

# 模块化高效隔离可编程序电压源装置设计

王 建<sup>1</sup>, 李晓庆<sup>2</sup>, 王同花<sup>1</sup>, 任 炜<sup>3</sup>, 迟恩先<sup>1</sup>, 王德涛<sup>1</sup>

(1. 山东华天电气有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;  
3. 国网山东省电力公司物资公司, 山东 济南 250001)

**摘要:** 针对低压电气设备对电压源测试的需要, 实现数字化可控的大功率电压源装置需求, 研制一种模块化高效隔离可编程序电压源装置, 多组电压源发生单元并联扩容冗余, 采用数模转换的方式生成试验波形。通过对所需波形电压幅值、相位数值归一化, 经过主控系统进行指令计算, 实现电压的幅值、频率、阶跃和渐变等功能。通过理论研究和样机测试, 为性能提升提供理论和实验依据。

**关键词:** 电压源; 模块化; 电压波形; 幅值

## Design of modularized high-efficiency isolated programmable voltage source device

WANG Jian<sup>1</sup>, LI Xiaoqing<sup>2</sup>, WANG Tonghua<sup>1</sup>, REN Wei<sup>3</sup>, CHI Enxian<sup>1</sup>, WANG Detao<sup>1</sup>

(1. Shandong Hoteam Technologies Co., Ltd., Jinan 250101, China; 2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Company Supplies Company, Jinan 250001, China)

**Abstract:** Aiming at the need of testing voltage source for low-voltage electrical equipment and realizing the demand of digital and controllable high-power voltage source device, a modular and high-efficiency isolated programmable voltage source device is developed, the multi-group voltage source generating unit is connected in parallel, and the test waveform is generated by the way of digital-analog conversion, and the voltage amplitude and phase of the waveform are normalized, and the instructions are calculated by the main control system, the realization of voltage amplitude, frequency, step, gradual change and other functions. Through theoretical research and prototype test, provide theoretical and experimental basis for performance improvement.

**Key words:** voltage source; modularization; voltage waveform; amplitude value

## 0 引言

随着电力系统用电设备要求的不断提高, 目前国家及省市级的设备检测机构和试验中心需要对电气设备进行功能检验, 测试设备的高低压性能、频率耐受度、变频变压和低电压穿越等功能。一般采用整流桥方式进行冲击试验, 桥式整流器可以在 $90^\circ$ 与 $270^\circ$ 时试验, 而不必改变整流器极性。整流器半周电源电流额定值至少为发生器冲击电流驱动能力的2倍, 以提供适当的运行

安全系数。由于整流桥的开关时刻不能控制, 功能单一, 可控性不高, 采用调压器和开关方式进行电源装置试验, 通过控制调压器的输出电压高低实现电压的跌落、上升和中断, 可以在与相位角无关的情况下断开和闭合开关, 调压器的输出电压可以通过人工调节, 也可以通过电动机自动调节, 或通过多路开关选择自耦变压器的抽头实现。能够实现简单的高低压试验, 对电压变化快的装置无法试验验证, 也能实现对测试装置的电

压闪变耐受、低电压穿越等功能。然而并没有一种可以全方面模拟电源状态的数字编程序的电压源,能够满足检验机构的需求。

## 1 可编程序电压源装置

研制基于模块化高效隔离的可编程序电压源装置,用于提供一种交流电源,可以实现电压三相独立分调,控制电压幅值、频率和不平衡等众多参数的变化,做低电压穿越和变频变压、设备的保护检测、功能检测、性能检测等的综合性电压源装置。装置结构如图1所示,模块化高效隔离可编程序、电压源装置由主控单元、多组电压源发生单元、人机界面单元、远程监控平台和辅助供电系统组成。主控单元与触摸屏人机界面单元、远程操控平台相连,采用本地/远程控制方式,基于总线的控制模式,通过本地操作台或远程控制主站将控制信号通过RS 485传至主控单元进行逻辑判定,然后下发控制信号至各个电压源发生单元模块。主控单元接收人机界面单元或者远程操控平台下发的试验所需的电压波形的参数值。远程操控平台和本地人机界面单元可以相互切换,切换设置在本地人机界面单元操作。主控单元接收人机界面单元或者远程操控平台下发的电压数据参数信息,根据接收的信息发出控制指令,在主控单元内进行计算并产生试验需要的电压波形,根据主控单元中指令电流运算单元形成的驱动指令电流控制电压源发生单元输出相应的电压源实现测试功能。

电压源发生单元采用模块化设计,并联冗余,按需启动,便于维护和容量扩展。根据测试设备的容量大小,自动分配每组电压源发生单元

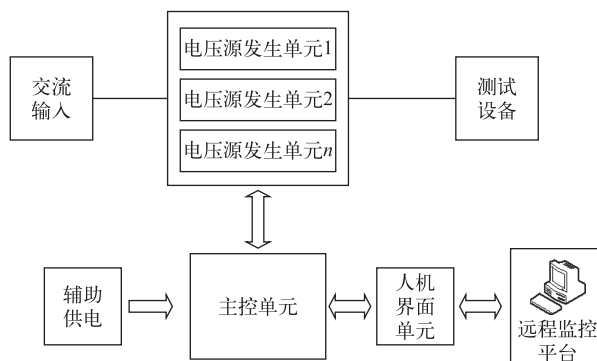
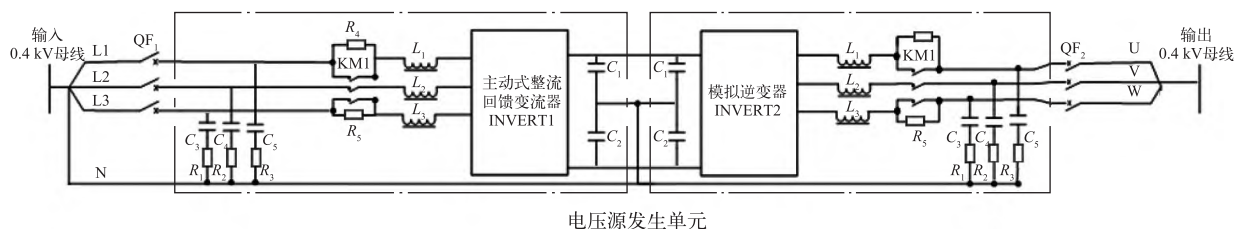


图1 装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device structure

的工作容量。容量在线可调,提高检测准确度,实际输出与设定输出之间误差不大于1%;单元模块故障不影响系统运行。电压源发生单元采用两级架构方式实现隔离,如图2所示。电压源发生装置内部采用背靠背功率单元,运用IGBT功率模块为核心部件作为整流与逆变核心的拓扑结构,采用隔离式脉冲宽度调制(PWM)整流和PWM逆变的两级变换架构模块化结构,通过扩展功率模块的级联数来扩大装置容量。依次串联缓冲电阻和输入电抗器后接入主动式整流变流器,主动式整流变流器将交流电压转换成可控的直流电压;经过模拟逆变器产生所需的试验电源,全功率串接入400 V线路中,可以产生0~480 V电压信号,在输入侧和输出侧分别并联RC高频吸收装置,用于吸收电压源装置电力电子器件开关频率纹波,避免影响电网和测试设备。电压源发生装置输出侧通过电流霍尔检测信号和电压反馈信号反馈到控制单元,对指令电流运算单元进行精确修正电压源发生单元的输入参数,主动调整直流母线工作电压、保护参数设定



以及监控值。控制单元的驱动指令电流利用光纤传输连接到每组电压源发生装置单元。将所有设备状态上传给控制单元系统，包括系统运行状态、功率模块运行状态和故障记录等；与控制单元系统协同完成必须的检测功能，并提供接口。

## 2 电压源波形产生方法

对试验所需的任意电压源通过控制参数设置电压的幅值和相位，产生各种不同需求的电压源。通过数模转换形成相应的电压波形，通过设定输出时间间隔，暂降、骤升及相位跃变输出方式。

按照基准频率 $n$ 倍（ $n$ 为正整数），根据需求将不同频率的正弦波叠加，通过对各次电压进行幅值和相位更改、数值归一化，在一个基准周期内进行 $N$ 点数据还原， $N$ 为大于0的自然数， $N$ 越大计算结果越精确，分别更改基准电压、各次谐波电压幅值和相位值。

对电压源各个参数设定后，通过极坐标表将对应的幅值、相位转换为对应的 $X$ 、 $Y$ 坐标分量，生成波形。

通过对电压源各个幅值调整和相位角进行设置，通过转换产生需要的电压波形，满足不同测试要求的电压幅频需求。根据测试需求，设定测试电压源的工作时间，每段时间最少设定

0.01 ms，即1/20工频周波，通过设定每段工作时间和每段起始段的初始幅值、频率和时间对测试设备进行电压试验。

## 3 电压源波形控制方法

电压源控制方法流程如图3所示。通过人机界面单元设定参数，包括输出电压频率设定、输出电压有效值设定和运行周期设定。设定的输出电压频率通过正弦波表中产生正弦波，将实际的波形通过正弦波表拆分， $U(t)=U\sin(2\pi f/n)$ ；根据正弦波表将一个周期内的正弦波进行4 096点的拆分；正弦波表产生的指令信号通过锁相环与输入电压锁相；设定的输出电压有效值经过PI调节产生一个幅值信号，正弦波表产生的指令信号和PI调节产生的幅值信号进行运算，其运算结果产生电压瞬时值指令信号；运行周期设定的时间通过内部计算器进行周期时间计数；运行周期设定的时间值与电压瞬时值指令，通过保护模块产生实时的电压瞬时PI调节器产生电压信号指令，然后控制产生电流瞬时值PI调节指令信号，运算得到SPWM电压脉宽信号驱动电压源发生单元中的IGBT器件，产生设定的电压源电压波形。同时，通过实时的电压和电流信号检测分别反馈到电压瞬时PI调节器和电流瞬时PI调节器对指令信号进行修正，将检测的电压、电流信号反馈到保

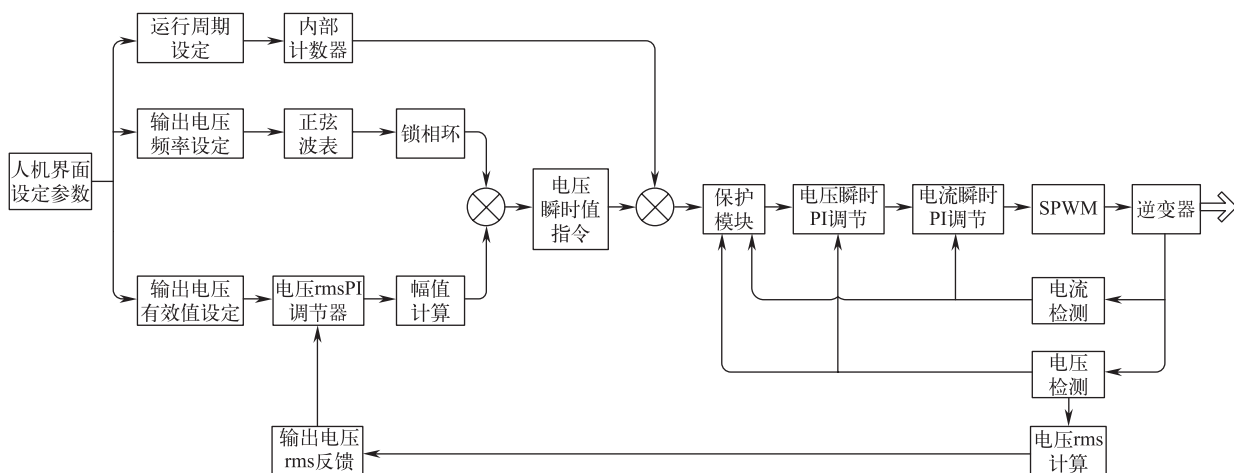


图3 电压源控制方法流程图

Fig. 3 Flow chart of voltage source control method

护模块对整个装置进行安全保护。将输出电压检测的波形进行有效值rms计算,反馈到电压有效值PI调节器进行指令修正。形成闭环系统,提高电压源装置的控制准确度。

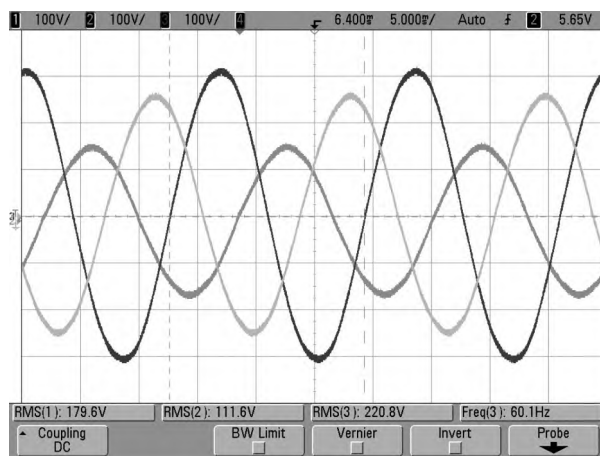
#### 4 400 kV·A高效隔离可编程序电压源装置

以400 kV·A模块化高效隔离可编程序电压源装置为例,由4组电压源发生单元并联构成,每组功率100 kV·A,采用隔离式PWM整流和PWM逆变的两级变换架构模块构成。通过并联模块实现扩容,每组的直流母线相互独立,直流母线电压分别调节,组与组之间互不影响;根据测试需求的功率大小自动实现100~400 kV·A容量扩展,容量分配由主控单元控制。所有的电压源发生单元模块的输出端通过分支断路器并联在一起,接入不同测试设备的输入端。根据相关检测需求,试验需要的电压特性通过人机界面进行参数设定,实现连续调整电压幅值、相位、电压渐变和步阶功能,同时实现不同电压、频率和时间的设定,并连续做循环测试。

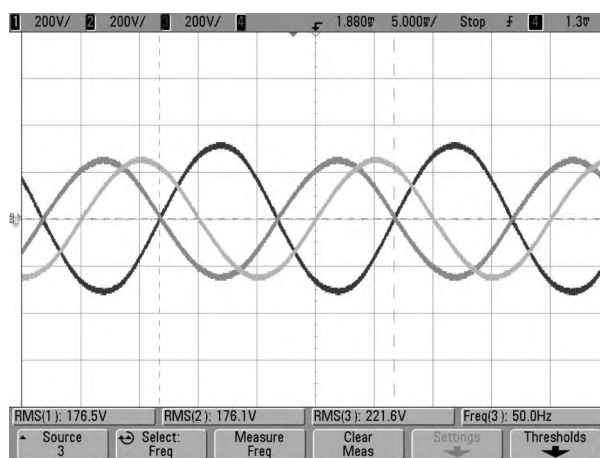
根据试验写入需要的电压幅值、相位、工作时间和循环周期等参数,可编程序电压源装置主控系统对人机界面单元下发的参数进行计算,得到SPWM电压脉宽信号驱动IGBT产生设定的电压源电压波形,得到测试需要的任意电压源。图5为可编程序电压源在不同试验要求的输出实测波形。图5a用于实现不同基准频率下(如60 Hz的三相电压幅值)分调,对基准频率60 Hz装置进行测试;图5b用于对三相电压的相位进行调制,测试设备对相移适应状况;图5c为输出电压由额定值跌落至20%额定后1.5 s恢复至80%额定时装置耐受情况;图5d用于测试电压中断10 ms受测设备能否正常工作;图5e模拟电网电压幅值和频率同时变化受测设备能否正常工作;图5f模拟电网电压连续突变,用于测试设备高低压穿越功能试验。

通过400 kV·A模块化高效隔离可编程序电压源装置的实际效果测试,能够数字化地实现测试电源的功能,满足高低电压穿越和变频变压、

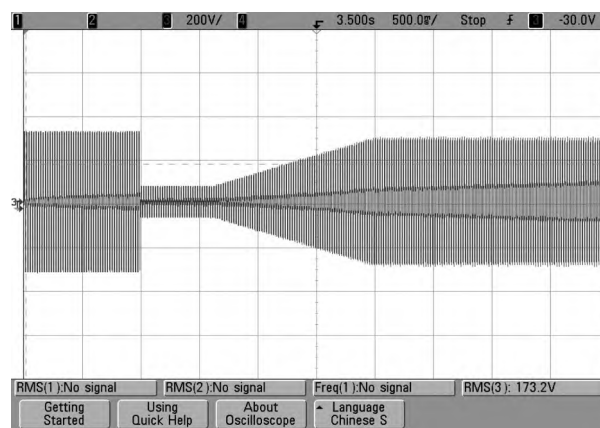
设备的保护检测、功能检测和性能检测等需求,输出准确度高的模块化结构,方便现场安装和扩容。



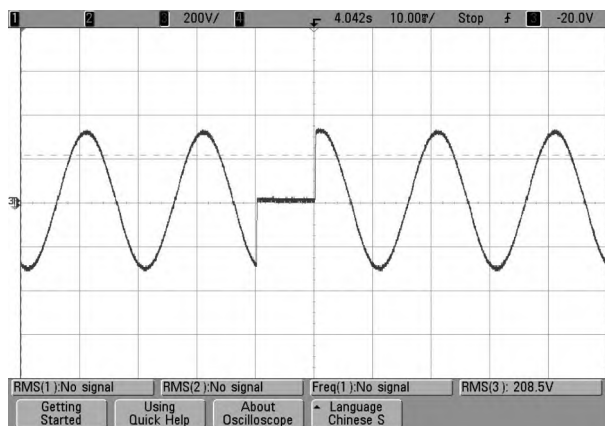
(a) 60 Hz分调三相幅值波形



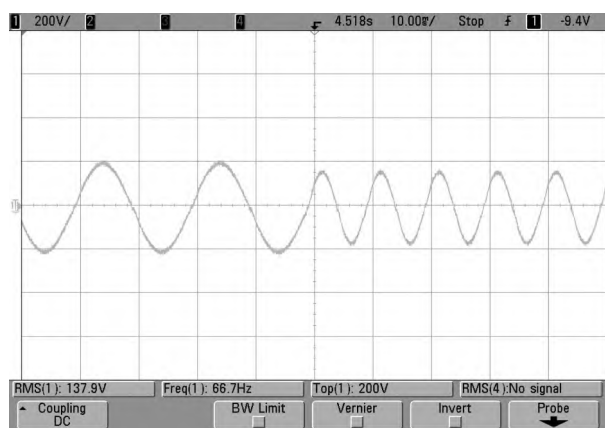
(b) 50 Hz分调三相相位波形



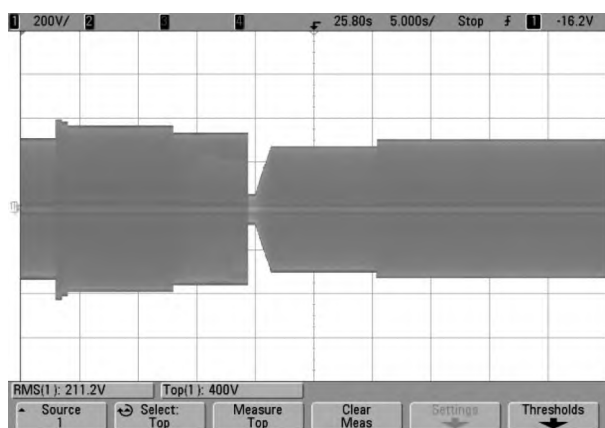
(c) 电压源输出调制输出波形图



(d) 电压中断10 ms波形



(e) 电压幅值频率变化波形



(f) 高压穿越波形

图5 电压源装置实测波形

Fig. 5 Measured waveform of voltage source device

## 5 结束语

本文提出一种基于模块化高效隔离可编程序电压源装置，用于科研院所和检测机构，提供一种交流大功率电压装置，实现电压三相独立分调、控制电压幅值、频率和不平衡等众多参数的变化，做低电压穿越和变频变压等试验、测试被测电气设备的保护检测、功能检测和性能检测等试验，弥补了综合性电压源装置的空白。

## 参考文献

- [1] 王建, 迟恩先, 王德涛. 一种基于模块化可编程序电网背景谐波模拟装置及其控制方法[P]. 中国专利, ZL 2019 1 0335255.6 发明专利. 2020-10-13.
- [2] 王建, 迟恩先, 王德涛. 基于模块化可编程序电网线路阻抗模拟装置及其控制方法[P]. 中国专利.ZL 2019 1 1024348.3 发明专利. 2021-03-23.
- [3] 王建, 任炜, 姜东岳, 等. 一种高效宽限可编程序逆变电源装置设计与研制[J]. 电气应用, 2020, 39(6): 80-84.
- [4] 袁义生, 邱志卓, 钟青峰, 等. 逆变器开关管驱动电流技术研究 [J]. 电源学报, 2019, 17(3): 133-139.
- [5] 王建, 马海刚, 王德涛. 单相可编程序电流源装置及其控制方法[P]. 中国专利, ZL201410715389.8, 2017-02-22.
- [6] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] 孙宪福, 何苗, 卢筑飞. 一种大功率可编程序电源输出装置[J]. 电子世界, 2018(19): 179-181.

## 作者简介

王建 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电能质量类产品研发, 定制电源类产品的设计开发工作。

(收稿日期: 2022-12-14)