

峰值电流控制模式中斜率补偿的研究

高田, 景占荣, 羊彦, 王琪

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要:介绍了峰值电流控制开关电源的原理和特点。针对占空比 $D > 50\%$ 时发生振荡的现象, 分析了系统工作不稳定的原因, 从理论上论述了电感电流的斜率、占空比与系统稳定性之间的关系。介绍了利用斜率补偿方法解决系统振荡的基本原理, 并提出了斜坡补偿电路的具体设计步骤。最后给出以 UCC3808 为控制芯片的推挽式变换器斜率补偿电路设计实例。实验结果表明, 该方法可实现峰值电流控制开关电源在 $D > 50\%$ 情况下的稳定工作, 增强了电源的抗干扰性, 提高了高频变压器的利用率。

关键字: 变换器 / 斜率补偿; 峰值电流

中图分类号: TM910.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2007)03-0092-02

Study on Slop Compensation in the Peak Current Control

GAO Tian, JING Zhan-rong, YANG Yan, WANG Qi

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper presents the principles and features of switching power supply in the peak current control. According to the oscillation phenomena with duty-cycle higher than one half, the reasons for instability in the system is realized and the relationship of the inductor current slope, duty cycle and system stability is discussed. It introduces how to design the slop compensation circuit, which is based on the principle of slop compensation. Finally, the paper gives a practical slop compensation circuit of Push-Pull converter which controlled by UCC3808. The result shows that the method can achieve the system stability with the duty-cycle higher than one half, enhance the anti-interference, and improve the utilization of high-frequency transformer.

Keywords: converter / slop compensation; peak current

1 引言

开关电源电路的控制方式分为电流模式控制和电压模式控制。前者, 在传统的电压模式控制基础上, 增加了一个电流反馈内环, 将原有的电压单闭环控制改为电压电流双闭环控制, 其动态响应快, 增益带宽大, 输出电感小。但在峰值电流模式控制下, 当占空比 $D > 50\%$ 时, 电路不能稳定工作, 限制了峰值电流控制方式的应用, 必须加以斜率补偿进行改善。文章讨论了斜率补偿问题, 并以 UCC3808 为控制芯片, 设计了推挽式电路中的斜率补偿电路。

2 峰值电流控制的原理

图 1 示出峰值电流控制原理图。开关管由时钟信号控制, 时钟信号以固定周期使锁存器置位、开关管导通, 变压器初级线圈电流 i_s 上升, 经检测电阻 R_s 产生电流反馈电压 u_s 。输出电压 U_o 反馈后经过误差放大器得到控制电压 U_c , 当 u_s 峰值达到 U_c 值时, PWM 比较器状态翻转使锁存器复位, 开关管截止,

等到下一个周期时钟使锁存器复位, 控制电路重复上述过程, 产生一定的占空比。这样经过电压电流的双环控制, 系统得到稳定的 U_o 。

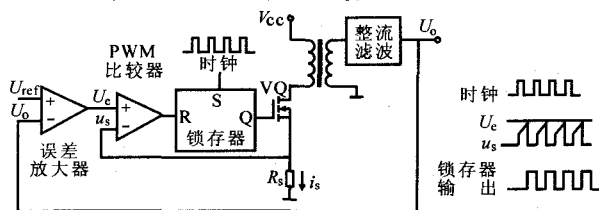


图 1 峰值电流控制原理图

峰值电流控制方式显著改善了电源的性能, 使其具有良好的电压调整率和负载调整率; 能逐个检测峰值脉冲及限流, 简化了过载和短路保护; 系统的幅频特性由双极点变为单极点, 提高了增益带宽积, 改善了频率响应特性。

3 系统不稳定的原因

由于峰值电流控制方式反馈的是电感电流 i_L 的峰值, 因此反馈电流不能全面地反映负载电流的变化, 当 $D > 50\%$ 时, 系统发生振荡, 不能稳定地工作。图 2 示出 i_L 对扰动的响应。由图可知, 经过一个周期, 由电感上扰动电流 Δi_0 引起的电流误差为:

$$\Delta i_1 = -m_1 \Delta i_0 / m_2 \quad (1)$$

定稿日期: 2006-09-22

作者简介: 高田 (1974-), 男, 陕西韩城人, 助教, 博士,

研究方向为电力电子技术。

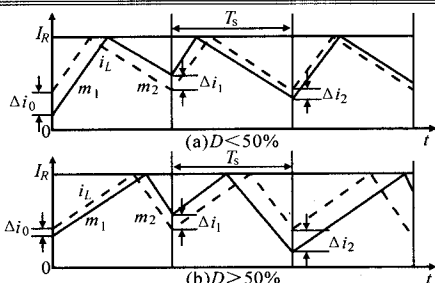


图2 电感电流对扰动的响应

图中 I_R ——PWM 比较器给定的电流值

Δi_0 ——电感上的扰动电流

m_1, m_2 ——电感电流的上升及下降斜率

经过 n 个周期误差为:
$$\Delta i_n = \left[-\frac{m_1}{m_2} \right]^n \Delta i_0 \quad (2)$$

当 $D < 50\%$, 即 $m_1/m_2 < 1$ 时, 见图 2a, 经过一个周期, Δi_0 引起的电流误差 Δi_1 减小, 依次下去, 电流误差会逐渐减少; 而当 $D > 50\%$, 即 $m_1/m_2 > 1$ 时, 见图 2b, Δi_0 经过几个周期会逐步扩大, 从而造成系统工作不稳定。

另外, 峰值电流模式控制系统电流环的闭环传递函数为^[1]:

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{i}_R(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{2s}{\omega_s} + \left(\frac{2s}{\omega_s}\right)^2} \quad (3)$$

式中 ω_s ——开关频率对应的角频率

Q_s ——阻尼系数, $Q_s = \frac{2(m_1+m_2)}{\pi(m_1-m_2)}$

如果 $m_1 < m_2$, 则 $Q_s \leq 0$, 式(3)中电流环闭环传递函数特征根的实部大于零, 此时系统不稳定。这说明当电感电流的上升率小于下降率, 即占空比 $D > 50\%$ 时, 系统不稳定。

4 斜率补偿原理

采用斜率补偿的方法, 在峰值电流控制模式下, 占空比 $D > 50\%$ 时, 系统实现了稳定工作。图 3 示出斜率补偿后 $D > 50\%$ 时 i_L 对扰动的响应。

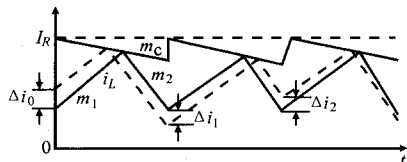


图3 斜率补偿后 $D > 50\%$ 时的电感电流对扰动的响应

图中 m_c ——补偿斜率

如图所示, 补偿后, 由 Δi_0 引起的电流误差为:

$$\Delta i_1 = -\frac{m_c+m_2}{m_c+m_1} \Delta i_0 \quad (4)$$

经过 n 个周期误差为:
$$\Delta i_n = \left[-\frac{m_c+m_2}{m_c+m_1} \right]^n \Delta i_0 \quad (5)$$

系统稳定的条件是: $\Delta i_0 > \Delta i_1 > \dots > \Delta i_n$, 得到:

$$-\frac{m_c+m_2}{m_c+m_1} < 1 \quad (6)$$

为保证在 D 由 0 到 1 的变化范围内, Δi_n 均能

衰减到零, 取 $D=1$, 此时 $m_1=0$, 代入式(6)中, 得到使系统稳定的补偿斜率取值范围条件是:

$$m_c > -0.5m_2 \quad (7)$$

工程实际中补偿斜率通常取 m_2 的 0.7~0.8 倍。

加入斜率补偿后, 电流环的闭环传递函数仍为式(3), 只是阻尼系数变为^[1]:

$$Q_s = \frac{2(m_1+m_2)}{\pi(m_1-m_2+2m_c)} \quad (8)$$

当 $Q_s \geq 0$ 时, 传递函数特征根的实部小于零, 系统稳定。当 $D=1$ 时, $m_1=0$, 代入式(8)中, 此时得到补偿斜率的取值范围与式(7)一致。

5 斜率补偿电路设计

针对峰值电流控制芯片 UCC3808, 主电路采用推挽式结构, 设计斜率补偿电路。通过该电路把振荡器的波形加在电流波形上, 以补偿电流斜率, 增加电流波形斜度, 从而提前翻转 PWM 比较器, 达到斜率补偿的目的。图 4 示出斜率补偿原理图, 图中利用 VQ_1 构成射随器来提高 UCC3808 的振荡器的带载能力。初级电流通过 R_{sense} 变为电流反馈电压信号。振荡器输出波形经射随器 VQ_1 输出, 在 R_3, R_4 分压点处与电流反馈电压叠加后送入电流检测端 (CS 脚), 实现对电流斜率的补偿。

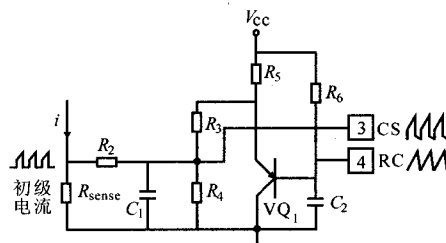


图4 斜率补偿原理图

在设计斜坡补偿电路时, 首先要确定输出电压 U_o 、输出电感 L_o 、变压器匝数比 N 、开关管最大开通时间 $T_{on,max}$ 、检测电阻 R_{sense} 阻值等参数。斜坡补偿电路设计步骤如下:

- ① 计算输出电感电流下降斜率 $m_2' = di/dt = U_o/L_o$;
- ② 计算反映到初级的 i_L 下降斜率 $m_2 = m_2'/N$;
- ③ 计算电感电流反馈电压下降斜率 $u_s = m_2 R_{sense}$;
- ④ 计算振荡器的充电斜率 $V_{osc} = \Delta V_{osc}/T_{on,max}$;
- ⑤ 确定斜坡补偿比例 M 和 R_3, R_4 值的计算式为 $M = m/m_2 = V_{osc} R_1 / (u_s R_2)$, 根据工程经验取 $M=0.7 \sim 0.8$ 。 R_4 取值范围为 $2 \sim 5k\Omega$, R_3 值可由上式计算得到。在实际调试电路时, 可适当调整 R_3, R_4 的分压比, 以改善斜率补偿的作用;
- ⑥ 根据叠加定理, 斜坡补偿后加到芯片电流检测输入端的反馈电压计算式为 $u_s' = u_s R_2 / (R_1 + R_2) + V_{osc} R_1 / (R_1 + R_2)$ 。

(下转第 99 页)

比较小,交流开关可正常工作。而交流开关的正常导通时间取决于 C_1 放电时间 $\tau=R_g C_1$ 。 τ 越大,交流开关可正常导通的时间越长。

稳压管 Z_1 用以防止在 C_2 对 C_1 充电瞬间, C_1 上电压过高,而过高的栅-源电压,会烧毁开关器件。

交流开关关断时,会有微弱的漏电流流过交流开关。在电源正半周时,漏电流通路为:电源 $\rightarrow R_1 \rightarrow VD_1 \rightarrow R_3 \rightarrow VD_5 \rightarrow U_1 \rightarrow VD_4 \rightarrow$ 负载;在电源负半周时,

漏电流通路为: 负载 $\rightarrow R_2 \rightarrow VD_2 \rightarrow R_3 \rightarrow VD_5 \rightarrow U_1 \rightarrow VD_3 \rightarrow$ 电源。为了降低交流开关关断时的漏电功耗,需要恰当选择漏电通路上的元器件参数。由于 R_3 处于公共通路上,其阻值的选择决定着整个交流开关的关断功耗。选 R_3 远大于负载阻抗,且阻值很大,即可使交流开关关断时的漏电功耗较小。功耗计算表达式为:

$$P_{off} \approx (\sqrt{2} U_{in})^2 / R_3 \quad (3)$$

式中 U_{in} ——输入电压有效值

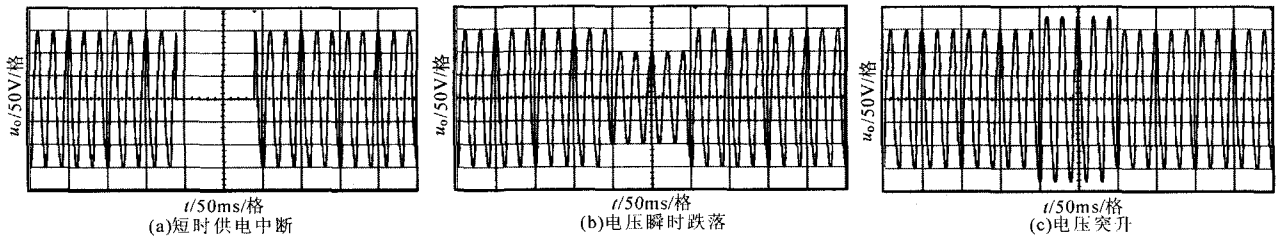


图4 实验波形

5 实验结果

根据所给出的电路结构搭建了试验电路。图4示出实验波形。图4a为短时电路故障,电网电压跌落至0V,持续了100ms;图4b为5个周波的电压暂降波形,跌落幅度为60%;图4c为5个周波的电压暂升波形,暂升的幅值为15%。

6 结论

提出了一种新型全控型交流电子开关。该开关结构简单,控制方便。将该开关用于电压暂变发生器中,可以模拟产生多种类型的电压故障波形。通过搭建电路进行实验,结果验证了方案的可行性和有效

性。该方案的不足之处是不能用于长期稳态导通的实用场合。

参考文献

- [1] 彭春萍,陈允平,孙建军.动态电压恢复器及其检测方法的探讨[J].电力系统自动化设备,2003,23(1):68~71.
- [2] 韩英铎,严干贵,姜齐荣,等.信息电力与FACTS及DFFACTS技术[J].电力系统自动化,2000,(19):1~7.
- [3] Ward Jewell. Power Quality Laboratory Testing[J]. IEEE Power Engineering Review,2000:13~15.
- [4] 张香真,张建成.一种电能质量干扰发生器的研究及仿真[J].公用电,2004,21(1):27~29.

(上接第93页)

5 实验结果

图5示出电路工作时开关管驱动电压 u_{gVQ} ,漏源极间电压 u_{dsVQ} 和 i_L (取采样电阻 R_{sense} 两端电压,50mV/格相当于1A/格)实验波形。

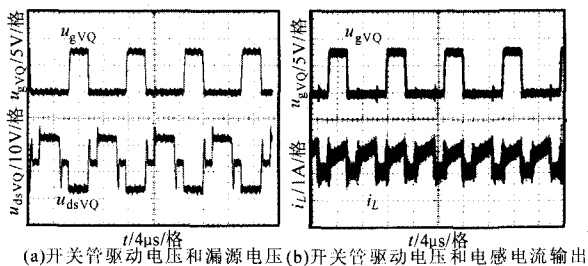


图5 实验波形

由图可见,推挽式电路的两路开关管占空比超过50%,每路开关管占空比超过25%,对应的电路

各点波形稳定,说明斜率补偿方法效果明显。

6 结论

利用斜率补偿的方法,可以实现峰值电流控制开关电源在占空比大于50%的情况下稳定工作,增强了电源的抗干扰性,同时由于占空比范围的增加,提高了高频变压器的利用率,在输出相同功率时可使用体积更小的变压器,有利于电源的小型化。

参考文献

- [1] Tan F Dong, Middlebrook R D. A Unified Model for Current Programmed Converters [J]. IEEE Trans. on Power Electro. 1995, 10: 397~408.
- [2] 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.