

文章编号:1000-582X(2006)09-0044-04

## 单周控制的线性-开关混合电源\*

时颖,周维维,谢品芳

(重庆大学电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**开关电源和线性电源相结合的混合电源可以提高动态响应速度,但是传统的控制方式不能有效抑制输入电压扰动的影响.为了改善混合电源对输入电压扰动的抑制能力,提高控制精度,提出了一种单周控制的混合电源,该控制方式采用单周控制对混合电源中的开关电源进行控制.理论分析结果表明,采用单周控制的混合电源能有效抵制输入电源扰动对输出电压的影响,提高混合电源的控制精度,简化电路的复杂性.仿真结果证明了这种基于单周控制的线性开关混合电源理论的正确性和有效性.

**关键词:**混合电源;单周控制;扰动

**中图分类号:**TM464

**文献标识码:**A

开关稳压电源由于体积小,效率高的优点,广泛应用于各种电子、通讯设备中.但是开关电源与线性电源相比,其动态性能和输出纹波都有一定局限性<sup>[1]</sup>.随着各种电子仪器和设备的数字化发展,脉冲性负载所占的比例不断增加.数字处理设备速度的提高,对电源的动态响应速度的要求越来越高<sup>[2]</sup>.特别是对于微处理器(Microprocessors)和数字信号处理器(DSPs)这类装置,要求供电电压非常稳定.甚至当设备所需电流在微秒级内由几毫安培到数十安培范围内变化时,也要求供电电源能迅速满足这样大范围的变化.由于开关器件的损耗,开关电源输出功率等级受开关频率的限制;同时,开关电源受工作模式和外部参数小信号增益的影响<sup>[3]</sup>,所以常规的开关电源难于满足这种要求.

为了提高开关电源的动态响应速度,消除输出纹波,文献[1]提出了一种交叉双环控制的开关稳压电源,这种稳压电源用工作在线性放大区的晶体管构成一种有源补偿电路,对输出电压中的纹波和扰动量提供快速补偿.文献[2]利用状态空间平均技术对文献[1]提出的控制方法建立了小信号模型,分析了其稳定性和动态特性,从理论上论证了这种电路优于一般的单环控制变换器.文献[1-2]采用的控制方式是检测电源的输出电压,将其与参考电压进行比较,通过线性补偿装置对负载提供一个快速补偿电流.正常情况

下,输出电压等于参考电压时,线性补偿装置几乎不提供电流.这种电压控制方式对电源的动态响应速度有一定改善,但控制精度不高.文献[3]提出了检测线性电源输出电流对开关电源进行控制的混合电源模型,并推导了传递函数.这种电流控制方式提高了电源的动态响应速度,当负载所需电流变化时,能迅速进行调节.文献[4-5]将这种混合电源的理论运用于功率放大器中.

上述文献均是针对负载变化的情况进行研究,没有考虑输入电压变化的影响.为了抑制输入电压变化对输出电压的影响,使混合电源的控制方式趋于完善,笔者将单周控制方式运用于混合电源中.单周控制的特点是在每一个开关周期内通过控制开关占空比,使每一个开关周期中,开关变量的平均值等于给定的参考量或成一定比例,从而消除稳态和瞬态误差<sup>[6-8]</sup>.所以采用单周控制的混合电源能有效抑制输入量的扰动对输出电压的影响,提高了输出电压的稳定性.理论分析和仿真结果证明了所提方案的正确性.

### 1 线性-开关混合电源

线性-开关混合电源的原理图如图1所示<sup>[3]</sup>.混合电源由线性电源和开关电源并联组成.线性电源由2个工作在线性放大区的晶体管 $Q_1$ 和 $Q_2$ 构成.混合电源的工作原理如下:

\* 收稿日期:2006-05-11

基金项目:重庆市自然科学基金重点项目(2005BA6017)

作者简介:时颖(1977-),女,重庆人,重庆大学硕士,主要从事电能质量控制器,开关电源的研究.

当负载所需电流  $i_{out}$  增大时,由于线性电源的响应速度比开关电源快,所以线性电源  $i_{Lin}$  迅速为  $i_{out}$  提供正方向电流,  $i_{Lin} > 0$ . 电流检测装置检测出  $i_{Lin}$ , 通过控制环节,调整开关电源的占空比  $d$ ,使  $i_{sw}$  增大. 负载电流

$$i_{out} = i_{Lin} + i_{sw} \quad (1)$$

假设负载电压  $v_{out}$  不变. 对于任意时刻  $t$ , 负载电流  $i_{out}$  为

$$i_{out} = \frac{v_{out}}{R_L} \quad (2)$$

即是可确定的. 对一确定的  $i_{out}$ , 根据公式(1),  $i_{sw}$  增大必然引起  $i_L$  的减小. 当  $i_{sw}$  满足

$$i_{sw} = i_{out} \quad (3)$$

$$\text{时, } i_{Lin} = 0 \quad (4)$$

此时,负载所需电流  $i_{out}$  完全由  $i_{sw}$  提供.

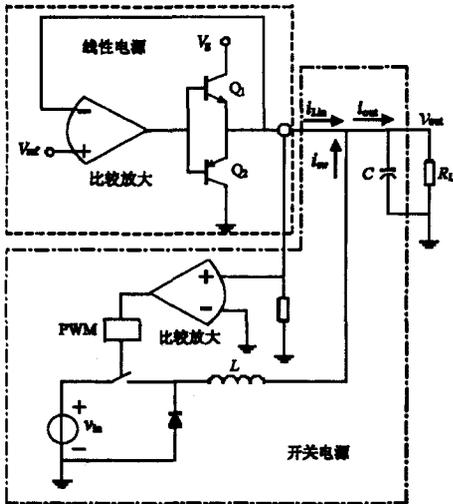


图1 线性-开关混合电源的原理图

当负载所需电流  $i_{out}$  减小时,同样由于线性电源的响应速度比开关电源快,线性电源  $i_{Lin}$  迅速为  $i_{out}$  提供负电流,  $i_{Lin} < 0$ . 电流检测装置检测出  $i_{Lin}$ , 通过控制环节,调整开关电源的占空比  $d$ ,使  $i_{sw}$  减小. 根据 KCL, 电流必须满足公式(1), 所以  $i_{sw}$  与  $i_{out}$  满足公式(3)时,  $i_{Lin}$  又为0.

通过对上述2种情况的分析,线性电源仅需在负载变化的很短一段时间内提供电流  $i_L$ , 线性电源的损耗降低, 所以这种混合电源的效率比较高.

## 2 单周控制的线性-开关混合电源

在电源的输入电压有扰动时,普通 PWM(脉冲宽度调制)控制的混合电源抗扰动性比较差. 针对这种情况,笔者提出了基于单周控制的混合电源,以有效抵制电源的输入电压扰动对输出电压的影响,提高混合电源的控制精度.

图2是单周控制混合电源的原理图.

线性电源和单周控制的开关电源并联构成了单周控制的线性-开关混合电源. 线性电源由2个工作在线性放大区的晶体管  $Q_1$  和  $Q_2$  构成, 取样电阻对输出电压  $v_{out}$  取样, 取样电压  $v_m$  与线性电源的参考电压  $V_{ref}$  经过 PI 调节, 使输出电压  $v_{out}$  达到预设值, 实现控制输出电压的目的. 同时, 电流取样装置对线性电源输出电流  $i_{Lin}$  取样, 经 PI 调节器输出的电压  $v_{sr}$  作为单周控制开关电源的基准电压. 当  $v_{in} > v_{sr}$  时, 比较器输出高电平, RS 触发器置0, Q 端输出低电平,  $\bar{Q}$  输出高电平, 使复位开关闭合, 积分器复位,  $v_{int} = 0$ . 在下一个周期开始时, RS 触发器置1, Q 端输出高电平,  $\bar{Q}$  输出低电平, 使复位开关断开,  $v_{int}$  又从0开始积分. 原理图中,  $Q_1$  为 NPN 型,  $Q_2$  为 PNP 型,  $C_{int}$  是积分电容, 它与电阻  $R_f$  构成单周控制开关电源的积分常数. 当  $i_{Lin} > 0$ , 线性电源通过  $Q_1$  提供正向电流; 当  $i_{Lin} < 0$ ,  $Q_2$  为电流  $i_{Lin}$  提供负向通路. 在分析时, 可将线性电源简化为一可提供正向和负向电流的电流源.

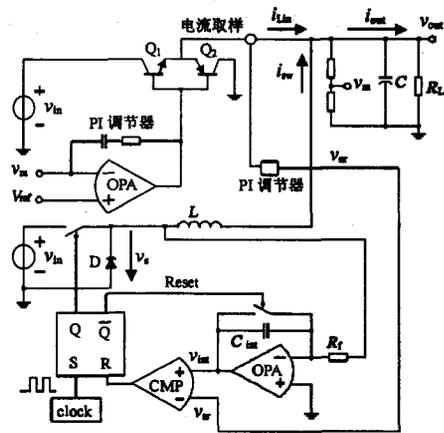


图2 单周控制混合电源原理图

电路采用单周控制来实现开关电源对参考电压信号的实时跟踪, 所以其控制关系必须满足:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{in} dt = v_{sr} \quad (5)$$

$i_{Lin}$  的大小及正负变化均能影响开关电源的参考电压  $v_{sr}$ , 从而控制开关电源的占空比  $d$ :  $i_{Lin} > 0$  时,  $v_{sr} > 0$ , 开关电源参考电压大于0,  $i_{sw} > 0$ , 根据公式(1),  $i_{Lin}$  减小, 直到接近0; 同理,  $i_{Lin} < 0$  时,  $v_{sr} < 0$ , 开关电源参考电压小于0,  $i_{sw} < 0$ ,  $i_{Lin}$  增大, 直到0.

假设单周控制的参考信号和负载不变, 电源电压发生扰动, 这必将改变二极管上的电压. 因此, 电源电压的扰动会直接迅速地影响占空比  $d$ , 使每一个开关周期内, 二极管电压的积分都为—常数.

所以, 当系统的输入电压有扰动时, 采用常规 PWM 控制的混合电源不能有效抑制这种扰动, 电路中

为了得到稳定的负载输出电流  $i_{out}$ , 主要靠线性电源满足这种变化, 这势必造成线性电源的损耗增加, 降低效率. 笔者采用单周控制能很好地抑制输入电压扰动产生的影响, 减小线性电源为抵制扰动输出的电流  $i_{Lin}$ , 从而减小损耗, 提高效率.

### 3 仿真研究

在相同的输入输出条件下, 对采用常规 PWM 控制的混合电源以及采用单周控制的混合电源 2 种电路进行了对比仿真研究. 仿真参数: 输入电压  $v_{in} = 20\text{ V}$ , 扰动幅度  $3\text{ V}$ , 扰动频率  $100\text{ Hz}$ , 输出电压  $10\text{ V}$ , 负载电阻  $5\ \Omega$ , 开关频率  $f = 25\text{ kHz}$ .

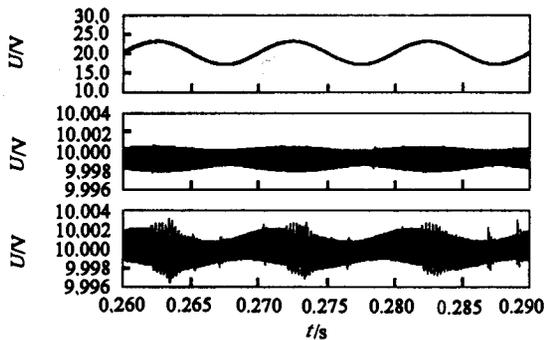


图3 输入电源扰动时输出电压波形

图3是输入电源电压扰动时, 输出电压的仿真波形. 最上面的波形表示输入电源电压波形; 中间的波形表示单周控制的混合电源输出电压波形, 其波动范围在  $3\text{ mV}$  以内; 最下面的波形表示常规 PWM 控制的混合电源输出电压波形, 波动范围达到  $7\text{ mV}$ . 可以看出采用单周控制的混合电源输出电压精度优于后者.

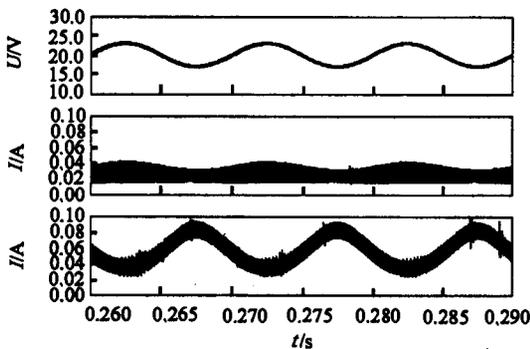
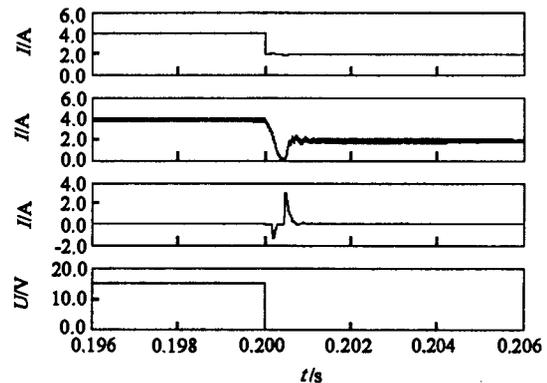


图4 输入电源扰动时线性电源输出电流波形

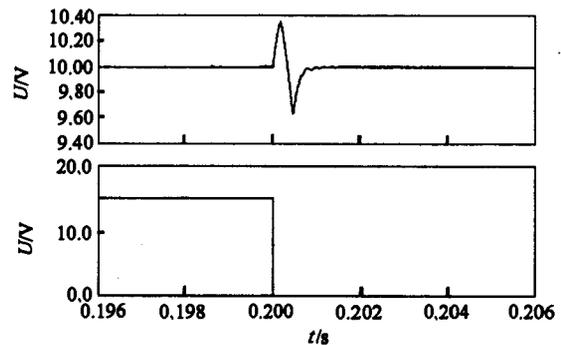
图4是输入电源电压扰动时, 线性电源提供电流的对比仿真波形. 最上面的波形表示输入电源电压波形; 中间的波形表示单周控制的混合电源中线性电源提供的线性电流波形, 平均值为  $30\text{ mA}$ , 其波动仅为  $20\text{ mA}$ ; 最下面的波形表示常规 PWM 控制的混合电源中线性电源提供的线性电流波形, 平均值为  $60\text{ mA}$ , 其

波动为  $80\text{ mA}$ . 可以看出前者抑制扰动的能力高于后者, 而且单周控制的混合电源提供的线性电流平均值更小, 线性电源的损耗更小, 因而效率高于常规 PWM 控制的混合电源.

图5是单周控制混合电源中负载由  $2.5\ \Omega$  跳变到  $5\ \Omega$  的仿真波形, (a) 图中从下至上第一道波形表示控制信号, 高电平表示负载为  $2.5\ \Omega$ , 低电平表示负载为  $5\ \Omega$ ; 第二道波形表示线性电源提供的电流  $i_{Lin}$ ; 第三道波形表示开关电源提供的电流  $i_{sw}$ ; 最上面的波形表示负载电流  $i_{out}$ . (b) 图中下面的波形表示控制信号; 上面的波形表示混合电源输出电压  $v_{out}$ .



(a) 电流波形



(b) 电压波形

图5 负载由  $2.5\ \Omega$  跳变到  $5\ \Omega$  的仿真波形

图6是单周控制混合电源中负载由  $5\ \Omega$  跳变到  $2.5\ \Omega$  的仿真波形, (a) 图中由下至上第一道波形表示控制信号, 低电平表示负载为  $5\ \Omega$ , 高电平表示负载为  $2.5\ \Omega$ ; 第二道波形表示线性电源提供的电流  $i_{Lin}$ ; 第三道波形表示开关电源提供的电流  $i_{sw}$ ; 最上面的波形表示负载电流  $i_{out}$ . (b) 图中下面的波形表示控制信号; 上面的波形表示混合电源输出电压  $v_{out}$ .

从图5和图6中可以看出, 当负载跳变时, 混合电源中的线性电源部分迅速地提供电流, 使混合电源能够很快达到平衡状态, 所以单周控制的混合电源在负载跳变时也能快速地为负载提供稳定的输出电压.

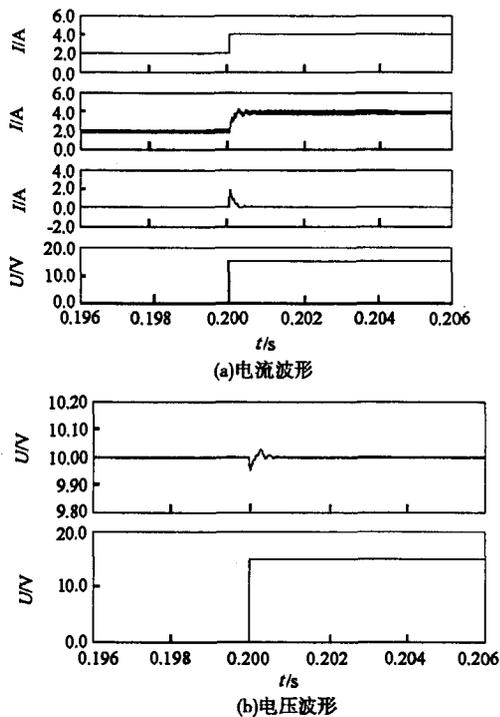


图6 负载由5Ω跳变到2.5Ω的仿真波形

## 4 结论

笔者对混合电源进行了理论分析,将单周控制理论应用于混合电源中。从理论分析和仿真结果可以看出,单周控制的混合电源不仅在负载跳变时能够提供稳定的输出电压,而且在输入电压有扰动时,单周控制的混合电源无论是在输出电压的精度还是在线性电源提供的线性电流波动幅度的大小上,与常规PWM控制的混合电源相比,性能均优于后者。仿真结果表明笔

者提出的单周控制的混合电源不但具有常规PWM控制的混合电源的性能,而且能有效抑制输入扰动,提供更可靠的输出电压,在对敏感性负载提供电压时具有更高的可靠性,具有广阔的实际应用前景。

## 参考文献:

- [1] 周维维,侯振程,李再华. 开关型直流稳压系统的一种新控制方式—交叉双环控制[J]. 仪表技术, 1989,18(6): 2-5.
- [2] 周维维,李再华,侯振程. 交叉双环PWM开关稳压系统分析[J]. 重庆大学学报,1993, 16(2):19-23.
- [3] BARRADO A, VOZQUEZ R, OLÍAS E, et al. Theoretical Study and Implementation of a Fast Transient Response Hybrid Power Supply[J]. IEEE Trans Power Electron, 2004, 19(4):1 003-1 009.
- [4] 周谦之. 开关线性复合功率变换技术及其应用[J]. 电工技术学报,2004,19(8):28-33.
- [5] 周谦之,李定,张捍东. 开关-线性复合功率变换技术机理和实效分析[J]. 电工技术学报,2002, 17(4):75-79.
- [6] SMEDLEY K M, CUK S. One-cycle Control of Switching Converters[J]. IEEE Trans Power Electron, 1995,10(6): 625-633.
- [7] QIAO C M, SMEDLEY K M, MADDALENO F. A Single-phase Active Power Filter With One-cycle Control Under Unipolar Operation[J]. IEEE Trans Circuits and Systems, 2004,50(4):1 623-1 630.
- [8] QIAO C M, SMEDLEY K M. Unified Constant-frequency Integration Control of Three-phase Standard Bridge Boost Rectifiers With Power-factor Correction[J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2003, 50(1): 100-107.

## Hybrid Power Supply Based on One Cycle Control

SHI Ying, ZHOU Luo-wei, XIE Pin-fang

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A hybrid power supply is composed by both a linear and a switching source connected in parallel and it can improve the dynamic response. But the hybrid power supply cant not effectively reject the perturbations in the power supply. A hybrid power supply based on one cycle control theory is proposed in order to improve the capability and the control precision. A switching source based on one cycle control is adopted in the hybrid power supply. The analysis results indicate that the hybrid power supply can effectively reject the perturbations in the power supply. And the analysis results also show that not only the control precision is improved, but also the control circuit is simple. The simulation results given verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** hybrid power supply; one cycle control; perturbations

(编辑 李胜春)