基于变参数和积分分离PI控制的大功率整流器研究

针对现有电解槽用极化电源大部分采用单片机及模拟电路控制和晶闸管相控整流技术方案的不足，提出一种采用二极管整流－Buck降压斩波的整流器主电路，控制部分采用DSP为控制器，软件实现采用变参数和积分分离PI控制算法的大功率整流器方案。阐述了系统方案的设计、主电路设计及原理分析、系统控制方案的设计以及控制算法分析与软件实现，并进行了系统仿真。仿真结果表明：采用该方案的整流器，电源输出稳定性和控制准确度得到明显改善，并能有效提高功率因数和变流效率，具有良好的应用前景。

曾小波／湖南理工职业技术学院　张小平／湖南科技大学先进矿山装备教育部工程研究中心　旷永红／湖南工程学院

曾小波／讲师

关键词/Keywords
整流器·
DSP·
积分分离PI·
变参数PI·
仿真·

极化电源是电化工业整流系统的备用电源，主要功能是为电解槽提供几十至几百安培的直流电流并进行槽电压检测；或者当正常运行的电解槽停车时，为电解槽提供正向极化电流，达到保护电解槽防止被腐蚀的目的。现有电解槽极化电源大部分采用相控整流技术，由于电解槽单元电压的变化范围大，使极化整流器常处于控制角较大的运行状态。因此相控整流电源存在的主要问题有：①三相桥式相控整流的直流侧电压、电流存在一定的纹波；②三相桥式相控整流的网侧电流畸变大，谐波含量多，电网污染严重，功率因数低[1]，能量浪费严重。另外，部分整流器的控制系统采用单片机扩展外围设备实现，对于多变量的复杂系统，单片机的运算能力和运算速度难以满足系统需要，影响整流器系统的性能。

国家自然科学基金（51477047），湖南省教育厅资助科研项目（12C1097）。

本文提出采用TI公司TMS320F28035型号的DSP作为核心控制器的大功率DC/DC整流器设计方案，设计一种400 V/100 A的极化电源。系统采用不可控整流－Buck降压斩波技术为整流器的主电路，选用英飞凌公司高性能IGBT作为晶体管。软件算法上以基于DSP的变参数和积分分离PI调节为核心控制算法，通过调节输出PWM脉冲占空比，达到控制后级Buck降压电路的输出、稳定输出电压[2]的目的。仿真表明，该方案能有效改善系统稳定性和控制准确度，设计的极化电源输出电压稳定，能减少谐波和无功损耗，效率高达97.5%，具有较好的应用价值。

系统方案

极化电源系统方案如图1所示，由功率主电路、辅助电源电路和以DSP为核心的控制电路组成。主电路部分主要由二极管整流电路、电容滤波电路和Buck降压直流变换部分组成，实现三相整流与滤波功能[3-5]。Buck降压直流变换部分主要由晶体管IGBT、驱动模块和辅助电路组成，在PWM信号的控制下，实现输出电压和电流的调节功能。控制电路的功能是实现信号处理、电压和电流采样、A－D转换、人机交互、闭环控制以及故障保护等功能。其中，电压和电流的采样主要负责主电路输出电压和电流的采样检测；IGBT驱动模块电路对DSP输出的PWM信号进行隔离、放大；功率

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

驱动保护电路保护过电压、过电流时封锁PWM信号，保护电源系统；辅助电源为控制电路、IGBT驱动电路和保护电路提供工作电源。图1中点画线部分为DSP的控制部分。

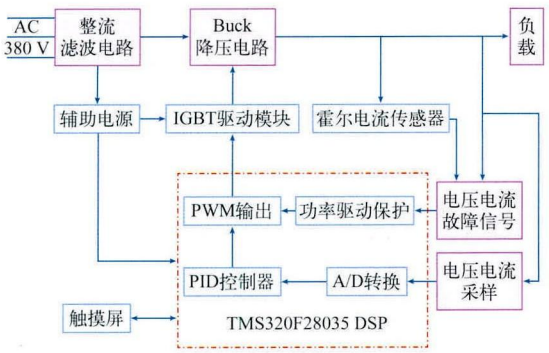

图1　系统整体方案框图

主电路设计及原理分析

主回路电路原理如图2所示，由二极管整流、电容滤波电路、IGBT晶体管和*LC*滤波电路组成。交流侧为380 V的三相电压，进输入端电感电容组成Y形滤波后，再进入二极管桥式整流电路，经电容C_1滤波后为平稳直流源。通过单管IGBT的斩波、平波电抗器滤波输出平稳的直流稳压电压和电流。通过调节IGBT导通时间t_{on}即可控制输出电压大小。根据现有电力电子技术理论可知[6]

$$U_D = 380\alpha_1\alpha_2 = 380\ \text{V} \times 1.35 \times 1.1 = 564\ \text{V} \quad (1)$$

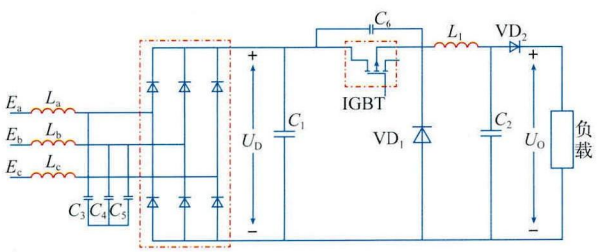

图2　整流器主回路原理

主回路为降压模式的电源输入时，三相交流和输出直流的关系为

$$U_o = \frac{t_{on}}{T}U_D = 380\frac{t_{on}}{T}\alpha_1\alpha_2 = 380\ \text{V} \times \frac{t_{on}}{T} \times 1.35 \times 1.1 = 564\alpha\ \text{V} \quad (2)$$

由式（2）可得，只需控制使IGBT导通的α取值即可，当脉冲占空比在0～90%范围调节时，输出极化直流电压可在0～507 V范围，考虑回路阻抗损耗和安全裕量，工程实际的输出电压范围在0～500 V之间。

系统控制算法及软件实现

1. 控制系统方案

控制系统方案如图3所示，控制部分包括DSP主芯片电路、A－D采样电路、IIC数据存储电路、拨码开关设置电路、电压电流故障保护电路、PWM输出电路和CAN总线通信电路等。控制系统工作原理为通过DSP芯片TMS320F28035自带12位A－D采样电路，采集输出回路的输出电压U_o；再根据触摸屏（或上位机）的给定值，利用DSP的强大数字信号处理能力进行变参数和积分分离PI运算，得到PWM信号的占空比；然后通过TMS320F28035的增强型脉宽调制器ePWM产生PWM波，控制晶体管IGBT的导通和关断；最后实现DC－DC斩波器功能，稳压输出电压U_o。

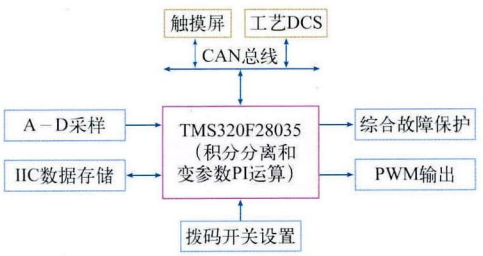

图3　控制系统框图

2. 系统控制策略

本文设计的极化电源系统在工作的起动阶段、负载发生变化或者受到干扰时，整流器输出电压波动比较大。依据经典PI控制理论可知，积分控制环节能消除稳态偏差，但对动态响应不利；比例控制环节可以加快动态响应过程，但又存在稳态偏差。因此本文控制策略采用变参数和积分分离PI算法。即当系统偏差较大时，使用纯比例控制可以达到迅速减小偏差的目的；而当偏差小于某一阈值时，加入积分控制作用，可以保证较高的稳定准确度。

传统数字PI位置式调节器的数学模型为

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^{k} e(j) \quad (3)$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其增量表达式为

$$\Delta u(k)=u(k)-u(k-1) \tag{4}$$

$$\Delta u(k)=K_{\mathrm{P}}[e(k)-e(k-1)]+K_{\mathrm{I}}e(k) \tag{5}$$

采用积分分离PI控制算法表达式[7]为

$$\Delta u(k)=K_{\mathrm{P}}[e(k)-e(k-1)]+\beta K_{\mathrm{I}}e(k) \tag{6}$$

式（3）～式（6）中，$e(k)$为第k次采样时的偏差值；$e(k-1)$为第$k-1$次采样时的偏差值；K_{P}为比例系数；$K_{\mathrm{I}}=K_{\mathrm{P}}T/T_{\mathrm{I}}$为积分系数；$T$为采样周期；$k$为采样序号；$\beta$为积分项的开关系数或逻辑变量。

传统的积分分离PI算法是人为设定某一阈值$\varepsilon>0$。当$|e(k)|>\varepsilon$，即偏差值$e(k)$比较大时，去掉积分环节，既可避免过大的超调，又可使系统有较快的响应。当$|e(k)|<\varepsilon$，即偏差值$e(k)$进入稳态区域时，加入积分环节，可保证系统的控制准确度[8]。本文设计中采用变参数和积分分离PI算法，因此，表达式中的β值已经不是传统积分分离式中的取值0或者1，而是利用DSP快速准确的浮点运算能力，根据设定值ε和采样反馈值偏差$|e(k)|$的偏离情况，确定相应P参数和I参数。即采用积分分离PI控制算法表达式应该改为

$$\Delta u(k)=K_{\alpha}K_{\mathrm{P}}[e(k)-e(k-1)]+K_{\beta}K_{\mathrm{I}}e(k) \tag{7}$$

式中，K_{α}、K_{β}均为变化的参数。

3. 系统软件设计

采用变参数和积分分离PI算法的具体过程如下：利用DSP的Q定标实现定点数并进行快速准确的浮点运算。首先设置PI运算后最大输出值为10 000，统一采用Q13定标，当设定值ε和采样反馈值偏差$|e(k)|$对应一定的阈值时，选择相应的P参数和I参数。积分分离和变参数的PI程序设计流程如图4所示。

1）当偏差的绝对值大于0.5倍最大输出时，只进行比例运算，去掉积分作用，加快系统响应速度。

2）当偏差的绝对值小于等于0.5倍且大于0.3倍最大输出时，P参数减小为0.7倍设置参数，I参数为0.3倍设置参数，在此阶段比例作用稍微减弱，增加适量积分作用，且还是以比例运算为主，兼顾系统响应速度和抑制静差。

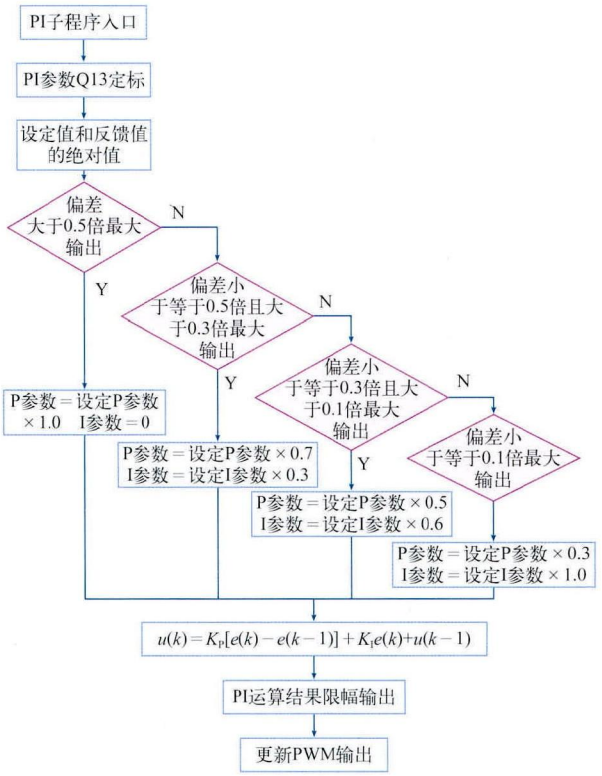

图4 变参数和积分分离PI程序设计流程

3）当偏差的绝对值小于等于0.3倍且大于0.1倍最大输出时，P参数减小为0.5倍设置参数，I参数增大为0.6倍设置参数，在此阶段比例和积分共同作用。

4）当偏差的绝对值小于等于0.1倍最大输出时，P参数减小为0.3倍设置参数，I参数增大为1.0倍设置参数，在此阶段随着偏差值的减小，比例作用进一步减弱，积分作用全部投入使用，逐渐使输出趋于设定值，最大化消除稳态偏差。

此处采用变参数和积分分离PI调节器应用于系统电压环的控制，既保留了积分作用，减小了超调量，又得到了较好的动态响应，达到了较高的稳定准确度。在负载波动时，控制系统参数能自动满足负载电压变化的需要，保证控制系统有合适的动态响应时间，使系统的输出快速、准确地逼近目标函数，维持直流侧电压的稳定，改善系统的稳态性[9]。

系统仿真及结果分析

根据以上分析，利用Matlab/Simulink工具箱建

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

立极化电源的仿真模型并进行仿真。系统主要参数如下：电源频率50 Hz，三相交流电压为380 V，滤波电容C_1、C_2均为2 200 μF，C_4为50 μF，电感L为2 mH，开关频率为5 kHz。

极化电源的相关性能通过Matlab的仿真结果进行分析，图5为DSP输出PWM波形，图中输出脉冲幅值约为12 V，周期约为62 μs，此时的占空比是31.2%，测量图显示波形输出失真和畸变少，能抑制其他信号的干扰。输出直流电压波形如图6所示，黑色粗实线为给定值，曲线为反馈值，系统利用变参数和积分分离PI算法以及DSP的快速运算能力，在4 ms内输出基本达到理想给定值，很好地解决了输出动态响应和输出准确度之间的矛盾。

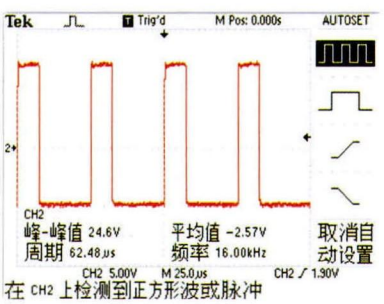

图5　系统仿真PWM波形

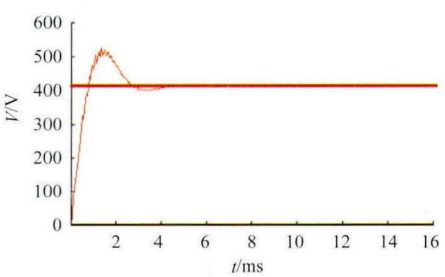

图6　输出直流电压波形

结束语

本文采用了二极管整流－Buck降压斩波的整流器电路，以DSP为整流器系统的控制核心，充分利用DSP丰富的软硬件资源实现变参数和积分分离PI运算、脉冲调制输出、极化电源输出采样检测及故障保护等功能，实现一种新型的大功率整流器装置方案。该大功率整流器系统简化了控制电路，外围电路简单且工作稳定。设计的400 V/100 A极化电源，也在部分电化企业现场投入使用。结果表明，采用DSP的变参数和积分分离PI控制的整流器方案，使极化电源输出稳定性和控制准确度得到明显改善，并能有效提高功率因数和变流效率，具有良好的应用价值。

参考文献

[1] 丁士启．冶金用大电流高频开关电源技术研究[D]．长沙：湖南大学，2012：21-22.

[2] 刘雪，赵柏树，杨维明．单片机控制的精密可调开关稳压电源设计[J]．电源技术，2014，38(3)：535-537.

[3] 胡时高，虎恩典，丁晓军，等．基于DSP控制的数字开关电源设计[J]．制造业自动化，2014，36(6)：112-115.

[4] 余致廷，张红梅，曹达，等．新型半桥式DC-DC软开关逆变焊机的数字化控制[J]．电源技术，2013，37(1)：111-114.

[5] 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.

[6] 旷永红，周鹏．一种新型极化整流器的研究和设计[J]．湖南工程学院学报，2012，22(4)：1-4.

[7] 朝泽云，徐至新，钟和清．基于DSP控制的恒流充电电源设计[J]．电力电子技术，2003，37(6)：50-52.

[8] 陈永会，谭功全，谭飞，等．一种切换参数PI控制器的分析与设计[J]．化工自动化及仪表，2011，38(1)：27-30.

[9] 陈洋，王海欣，朱元付，等．基于变参数PI的电压型PWM整流器的研究[J]．电力电子技术，2012，46(11)：36-37，52.

（收稿日期：2014－12－05）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net