

# 变速恒频电源闭环控制系统的设计与仿真

冯欢, 周理兵, 王晋

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 提出了一种小功率变速恒频电源系统的设计方法。在此系统中交流发电机使用永磁同步电机, 交直交变换器采用PID加重复的控制策略。这种设计可以明显地减小系统的体积和重量。通过仿真分析可知, 电源系统输出电压的频率和幅值恒定, 精度高, 畸变小。

**关键词:** 变速恒频; 逆变器; PID加重复控制器

**中图分类号:** TN86

**文献标识码:** A

## The Design and Simulation about the Closed-Loop Control Technology of VSCF Power System

FENG Huan, ZHOU Li-bing, WANG Jin

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A new design method of the low power VSCF power system is presented in this paper. In the system, a permanent magnet machine is used as AC generator, PID and repetitive strategy is used to control the AC-DC-AC converters. It could make the power system smaller and lighter. Through the computer simulation analysis, we know that the output-voltage has constant frequency and amplitude with high precision and low distortion.

**Key words:** VSCF; inverters; PID and repetitive controller

## 0 引言

变速恒频技术是随着高性能半导体器件的出现、不断更新以及变流技术的日趋成熟应运而生, 伴随着现代电力电子技术、微电子技术的进步和新的控制方式的提出而不断发展的。现如今, 变速恒频技术广泛地应用于原动机转速波动的场合, 像风力、水力发电, 机载、舰载、车载电源以及小功率移动电源等场合。对大功率发电场合, 为了避免变频器的容量过大, 双馈发电机系统是现在的研究热点。在中小功率领域, 变速恒频发电系统多采用原动机直接带动交流发电机, 再通过交直交变换器来获得恒频恒压的电源输出。只是所采用的发电机和变换器控制方法各有不同。本文提出了一种小功率变速恒频电源的设计方法, 交流发电机采用永磁同步电机, 交直交变换器利用数字闭环控制。这种设计可以简化控制系统的设计, 明显地减小电源系统的尺寸和重量, 得到高品质的电源输出。

## 1 系统的构成及工作原理

本电源系统主要由高速原动机、永磁同步发电机、以及交直交逆变器组成。其构成及工作原理如图1所示。

发电机采用稀土永磁同步发电机, 与传统的电励磁发电机相比, 具有结构简单、体积小、重量轻, 适合于高速运行, 有很高的功率密度以及高效率和高可靠性等特点, 但是由于稀土永磁体的高内禀矫顽力, 使得其磁场无法调节, 所以当汽油发动机转速变化时, 发电机发出的是频率和幅值都在变化的三相交流电。交直交逆变器前端采用不控整流, 将永磁同步电机发出的三相变频交流电整流成电压在一定范围内波动的直流电, 然后利用闭环控制将此直流电压逆变成恒频恒压的单相交流电供负载使用。保证高品质的电源输出的关键在于逆变控制器的设计。这里采用数字闭环控制方法, PID加重复控制的控制策略, 可以利用高性能的DSP芯片来使控制系统实现。

## 2 逆变器的数学模型

设计控制系统首先要建立被控对象的数学模型, 这里我们的控制对象是单相全桥逆变器, 所以可以知道其频域传递函数和结构框图分别如式(1)和图2所示。

$$G(S) = \frac{1/LC}{S^2 + \frac{R}{L}S + 1/LC} \quad (1)$$

假设单相全桥逆变器主电路的参数为  $L = 0.8$  mH,  $C = 20$   $\mu$ F, 滤波电感及阻尼因素等效电阻  $R = 0.6$   $\Omega$ 。则其频域传递函数为:

$$G(S) = \frac{6.25 \times 10^7}{s^2 + 75s + 6.25 \times 10^7} \quad (2)$$

收稿日期: 2006-09-13

作者简介: 冯欢(1981-), 男, 湖北随州人, 华中科技大学电气学院硕士研究生, 专业方向: 电力电子与电力传动。

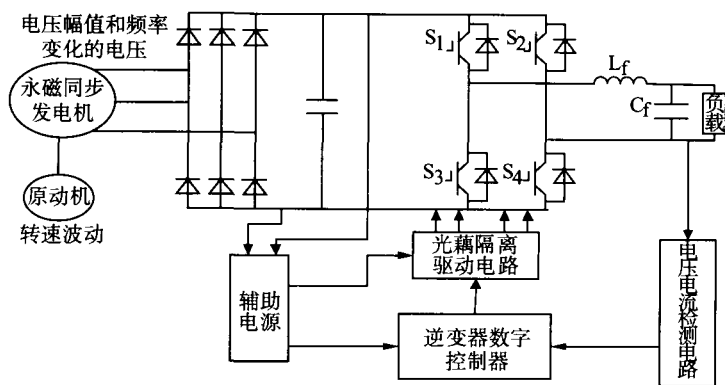


图1 变速恒频电源系统框图

在 20 kHz 采样频率下将其用零阶保持器法离散得：

$$P(z) = \frac{0.07644z + 0.07548}{z^2 - 1.811z + 0.9631} \quad (3)$$

### 3 PID 加重复的控制策略

由于单相全桥逆变器的输入端是波动的直流电压，为了输出恒频恒压的电，使电源系统具备良好的动态性能和稳态性能，这里采用能够快速跟踪系统变化的 PID 控制和能够很好消除稳态误差的重复控制相结合的控制方法。其基本原理如图 3 所示。

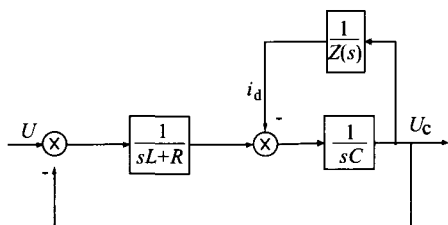


图2 逆变器主电路在频域下的结构框图

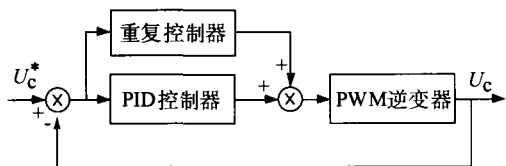


图3 PID 加重复控制器

此控制方案的反馈量只有一个，即负载电压(电容电压  $U_c$ )，使得电路设计得以简化，只需检测出负载的电压值即可。而且 PID 控制器与重复控制器之间是并联关系，相互之间并不影响，所以可以独立设计，简化了设计过程。

### 4 重复控制器设计

重复控制系统框图如图 4 所示，由扰动量  $d$  来等效负载及其它因素的影响。重复控制器的输出与原有的参考输入叠加，以产生矫正作用。重复控制器由周

期延迟正反馈环节和补偿器  $k_r z^k S(z)$  组成， $N$  是数字控制器每周周期采样次数， $Q(z)$  用以增强系统的稳定性，一般取为常数 0.95。周期延迟正反馈环节对逆变器对象实现中低频对消和高频衰减，这样重复内膜给出的补偿信号才能幅值和相位均正确地与扰动对消，实现稳态波形的无差。 $k_r$  是重复控制器增益，一般取值在 0~1 之间， $k_r$  越

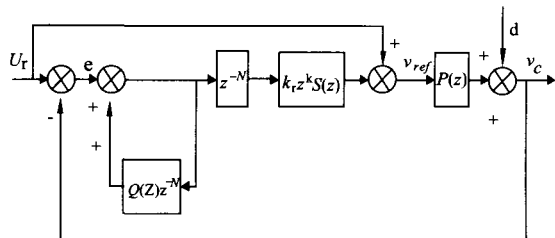


图4 重复控制器结构

大，稳态误差越小， $k_r$  越小稳定裕度越大，这里我们取为 1。 $S(z)$  可以由一个陷波滤波器  $S_1(z)$  和一个二阶滤波器  $S_2(z)$  组成，目的是对消控制对象的谐振峰值，而且能保证对象的中低频增益保持为 1，高频增益衰减较快，对于上述参数的逆变器，我们可以设计为：

$$S_1(z) = \frac{z^6 + 2 + z^{-6}}{4} \quad (4)$$

$$S_2(z) = \frac{0.04397z + 0.03786}{z^2 - 1.557z + 0.6389} \quad (5)$$

超前环节  $z^k$  实现了  $S(z)P(z)$  的相位补偿，这里取为  $z^6$ 。

PID 控制器设计。由于重复控制可以很好的消除稳态误差，所以此处可以省去积分环节，设计成 PD 控制器。其在 S 域的传函如下式：

$$G_{PD}(s) = K(\tau s + 1) \quad (6)$$

为了便于控制器实现，PD 控制器传函可改为：

$$G_{PD}(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{0.01\tau s + 1} \quad (7)$$

根据逆变器的空载传函，数字 PD 控制器设计为：

$$G_{PD}(s) = \frac{1.91(10^{-4}s + 1)}{10^{-6}s + 1} \quad (8)$$

利用双线性变换法  $s = \frac{2z-1}{Tz+1}$ ，该控制器的 z 域形式为：

$$G_{PD}(z) = \frac{9.1789z - 5.5077}{z + 0.9231} \quad (9)$$

### 5 仿真模型及仿真结果

利用 2、3 两节的设计结果，我们在 MATLAB 的 SIMULINK 环境下建立了如图 5 所示的仿真模型。

仿真模型中的大多数模块都可以从 SIMULINK 环境下的电力系统模块 (PSB) 中直接取用，仿真模型搭建起来十分方便。由于在电源系统中，当原动机转

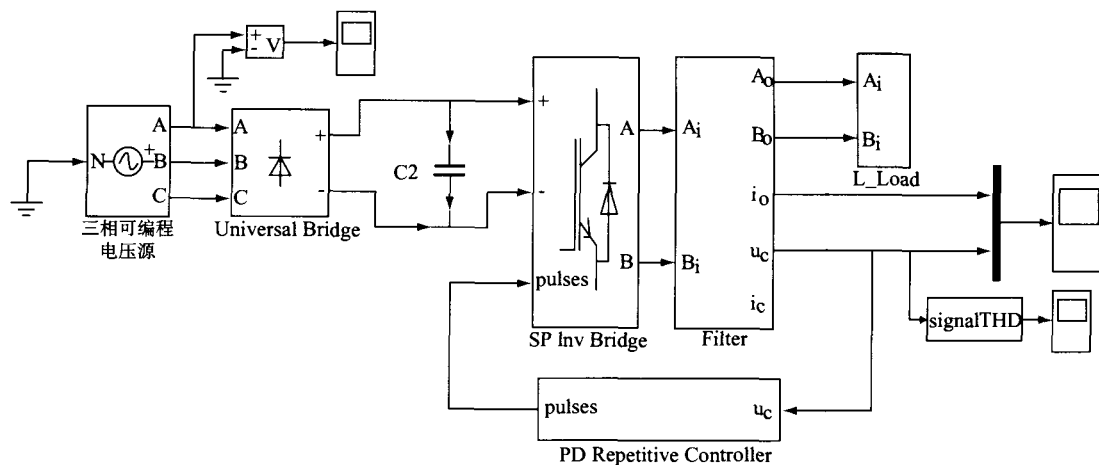


图5 系统仿真模型

速变化时,永磁同步发电机发出的是变频变压交流电,所以这里前端采用的电压源是自己建立的三相可编程电压源模块,通过适当设置模块参数,可以得到频率和幅值按一定规律(阶跃、连续等)变化的三相交流电压,用来模拟永磁同步电机的输出电压。末端的负载模块可以搭建成阻性负载或者是整流性负载。整个仿真模型的核心是 PD Repetitive Controller 模块,其内部结构如图 6 所示。可以利用上节给出的参数进行设计,开关频率取为 20 kHz,死区时间设置为 2 μs,输出参考电压幅值设为 325 V,频率为 50 Hz。

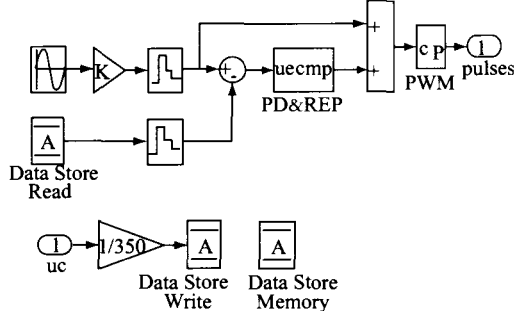
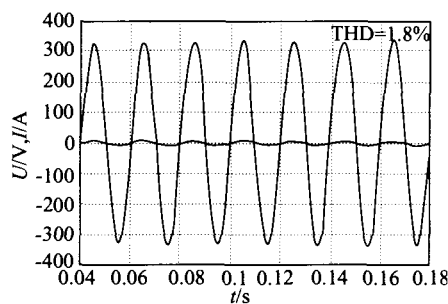


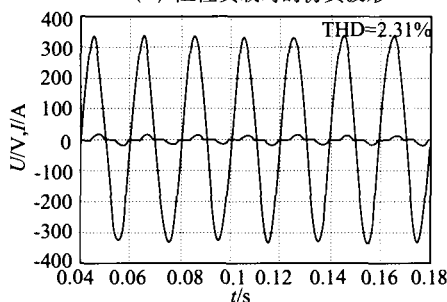
图6 PD加重复控制器仿真模型

图 7 分别给出了当电压源输出电压幅值从 200 V 连续变化到 300 V,相应的频率从 400 Hz 变化到 600 Hz 时,逆变器带阻性负载、整流性负载,以及突加负载(在 0.105 s)时的仿真波形。

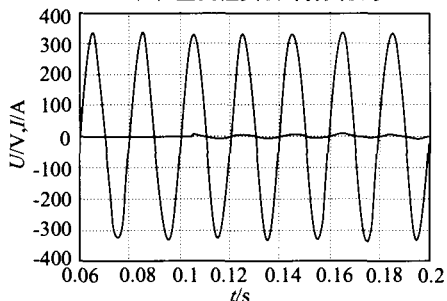
从仿真波形中可以看出整个电源系统在采用重复加 PD 的控制策略后,带阻性负载时谐波含量仅为 1.8%,带整流性负载时谐波含量仅为 2.31%,在突加负载时,系统只需两个周期左右即可恢复稳定。另外还利用此模型对输入电压突变(200 V~280 V,模拟转速突变)时做了仿真分析,仿真结果如图 8 所示。从图中可知在输入电压跳变时,输出电压也能在短时间内恢复稳定。所以可知电源系统具备良好的动态特性和稳态特性。



(a) 阻性负载时的仿真波形



(b) 整流性负载时仿真波形



(c) 突加负载时的仿真波形

图7 逆变器带负载的仿真波形

## 6 结论

本文提出了一种小功率变速恒频电源的设计方法,交流发电机采用永磁同步电机,利用 PD 加重复的控制策略对后端的逆变器进行控制,这种设计可以明显地减小电源系统的体积和重量。经仿真分析可知,当原动机转速变化时,电源系统无论带阻性负载还是

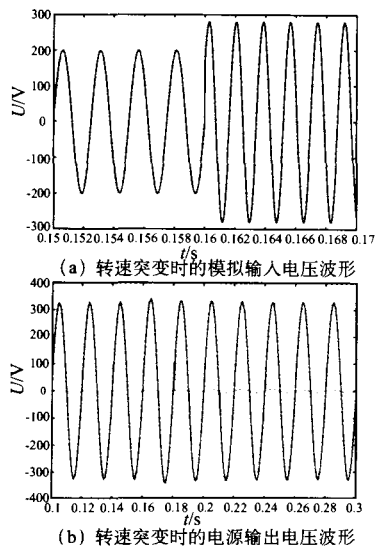


图8 仿真结果

整流性负载,都能输出理想的恒频恒压的正弦波形,而且电源系统对转速突变及负载突变也能很好的适应。

参考文献:

[1] 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

[2] 陈新,陈志辉,严仰光. 变速恒频电源系统的全数字控制[J]. 数据采集与处理,2001,16(4):428-434.

[3] 张凯,康勇,熊建. UPS逆变电源重复控制技术[J]. 华中理工大学学报,2000,28(6):34-36.

[4] 胡寿松. 自动控制原理(第3版)[M]. 北京:国防工业出版社,1994.

[5] 刘仲恕,朱勇. 逆变式高效永磁发电系统分析[J]. 上海电力学报,2004,20(4):6-11.

(上接第14页)

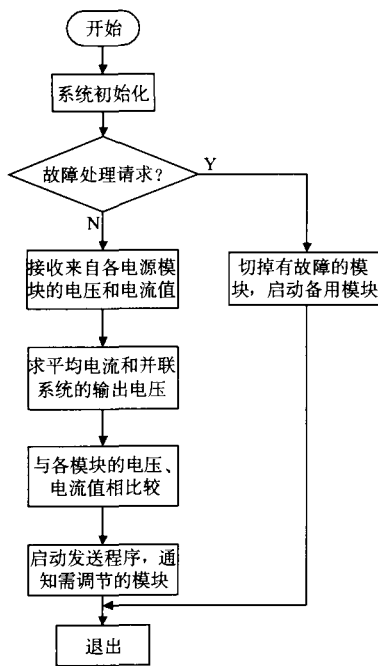


图5 监测单元软件流程图

(3)控制灵活、通用性强,可以在几乎不改变硬件的情况下,通过修改软件来实现控制系统的升级。

(4)出现故障可以提供故障查询和诊断,还可以通过通讯端口,实现对电源系统的远程监控。

5 结 语

数字均流技术可以达到很好的均流精度,提高电源并联系统的可靠性和容错能力。在不断提高均流精度和动态响应速度的同时,均流控制技术将朝着增加并联模块数目及不同容量模块并联的方向发展。随着微处理器的发展,应用数字化控制完成电源系统的检测和控制,可以更好地采用复杂的控制策略,实现均流冗余、故障检测、热插拔维修和模块的智能管理。

参考文献:

[1] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

[2] 邬宽明. CAN总线原理和应用系统设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1996.

[3] 李杰,王武,杨富文. UPS逆变电源的并联控制技术综述[J]. 通信电源技术,2005,22(4):7-10.

[4] 杨旭丽,杨英. 一种新型开关电源并联均流技术的研究[J]. 电气应用,2006,25(5):26-28.

[5] 张松涛,任光. 一种不间断电源并联运行控制方式的研究[J]. 电力电子技术,2005,39(2):29-30.