

一种新型超低频正弦波发生器的研制

沈谢林¹, 郭建钊¹, 曾肖明², 杨赛柯², 李洪杰²

(1. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 近年来, 超低频试验装置因其轻便性得到了推广。研制了一种新型的超低频正弦波发生器, 利用该装置可以进行电力电缆的耐受电压试验。装置主要由双极性充电电路、放电电路、极性转换开关、电阻分压器以及控制系统组成, 产生超低频正弦波的关键在于滞环控制技术。在实验室中搭建装置并进行验证, 其输出波形的畸变率低于5%, 满足IEEE 400.2标准及国标要求, 验证了该超低频正弦波发生器的可行性与有效性。

关键词: 超低频; 耐受电压试验; 正弦波; 滞环控制

A new type of very low frequency sinusoidal waveform generator

SHEN Xielin¹, GUO Jianzhao¹, ZENG Xiaoming², YANG Saike², LI Hongjie²

(1. Quanzhou Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Company, Quanzhou 362000, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The very low frequency (VLF) testing equipment has been widely used in recent years due to its portability. A new type of VLF sinusoidal waveform generator which can be used for withstand voltage testing of power cables is presented. The equipment consists of a bipolar charging circuit, a discharging circuit, a polarity conversion switch, a resistance voltage divider and the control system, and the key to generate VLF sinusoidal waveform is hysteresis control technology. An experiment platform is built in the laboratory, and the result shows that this generator can generate a sinusoidal waveform at 0.1 Hz whose total harmonic distortion can meet the requirement of IEEE 400.2 standard and national standard, and its feasibility and effectiveness are proved.

Key words: VLF; withstand voltage testing; sinusoidal waveform; hysteresis control

0 引言

随着中国城市化进程加快, 电力电缆逐渐取代架空线路, 成为电网的重要组成部分^[1]。其中, 交联聚乙烯电缆以其优良的性能得到广泛应用。然而, 由于电缆附件的制作工艺和敷设环境的影响, 部分电缆在使用过程中会出现故障, 危害电力系统的安全运行^[2]。定期对电缆进行绝缘状态检测, 是电力部门排查隐患、保障电力系统安全的

重要手段^[3]。

根据励磁源的不同, 电缆离线检测技术可分为工频交流测试技术、直流测试技术及超低频测试技术等^[4]。工频交流测试技术最接近电缆实际运行工况, 但工频试验设备容量大、装置笨重, 不利于现场展开测试; 直流测试技术所需电源功率小, 但研究表明直流高压下会引发交联聚乙烯电缆中空间电荷积聚, 对电缆本体造成损害; 超

低频测试技术综合了以上两种测试技术的优点, 试验设备体积小, 在工频电压下具有较好的等效性, 近年来常用于电缆的耐受电压试验以及介损测量, 评估电缆的整体绝缘水平^[5]。

按照波形分类, 超低频试验设备主要可分为超低频正弦波和超低频余弦方波等^[6]。其中, 超低频正弦波试验设备应用较为广泛。目前常用的超低频正弦波产生方式或使用步进电动机, 波形存在失真; 或使用复杂的调制解调单元, 控制难度大^[7]。本文提出一种新型的超低频正弦波发生器, 并通过仿真软件和实验室试验验证其可行性和有效性, 具有工业应用前景。

1 发生器工作原理

系统电路拓扑结构如图1所示, 主要由正负极性充电电路、放电电路、极性转换开关、分压器和控制单元等组成, C_x 为试品电缆的等效电容。其中, 正负极性充电电路结构相同, 均由整流稳压电路、全桥逆变电路、高频变压器及输出整流电路几部分组成, 通过对逆变电路中IGBT的控制, 可以实现对试品电缆的快速直流充电; 放电电路由双向高压半导体开关和放电电阻组成, 用于调制试品电缆上的电压波形, 所用双向高压半导体

开关由两组开关单元共射极连接, 简化了驱动电路设计; 极性转换开关由两组高压半导体开关单元串联组成, 用于切换直流充电电路极性, 分别对应0.1 Hz超低频正弦波的正负半周期; 分压器用于监测试品电缆上电压, 将反馈信号送入控制单元中。

本文提出的发生器产生超低频正弦波的关键在于滞环控制技术, 滞环控制技术原理如图2所示。滞环控制的思路就是为获取某种波形, 根据所需要实际准确度设置一个环宽 δ , 通过脉冲控制电路中的电力电子开关开断。在开关导通期间进行充电, 电压/电流上升; 在到达上环($u+\delta$)时控制脉冲使开关断开进行放电, 电压/电流开始下降; 下降到下环($u-\delta$)时, 控制脉冲使开关导通进行充电。通过这样一个循环往复的动作, 以实现理想的波形信号^[8]。

在本系统中, 试品电缆上的电压由分压器监测, 通过高准确度A-D采样模块送入FPGA控制板中, 与理想0.1 Hz正弦波电压波形数据进行比较, 理想波形由DDS技术产生。当试品电缆上的电压低于理想电压一个指定值时, 充电电路工作, 令试品电缆电压抬升; 当试品电缆上的电压高于理想电压一个指定值时, 充电电路断开, 放

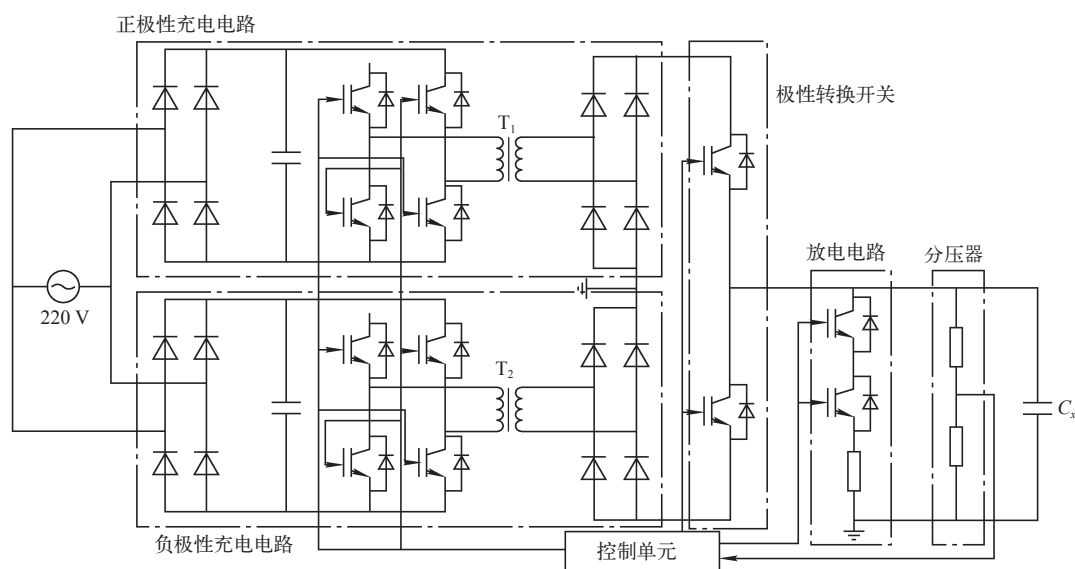


图1 超低频正弦波发生器拓扑结构
Fig.1 Topology of ultra-low frequency sine wave generator

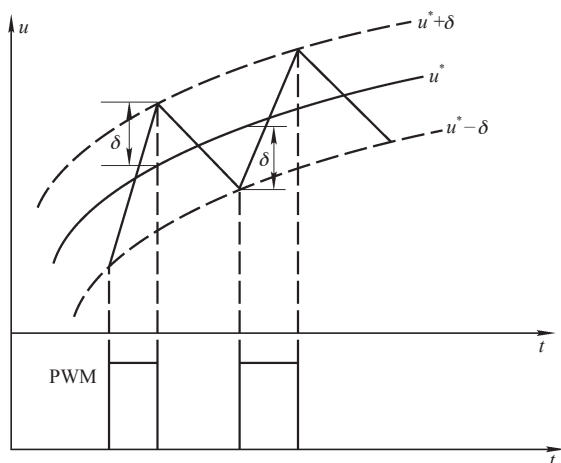


图2 滞环控制技术原理

Fig.2 Principle diagram of hysteresis control technology

电电路的双向高压半导体开关导通，试品电缆通过电阻进行放电。通过对试品电缆电压的跟踪控制，即可在试品电缆上得到0.1 Hz超低频正弦波电压。

2 系统仿真研究

为了验证本文提出的系统拓扑结构和控制策略的可行性，采用Simulink进行仿真研究。整流二极管、IGBT开关和高频变压器等采用理想器件；控制单元由逻辑模块组成。设定输出电压峰值10 kV，仿真结果如图3所示。由图3可知，对于本文设计的系统拓扑结构，采用滞环控制时，可以在负载电容上得到0.1 Hz超低频正弦波。但由于输出电压是以环宽值跟踪理想0.1 Hz正弦波电压，不可避免地叠加有高次谐波。对输出电压波形进行快速傅里叶分析，得到输出电压的THD值（总谐波失真度）仅为0.25%，满足IEEE 400.2标准及国标对超低频电压试验设备输出波形失真度小于5%的要求。为了得到最优波形，本文仿真研究了部分电路参数对输出电压的影响。

2.1 滞环环宽对THD值的影响

对于本文设计的超低频正弦波发生电路，滞环控制方法是产生0.1 Hz正弦波的关键。因此，滞环环宽值的大小对于输出电压的质量有很大的影响。在Simulink软件中逐渐改变滞环环宽值，其他电路参数保持不变，输出电压波形的THD值如图4

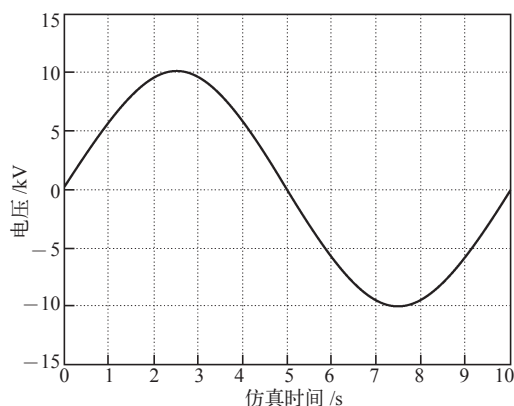


图3 仿真波形

Fig.3 Simulation waveform

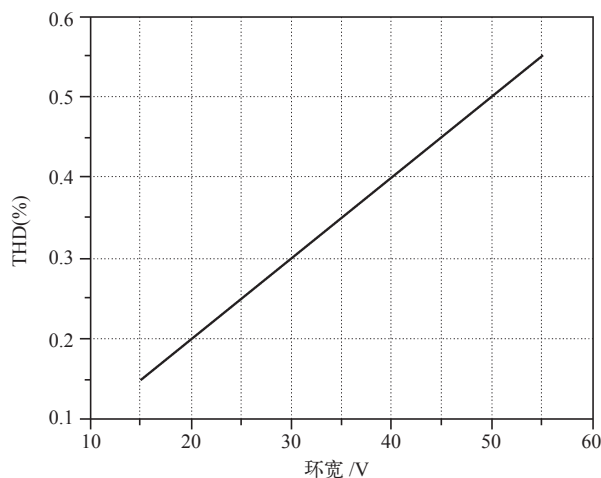


图4 环宽对THD值的影响

Fig.4 The effect of ring width on THD value

所示。

由图4可以看出，环宽值越小，则输出电压的THD值越小，系统的跟踪响应特性越好。但在实际电路中，环宽值还受到反馈电路分辨率和IGBT开关频率的限制，环宽值越小，则反馈电路分辨率越高，IGBT动作频率越快。因此，综合考虑后本文选择实际电路能满足要求的最小环宽值25 V。

2.2 开关频率、占空比对充电速率的影响

充电电路是本文设计的超低频正弦波发生电路重要的组成部分，充电时间越快，则系统滞环的动态响应越快，输出电压的谐波分量越小。因此，对于充电电路中的全桥逆变电路，采用不同开关频率、不同占空比的控制脉冲，以输出电压从0 V上升到指定电压的时间作为特征量，研究其对系统充电速率的影响。在Simulink软件中，

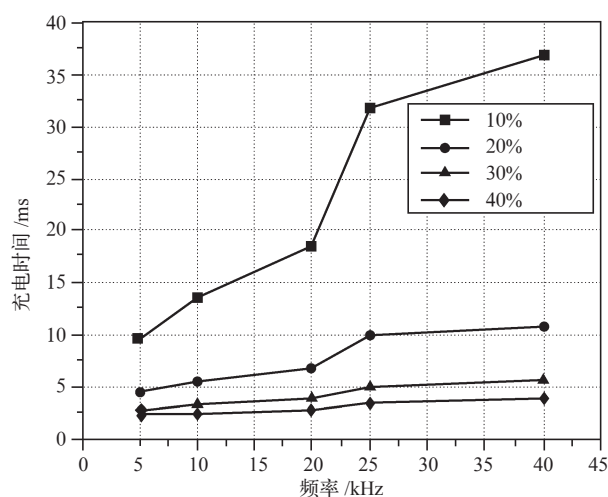


图5 充电开关频率、占空比对充电速率的影响

Fig.5 Effect of charging switch frequency and duty ratio on charging rate

分别改变开关频率和占空比的值，仿真结果如图5所示。

由图5可知，充电开关频率越低，占空比越大，则系统充电时间越短。通过分析，当充电电路中逆变桥的IGBT导通时，系统充电电流增大；当充电电路中逆变桥的IGBT关断时，系统充电电流减小。因此，充电开关频率越低，占空比越大，系统充电电流峰值越大，平均充电电流也越大，系统充电时间越短。综合考虑系统充电时间和实际元器件通流量，本文选取充电频率20 kHz、占空比30%。

2.3 放电电阻对输出波形的影响

在本文设计的超低频正弦波发生电路中，电阻是放电电路的关键组成部分。当负载电容上电压超过理想正弦波电压环宽值时，就需要通过电阻放电。因此，电阻值的大小决定电容放电的速率，影响系统的滞环特性。不难得出结论，当放电电阻值过大时，电容放电速率慢，负载电容上电压无法跟踪理想电压值变化，则输出波形失调，系统无法产生超低频正弦波；当放电电阻值过小时，电容放电速率快，在控制系统接收反馈电压、产生控制脉冲的时间间隔内，电容电压迅速下降，也将造成输出波形失调，系统无法产生超低频正弦波。因此，选取一个适中的电阻值至

关重要。通过Simulink软件仿真可知，当选取放电电阻值为1~50 kΩ时，系统均能正确地产生超低频正弦波波形。考虑到若电阻值过小，则需要增大电阻功率，最终选取放电电阻值为50 kΩ。

3 平台搭建与测试

3.1 双极性充电电路

双极性充电电路结构相同，由整流稳压电路、全桥逆变电路和输出整流电路几部分组成。其中，整流稳压电路的输入为220 V市电，输出为311 V直流电压。因此，采用西门康公司的MDQ100 A/1 600 V模块作为整流元件，参数留有安全裕量。稳压电容选取日立生产的4 700 μF、DC 450 V电解电容，将整流桥输出的脉动直流电压变成稳定直流，供给后级的全桥逆变电路；逆变电路是充电电路的核心部分，由两个半桥IGBT模块组成，将前一级得到的直流电压变为高频交流电，作为高频变压器的输入。选取日本富士生产的2MBI75N-120 IGBT模块，动作时间小于1 μs，满足性能要求；高频变压器将前级交流电压抬升，得到高频交流高压，使得输出电压峰值满足试验要求。由于采用铁氧体作为磁心，重量和体积大大减小，电压比设为1:100，委托加工厂代为制造；输出整流电路将变压器输出的高频交流高压变成直流高压，给负载电容充电。因此，由耐受电压值为20 kV、额定电流为2 A的高压硅堆PRBVP2A-20搭建而成。充电电路实物图如图6所示。

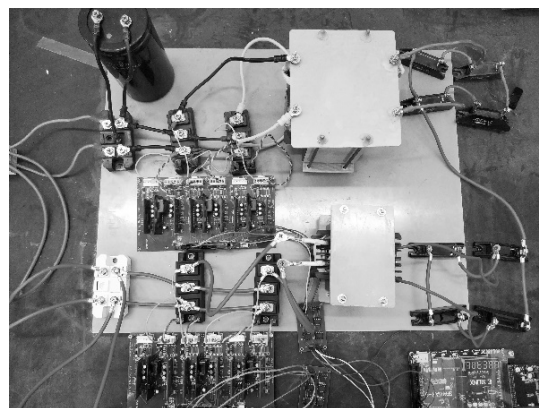


图6 双极性充电电路实物

Fig.6 Physical chart of bipolar charging circuit

3.2 高压半导体开关单元

本文设计的极性转换开关和双向高压半导体开关均由两组高压半导体开关单元串联组成。由于单个分离式IGBT耐受电压值不高,以IXYS公司的IXEL40N400型IGBT为例,额定耐受电压值为4 kV,满足不了系统高耐受电压的要求。因此,本文采用多个IGBT串联构成高压半导体开关单元的设计方案。即选取5个额定耐受电压值为4 kV的IGBT串联使用,耐受电压值可达20 kV。IGBT串联应用中,必须要对芯片本体加装均压保护电路,其作用在于保证串联使用的IGBT芯片在关断状态下静态分压均不大于其额定电压。本文采用并联均压电阻的方法来实现串联开关功能模块之间的静态均压;同时,本文采用暂态电压抑制管(TVS)来抑制动态分压不均。TVS具有极佳的瞬态性能,瞬态吸收功率可达数千瓦。由于选用的IGBT额定耐受电压为4 kV,因此选用9个最大钳位电压为440 V的TVS管串联。高压半导体开关单元实物如图7所示。

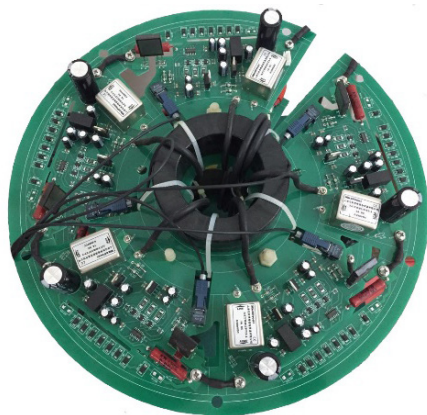


图7 高压半导体开关单元实物图

Fig.7 Physical chart of high voltage semiconductor switching unit

3.3 控制单元

控制单元包含A—D采样模块、FPGA控制板和IGBT驱动电路几部分。A—D采样模块连接主电路中分压器低压臂电阻的输出,将采集到的负载电容电压数据送入FPGA控制板中,其准确度直接影响系统最终输出的超低频正弦波波形质量。因此,采用工业级12 bit高精度A—D采样模块,

输入电压 $-5 \sim +5$ V,与低压臂输出相匹配;由于本文采用的滞环控制方法对系统的响应时间有较高要求,因此采用FPGA作为整套装置的控制核心,主频时钟50 MHz,满足高精度A—D采样和IGBT快速动作的性能要求。此外,滞环控制方法所需的理想0.1 Hz正弦波由FPGA的DDS内核产生,无须额外设计理想正弦波发生电路。人机交互部分采用键盘和数码管,可以通过键盘设定试验电压幅值和控制试验时间;IGBT驱动电路的作用为:将FPGA控制板输出的脉冲信号放大到足以驱动主电路中IGBT动作,同时隔离控制板和主电路,起到保护作用。

最终,在实验室对搭建完成的整套发生器装置进行测试,选用0.1 μ F的负载电容,输出电压波形如图8所示。可以看到,本文设计的超低频正弦波发生器可以在负载电容上产生0.1 Hz正弦波电压,且波形畸变率小。对输出电压波形进行快速傅里叶变换,得到波形的THD值为1.91%,满足IEEE 400.2标准及国标对超低频电压试验设备输出波形失真度小于5%的要求。

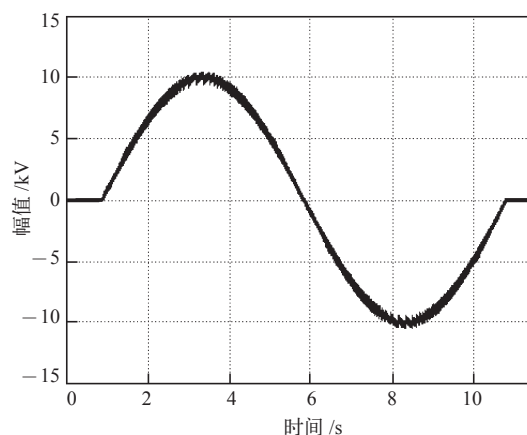


图8 试验波形

Fig.8 Test waveform

4 结束语

本文提出了一种新型的超低频正弦波发生器,并通过仿真技术和试验验证了系统拓扑结构和控制策略的可行性和输出波形的有效性。相对于传统正弦波发生装置,本发生器结构简单,控制新颖,输出波形质量高,具有工业应用前景。

参考文献

- [1] 罗俊华, 马翠姣, 邱毓昌, 等. 35 kV及以下XLPE电力电缆试验方法的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 58-61.
LUO Junhua, MA Cuijiao, QIU Yuchang, et al. Research on test methods of XLPE power cables with 35 kV and below [J]. Power Grid Technology, 2000, 24 (12): 58-61.
- [2] 曹佳滨. 交联聚乙烯电缆现场耐受电压试验的特点分析[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 63-65.
CAO Jiabin. Characteristic analysis of field voltage withstanding test of XLPE cable [J]. Insulating Materials, 2008, 41 (3): 63-65.
- [3] 张丽, 李红雷, 贺林, 等. 高压电缆状态检测技术有效性研究[J]. 华东电力, 2012(1): 116-118.
ZHANG Li, LI Honglei, HE Lin, et al. Effectiveness of condition detection technology for high voltage cables [J]. East China Power, 2012 (1): 116-118.
- [4] 江思杰, 王继红, 王定虎, 等. 交联聚乙烯(XLPE)电缆局部放电检测技术的研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(5): 118-120.
JIANG Sijie, WANG Jihong, WANG Dinghu, et al. Research on partial discharge detection technology for XLPE cables [J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35 (5): 118-120.
- [5] 钟志毅, 欧景茹, 郭铁军. 交联聚乙烯绝缘电力电缆交流耐受电压试验研究[J]. 电网技术, 2007(增刊1): 108-111.
ZHONG Zhiyi, OU Jingru, GUO Tiejun. AC withstand voltage test of XLPE insulated power cables [J]. Power Grid Technology, 2007 (Sup1): 108-111.
- [6] 彭潜, 陈俊武, 吴云飞. 用0.1 Hz超低频方法进行XLPE/PE电缆耐受电压试验[J]. 电工技术, 2004(12): 58-60.
PENG Qian, CHEN Junwu, WU Yunfei. Voltage withstand test of XLPE/PE cable by 0.1 Hz ultra-low frequency method [J]. Electrical Technology, 2004 (12): 58-60.
- [7] 何丽娟, 李子帙, 罗双超, 等. 0.1 Hz超低频耐受电压试验装置的设计及实现[J]. 电测与仪表, 1999(8): 22-24.
HE Lijuan, LI Zizhi, LUO Shuangchao, et al. Design and realization of 0.1 Hz ultra-low frequency voltage withstand test device [J]. Electrical Measurement and Instrument, 1999 (8): 22-24.
- [8] 张加胜, 郝荣泰. 滞环控制变流器的开关频率研究[J]. 电工电能新技术, 1998(1): 54-56.
ZHANG Jiasheng, HAO Rongtai. Study on switching frequency of hysteresis controlled converter [J]. New Technology of Electrical Power, 1998 (1): 54-56.

作者简介



沈谢林

沈谢林, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力设备高压试验工作。

(收稿日期: 2018-10-19) **EA**