

峰值电流控制模式中斜坡补偿的分析

刘成 吴玉广

(西安电子科技大学微电子学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 本文介绍了电流控制型开关电源中峰值电流控制模式的原理及优点, 指出了功率管的占空比大于 50%时必须进行斜坡补偿, 否则电路不能稳定工作。分析了斜坡补偿的基本原理和设计问题, 给出了补偿电路。

关键词: 峰值电流控制模式 误差电压 采样电压 斜坡补偿

中图分类号: TN403 文献标识码: B

Analysis and Design of Slop Compensation in the Peak Current Control

LIU CHeng,, WU Yu guang

(Microelectronic Institute, Xidian Uuniversity, Xi'an, Shan xi)

Abstract: The paper introduces the principle and the merit of the peak current control in the monolithic current-mode switching regulator and points out that it need slop compensation when the of the MOSFET exceed 50%,otherwise the circute can't work steadily. The basic principle and the design question of slop compensation are analysed and the compensation circute is given.

Key words: peak current control errors voltage sense voltages slop compensation

开关功率电路的控制模式可分为电流模式控制和电压模式控制。电流模式控制因动态反应快、补偿电路简化、增益带宽大、输出电感小、易于均流等优点而被广泛应用。电流模式控制又分为峰值电流控制和平均电流控制。当采用峰值电流控制模式并且占空比大于 50%时, 必须对电路进行斜坡补偿。斜坡补偿能增加电路稳定性、使电感电流平均值不随占空比变化, 并减小峰值和平均值的误差, 还能抑制次谐波振荡和振铃电感电流。在开关功率电路中, 斜坡补偿是不可或缺模块, 有着极其重要的作用。本文主要介绍了峰值电流控制模式的原理, 分析了斜坡补偿的原理及方法, 并给出了补偿斜坡的产生电路。

1. 峰值电流控制模式原理

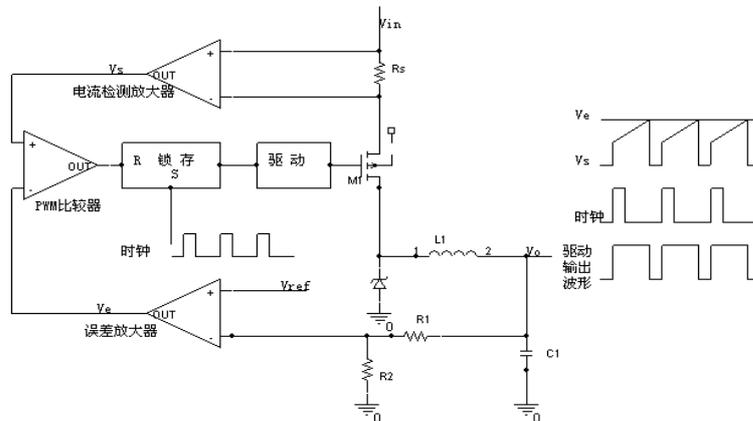


图 1. BUCK 电路的峰值电流控制原理图

上图是简单的 BUCK 电路的峰值电流控制原理^{[1] [2]}。由误差放大器对基准电压 V_{ref} 和输出电压分量 $V_o(R3/(R3+R2))$ 之间的差值进行放大, 得到控制电压信号 V_e , 由于在一个开关周期时间内, 负载电压的变化量很小, 可近似认为在同一个开关周期时间内 V_e 值不变, 送入 PWM 比较器的负向端。电流采样放大器把采样电阻上的电流转换为电压并放大, 得到电流采样信号 V_s , 送入 PWM 比较器的正向端。当电感电流上升到满足条件 $V_s \geq V_e$ 时, PWM 比较器输出高电平, 功率管即被关断, 于是电感与 V_{in} 的连接被断开, 电感电流随后就线性下降, 直到下一周期时钟信号到来, 功率管重新导通后电感电流才会增加。而在本周期内, 功率管断开时刻的电流瞬时值即为电感电流峰值。考虑到 $V_s = iL R_s A_s$ (iL 为电感电流, R_s 为采样电阻, A_s 为电流检测放大器的闭环增益), 可以得出结论: 在每个周期, 由电压控制环输出控制电压 V_e , 它为本周期的电感电流瞬时值设定了的最大值 $V_e/R_s A_s$, 故称为电感电流峰值控制模式。当占空比大于 50% 时, 为了电路稳定, 必须对电路进行斜坡补偿。斜坡补偿可以对误差电压 V_e 进行补偿, 也可以对电流采样信号 V_s 进行补偿。

2. 误差电压 V_e 处的斜坡补偿^[3]

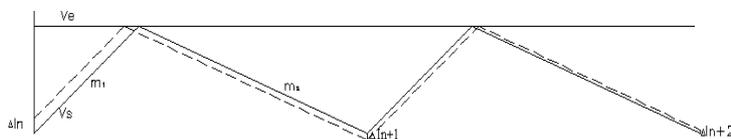


图 2. 占空比小于 50%

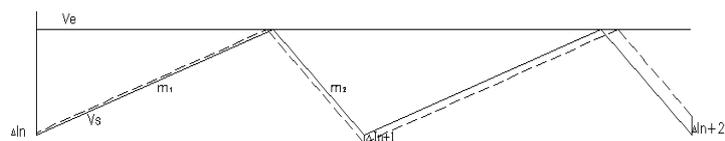


图 3 占空比大于 50%

设 Δi_n 为第 n 次开通前电流扰动信号, m_1 和 m_2 分别为电流上升和下降率, 实线为稳定情况, 虚线为加入扰动后的情况。图 2 为占空比小于 50%, 即 m_1 大于 $-m_2$ 时在扰动信号 Δi_n 作用下的波形, 图 3 为占空比大于 50%, 即 m_1 小于 $-m_2$ 的波形。可以推出:

$$\text{第 } n+1 \text{ 个开关周期电流扰动量为 } \Delta i_{n+1} = -\Delta i_n \frac{-m_2}{m_1},$$

$$\text{第 } n+2 \text{ 个开关周期电流扰动量为 } \Delta i_{n+2} = -\Delta i_n \left(\frac{-m_2}{m_1} \right)^2$$

⋮

从图 2、图 3 即以上推论可以很明显的看出, 当 $D > 0.5$ 时, 即 $-m_2 > m_1$ 时, 扰动会在随后的周期逐渐减小, 系统趋于稳定。当 $D > 0.5$ 时, 即 $-m_2 < m_1$ 时, 扰动会在随后的周期加大, 造成不稳定或性能下降。若在 V_e 处加入斜坡补偿, 如图 4 所示。

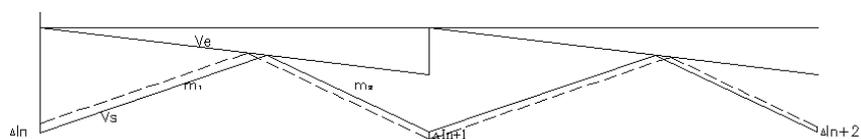


图 4. V_e 处的斜坡补偿

$$\text{此时 } \Delta I_{n+1} = - \Delta I_n \left(\frac{-m_2 - m}{m_1 - m} \right)$$

$$\Delta I_{n+2} = - \Delta I_n \left(\frac{-m_2 - m}{m_1 - m} \right)^2$$

如果选择 m 使 $\frac{-m_2 - m}{m_1 - m} < 1$, 那么在随后的周期电流扰动会逐渐减小到零。式 $\frac{-m_2 - m}{m_1 - m} < 1$

中, 消去 m_1 (利用 $-m_2 > m_1$) 可得到 $m > 0.5m_2$ 。在实际设计中, 斜坡补偿斜率通常取 $0.75m_2 \sim m_2$ 。

如果选择 $m = m_2$, 那么扰动信号在一个周期内就可以完成校正。对于 BUCK 电路, 补偿坡度是 V_o/L , 由于输出电压恒定, 所以补偿值便于计算并恒定; 对于 BOOST 电路, 补偿坡度是 $(V_{in}-V_o)/L$, 由于输入电压随电网变化, 所以补偿值不恒定, 这样对于固定补偿网络, 很多时候会发生过补偿或补偿不足, 降低了电路的性能并导致波形畸变, 因此 BOOST 电路通常不采用峰值电流控制而采用平均电流控制的模式, 来避免斜坡补偿。

3. 采样电压 V_s 处的斜坡补偿^[4]

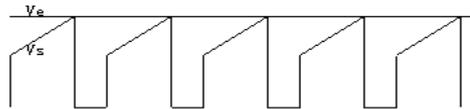


图 5. 补偿前的 V_e 和 V_s

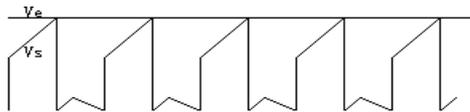


图 6. 补偿后的 V_e 和 V_s

电压 V_e 处的补偿是在 V_e 信号上减去补偿信号, 而 V_s 处的补偿是在 V_s 上叠加补偿信号。占空比大于 50% 时, 检测电阻 R_S 电流上升率平坦, 稍有干扰, 就将引起误触发。在采样电压 V_s 处加一个补偿斜坡可大大提高其可靠性。以图 1 的原理图为例, 图 5 为补偿前误差电压和采样电压, 它的不稳定情形前面已经分析过。图 6 为补偿后的误差电压和采样电压。这种补偿方法的结果与前一种是等效的, 由于该方法实现电路简单, 较为常用。

4. 斜坡补偿的方法^[5]

采用恒定电流充放电型振荡器可以获得固定频率、固定占空比的时钟脉冲信号和斜率恒定的斜坡电压信号。时钟脉冲信号可以通过控制锁存器来设定变换器的工作频率和最大占空比, 而且可以使控制电路有效地实现电流模式的逐个脉冲控制。振荡器中电容 C 上的电压即为斜坡信号, 可以用来作为斜坡补偿信号。斜坡补偿可用外接电路, 也可用芯片内部的集成电路。图 7 为外接的 V_e 处的斜坡补偿电路。图 8 为外接的 V_s 处的斜坡补偿电路。图 9 为图 8 的改进电路, 其中射极跟随器的接入减小了晶振端输出阻抗。

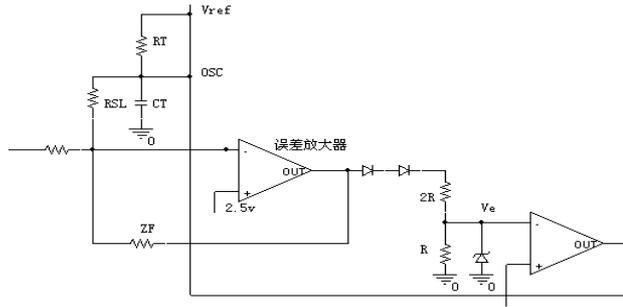


图 7.外接的 Ve 处的斜坡补偿电路

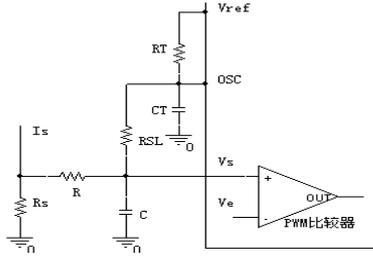


图 8.外接的 Vs 处的斜坡补偿电路

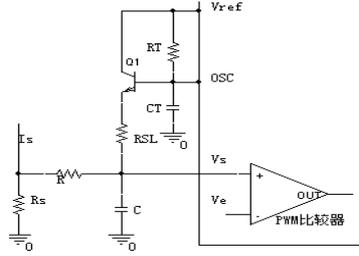


图 9.图 8 的改进电路

对于图 8 或图 9 的补偿电路，斜坡补偿设计步骤如下：

① 计算电感电流的下降沿: $m_2' = \frac{di}{dt} = \frac{V_o}{L}$ (安/秒);

② 如果外围电路为隔离式，计算反应到初级的电感电流下降沿 $m_2 = \frac{m_2'}{N}$ (N 为高频变压器的匝比);

③ 计算初级测得的下降沿坡度: $V m_2 = m_2 \cdot R_s$ (伏/秒);

④ 计算补偿斜坡的上升沿坡度: $V_o = \frac{d(V_{osc})}{T_{on}}$ (伏/秒)

⑤ 应用叠加定理求斜坡补偿后电流输入端电压。如图 10 所示，斜坡补偿后加到芯片电流输入端的电压为:

$$V_r = \frac{V m_2 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2}$$

⑤ 计算斜坡补偿值:

$$V_c = \frac{V_o R_1}{R_1 + R_2} = M \frac{V m_2 R_2}{R_1 + R_2}, \text{其中 } M \text{ 为补偿因子，一般取 } 0.75 \sim 1.$$

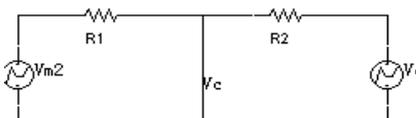


图 10

如果采用片内集成的话，振荡器中电容 CT 上的电压就是斜坡信号，可用求和电路把斜坡电压和采样电压叠加得到补偿后的信号。当然电压求和不如电流求和简单，所以可采用一个 V-I 电路把斜坡电压转换成斜坡电流，然后对斜坡电流信号 Islope 和电感电流采样信号 Isense 求和，然后输入到一个 I-V 电路产生 Vs，再和误差放大器的输出 Ve 进行比较。

5. 结论

对于目前广泛应用的峰值电流控制电路,采用斜坡补偿可以改善电路性能,增加电路稳定性,特别对占空比大于 50%的电路,进行斜坡补偿是必要的。本文介绍了电流控制型开关电源中峰值电流控制模式的原理,分析了斜坡补偿的原理及方法,并给出了补偿斜坡信号的产生方法。

本文作者创新点:系统深入的分析了峰值电流控制电路中的斜坡补偿原理及 V_s 处的片外补偿电路,并对该电路进行了改进,该斜率补偿电路对于各种采用峰值电流控制模式的电源变换器有着重要的实用价值。

参考文献:

- [1] 赵良炳. 现代电力电子技术基础[M]. 北京 清华大学出版社, 1995.
- [2] 王水平等. DC/DC 变换器集成电路及应用[M]. 西安 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [3] 张兰红, 陈道炼. 电流控制型脉宽调制器 UC3842 及其应用[J]. 盐城工学院学报, 2002, 15 (2) :5~7.
- [4] 汪 岭, 谢 憬. 电流模式 PWM 升压变换器的斜率补偿电路[J]. 微计算机信息, 2007, 6-2: 277-278.
- [5] 杨 汝. 峰值电流控制模式中斜坡补偿电路的设计[J]. 电力电子技术, 2001, 35 (3) :35~38.

作者简介:

刘成(1979—), 男(汉族), 西安电子科技大学电力电子与电力传动专业硕士研究生。研究方向为:模拟集成电路设计。

吴玉广(1947—), 男(汉族), 教授。研究方向:专用集成电路和功率集成电路设计。

Biography:Liu CHeng(1979-), male(Han nationality), Master from School of Microelectronics of Xi'Dian University , majored in analog integrated circuits design.

Wu Yuguang (1947—) , male(Han nationality), professor of Xi'Dian University, majored in ASIC and power integrated circuits design.