

基于 DSP-FPGA 的 APF 的硬件设计

宋连庆, 万卓, 韦新磊, 权策, 马存乐

(西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于 NPC 三电平拓扑结构的 APF 有效提升了开关管的耐压能力, 先通过 MATLAB 仿真得出三电平 APF 有源滤波器在谐波电流补偿上具有比较好的补偿特性。针对仿真得出的结论, 基于双核 DSP28377D 与 EP3C40Q240C8N 的主控样机, 在进行保护电路的设计后, 在 APF 有源滤波器的硬件电路上进行采样测试、驱动测试、直流侧充电测试以及带纯阻性电感负载的逆变侧测试。通过硬件电路的测试得知基于 DSP-FPGA 的 APF 有源滤波器设计可以满足实验进行的谐波电流补偿的条件。

关键词: 三电平拓扑结构; MATLAB; 有源滤波器; 谐波电流补偿

中图分类号: TN713

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.191059

中文引用格式: 宋连庆, 万卓, 韦新磊, 等. 基于 DSP-FPGA 的 APF 的硬件设计[J]. 电子技术应用, 2020, 46(5): 74-78.

英文引用格式: Song Lianqing, Wan Zhuo, Wei Xinlei, et al. Hardware design of APF based on DSP-FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(5): 74-78.

Hardware design of APF based on DSP-FPGA

Song Lianqing, Wan Zhuo, Wei Xinlei, Quan Ce, Ma Cunle

(Telecommunications College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: APF based on NPC three-level topology structure can effectively improve the voltage withstand capacity of the switch. Firstly, through MATLAB simulation, it is concluded that three-level APF active filter has relatively good compensation characteristics in terms of harmonic current compensation. According to the conclusion of the simulation, based on the main control prototype of dual-core DSP28377D and EP3C40Q240C8N, after the design of the protection circuit, the hardware circuit of APF active filter is tested by sampling, drive test, DC side charge test and inverter side test with pure resistance inductance load. The test of hardware circuit shows that APF active filter design based on DSP-FPGA can satisfy the condition of harmonic current compensation.

Key words: three level topology; MATLAB; active filter; harmonic current compensation

0 引言

现如今, 电力电子技术的发展很快, 使得它在各个行业的应用非常广泛^[1]。电力系统存在非纯阻性负载, 无源滤波器利用谐振原理来消除特定次谐波频率, 灵活性比较差^[2]。国内外学者以及众多公司针对并联型 APF 做了不少研究与应用开发, 1977 年, 一名德国专家首次提出了三电平逆变器拓扑结构^[3], 利用两个辅助开关来平衡每个桥臂的中点电压平衡。之后, 1983 年的 IEEE 工业年会当中, NABAE A 专家首次提出 NPC 三电平逆变器的概念^[4], 用箝位二极管代替了之前的辅助开关, 明显降低了开关管的损耗, 提升了开关管的耐压。工业化的快速发展、用电负荷的提升、大功率以及高电压的谐波源负载使得高压大容量 APF 有源滤波器的研究将成为热点问题之一^[5]。本文利用 MATLAB 进行仿真, 可以得知 NPC 型三电平 APF 具有不错的动态补偿特性。APF 有源滤波器产品在硬件电路板上分为阻抗板、主控板、驱动板。三电平变流器可分为五部分: 直流母线电

容、吸收电容、充电电阻、IGBT 和 LCL 滤波器^[6]。高精度的电流检测装置在有源电力滤波器上有重要作用^[7], 开发 APF 有源滤波器除了要对谐波电流的算法设计以外, 还需要提前对硬件电路的设计进行测试, 表明各模块已经具备谐波补偿测试的要求。

1 有源滤波器

有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波、补偿无功功率的新型电力电子^[8]。根据开发设计的要求, 选择并联型三电平 APF 不但可以灵活地补偿系统的谐波, 而且应用三电平控制技术, 开关器件在耐压方面得以提升, 电子元器件的损耗相对减小且使用时效相对延长, 改善了逆变电路输出后电流波形的畸变。

1.1 工作原理

并联型 APF 工作的原理图如图 1 所示, 包括三相交流电源、并联 APF 谐波电流补偿模块、三相整流负载。图中系统电流为 I_s , 负载电流为 I_L , 谐波电流为 I_m^* , 补偿电流为 I_m 。APF 主要分为谐波检测补偿模块和主电路逆

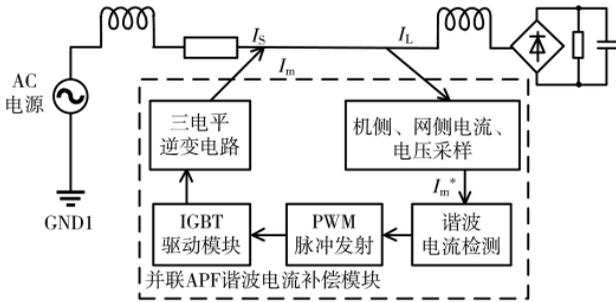


图1 并联型 APF 工作原理图

变模块^[9]，谐波的检测主要通过主控芯片 DSP 来完成采样与指令电流的计算，FPGA 用于保护和生成 SPWM 波。通过霍尔传感采集机侧与网侧的电流，根据瞬时无功功率理论运算得出谐波电流^[10]。DSP 在完成采样以及运算后得出指令电流，由 FPGA 发送至 IGBT，控制它的通断，使得逆变电路发出补偿电流。谐波补偿电流大小上等于网侧中的谐波电流，相位上相反，使得由整流侧产生的电流波形畸变得到了很好的补偿效果^[11]。APF 动态补偿的实时性最终使得机侧产生的补偿电流矫正了网侧的电流的畸变，电流波形基本接近正弦波。

1.2 APF 主电路拓扑

图2所示为并联型 APF 逆变主电路拓扑结构，包含 12 个 IGBT、6 个续流二极管、2 个电容。逆变电路前端 RC 滤波可以降低开关器件通断产生的高频次谐波分量，使得滤波器性能得以提升。通过控制 IGBT 的开通与关断来控制直流侧电容给网侧输入的指令电流的大小，三电平 APF 拓扑电路共有 3 个桥臂，每一个桥臂包括 4 个 IGBT，组合起来的工作状态有 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 种，但每个单桥臂中，开关器件 T1 与 T3 互补、T2 与 T4 互补，因此

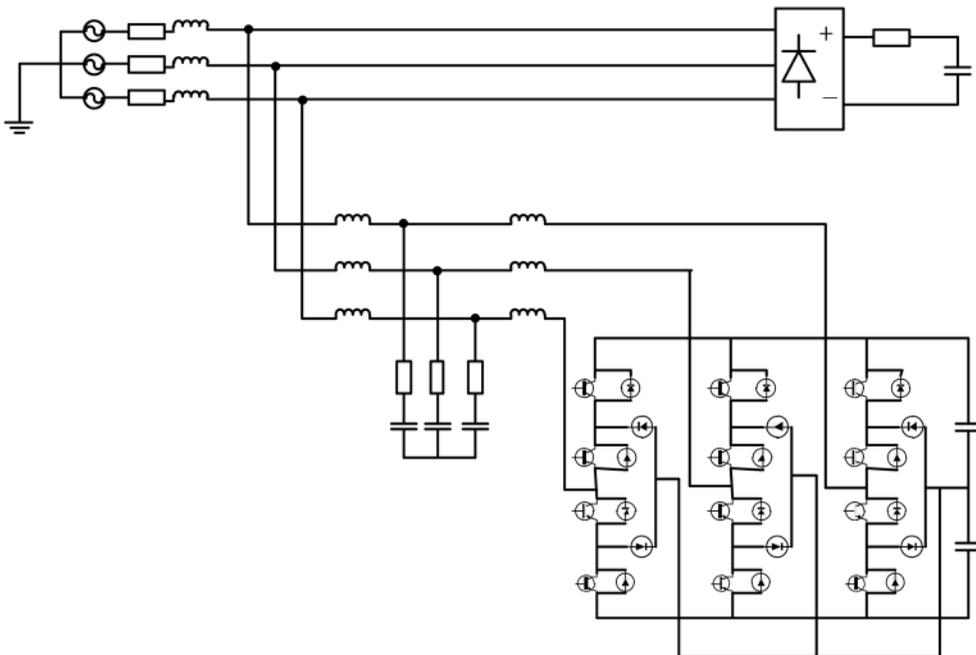


图2 并联型 APF 逆变主电路拓扑结构

剩下的状态只有 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 种。既而输出的相电压也就有 3 种，分别为： $-U/2$ 、 $+U/2$ 、 0 。

2 Simulink 仿真

Simulink 是 MATLAB 中重要的仿真应用器件库，用其建立系统模型，调整仿真参数，启动仿真程序，可以查看电路仿真出来的波形。

2.1 仿真模型

自 1983 年赤木泰文提出的瞬时无功功率理论被广泛应用于谐波检测，此后从 PQ 理论中引申出的 i_p 、 i_q 运算方式所计算得出的基波电流分量 i_{1f} 和谐波电流分量 i_{1h} 不受电压波形畸变的影响^[12]。基于该原理搭建并联型 APF 的 Simulink 仿真，如图 3 所示。

2.2 仿真结果

按 RUN 键后运行程序，示波器显示波形。

通过观察仿真出的实验图形，可以看出在对整流负载模块进行 APF 并联补偿后，系统的电流波形明显有所改善。电容电压达到了不错的稳定状态，谐波指令电流在生成脉冲后，可以满足 1、3 管以及 2、4 管的互补，并形成比较良好的 SPWM 波形，达到了驱动设计的要求，这里只给出 A 相的驱动脉冲，如图 4 所示。

负载侧的电流 THD 为 24.15%，由于谐波的补偿，THD 降低到 3.07%，说明 APF 改善了电网侧电流波形畸变。

3 硬件搭建

早期采用 DSP 处理器原因是因为它的数字处理精度高，应用灵活，FPGA 具有的处理速率高以及高度的并行、流水处理功能^[13]。结合两者的优点，本文主控处理芯片选择双核的 TMS320F28377D 与 EP3C40Q240C8N。随着电力电子技术的发展，DSP+FPGA 应用于高压大功率电力电子设备的控制将会越来越多^[14]。

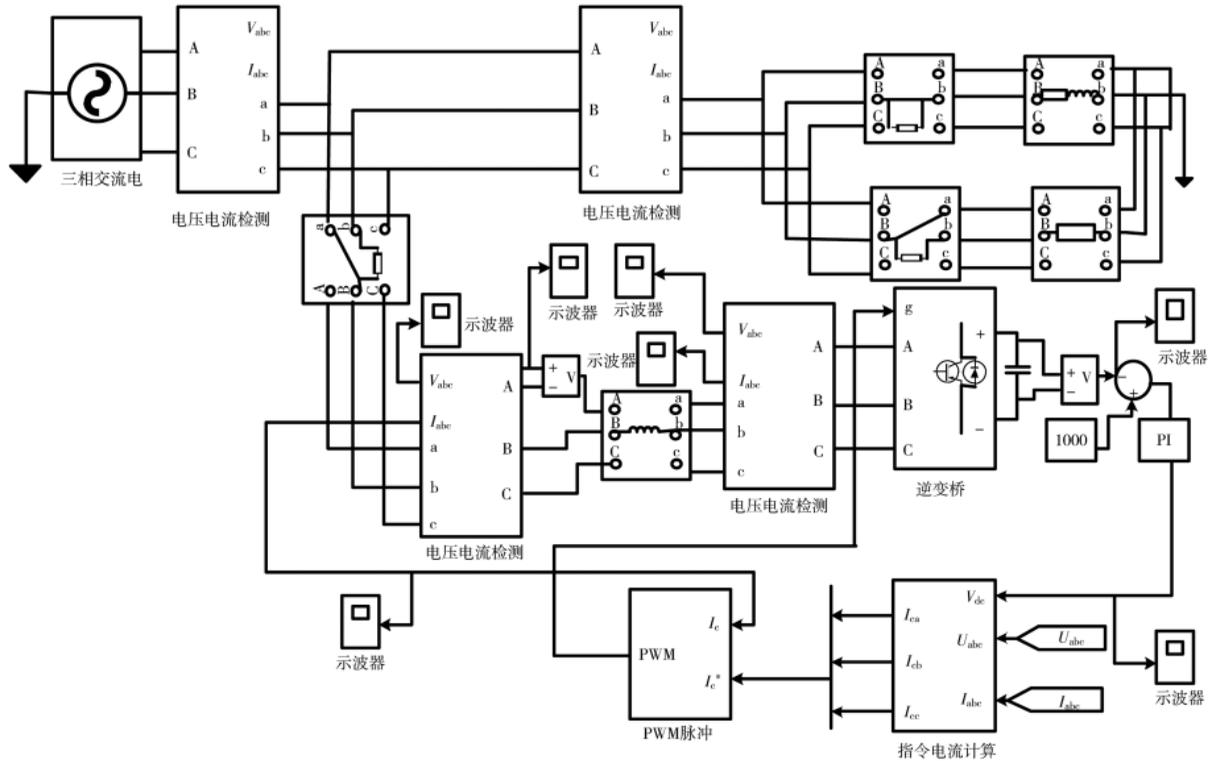


图3 并联型 APF 的 Simulink 仿真

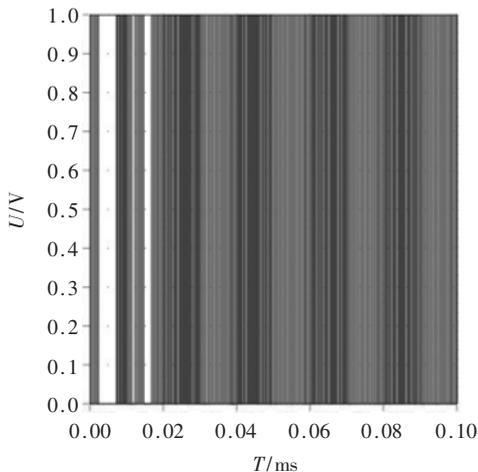


图4 A相驱动脉冲

3.1 功能框图

根据 APF 所需要完成的任务,对其主控芯片进行功能划分,如图 5 所示。

DSP 处理从外界采样而来的电流、电压信号,通过采样电路将其转化成数字量,进行电流、电压双闭环设计,通过 PID 先调节电压外环,再调节电流内环;FPGA 以电流的 A 相为参考对 C 相进行锁相环设计,编程发生一条载波,与调制波进行比较生成 SPWM 波形;再利用内部的乘法器进行低通滤波器设计,可以得到滤波后的正弦波图形。

3.2 流程图

APF 在进行逆变的时刻,要满足如下的条件,如图 6

所示,主要是针对直流侧电压是否已经充到可以逆变的调节,以及逆变后电压是否稳定,以调整 PI 的参数,使得 1、2 上管与 3、4 下管电压平衡,避免中点漂移。通过观察生成的 SPWM 波形可以针对性地调节电压环的 PI 设计与电流环的 PI 设计,直至达到生成中间宽两边窄的 SPWM 脉冲。

4 保护电路

主板设计在进线口采用保险熔断保护,使得进线电压电流有一定的额度,防止烧坏主板电路。采样模块中设计保护电路,过流、过压、欠压设计。这里只给出过压、欠压电路图,如图 7、图 8 所示。采用 LM339 芯片,内部包含 4 个独立的电压比较器,还有 14 个引脚。驱动脉冲电压为 5 V,所以 VREF 的设定值为 5 V。当直流侧电压 VDC 大于 VREF 时,属于过压保护,输出 0 V;当直流侧电压 VDC 小于 VREF 时,属于欠压保护,直接输出 3.3 V。

5 实验样机的测试

根据实验要求设计出硬件电路,按照电容储存的能量与逆变产生的最大功率计算得知,电容采用在实际装置中取 24 个 450 V、820 μ F 的电容,12 并两串组成直流侧电容组,这样电容组的容值为 4 920 μ F。考虑开关器件的耐压耐流,针对 NPC 型三电平拓扑结构,单个开关管承受的直流母线电压为总电压的一半,本文选取英飞凌的 F3L150R07W2E3 三电平模块作为主电路开关管,集成后的模块每个开关管耐压为 650 V,额定电流为 300 A。

硬件包括三层电路板,分别为:顶层的主控板、中间层主板、底层阻抗板。网侧有进线的电压采样电路与电

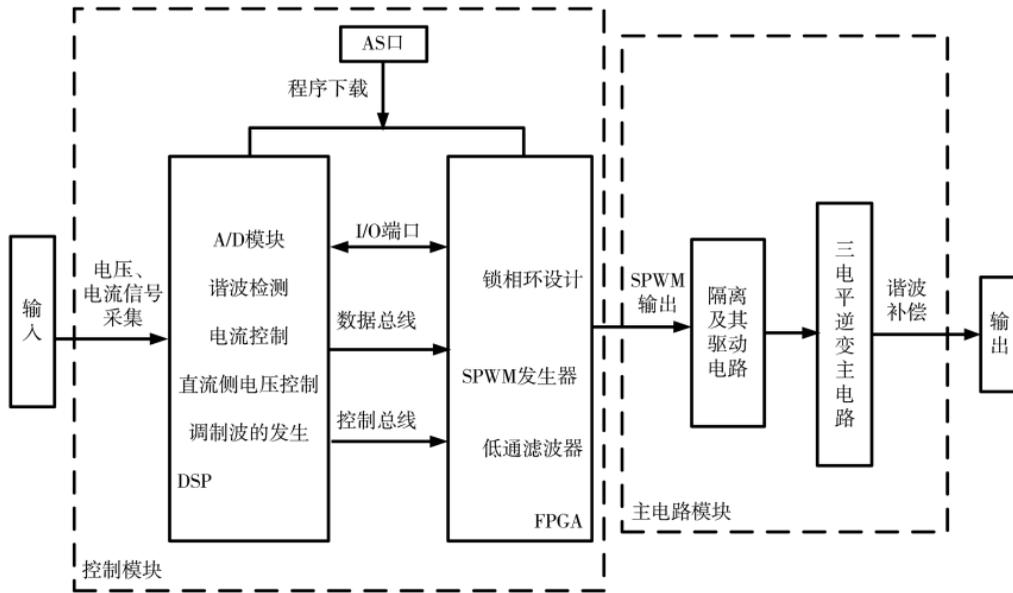


图5 主控硬件框图

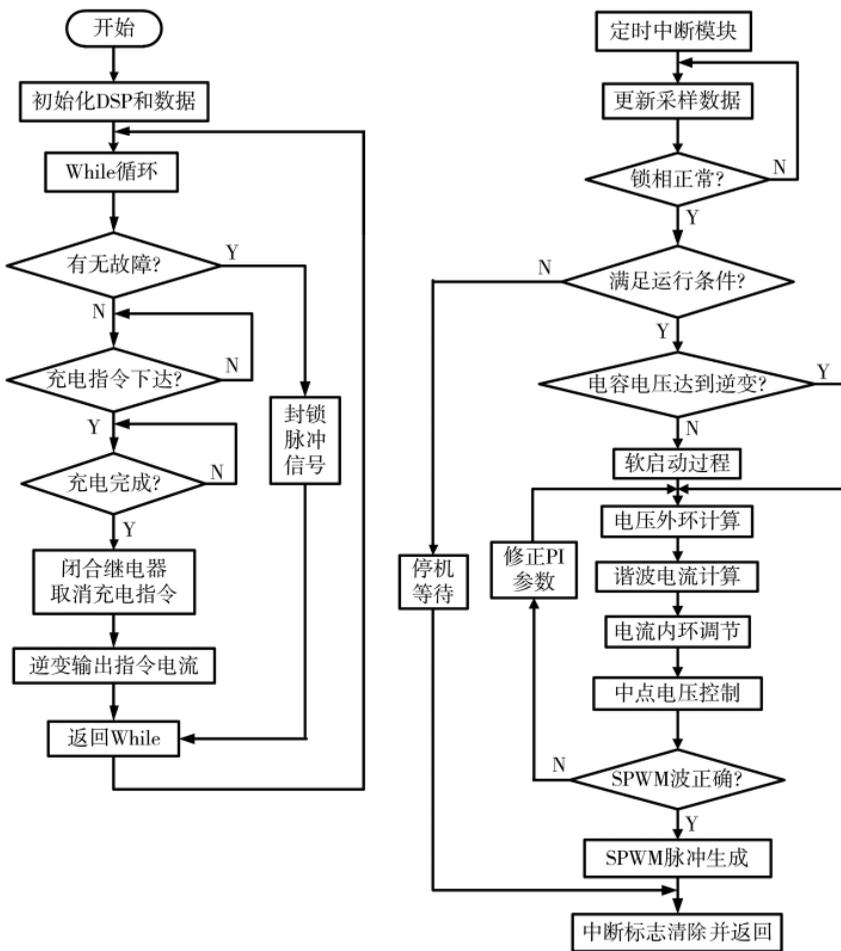


图6 系统流程图

样逆变侧出来的电流大小,电容输出谐波电流进行补偿。通过加大电压来观测采样电流的大小,采样电路正确。网侧的电流采样通过互感器变比后进入电流传感器进行采样,电流10 A的互感器变比为30:1,进线绕4圈,进入主控板测量,调整网侧采样出的电流波形信号,如图9所示。

5.2 驱动测试

调制波发生器发射脉冲检测1、2管脉冲是否正确发出,驱动电路外加15 V驱动电源,外接5 V脉冲信号,加载直流侧电容电压50 V。驱动板的调试过程中,由于没加退饱和,一直检测CE两端的电压,2脚高阻状态不输出PWM,加入退饱和和电阻,驱动正常工作。

驱动的自身保护:检测CE两端电压,与电源驱动芯片里的9 V(自带保护硬件设计)相比较大时,出现PWM的封锁。

5.3 直流侧充电测试

实验器件包括0~250 V调压器、220 V电源、电压表、熔断器。

将电压从0调至50 V,观察直流侧正、负两端电压为100 V,进一步发现24个电容正常充电。电容充电时,电流从电容的正极流向负极。电容充电的图形是阶梯

流采样电路,通过断路器将设备并入电网,负载发生谐波。为了保障APF的安全,设备前端串入电阻。

5.1 采样测试

逆变侧电流采样:当继电器闭合时,霍尔传感器采

状,充电完成的电路电流波形逐渐平缓。

5.4 带纯阻性电感负载的逆变侧的测试

三相各串联两个功率为1 500 W的5 Ω电阻负载后,通过谐波发生器发出谐波,采样谐波电流,生成指令

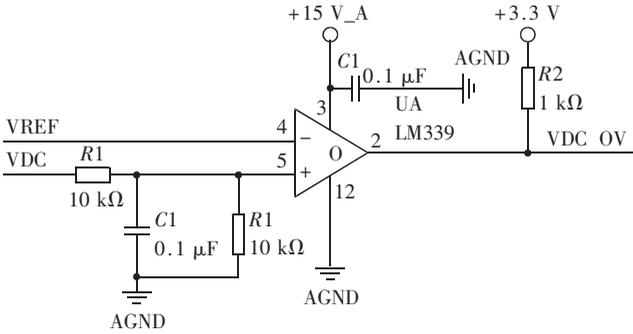


图 7 直流侧过压保护

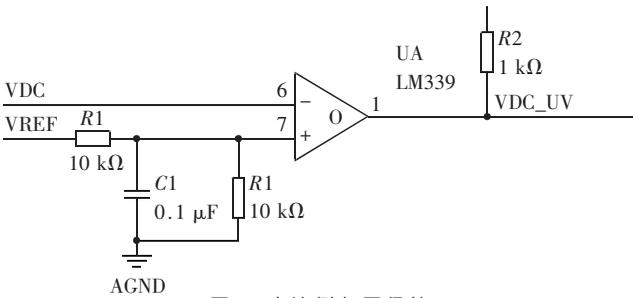


图 8 直流侧欠压保护

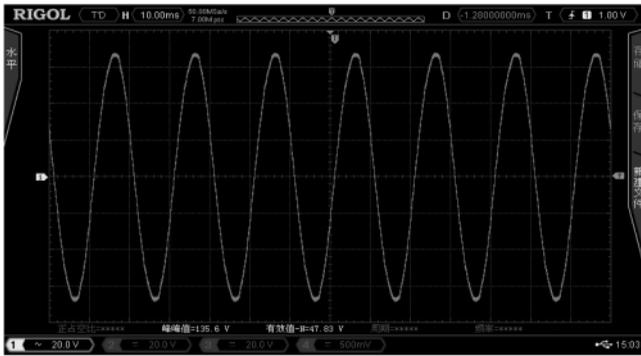


图 9 采样电流

电流驱动 IGBT 的开通。先不给驱动电源,只是观测逆变后直流侧电压是否稳定、中点电压是否平衡运行以及发出的脉冲是否正确。继电器闭合的瞬间,逆变侧的电压在多次调整 PI 后达到了稳定,指令电流生成的驱动脉冲如图 10 所示。

6 结论

本文根据 APF 工作的基本原理,按照 i_p 、 i_q 运算进行谐波计算,合理地划分主控芯片的结构,硬件部分按照设计的流程框图完成电压环、电流环的 PID 调节运算。通过实验调节采样调理电路中的电阻,处理驱动电路的故障,主电路的电压最终可以稳定进行充电;同时,APF 逆变实验中,逆变时直流侧电压稳定,脉冲生成无误。

参考文献

[1] 王晓杰.三相四线制三电平有源电力滤波器研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
 [2] 邱照阳.三相三线制三电平 APF 的控制算法研究[D].成都:电子科技大学,2014.

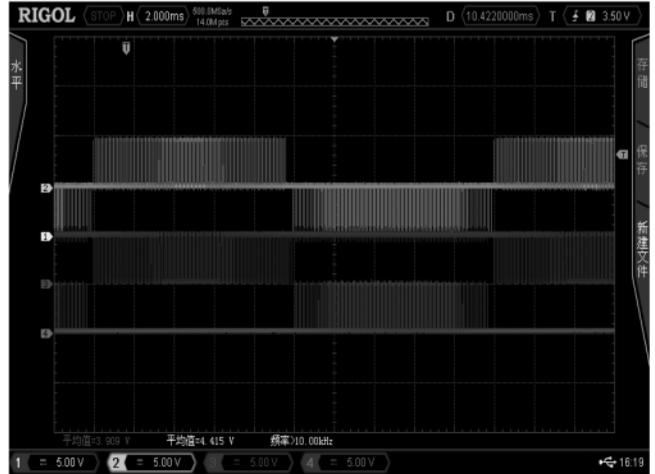


图 10 SPWM 脉冲

[3] 陶生桂,胡宾.城市轨道交通车辆电气传动系统发展综述[J].电力机车与城轨车辆,2007,30(2):1-5,22.
 [4] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuit[C]. IEEE&JIEE, Proceedings IPEC Tokyo IEEE, 1983, 2: 1357-1386.
 [5] 刘意.基于 DSP+FPGA 的级联 H 桥 APF 研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
 [6] 于瑞龙,王刚,徐园.基于 DSP 的三电平 APF 研究[J].电气应用,2019,38(3):21-25.
 [7] 韩雪龙,候银银,顾能华,等.基于谐波分离的电流信号频率检测装置设计[J].电子技术应用,2019,45(6):80-83,88.
 [8] 徐德鸿,陈治明,李永东,等.现代电力电子学[M].北京:机械工业出版社,2017.
 [9] 万卓.三相三线制三电平 APF 仿真[J].电脑知识与技术,2019(2):15-16.
 [10] 李昱.三电平有源电力滤波器关键技术的研究[D].西安:西安交通大学,2013.
 [11] 王粟,朱飞.三相四线并联型有源电力滤波器的仿真[J].电子制作,2017(1):5-7.
 [12] 王兆安.谐波抑制和无功率率补偿[M].北京:机械工业出版社,2016.
 [13] 陈勇.基于 FPGA+DSP 弹载 SAR 信号处理系统设计[J].电子技术应用,2019,45(9):101-105.
 [14] 刘魁,刘健,管曾轮,等.基于 DSP+FPGA+CPLD 的电力电子设备通用控制器[J].机械工业出版社,2019,45(4):122-126.

(收稿日期:2019-10-09)

作者简介:

宋连庆(1963-),男,副教授,主要研究方向:电力电子与电力传动、现场总线网络以及嵌入式计算机的应用。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所