

# 高压电能表校验装置电流档位控制器设计

赖荣光<sup>1</sup>, 高翔<sup>1</sup>, 胡仁俊<sup>2</sup>

(1. 珠海安瑞通电子科技有限公司, 广东 珠海 519000; 2. 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

**摘要:**高压电能表校验装置具有输出高电压、大电流的能力,为了检定与校验不同电流规格的高压电能表,需要输出符合检定规程的电流。目前大部分校验装置需要在停机且断电状态下由操作人员手动改变升流器或电流互感器的档位接线,以输出满足精度要求的电流值。文中提出了一种在装置内部高、低压侧电流档位智能切换的自动控制器,并详细介绍了其工作原理和软硬件设计。该控制器以多个磁保持继电器同步切换为基础,在校验装置不停机的情况下,可以控制连续输出最大允许电流之内的任意值,有效提高了自动校验时的安全性、可靠性和快速性。

**关键词:**高压电能表;电流档位;自动控制;整体校验

**DOI:**10.19753/j. issn1001-1390. 2023. 11. 026

中图分类号:TM834

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2023)11-0188-06

## Design of current gear controller for high-voltage electricity meters calibration device

Lai Rongguang<sup>1</sup>, Gao Xiang<sup>1</sup>, Hu Renjun<sup>2</sup>

(1. Zhuhai ARTON Electronics Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, Guangdong, China.

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The verification device of high-voltage electricity meter has the ability to output high voltage and large current. In order to verify high-voltage electricity meters with different current specifications, it is necessary to output current in accordance with the verification regulations. At present, most calibration devices need to manually change the gear wiring of the current riser or current transformer in the state of shutdown and power failure, so as to output the current value that meets the accuracy requirements. This paper presents an automatic controller for intelligent switching of current gear, and introduces its working principle, software and hardware design in detail. Based on the synchronous switching of multiple magnetic holding relays, the controller can control the continuous output of any value within the maximum allowable current without stopping the calibration device, which effectively improves the safety, reliability and rapidity of automatic calibration.

**Keywords:** high-voltage electricity meters, current gear, automatic control, overall calibration

## 0 引言

国家标准 GB/T 37968-2019《高压电能计量设备校验装置》定义的高压电能计量设备校验装置(以下简称校验装置)是一种由源、标准装置以及误差计算系统组成的集合,并用于检验 6 kV~35 kV 三相或单相高压电能的计量设备(以下简称被检设备)。被检设备包括传统高压电能计量箱(柜)、一体化高压电能表<sup>[1]</sup>、配电网同期线损测量装置、12 千伏一、二次融合柱上断路器(具有电能计量功能)等。校验装置的“源”是指能够产生频率、相位和幅值可调的电压、电流且有一定负载能力的装置。“高电压、大电流”的输出实际上以三相低压程控功率源、高压升压器、高压升流器和高压标准电压互感器、电流互感器<sup>[2]</sup>为核心组成的控制系统进行输出控制和反馈,而高压升流器及其电流互感器由多个档位组成以保证允许输出在测量范围内的精度,

如 0.2 级,从而满足输出符合检定规程的不同幅值和角度的电流值,通常升流器与电流互感器采用分体式而不是一体式结构以增大升流器的额定容量<sup>[3]</sup>。国家标准 GB/T 32856-2016《高压电能表通用技术要求》所定义的额定电流标准值为 5 A、10 A、15 A、…、400 A、500 A 和 600 A,为了满足校验时输出  $0.01\% I_n \sim I_{max}$  的宽量程电流值、额定电压和不同功率因数,需要切换高压升流器及其电流互感器的档位。

根据电网的安装设计规范,大约每 300 kV·A 用电负荷配置一台 10 kV 传统高压电能计量装置,估计全国预计需求量超过 100 万台。另外近几年兴起且应用于 10 kV 配电网同期线损<sup>[4-5]</sup>管理与考核的一体化高压电能表和分线线损计量装置<sup>[6]</sup>,安装在 10 kV 架空线路与环网柜的联络、分段、分支或分界位置,用于负荷转供时实现电能双向计量,依赖用电信息采集系统完成数据远传和自动采集,结合一体化电量和线损管

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2018A030313066)

理系统,自动计算10 kV配电网的日(月)分线线损,降低线损计算打包率,可以快速有效治理高(负)线损,查处高压窃电。与传统高压电能计量装置相比,此类新型轻量化设备高度集成了高压取能、高压计量、硬件加密和远程通信等一二次融合技术<sup>[7]</sup>,改变了传统的计量方式,利于整体检定和校验,测量的电能精度为整体误差而不是综合误差<sup>[8]</sup>;大大减少了铜、铁等金属材料的消耗,具有资源节约、体积小、易运输、易安装的特点,符合国家的“碳达峰、碳中和”政策。国内应用总数超过10 000台,正是当今研发与应用的热点。为了准确得到高压电能表的整体误差,满足社会发展对电能计量准确度越来越高的要求,国内目前有多个厂家对高压电能表的校验装置展开研究,并取得了初步成果。在现有大多数高压电能表校验中,为了保证电流输出的准确度,当输出一定量程的电流时,需要将校验装置停机,依靠人工手动更换高压升流器或高压电流互感器的档位,而不是由电流档位自动切换机构完成,这会严重影响校验装置在实际批量生产或检测时的安全性、时效性、自适应性和自动化水平。

文中基于电子控制技术设计了一种可在高压大电流回路中进行电流档位智能切换的控制器,即在高压侧的电流输出和反馈回路串联了多个并行磁保持继电器,通过一个或多个继电器的同步开合实现升流器及电流互感器的一次侧给定档位选通;另外,电流互感器二次接线的输出档位直接驱动小型固态继电器闭合与断开,以选通继电器作为电流量程的切换,实现校验装置工作时的电流线性输出;同时,还设计了一款用于校表与检表的智能化软件。与采用 PLC 控制步进电机的机电控制方式相比,降低了高压工作环境下需具备较高绝缘水平和较大安全距离的要求,具有切换速度快、安全性高、维护性强、噪声低的特点。

## 1 电流档位控制器硬件方案

## 1.1 校验装置系统组成

文中设计的校验装置工作原理如图 1 所示,包括三相多功能标准表、三相程控功率源、10 kV 高压升压器及标准电压互感器、10 kV 高压升流器及标准电流互感器、多表位电能误差计<sup>[9]</sup>、电流档位控制器等,智能化检表软件运行在安装有 Windows 系统的主控计算机(PC 机)上。采用三元件法(3 个 10 kV 升压器)升压与反馈、二元件法(2 个 10 kV 高压升流器及其电流互感器)升流与反馈实施源控制,电压输出 0~10 kV、电流输出 0~400 A,相位 0~360°,整体准确度 0.05 级。三元件法升压相比二元件法升压,输入电压降为 1.732 倍,可以降低 10 kV 升压器的绝缘耐压水平,提高升压器的使用寿命与安全水平。一旦升源成功,将三相多功能标准表由三元法计量模式自动切换成二元法计量,保持与高压电能表的二元件法计量的原理一致,保

证接线正确、杜绝少记电量<sup>[10]</sup>。

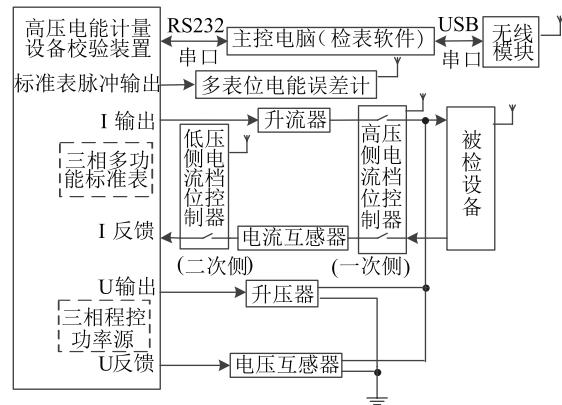


图 1 高压电能表校验装置系统框图

Fig. 1 Block diagram of testing device for high-voltage electricity meters

10 kV 高压升流器具有 5 个输出档位,10 kV 高压电流互感器具有 6 个输入档位,它们的一次侧与二次侧接线的档位对应关系如表 1 所示。

表1 10 kV 高压电流互感器一二次接线对应关系

Tab. 1 Primary and secondary wiring corresponding relations  
of 10 kV high-voltage current transformer

一次电流 /A	一次 接线	二次 接线	变比	一次电流 /A	一次 接线	二次 接线	变比
400		K1 K5	80	50	L1 L4	K1 K2	20
300	L1 L2	K1 K3	60	40		K1 K5	16
250		K1 K2	50	30	L1 L5	K1 K3	12
200		K1 K6	100	25		K1 K2	10
150	L1 L3	K1 K4	75	20		K1 K6	10
100		K1 K2	60	15	L1 L6	K1 K4	7.5
80		K1 K5	32	10		K1 K2	5
75	L1 L4	K1 K4	30	7.5	L1 L7	K1 K4	5
60		K1 K3	24	5		K1 K2	5

10 kV 高压升流器一次接线即高压侧有 5 个输出档位 (L1L2 ~ L1L6), 输入电压 0 ~ 220 V, 最大输出 400 A, 输出功率 2 kV·A。L2 ~ L6 分别对应 400 A、250 A、100 A、50 A、25 A, 其中 L1 为公共端。

10 kV 高压电流互感器一次接线有 6 个输入档位 (L1L2 ~ L1L7), 二次接线有 5 个输出档位 (K1K2 ~ K1K6), 准确度等级 0.05, 其中 L1 和 K1 为公共端。

## 1.2 电流档位控制器的方案对比与分析

校验装置通过低压的三相程控源经过 10 kV 高压升流器、10 kV 高压电流互感器输出满足检定精度要求的电流幅值以及与电压间的角差，两者在输入与输出端都具有不同量程的档位。根据电流输出值所处量程自动闭合或断开相应档位，可以采用机电式与电子式的电流档位切换机构。

机电式结构采用 PLC 控制步进电机驱动丝杆护套移动滑块实现切换不同电流档位, 主要由步进直线电机、PLC 控制卡、电机驱动器、各个档位光电开关、导向杆、丝杆、滑块、感应片等组成。优点是高低压分离换挡后绝缘性好, 安全性高; 由于引入分档实现保证 1 A ~ 500 A 输出电流的线性度以及相位的准确度, 失真度低, 稳定度好。缺点是换挡时依靠机械运动导致速度慢(约为 15 s—60 s)、噪声大、可维护性差。特别是输出电流大于 300 A 时电流换挡需要 30 s 以上, 对感应片的触点容量要求较高, 长时间工作在大电流时容易烧蚀触点, 需要上位机软件控制其运行时间, 无法承担长时间大电流的试验与校验。

文中设计的电流档位控制器为电子式结构, 其采用微控制器、无线通信模块、磁保持继电器、隔离电源等, 工作原理框图参见图 2。

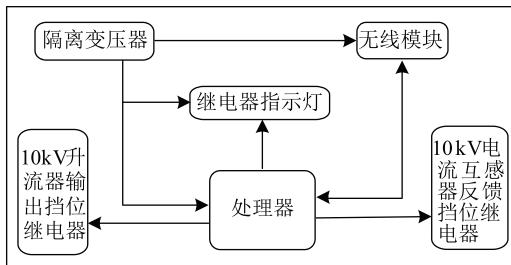


图 2 高压侧电流档位控制器原理框图  
Fig. 2 Block diagram of the high-voltage side current gear controller

所设计的电流档位控制器具有结构简单、可编程、成本低、换挡速度快、可维护性好等优点, 可以承受大电流的长时间运行与工作, 档位切换时间依赖于通信命令的下发与响应, 约为 3 s—6 s。但是, 需要对无线通信模块的信道做统一规划, 以防受到同频干扰。

### 1.3 电流档位控制器的硬件设计

将校验装置工作时的电压区域划分为高压与低压两个区域, 因采用二元件法升流, 在 A/C 相高、低压侧分别配置一个独立的电流档位控制器, 运用电子式电流档位切换机构进行设计与应用。以电流档位 250 A 为例, 其高压侧控制器的继电器升流与反馈控制电路接口电路图参见图 3, 其中 L3A 为继电器升流控制, L3B 为互感器反馈控制。

低压侧控制器接入的电流互感器二次侧输出电流最大只有几安培, 可直接使用固态继电器(AC 250 V, 10 A)作为开关, 设计较简单。但高压侧控制器的控制 IO 连接升流器与电流互感器的一次接线端子所串接继电器的控制接口, 工作于高压大电流回路, 承载最大电流为 400 A, 需使用磁保持继电器(DC 12 V, 300 A)作为开关元件串接在电流回路中。相比一般电磁继电器, 磁保持继电器具有高可靠性、安全性及抗短路电流

能力<sup>[11]</sup>。单个三相磁保持继电器的最大允许电流为 300 A, 当输出 300 A 以上的电流档位, 需要并接 2 个磁保持继电器; 输出小于 300 A 的电流档位则只需要 1 个磁保持继电器。据此需求, 设计出分别用于 A 相与 C 相独立的一组磁保持继电器。

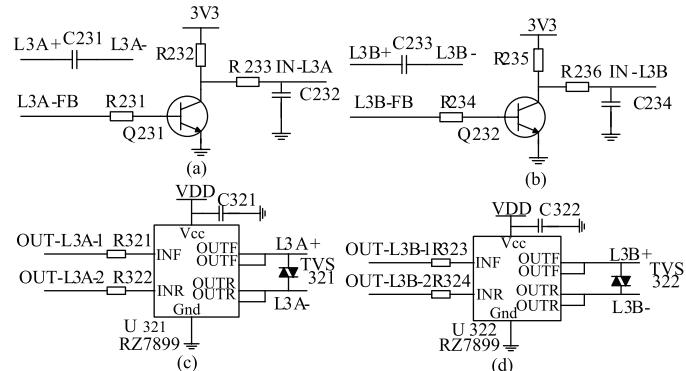


图 3 250 A 挡输出与反馈继电器控制接口电路图

Fig. 3 Interface circuit diagram of 250 A output and feedback for relay control

## 2 电流档位控制器软件设计

### 2.1 电流档位控制命令

电流档位控制器对升流器的一次输出侧继电器、电流互感器一次/二次反馈侧继电器的动作执行, 完全取决于检表软件下发的控制命令。检表软件在下发命令之前将自动抄读继电器组的当前供电状态、开/合状态、异常状态标志等, 并且控制器在编程允许状态下才能响应检表软件的打开或关闭继电器的命令, 防止继电器收到其他同频同地址的控制报文, 严禁避免继电器的误动作, 达到智能控制的要求。检表软件与控制器的控制命令及其格式如表 2 所示。

表 2 电流档位控制器的控制命令

Tab. 2 Commands of current gear controller

控制命令	控制命令 ID	数据内容	数据长度	数据格式
控制器工作电源状态	EC10	X	1	BIN
控制器无线信道	EC11	X	1	BIN
控制器无线发射功率等级	EC12	X	1	BIN
控制器自检状态	EC13	X	1	BIN
继电器指示灯输出状态	EC14	X	1	BIN
升流器档位状态	EC15	X	1	BIN
升流器档位异常标志	EC16	X	1	BIN
电流互感器一次侧档位状态	EC17	X	1	BIN
电流互感器一次侧档位异常标志	EC18	X	1	BIN
电流互感器二次侧档位状态	EC19	X	1	BIN
电流互感器二次侧档位异常标志	EC1A	X	1	BIN
继电器档位状态设置允许	EC1F	X	1	BIN
控制板的通信地址	EC20	NNNNNN	6	BCD

### 2.2 电流档位自动切换控制

高压侧电流档位控制器位于校验装置机柜的高压

侧,从内外隔离和绝缘的安全性、通信稳定性和硬件成本考虑<sup>[12]</sup>,选择本地微功率短距离无线通信模块 A7139(频段 470 MHz ~ 510 MHz)实现检表软件与控制器的点对点通信,以避免有线通信的高压干扰、绝缘和安全等问题;同时选择的处理器 R5F100PJAFB 的 IO 接口具有优良的 EMC 特性,在高电压大电流的工作环境之下保持接口的电平稳定性,防止继电器的误动作而出现电流互感器开路;另外 A/C 相高、低压侧控制器的无线模块处于同一无线信道(最大 32 信道,可设),控制器配置不同的通信地址。当具有编址的控制器接收到检表软件下发的电流档位切换命令,必须严格校验命令的正确性,精准控制电流档位的输出与反馈继电器接通或断开是否到位,保证电流回路不能开路。另外,对于电流输出量程相同,即升流器与电流互感器档位一致,在此量程范围内则不需要切换档位。

控制器上电完成自检之后处于空闲状态,当校验装置对被检设备需要输出不同相别、幅值和角度的电压与电流时,由检表软件发出升源命令,根据当前电流档位状态确认是否需要输出 0 A、保持当前电流挡或者切换至其它电流挡,若有异常则立刻中止,电流档位自动切换控制流程详见图 4。



图 4 高压侧电流档位切换控制流程图

Fig. 4 Flow chart of current gear switching and control on HV side

### 3 实验验证

#### 3.1 检表软件设计

基于 C# 语言、.Net4.0 框架、Access 数据库设计开发了一款检表软件,采用了多线程、串口通信、定时器、异步调用、面向对象等编程技术,对功率源、标准表、误差计等设备进行多串口通信、多规约处理和多任务设计,支持友好的人机界面,以文件或数据库保存相关配

置文件和检测结果,主要包括以下功能。

1) 系统配置:配置功率源、标准电能表、多表位误差计的通信端口及参数,配置 10 kV 高压升压器的变比、10 kV 高压升流器的档位和变比及其允许输出的最大电流、高/低压侧各相电流档位控制器的通信地址等;

2) 电能表配置:配置各个表位的高压电能表(或其他高压电能计量装置)型号、接线方式、表地址、额定电压、额定电流、误差等级、脉冲常数、无线信道等;

3) 方案配置:主要配置检表误差方案,根据不同设备类型定制检表的分相与合相不同负载点,并且保存在 Access 数据库中,方便在检表界面直接根据设备类型选择检表方案名称;

4) 手动控源:手动控制升压与升流,调试控制器的命令收发、继电器开合、继电器状态等;

5) 自动检表:根据选择的高压电能表的型号、规格、检表方案等实施自动检表。其中在检表过程中,由于不同的检表点需要输出分相或合相的额定电压、不同的电流幅值和功率因数,通过文中论述的电流档位自动控制器实现电流自动换档,满足一体化高压电能表的自动检定需求,检表数据自动保存在 Access 数据库中;

6) 查询与导出:按照被检设备的类型和地址查询和筛选检表记录,以 EXCEL 表格导出被检设备的各项检表数据,并以文本文件方式自动记录所有控制对象(功率源、标准表、误差计、被检设备、电流档位控制器)的通信报文记录。

#### 3.2 电流精确输出实验

实际高压线路中的电流是高压状态下的电流,鉴于电流互感器在高压和非高压状态的特性有差别<sup>[13]</sup>,三相程控功率源输出的低电压、小电流经过升压、升流及其反馈之后,生成的高电压和大电流一次无法达到预期的幅值和角度,高压电流互感器可通过改变一次绕组串并联连接方式以及二次绕组抽头的选择进而改变变比<sup>[14]</sup>,所输出的电压、电流、相位与标准表进行比对。为了消除升压器变压和升流变压器引起的幅值和相位偏移<sup>[15]</sup>,根据电压与电流标准互感器的二次信号传输到控制系统,由检表软件进行多次计算、调整才能达到稳定的幅值与相位。

检表软件在多次调整输出时,电压、电流幅值调节细度为 0.02%,相位调节细度为 0.01°,约 100 s 左右升源成功,源输出的功率稳定度为 0.05%,三相电压不对称度为 ±0.2%,三相电流不对称度为 ±0.2%,三相相位差值为 0.3°。校验装置输出不同的电流及其精度参见表 3。例如待检高压电能表的基本参数:3 × 10 kV、100(400) A、0.5S、1 kW · h/imp, 功率因数为 ±1.0、±0.5C、±0.5L 时检定  $I_{max}$ 、0.5  $I_{max}$ 、 $I_n$ 、0.5  $I_n$ 、0.1  $I_n$ 、0.01  $I_n$  等负载点,基本电能误差的检表数据详见表 4。

表 3 校验装置输出不同电流的精度  
Tab. 3 Precision of different current output for calibration device

输出电流	功率因数	电压/V		电流/A		相位/(°)	
		A 相	C 相	A 相	C 相	A 相	C 相
200 A	1.0	10 000.81	9 993.93	200.063	199.960	0.11	120.11
	0.5L	10 000.65	9 999.41	200.42	199.995	300.01	59.99
	0.5C	10 000.74	9 999.33	199.999	199.944	60.00	180.12
100 A	1.0	10 000.78	9 993.54	100.027	99.976	359.89	120.12
	0.5L	10 000.67	9 999.29	100.019	100.000	299.86	59.84
	0.5C	10 000.79	9 992.74	99.997	99.978	59.99	180.01
50 A	1.0	10 000.99	9 999.41	50.033	50.009	0.09	120.01
	0.5L	9 992.65	9 999.75	50.017	50.001	299.84	59.91
	0.5C	10 000.89	9 999.50	50.002	49.986	59.84	179.85
10 A	1.0	9 994.99	9 999.42	10.002	9.998	359.94	119.94
	0.5L	10 000.53	9 999.98	10.002	10.000	300.02	60.00
	0.5C	10 000.72	9 992.51	10.000	9.998	59.86	179.87

表 4 高压电能表不同负载的有功电能误差  
Tab. 4 Active errors of different load for a high-voltage electricity meters

相别	电能类型	负载电流 /A	功率因数	误差值	检表时间 /s
A 相	正向有功	$I_n$	1.0	0.051	126
	正向有功	$I_n$	0.5L	0.076	106
	正向有功	$I_n$	0.5C	0.067	104
	正向有功	$0.1I_n$	1.0	0.056	140
	正向有功	$0.1I_n$	0.5L	0.148	112
	正向有功	$0.05I_n$	1.0L	0.090	134
	正向有功	$0.05I_n$	0.5L	0.203	118
	正向有功	$I_n$	1.0	0.121	127
C 相	正向有功	$I_n$	0.5L	0.112	105
	正向有功	$I_n$	0.5C	0.141	104
	正向有功	$0.1I_n$	1.0	0.063	138
	正向有功	$0.1I_n$	0.5L	0.192	110
	正向有功	$0.05I_n$	1.0	0.028	138
	正向有功	$0.05I_n$	0.5L	0.159	110
	正向有功	$I_{max}$	1.0	0.095	120
	正向有功	$I_{max}$	0.5L	0.055	90
合相	正向有功	$0.5I_{max}$	1.0	0.086	120
	正向有功	$0.5I_{max}$	0.5L	0.078	93
	正向有功	$0.5I_{max}$	0.5C	0.019	95
	正向有功	$I_n$	1.0	0.069	116
	正向有功	$I_n$	0.5L	0.011	108
	正向有功	$I_n$	0.5C	0.027	109
	正向有功	$0.5I_n$	1.0	0.044	136
	正向有功	$0.5I_n$	0.5L	0.119	108
	正向有功	$0.1I_n$	1.0	-0.006	122
	正向有功	$0.1I_n$	0.5L	0.160	98
合相	正向有功	$0.01I_n$	1.0	-0.021	148
	反向有功	$I_n$	-1.0	0.077	86
	反向有功	$I_n$	-0.5L	0.040	116
	反向有功	$I_n$	-0.5C	0.034	108
	反向有功	$0.5I_n$	-1.0	0.035	110
	反向有功	$0.5I_n$	-0.5L	0.106	108
	反向有功	$0.5I_n$	-0.5C	-0.013	116

可见,新型一体化高压电能表<sup>[16-17]</sup>与低压智能电能表校表或检表过程具有显著的不同<sup>[18-20]</sup>,低压校验装置不需要接入高压升流器与互感器,也不需要控制输出几百安培的电流,被检表计也不受到高电压大电流的强电磁干扰,也无须预留足够的 10 kV 安全距离。面向高压整体计量检定的校验装置应用此电流档位自动控制器,在检表过程中针对不同电流的负载点实现了无须停机切换高压升流器与高压电流互感器的各个电流输出档位,约 60—90min 可完成多套高压电能表的校表与检表,与校验装置的带载能力、检表项目、脉冲常数、无线脉冲稳定时间等有关,通常一次性检表 4~16 套,基本上满足批量化生产需求。

#### 4 结束语

将文中研究与开发的高、低压侧电流档位控制器以串联方式接入到所述校验装置的高压侧输出电流回路和低压侧反馈电流回路中,连续运行时可以输出线性电流 0~400 A,实质上根据不同电流量程执行了高压升流器及其标准电流互感器的不同电流档位上所串接继电器的选择与开合,以适应不同额定电流的被检设备和检定规程中要求的不同负载点。经过近 3 年的使用表明,磁保持继电器没有出现故障,控制器的安全性、可靠性、稳定性达到设计要求,大大提高批量校验的自动化水平,在关键技术细节上注意以下几点。

1) 高压侧电流档位控制器与升流器工作在高压的等电位环境,其工作电源必须使用交流耐压超过 10 kV 的隔离变压器(如 220 V/12 V)进行供电;

2) 高压侧电流档位控制器的数字地、模拟地与高压端接在一起,避免高电压对控制器的“地”电位放电或叠加干扰电场;

3) 检表软件控制高压升流器及其电流互感器的不同档位继电器,自动检表时按负载点大小自动排序,即从不同相别、功率因数的大电流向小电流方向执行检验项目,减少跨电流量程出现频繁继电器动作以切换档位;

4) 校验装置若需要输出更大的电流或同时检定多个被检设备,则需要选择带载能力更强的高压升流器和高压电流互感器。

### 参 考 文 献

- [1] 郭琳云. 一体化高压电能计量装置及其在智能配网中的应用[D]. 华中科技大学, 2010.  
Guo Linyun. An integrated high voltage energy metering device and its application in smart power distribution grid[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [2] 许灵洁, 周琦, 周永佳, 等. 电流互感器基本误差现场检定一次升流方法的研究[J]. 浙江电力, 2010, 29(5): 15-18.  
Xu Lingjie, Zhou Qi, Zhou Yongjia, et al. The Primary Current Magnification Techniques in the Current Transformer Basic Error Site Verification[J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(5): 15-18.
- [3] 李涛. 升流器在现场检定电流互感器时的使用探讨[J]. 机械工程与自动化, 2017(5): 142-144.  
Li Tao. Discussion on application of large current generator in field test of current transformer[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2017(5): 142-144.
- [4] 刘道新, 胡航海, 张文晋等. 配电网同期线损监测系统的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2017, 25(5): 42-45.  
Liu Daoxin, Hu Hanghai, Zhang Wenjin, et al. Design and implement of a synchronous line loss monitoring system in distribution[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(5): 42-45.
- [5] 陈乃兴, 冯欣玉, 江盼, 等. 基于 UPFC 优化 10 kV 线路高损问题应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(4): 95-100.  
Chen Naixing, Feng Xinyu, Jiang Pan, et al. Application Research on Optimization of High Losses of the 10 kV Transmission Line Based on UPFC[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4): 95-100.
- [6] 吕东飞, 刘文安, 郑春旭 等. 新型移动式 10kV 分线线损计量装置在同期线损管理系统中的应用[J]. 电力设备, 2018(22): 412-415.  
Lu Dongfei, Liu Wen'an, Zheng Chunxu, et al. Application of 10 kV line loss energy measuring device for synchronous line loss management System [J]. Electrical Equipment, 2018(22): 412-415.
- [7] 赵勇, 刘飞, 戴成涛, 等. 基于电力一二次配合技术的新型智能电能表的研制技术方案[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(9): 64-68.  
Zhao Yong, Liu Fei, Dai Chengtao, et al. The technical scheme development of new intelligent electric energy meter based on power-secondary fusion technology[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(9): 64-68.
- [8] 陈缨, 岳长喜, 杨勇波, 等. 高压电能表整体校准及其结果验证[J]. 电工技术, 2015, (12): 143-146.  
Chen Ying, Yue Changxi, Yang Yongbo, et al. Overall calibration of the high voltage electric energy meter and its result verification[J]. Electric Engineering, 2015, (12): 143-146.
- [9] 赖荣光. 检定高压电能表的多表位误差计的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2019(10): 234-236.  
Lai Rongguang. Design of multi-meter error in test system for high-voltage electric energy meter [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(10): 234-236.
- [10] 康文广, 朱彬, 刘冬, 等. 逆相序对电能表计量准确性影响的研究[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(2): 92-96.  
Kang Wenguang, Zhu Bin, Liu Dong, et al. Study on the electrical energy meter Measuring precision under the influence of the negative phase-sequence[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(2): 92-96.
- [11] 李耀林, 侯月宾, 卢菲等. 智能电表用磁保持继电器失效原因及机理分析[J]. 电工材料, 2014(12): 38-42.  
Li Yaolin, Hou Yuebin, Lu Fei, et al. Failure cause and mechanism of magnetic latching relays for smart meters[J]. Electrical Engineering Materials, 2014(12): 38-42.
- [12] 周明涛, 刘利成. 基于负荷管理数据的电能计量装置监测系统研制[J]. 中国计量, 2009(11): 61-63.
- [13] 马雪峰, 李文强, 金勇, 等. 浅议高压电能表检定装置[J]. 电测与仪表, 2013, 50(11): 22-24.  
Ma Xuefeng, Li Wenqiang, Jin Yong, et al. Discussion of verification equipment for high-voltage electrical energy meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(11): 22-24.
- [14] 张爱军, 张丽华, 李秀芬. 高压电流互感器变比分析[J]. 内蒙古电力技术, 2009, 27(4): 38-40.  
Zhang Aijun, Zhang Lihua, Li Xiufen. Analysis to transformation of high voltage current transformer [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2009, 27(4): 38-40.
- [15] 陈缨, 岳长喜, 杨勇波, 等. 配网高压电能计量装置整体校准技术研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 35-39.
- [16] 程瑛颖, 杜杰, 肖冀, 等. 用于高压电能表的新型电源管理单元设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(1): 236-238.  
Chen Yingying, Du Jie, Xiao Ji, et al. Design of a new power management unit used for high voltage watt-hour meters[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(1): 236-238.
- [17] 李优仪, 刘珏, 杨晓伟, 等. 高压电能表的计量装置在线校验技术[J]. 电力系统装备, 2019(12): 80, 224.  
Li Youyi, Liu Jue, Yang Xiaowei, et al. On-line Verification Technology for Metering Device of High-voltage Electric Energy Meter[J]. Electric Power System Equipment, 2019(12): 80, 224.
- [18] 赵东芳, 赵伟, 荣潇, 等. 高压电能计量设备及其检验技术[J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 1-10.  
Zhao Dongfang, Zhao Wei, Rong Xiao, et al. Measurement equipments of high-voltage electrical energy and the testing technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 1-10.
- [19] 郭红霞, 王振华, 荆臻, 等. 基于 BP 神经网络的高压电能计量装置误差校正研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(6): 25-30.
- [20] 郭琳云, 尹项根, 张乐平, 等. 基于高压电能表的计量装置在线校验技术[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12): 79-82.  
Guo Linyun, Yin Xianggen, Zhang Leping, et al. On-line calibration of energy metering device based on high voltage energy meter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 79-82.

### 作者简介:



赖荣光(1976—),男,硕士,高级工程师,主要从事电能计量与采集控制研究。Email:282329879@qq.com

高翔(1982—),男,硕士,主要从事带电作业技术及高压计量技术研究。  
胡仁俊(1993—),男,博士,主要从事直流功率变换和智能控制关键技术研究。

收稿日期:2021-09-02;修回日期:2022-10-09

(杜景飞 编发)