

稳流型开关电源控制系统研究

蔡子亮,方 波

(许昌学院 电信学院,河南 许昌 461000)

摘要: 在建立全桥移相 PWM DC/DC 变换器小信号模型的基础上对稳流型开关电源的控制系统进行了研究,给出了稳流型开关电源的闭环控制系统的电路组成和数学模型。引入新型 PWM 电源控制器 UCC3895 对中大功率全桥移相软开关方式稳流型开关电源控制电路进行了具体设计。稳流电源控制器由主控芯片 UCC3895 及其外围的时钟与锯齿波形成、自适应死区设置、隔离驱动、保护、电压电流采样和调节器等子模块组成。用 Matlab 对控制参数进行了整定,采用 PSpice 电子仿真软件对系统进行仿真,结果表明根据系统小信号模型设计的开关稳流电源是可行的。

关键词: 稳流; 开关电源; 控制系统; UCC3895; PSpice 仿真

中图分类号: TM 44

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)08-0069-04

在许多工业领域中,根据应用要求需要电源具有稳流特性,传统的稳流电源常采用线性电源或相控电源,存在体积大、效率低、响应速度慢、可靠性差和电网污染严重等诸多缺点^[1-4]。这里引入新型 PWM 电源控制器 UCC3895 对中大功率全桥移相软开关方式恒流型开关电源控制系统进行研究和设计,并采用 PSpice 软件对所设计的系统进行了仿真分析。

1 稳流型开关电源组成原理和技术指标

稳流源主电路及其控制系统结构如图 1 所示,采用全桥移相 PWM 软开关工作方式^[5]。主要结构参数有:变压器变比 $K_T=n_1/n_2=1/1.2$,输出滤波电感 $L=10\text{ mH}$,输出滤波电容 $C=1\text{ }\mu\text{F}$,负载电阻 $R=40\text{ }\Omega$ 。其主要技术指标有:供电电源为三相,380 V、50 Hz;输出功率 4 kW;开关工作频率 100 kHz;输出限压 500 V;输出电流平均值 10 A 可调;稳流精度 0.5 %。

收稿日期:2006-11-29;修回日期:2007-05-27

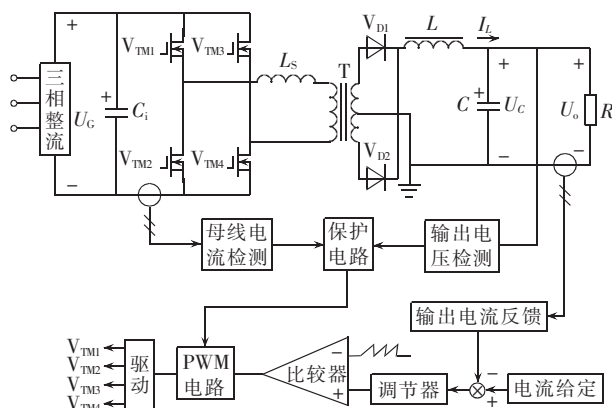


图 1 稳流电源系统结构

Fig.1 Structure of stable current power supply

2 移相全桥 DC/DC 变换器小信号模型^[6-8]

2.1 变换器的等效开环小信号模型

电流源主电路拓扑为全桥结构,根据其工作原理,其电路结构可等效为降压型电路结构。假定器

件开关特性理想,且状态转换是瞬间完成的,则通过对带隔离变压器的降压型电路拓扑的线性电路平均分析,可以得到全桥 DC/DC 变换器的标准化平均等效电路模型,如图 2 所示,图中 $U_G + \hat{u}_g(s)$ 为输入电压稳态量与扰动量的叠加, $I_L + \hat{i}_L(s)$ 为电感电流稳态量与扰动量的叠加, $U_C + \hat{u}_c(s)$ 为输出滤波电容电压稳态量(即输出电压 U_o)与扰动量的叠加, $R + \hat{r}(s)$ 为负载电阻值稳态量与扰动量的叠加, D 和 $\hat{d}$ 分别为占空比的稳态量和扰动量,下同。

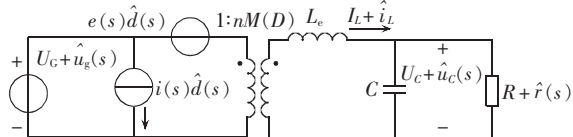


图 2 全桥 DC/DC 变换器的标准化平均等效电路模型

Fig.2 Standard average equivalent circuit model of FB DC/DC converter

根据文中的设计参数,标准化模型中各参数分别为 $n=1/K_T$, $M(D)=D$, $e(s)=U_o/D^2=nU_G/D$, $i(s)=U_o/R=nDU_G/R$, $L_c=L$ 。由图 2 所示的标准化模型或采用状态空间平均法可以建立全桥拓扑 DC/DC 变换器电感电流连续情况下的小信号数学模型,即状态变量扰动量 $\hat{x}$ 与输入电压扰动量 $\hat{u}_g$ 间的传递函数:

$$G_{ig}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{u}_g(s)} = \frac{D(Cs+1/R)/K_T}{LCs^2+Ls/R+1} \quad (1)$$

$$G_{ug}(s) = \frac{\hat{u}_c(s)}{\hat{u}_g(s)} = \frac{D/K_T}{LCs^2+Ls/R+1}$$

状态变量扰动量 $\hat{x}$ 与占空比扰动量 $\hat{d}$ 间的传递函数:

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{(Cs+1/R)U_G/K_T}{LCs^2+Ls/R+1} \quad (2)$$

$$G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_c(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{U_G/K_T}{LCs^2+Ls/R+1}$$

状态变量扰动量 $\hat{x}$ 与负载扰动量 $\hat{r}$ 间的传递函数:

$$G_{ir}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{r}(s)} = \frac{-U_G/R^2}{LCs^2+Ls/R+1} \quad (3)$$

$$G_{ur}(s) = \frac{\hat{u}_c(s)}{\hat{r}(s)} = \frac{U_G Ls/R^2}{LCs^2+Ls/R+1}$$

2.2 变换器恒流方式小信号闭环系统模型

为避免主电路对控制电路的干扰,实现控制电路与主电路的电气隔离,并满足采样精度要求,在中大功率移相全桥 DC/DC 变换器应用场合,电流采样宜采用霍尔电流传感器,电流传感器可串在变换器直流输入母线返回端、逆变主变压器原边、输出滤波电感支路和负载支路上,但对于对稳流特性要求高的恒流电源而言,传感器宜直接设于负载支路,以提高负载扰动时动态响应速度。电流采样设于负载支路时的电流源型移相全桥 DC/DC 变换器闭环系

统基本结构框图如图 3 所示。

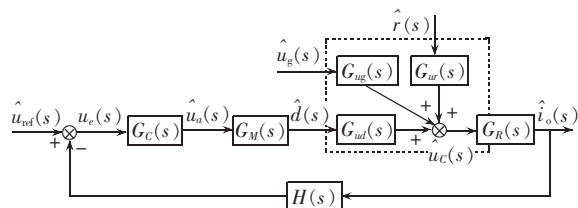


图 3 电流源型 DC/DC 变换器闭环系统结构图

Fig.3 Closed-loop system of current source DC/DC converter

图中, $G_{ug}(s)$ 、 $G_{ud}(s)$ 、 $G_{ur}(s)$ 分别为开关变换器的输出电压对输入扰动、占空比和负载扰动的传递函数,其表达式已由式(1)(2)和(3)给出, $G_R(s)$ 为负载网络函数,负载为阻性负载,则 $G_R(s)=1/R$, $G_C(s)$ 为调节器传递函数, $G_M(s)$ 为 PWM 环节传递函数,在线性工作范围内, $G_M(s)=d(t)/u_a(t)=1/U_m$, U_m 为锯齿波峰值。 $H(s)$ 为电流取样反馈环节,电流取样隔离采用霍尔电流传感器,精度高、线性好,设输出电流整定值为 10 A,输出电流参数给定以电压形式给出,设置为 2.5 V,其传递函数 $H(s)=2.5/10$ 。由图 3 可得:

$$\hat{i}_o = \frac{G_C G_M G_{ud} G_R}{1 + G_C G_M G_{ud} G_R H} \hat{u}_{ref} + \frac{G_{ug} G_R}{1 + G_C G_M G_{ud} G_R H} \hat{u}_g + \frac{G_{ur} G_R}{1 + G_C G_M G_{ud} G_R H} \hat{r} \quad (4)$$

3 稳流源控制系统设计

3.1 电流闭环小信号模型系统调节器参数设计^[9-11]

根据上述分析可知,电流闭环小信号模型系统为二阶系统,而且输出滤波参数 LC 大,频率参数 $f_o = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 较低,所以,系统在中频段是以 -40 dB/dec 的斜率穿越零分贝线的,如果采用 PI 调节器,可以减小稳态误差,要想加快其响应速度,则需增大比例系数,这将导致系统不稳定。为使系统满足稳态性能、动态性能和稳定性要求,应对系统进行校正,根据幅频特性,采用 PID 调节器可以满足要求。设 PID 调节器传递函数为

$$G_C(s) = K_p [1 + 1/(\tau_i s) + \tau_d s] = K_p (\tau_i \tau_d s^2 + \tau_i s + 1) / (\tau_i s) \quad (5)$$

式中 K_p 、 τ_i 、 τ_d 分别为比例系数、积分校正和微分校正的时间常数。

$G_C(s)$ 有 2 个零点需要确定,根据开环波德图,其中一个零点设置于滤波环节的谐振角频率处 ($1/\sqrt{LC} = 1/\sqrt{10 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-6}} = 1/10^{-4} = 10^4$ (rad/s)), 另一个零点置于第一个零点约 1/3 频率处 ($(10^4/3)$ rad/s), 即

$$\tau_i \tau_d s^2 + \tau_i s + 1 = \left(\frac{1}{10^4} s + 1 \right) \left(\frac{3}{10^4} s + 1 \right) = \frac{3}{10^8} s^2 + \frac{4}{10^4} s + 1 \quad (6)$$

故 $\tau_i = 4 \times 10^{-4}$ (s), $\tau_d = 3/4 \times 10^{-4}$ (s)。

比例系数 K_p 根据波德图进行调整,使得系统在稳定的前提下有快的响应速度。

根据上述设置,用 Matlab 进行仿真,当取 $K_p=10$ 时,系统开环波德图如图 4 所示。

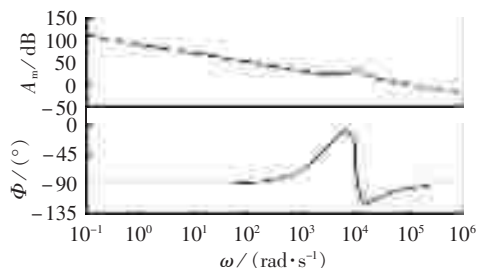


图 4 系统开环波德图

Fig.4 Bode diagram of open loop system

PID 调节器电路如图 5 所示。

$$G_C(s) = \frac{(sR_1C_1+1)(sR_2C_2+1)}{sR_1C_2} = K_p \frac{\tau_i \tau_d s^2 + \tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (7)$$

若取 $K_p = (R_1C_1 + R_2C_2) / (R_1C_2) = 10$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, 则 $C_2 = 40 \text{ nF}$, $R_2 = 7.5 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$ 。

上述 PID 调节器参数设计是基于开关电源系统小信号模型理论分析得到的,对于系统在稳态工作点附近的运行状况是有效的,但对于系统的大信号工况(如启动过程、大扰动等)未必合适^[12],在系统仿真和实际系统调试过程中其参数尚需进一步检验和修正。

3.2 稳流电源控制电路设计

UCC3895 是用于全桥移相 PWM 控制的新型开关电源控制器件,功能完善,具有自适应死区设置功能和软启动/软关断能力^①,适合于全桥主电路软关工作方式。

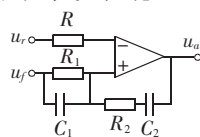


图 5 PID 调节器电路

Fig.5 Circuit of PID regulator

这里以 UCC3895 芯片为核心设计稳流电源控制器,包括时钟与锯齿波形成、自适应死区设置、隔离驱动、保护、电压电流采样和调节器等子模块,对输出电流进行采样反馈构成电流闭环,同时对输出电压和母线电流进行采样,以实现过压过流保护。稳流型开关电源控制电路如图 6 所示^②。

图中,自适应死区延时与 ADS、CS 以及 DELAB、DELCD 脚设置有关,取最大延时模式,即 R_7 开路,取 $R_5=R_6=10 \text{ k}\Omega$,则 ADS 引脚电压 $U_{\text{ADS}}=0$,两桥臂的死区时间 $t_{\text{dAB}}, t_{\text{dCD}}$ 为

$$t_{\text{dAB}} = t_{\text{dCD}} = (25 \times 10^{-12}) R_d / U_{\text{DEL}} + 25 \times 10^{-9} = (25 \times 10^{-12}) \times 10 \times 10^3 / U_{\text{DEL}} + 25 \times 10^{-9} (\text{s}) \quad (8)$$

式中 $U_{\text{DEL}} = [0.75(U_{\text{CS}} - U_{\text{ADS}})] + 0.5 = 0.75U_{\text{CS}} + 0.5 (\text{V})$ 。

极限情况下, $t_{\text{d,min}} = 150 \text{ ns}$, $t_{\text{d,max}} = 525 \text{ ns}$ 。

图 6 中, u_{if} 为负载电流检测电路输出, u_s, i_s 分别来自输出电压和母线电流采样隔离电路,以实现实际的工业现场如磁控喷射靶极电流源对输出特性的要求,以及过压过流保护。

4 稳流源控制系统仿真

采用 PSpice 仿真软件对上述所设计稳流源系统进行了仿真^[13],模拟扰动为: $t=2.5 \text{ ms}$ 时输入电压由 500 V 下跳为 400 V , $t=4 \text{ ms}$ 时负载 R 由 $40 \text{ }\Omega$ 突变为 $20 \text{ }\Omega$,仿真结果如图 7 所示,图中曲线 1、2 分别为 PID 调节器输出电压 U_{EA} 和输出滤波电感电流 I_L 波形;曲线 3、4 分别为 U_o 和输出电流 I_o 波形。

仿真结果表明,根据小信号模型设计的控制器在本电源系统启动和电源电压大扰动情况下能够稳定工作,在负载突变时,系统可能不稳定, PID 调节器输出极限值,利用控制器 PWM 电路固有的限幅特性,控制系统将由非线性控制状态进入线性控制状态。电源能够满足技术设计指标。

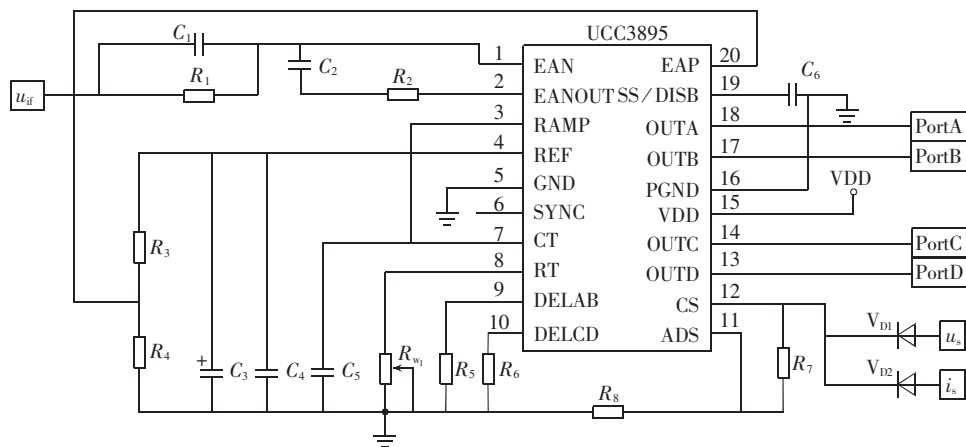


图 6 稳流电源控制器电路

Fig.6 Controller circuit of stable current power supply

① BiCMOS advanced phase shift PWM controller. Unitrode products from Texas instruments SLUS157F-December 1999-revised January 2007. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ucc3895.html>.

② UCC3895 phase shift PWM controller EVM kit setup and usage. User guide of unitrode products from Texas instruments SLUU069A, September 2000. <http://focus.ti.com/lit/ug/sluiu069a/sluiu069a.pdf>.

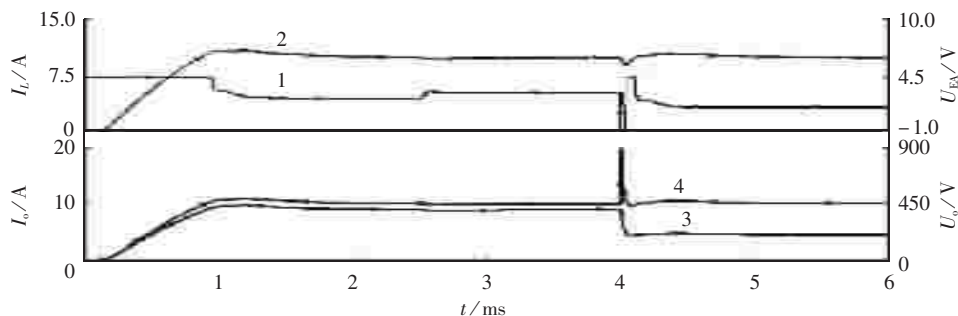


图 7 稳流电源系统仿真波形

Fig.7 Simulation waveforms of power system with stable current

5 结语

针对传统稳流电源的不足对中大功率移相-全桥-脉冲宽度调制(PS-FB-PWM)软开关稳流源进行了研究,在建立电源系统的小信号模型的基础上对稳流电源的控制系统和以 UCC3895 为核心的控制器电路进行了具体设计,并采用 PSpice 电子仿真软件对所设计的开关稳流电源系统进行了仿真实验,仿真结果验证了设计的可行性,并表明控制器 PWM 电路固有的限幅特性对于增强系统的稳定性具有重要作用。

参考文献:

- [1] 佟玉鹏,李云奇,王振强. 真空溅射镀膜专用直流电源[J]. 真空, 1997,34(5):32-35.
- [2] 李清源,李旭春,甘小杰. 离子溅射用高频 PWM 电源及其控制系统的设计[J]. 真空, 2005,42(4):42-44.
- [3] 尹金银,王德苗,董树荣,等. 工业用巨型磁控溅射靶电源反馈控制的研究[J]. 真空, 2006,43(1):30-32.
- [4] 林晓东. 高频开关电源的特点及在电力系统的应用[J]. 电力自动化设备, 1999,19(6):71-72.
- [5] 王聪. 软开关功率变换器及其应用[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [6] ERICHSON R W,MAKSIMOVIC D. Fundamentals of power electronics[M]. 2nd ed. New York:Kluwer Academic Publisher,2000.
- [7] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与实践[M]. 修订版. 北京:电子工业出版社,2004.
- [8] MIDDLEBROOK R D. Small-signal modeling of pulse-width modulated switched-mode power[J]. Proceedings of the IEEE, 1998,76(4):343-354.
- [9] 杨旭,裴云庆,王兆安. 开关电源技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [10] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 3 版. 北京:国防工业出版社,2000.
- [11] 邢青青,郝继飞,白文宝. 存在常见非线性环节系统 PID 参数的整定[J]. 电力自动化设备, 2005,25(5):91-93.
- [12] 蔡宣三,龚绍文. 高频功率电子学[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [13] 陈建业. 电力电子电路的计算机仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

蔡子亮(1965-),男,河南许昌人,副院长,副教授,主要从事电路与系统、信号与信息处理研究(E-mail:caizl2002@xctc.edu.cn);

方波(1973-),男,河南新县人,讲师,硕士,主要从事开关电源技术方面的研究(E-mail:fangboxc@126.com)。

Stable current control of switching power supply

CAI Zi-liang, FANG Bo

(School of Electrics & Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: Based on the small-signal model of full-bridge phase-shifted PWM DC/DC converter, the stable current control system of switching power supply is developed, with the mathematic model and circuit of its closed-loop control system presented. The control circuit of high/middle power is designed with UCC3895, PWM power supply controller, and sub-modules: clock and saw-tooth wave generator, adaptive dead band, insulated driver, protection, voltage/current sampler, regulator, etc.. The control parameters are set by Matlab software and the system is simulated with PSpice, results show the design is feasible.

Key words: stable current; switching power supply; control system; UCC3895; PSpice simulation