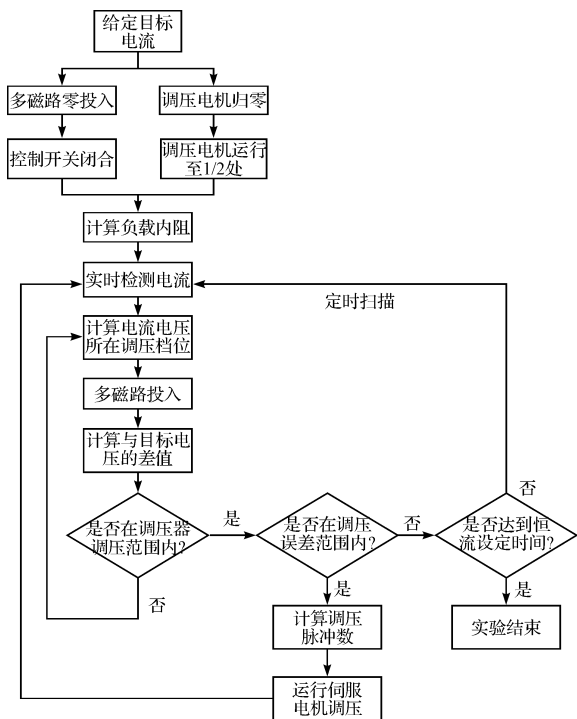


图 3 控制流程

(1)调零过程。为保证系统能够正常运行,在用户输入目标电流前,多磁路零投入,调压电机返回到起始位置,然后等待进入下一过程。

(2)内阻测量过程。多磁路零投入,调压电机转到调压器整圈范围的 1/2 处,作为调压的起始位置,在电流和电压传感器读出的数据稳定后,根据欧姆定律计算出当前试品的内阻值。

(3)多磁路投入。用户输入目标电流后,根据输入数值确定所处的调压档位,然后确定多磁路的投入,作为输出电压的一部分。

(4)调压过程。在确定多磁路的投入之后,剩下部分的电压就要通过调压器调压完成。PLC 根据电流传感器传回的数值计算出和目标电流的差值 ΔI ,根据 ΔI 不断输出脉冲,控制伺服电机调压。根据负载的内阻计算出实时电压要达到目标电流时电压的差值,然后根据伺服电机运行一步脉冲能够调节的电压计算出达到目标电压所需要的脉冲数,最后根据计算出的脉冲数运动电机到相应的位置。

(5)电流保持过程。虽然通过上一过程,电流已经基本上达到目标电流,但是 PLC 会不断扫描传感器返回的实时电流数据,根据实时的 ΔI 的大小重复调压过程中的判断和计算过程,不断运行伺服电机使实时电流无限接近于目标电流。

4.3 多磁路变压器主电路

由于多磁路变压器的调压器容量大幅度降低,是原来的 1/6,调压器的体积大大减小,从而可以选择自耦变压器,试验电压输出波形失真小。自耦变压器的初次级绕组电压比可在运行中按要求连续地改变,可以在一定范围内作电流电压的无级调节,所以该试验采用电动调压器来调节电压^[13]。

主电路如图 4 所示。

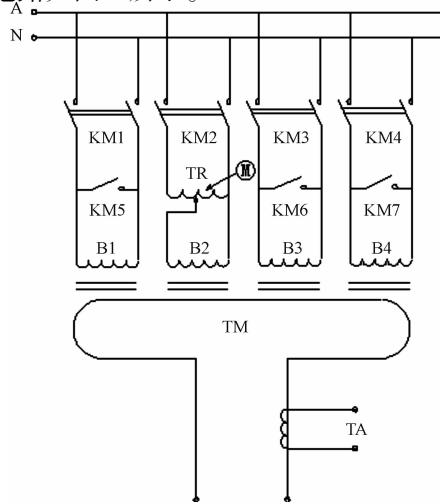


图 4 系统主电路

多磁路变压器中的调压器所起的作用相当于细调,多磁路变压器中磁路的投入相当于粗调,电压细调包括调压器 TR、磁体 B2(容量为总容量的 1/6)、相应的伺服电机 M、调压控制电路、电流互感器 TA;电压粗调主要包括磁体 B1(容量为总容量的 1/6)、B3(容量为总容量的 1/3)、B4(容量为总容量的 1/3)和控制它们投入的接触器开关 KM1、KM2、KM3、KM4、KM5、KM6、KM7。接触器开关由 PLC 通过继电器控制,需要投入时一次线圈应与电源接通,不需要投入时一次线圈必须断开电源,并将本线圈短路,阻止所环绕磁路的磁通过^[14]。伺服电机 M 的输出轴与调压器的滑动端相连,由于输入为 A、N 交流电,4 个磁路的两端接交流 220 V,输出为 0~15 V。多磁路变压器分为 4 个磁路,通过组合可以实现 2.5 V、5 V、7.5 V、10 V、12.5 V 和 15 V 6 档输出,多磁路变压原理设计的磁路投入对应电压范围如表 1 所示^[15]。为了保证两档之间衔接不间断,设计变压器时,相邻档是有重叠部分的,再通过调节调压器,即可实现回路 0~15 V 输出。

表 1 磁路投入对应电压范围

电压范围/V	初级绕组			
	B1	B2	B3	B4
0~2.5	√	—	—	—
2.5~5	√	√	—	—
5~7.5	√	—	√	—
7.5~10	√	√	√	—
10~12.5	√	—	√	√
12.5~15	√	√	√	√

本研究以某个型号断路器的可靠性试验为例,说明基于多磁路变压器的控制过程。仪器测得断路器的内阻为 0.003 2 Ω,实验要求输出恒定电流为 1 000 A,根据欧姆定律,可得断路器两端的电压为 3.2 V。根据表 1 可得:3.2 V 属于 2.5 V~5 V,则:

$$B2 \text{ 投入} = 2.5 \text{ V}$$

$$B1 \text{ 投入} = 3.2 \text{ V} - 2.5 \text{ V} = 0.7 \text{ V}$$

PLC 通过继电器控制接触器 KM1、KM2 闭合,使磁体 B1、B2 投入;接触器 KM3、KM4、KM5 断开,接触器 KM6、KM7 闭合,阻止磁体 B3、B4 所环绕的磁通过;电流互感器 TA 将输出电流信号传回到 PLC 中,PLC 不断修正输出脉冲信号,控制伺服电机 M 转动,直到输出电流达到精度要求。

该系统采用的伺服电机旋转一周细分到 10 000 个脉冲,对应的伺服电机每走一小步的最小电压调节单位和最小电流调节单位分别为:

$$220 \text{ V} / 10\,000 = 0.022 \text{ V}$$

$$0.022 \text{ V} / 0.003\,2 \Omega = 6.875 \text{ A}$$

由计算的数值可知,与传统直流电机相比,控制精度已有大幅提高。

4.4 控制系统结构

整个系统的实时控制和数据采集主要由 PLC(三菱 FX3U-64MR)实现,其中模拟量输入模块对系统输出的电流进行检测,应用三菱 PLC 的高速脉冲输出功能控制伺服电机,实现对电动调压器的自动调压(主回路的微调),通过 RS-232 转 RS-485 的接口与上位机通讯,系统中其他的各类开关量均与 PLC 的数字 I/O 模块相连,控制系统框图如图 5 所示。

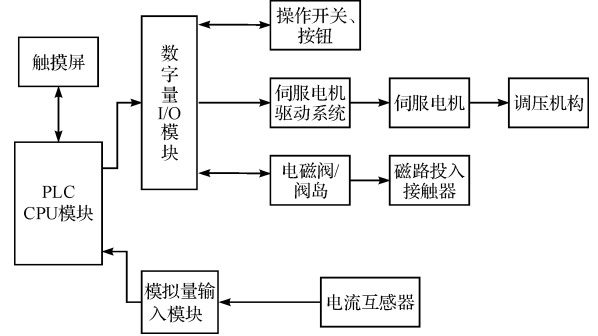


图 5 控制系统结构

4.5 控制系统梯形图设计

PLC 的数字 I/O 模块外接 24 V 直流线包的欧姆龙继电器,能够实现主回路控制、多磁路变压器初级绕组投入、输出电流电源类型的选择等实时控制功能,并实时监测被测断路器的状态和一些保护限位开关的状态,PLC 控制的 I/O 分配表如表 2 所示,根据控制过程要求设计的部分梯形图如图 6~7 所示^[16]。

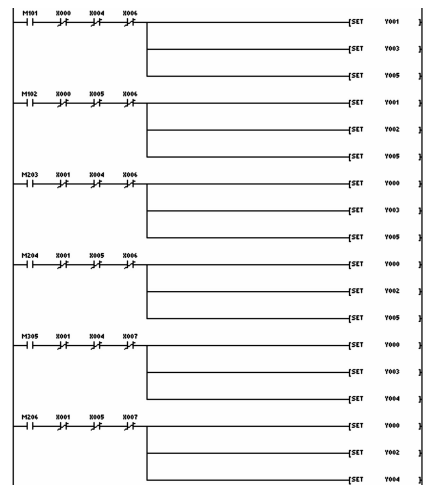


图 6 多磁路分段投入

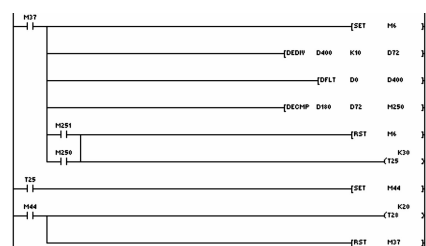


图 7 计算内阻

表2 PLC控制I/O分配表

输入			输出		
器件名称	磁路容量	点号	器件名称	磁路容量	点号
磁路 B1 投入信号	1/3	X0	磁路 B1 投入	1/3	Y0
磁路 B1 短接信号	1/3	X1	磁路 B1 短接	1/3	Y1
磁路 B2 升压信号	1/6	X2	磁路 B3 投入	1/6	Y2
磁路 B2 降压信号	1/6	X3	磁路 B3 短接	1/6	Y3
磁路 B3 投入信号	1/6	X4	磁路 B4 投入	1/3	Y4
磁路 B3 短接信号	1/6	X5	磁路 B4 短接	1/3	Y5
磁路 B4 投入信号	1/3	X6	磁路 B2 升压	1/6	Y6
磁路 B4 短接信号	1/3	X7	磁路 B2 降压	1/6	Y7

4.6 上位机软件设计

本研究采用微软公司 Visual Basic 为编程软件^[17],通过良好的人机界面控制下位机,并对现场运行状态进行监控,系统的触摸屏软件主界面如图8所示,可以分别进行手动试验测试、温升试验测试、长延时试验测试、短延时试验测试、瞬时试验测试等多种试验。

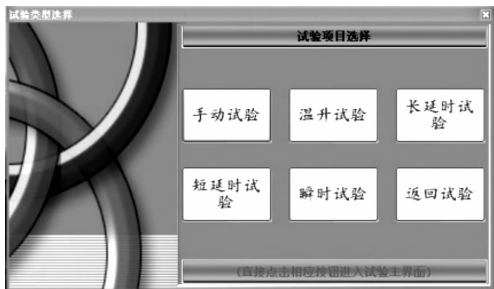


图8 主界面

断路器长延时试验界面如图9所示。



图9 长延时试验

试验系统的主要功能有:

(1)系统自检。系统上电后,首先进行自检,检测电路是否正常和各装置是否处于初始位置,自检结束并通过后才能进入主界面。

(2)参数设置。用户可以根据测试断路器性能要求对电流输出及测试的相关参数进行设置。

(3)实时监控。在用户设置完参数,开始试验后,系统可以监控整个测试过程,实时显示检测数据,若发

生数据异常可以马上停止测试。

5 系统稳流性能测试

断路器可靠性试验要求系统能够输出0~1000 A的稳定电流,稳流误差控制在1%以内,且为自动可调大功率的恒流源,根据实验测试获得的数据判断系统是否符合要求。系统性能测试电路连接如图10所示。

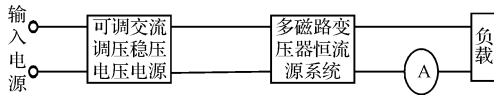


图10 测试电路连接示意图

输入电源为220 V,交流调压稳压电源提高为200 V~240 V连续可变稳定输入电压,可变法琅电阻作为可变负载。

5.1 输入电压波动对输出电流稳定影响的试验

试验中保持负载固定不变,在一定范围内改变输入电压,观察输出电流是否恒定,能否达到允许误差,并迅速稳定电流。

输入电压:200 V~250 V(50 Hz);输出电流:1000 A;负载内阻:0.003 2Ω。

输入电压波动对输出电流的影响如表3所示。

表3 输入电压波动对输出电流的影响

输入电压	设置电流	实测电流	电阻/Ω	误差/(%)
/V	/A	/A		
200	1000	1003.2	0.003 2	0.32
210	1000	1002.3	0.003 2	0.23
220	1000	1002.5	0.003 2	0.25
230	1000	997.1	0.003 2	-0.29
240	1000	1003.2	0.003 2	0.32
250	1000	997.7	0.003 2	-0.23

5.2 负载变化对输出电流稳定影响的试验

试验中改变负载内阻,保持输入电压稳定,观察输出电流的变化,电流稳定的时间。

输入电压:220 V、50 Hz;输出电流:1000 A;负载内阻:可调。

负载变化对输出电流恒定的影响如表4所示。

表4 负载变化对输出电流恒定影响

电阻	实测电流	预置电流	输出电压	误差/(%)
/Ω	/A	/A	/V	
0.001	1009.2	1000	1.00	0.92
0.002	998.3	1000	1.99	-0.17
0.003	1004.4	1000	3.00	0.44
0.004	1003.3	1000	3.98	0.33
0.005	1002.2	1000	5.04	0.22

5.3 大电流恒流源系统的输出电流、电压试验波形

试验中负载内阻为 0.005Ω ; 输出电流为 1000 A 。系统输出的电流、电压试验波形如图 11 所示, 由于交流电周期为 0.02 s , 较短周期内无法看到电流和电压幅值有明显变化。

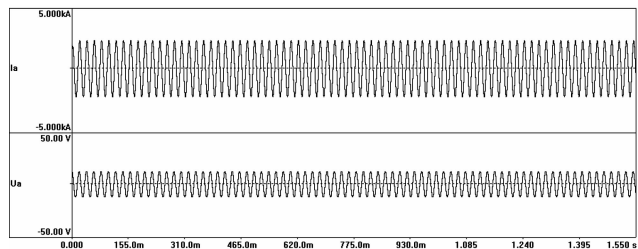


图 11 系统输出电压、电流波形

根据表 3、表 4 的数据可得, 输入电压的变化对系统输出检测电流的影响较小, 在 $200 \text{ V} \sim 250 \text{ V}$ 的范围内, 电流误差最大为 0.32% ; 负载变化对输出检测电流的影响较大, $0.001 \Omega \sim 0.005 \Omega$ 范围内, 电流的最大误差已达到 0.92% , 这是由于负载内阻过小导致伺服电机的最小控制电流变大引起的。

从实验数据可得, 该系统的稳流性能良好, 完全符合断路器检测电流输出要求。由于系统采用多磁路变压器进行调压, 使得系统特别适用于强电流的输出, 通过采用相当于常规调节系统 $1/6$ 容量的调压器使得电流调正过程的稳定性大大提高, 采用伺服电机控制调压器又使得系统的电流调节迅速, 调节精度较高。

6 结束语

针对低压电器可靠性的检测, 本研究开发了一套多磁路变压器的恒流源系统, 并结合了伺服电机、PLC 控制器和触摸屏来控制整个系统的大电流输出。该系统能够根据检测要求输出检测大电流, 并且保持低压电器检测过程中电流的恒定。将该系统应用于断路器的可靠性检测, 实际运行表明, 其可靠性强, 操作方便, 输出准确, 响应快, 精度高, 提高了低压电器产品的质量水平和检测效率。

参考文献 (References):

[1] 程亚平, 李志刚, 岂 峰. 小型断路器可靠性检测装置

[J]. 电气应用, 2008, 27(4): 79-81.

[2] MICHACA R, HEISING C R, KOPPL G. Studies on the test and control methods intended to assure the reliability of high-voltage circuit breakers[J]. **Electra**, 1985(102): 133-175.

[3] 杜太行. 塑壳断路器可靠性试验设备的研究[C]. 第三届电工产品可靠性与电接触国际会议, 2009.

[4] 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): 24-30.

[5] 骆燕燕. 小型断路器的可靠性研究[D]. 天津: 河北工业大学电气工程学院, 2000.

[6] POLYCARPOU A, SOOM A, SWARNKAR V, et al. Event timing and shape analysis of vibration bursts from power circuit breaker[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1996, 11(2): 848-857.

[7] YANG H T, CHANG W Y, HUANG C L. On-line fault diagnosis of power substation using connectionist expert system [J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1995, 10(1): 323-331.

[8] OKAMOTO M, LSHIKAWA M, SUZUKI K, et al. Computer simulation of phenomena associated with hot gas in puffer-type gas circuit breaker[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1991, 6(2): 833-839.

[9] 费让若. 多磁路调压变压器——一种新的大功率调压系统[J]. 变压器, 2000, 37(10): 8-12.

[10] 李践飞. 一低压断路器特性试验台设计[J]. 船电技术, 2009(2): 19-22.

[11] 石建国. 万能式断路器电流脱扣特性的自动检测[J]. 电器制造, 2003(3): 75-76.

[12] 王宗亮, 王 超, 徐杭田. 一种船用多磁路变压器仿真模型[J]. 变压器, 2009, 31(1): 28-30.

[13] 侯冰洲. 对基于恒压源的精密恒流源的思考分析[J]. 数字技术与应用, 2011(12): 239-239.

[14] 杨万生, 杨良瑞, 牛 索. 断路器大电流特性试验供电系统[J]. 电器技术, 2012(6): 32-36.

[15] 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.

[16] 周丽芳. 三菱系列 PLC 快速入门与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

[17] 李春葆, 金 晶, 曾 平. VB. NET 2005 程序设计教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[编辑: 李 辉]