

降压型 DC-DC 转换器的二次斜坡补偿电路设计

陈远龙, 张 涛, 王 影, 张国俊

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘 要: 考虑到传统线性斜坡补偿对开关电源系统带载能力和瞬态响应的影响, 利用与频率成正比的充放电电流形成一次斜坡电流, 再利用其一次特性与双极性晶体管的输入、输出特性实现了一种工作频率可变的, 斜坡峰值电流随占空比变化的二次特性的斜坡补偿, 使斜坡补偿所带来的不足有效减小. 最后利用 HHNEC 0.35 μm 的 BCD 工艺, 及 Hspice 仿真软件对电路进行了仿真实验.

关键词: 一次斜坡补偿; 二次斜坡补偿; 带负载能力; 瞬态响应

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)08—0082—04

Design of a Quadratic Slope Compensation Circuit for Buck DC-DC Converter

CHEN Yuan-long, ZHANG Tao, WANG Ying, ZHANG Guo-jun

(State Key Laboratory of Electronics Thin Films and Integration Device, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Considering the influence on load capacity and transient response caused by the traditional linear slope compensation. The proportional to the frequency of the charge and discharge current is used to form the first order slope current, then use it together with the input and output of the bipolar transistor characteristics realize quadratic slope compensation circuit which can work in different frequency and slope peak current changed with the duty cycle was proposed. The lack of the slope compensation effectively reduced. its performances have been verified by Hspice simulation using the 0.5 μm BCD process.

Key words: first-order slope compensation; quadratic slope compensation; load capacity; transient response

1 引言

在开关电源系统中, 需要采样信号作为调节占空比的控制信号, 可分为电压环控制型和电流环控制型. 其中电流环控制型, 又可分为峰值、谷底和平均的电流控制模式. 峰值电流控制模式使用较为普遍, 相对于电压模式, 峰值电流模式具有快速的线性瞬态响应, 消除了电压模式输出端滤波器引入的极点和系统二阶特性带来的影响^[1], 并自带最大电流限制功能. 这些优势使得峰值电流控制越来越受欢迎.

但是当占空比大于 50% 时, 系统会出现次谐波振荡, 使系统不稳定, 这时需要加入合适的斜坡补

偿, 来抑制谐波振荡的现象^[2], 可以采用传统线性补偿(在电流控制模式上加入短暂的电压控制模式), 但会带来过补偿的缺点, 导致减小峰值电感电流, 影响系统带载能力, 甚至使电流控制模式变为电压控制模式, 丧失了快速瞬态响应的能力. 本文结合一次线性的斜坡补偿电流, 设计了一种具有二次特性的斜坡补偿电路.

2 斜坡补偿原理与方法

2.1 斜坡补偿原理

峰值电流控制模式中, 占空比的突然变化, 控制电压无法足够快地校正占空比改变, 且环路控制的是峰值电感电流, 因此, 会导致平均输出电流的改

变,为校正这一变化,需将一定的三角波电压波形添加到电感电流信号中,使平均输出电流不随占空比而变化。

图 1 表示了 BUCK 同步 DC-DC 在占空比大于 50% 时,无斜坡补偿和有斜坡补偿的情况下,输出电感电流有小波动时,电感电流逐周期变化的情况。图中, ΔI_0 为扰动电流, ΔI_1 为扰动电流经过一个周期后的误差电流。 m_1 为电感电流上升斜率, m_2 为电感电流下降斜率。由数学知识可得:

$$\frac{\Delta I_1}{\Delta I_0} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{D}{1-D} \quad (1)$$

从式(1)可知,在占空比大于 50% 时,扰动电流有逐周期增大的趋势,系统发生次谐波而不稳定。在加入斜坡补偿 m 后,有:

$$\left| \frac{\Delta I_1}{\Delta I_0} \right| = \left| \frac{m_2 - m}{m_1 + m} \right| \quad (2)$$

故要维持系统稳定,只要满足

$$m > \frac{1}{2}(m_2 - m_1) \quad (3)$$

在设计时,为了保证最恶劣条件下开关系统的稳定性,我们使补偿斜率 $m > \frac{1}{2}m_2$ 。这也是传统线性补偿所采用的方法。

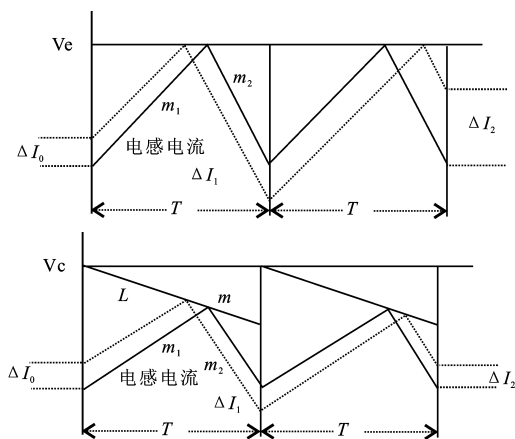


图 1 次谐波振荡及斜坡补偿原理图

2.2 各种不同的斜坡补偿方法

传统的线性补偿技术是以最大占空比时所对应的情况来设计补偿斜率,所以,在大多数条件下,系统处于过补偿的状态中,对带载能力影响极大^[3]。分段线性补偿的基本思想是把占空比分为几个区间(一般 4 个最合适),每个区间以最大斜率补偿,相比于线性补偿,其能够一定程度地改善系统带载能力和瞬态响应,但这种结构的劣势在于,在每个占空比区间内还是存在一定的过补偿,只是幅度比线性补

偿小,而且电路设计的复杂度随占空比区间成正比。自适应斜坡补偿技术是使得补偿斜率与输入、输出电压相关,每个占空比对应一个补偿斜率。本文所设计的二次特性的斜坡补偿就是通过拟合理想的补偿斜率^[4-6],从而尽可能地提高系统带载能力。图 2 给出了三种补偿技术对峰值电流的影响的对比。

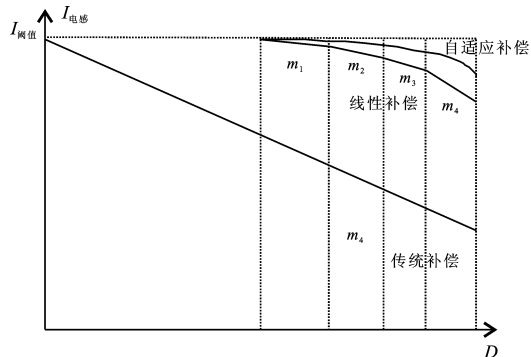


图 2 传统分段线性和自适应斜坡对峰值电流影响对比示意图

3 二次斜坡补偿电路的实现

本文提出的斜坡补偿电路整体上可以分为三个部分:一次斜坡电流产生电路,二次斜坡电流产生电路和叠加电路。下面分别讨论这三个模块。如图 3 所示。

3.1 一次斜坡电流产生电路

一次斜坡电流由与转换器频率成正比的电流 I_{ref} 对电容充放电形成,因为当开关电源工作在不同频率时,所需要的斜坡补偿宽度也不相同,故采用与开关频率成正比的电流可以形成对不同工作频率的补偿。具体说明如下,图 3 中 CK 为 PWM 占空比相关的信号,控制 M_{23} 和 M_{24} 的导通与关断,使斜坡补偿信号只在采样电感电流上升阶段时产生。即当 CK 为高时, M_{24} , M_{23} 开启,电容放电,无斜坡信号产生;当 CK 为低时, Q_2 对电容充电,由电容特性,可得一次斜坡补偿电流的斜率为

$$K_{slope} = \frac{I_{ref}}{C_1 R_2} \quad (4)$$

肖特基二极管 D_1 箝位 Q_1 两端的电压,防止其进入深饱和区,可以限制一次补偿电流的大小。 M_{21} , M_{22} 把产生的一次斜坡电流镜像到二次斜坡产生电路。

3.2 二次斜坡电流产生电路

二次斜坡电流可由产生的一次斜坡与三极管 Q_3 , Q_4 , Q_5 , Q_6 组合产生,利用三极管的输入输出特性得:

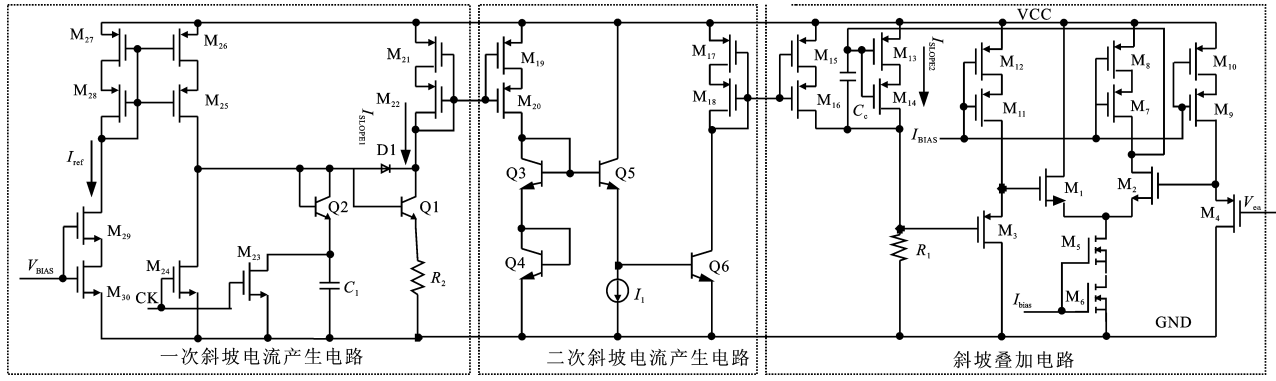


图3 整体电路

$$V_{BE1} + V_{BE2} = V_{BE3} + V_{BE4} \quad (5)$$

$$2V_T \ln \frac{I_{\text{slope1}}}{I_s} = V_T \ln \frac{I_1}{I_s} + V_T \ln \frac{I_{\text{slope2}}}{I_s} \quad (6)$$

可解得二次斜坡补偿的斜率为

$$K_{I_{\text{slope2}}} = \frac{dI_{\text{slope2}}}{dt} = \frac{2I_{\text{ref}}^2 \cdot t}{R_2^2 \cdot C_1^2 \cdot I_1} = \frac{2I_{\text{ref}}^2 \cdot T \cdot D}{R_2^2 \cdot C_1^2 \cdot I_1} \quad (7)$$

可知斜坡电流的斜率与占空比成正比关系,斜坡电流与占空比成二次特性,可以起到动态斜坡补偿的效果,且电路简单有效.下面介绍了补偿斜率的确定.

在BUCK同步DC-DC转换器斜坡补偿理论中,一般在斜坡补偿斜率为电感电流下降斜率的一半时,设计补偿,即

$$\frac{dI_{\text{SLOPE}}}{dt} \geq \frac{V_{\text{out}}}{2L} \quad (8)$$

上式的左边是斜坡电流对时间求导之后的结果,而右边的表达式与时间的关系不太明显,我们可将右边的表达式换成另外一种表达式.

电感的选择要满足如下公式:

$$L = \frac{V_{\text{out}}}{f \Delta I_{L(\text{max})}} (1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}) = \frac{TV_{\text{out}}}{\Delta I_{L(\text{max})}} (1 - D) \quad (9)$$

式中, $\Delta I_{L(\text{MAX})}$ 为最大纹波电流,且 $\Delta I_{L(\text{max})} = \frac{r}{2} I_L$.

其中 r 为电感电流纹波率, I_L 为平均电感电流.我们将式(8)中的电感电流换成式(9)中的形式,化简得到:

$$\frac{V_{\text{out}}}{2L} = \frac{\Delta I_{L(\text{max})}}{(1-D)T} = \frac{rI_L}{2(1-D)T} \quad (10)$$

假设芯片工作的最大占空比是 D_{max} , 要保证斜坡补偿的足够,即要保证 $\frac{2I_{\text{ref}}^2}{I_1 R_2^2 C_1^2} DT \geq \frac{rI_L}{2(1-D)T}$ 对 $50\% < D < D_{\text{MAX}}$ 恒成立. 即

$$\frac{4I_{\text{ref}}^2 D(1-D)T^2 - rI_L I_1 R_2 C_1}{2I_1 R_2 C_1 (1-D)T} \geq 0 \quad (11)$$

分析式(11),分母一定大于零,只需设置电路参数保证分子在 $50\% < D < D_{\text{max}}$ 时,恒大于等于零即可.而分子中 $D(1-D)$ 一项在 $50\% < D < D_{\text{max}}$ 之间单调递减,所以式(11)中 $D = D_{\text{max}}$ 分子取得最小值,我们取 rI_L 为峰值电感电流.这样,式(11)中的参数便当外围元件无关,只要保证这个最小值大于等于零即可.

因此这样得到的斜坡补偿斜率与温度及器件的工艺参数的关系也不紧密,主要与电阻电容的温度系数相关.

3.3 叠加电路

叠加电路利用运放的单位增益负反馈,将二次电流斜坡信号与误差放大器输出电压反相叠加,箝位 M_3 的栅极电压等于 V_{ea} , C_c 作为米勒补偿电容,保证反馈系统的稳定性,利用 KCL 方程,可解出在 M_{12} 、 M_{11} 产生的输出二次斜坡电流.

$$(I_{\text{slope2}} + I_{\text{comp}})R_1 = V_{\text{ea}} + V_{\text{GSP}} \quad (12)$$

其中, I_{comp} 为斜坡叠加电流,由式(12)可得

$$I_{\text{comp}} = \frac{V_{\text{ea}} + V_{\text{GSP}}}{R_1} - I_{\text{slope2}} \quad (13)$$

4 电路仿真结果与分析

本文采用 HHNEC 0.35 μmBCD 工艺, Hspice 仿真软件对所设计的斜坡补偿电路进行验证.斜坡电流 I_{slope} 与误差放大器输出叠加后的输出电压电流波形如图4所示.

I_{comp} 是 EA 电流减去斜坡电流后的总叠加电流,根据 I_{comp} 仿真波形可知,随着占空比 D 的增加,斜坡电流限制峰值电流程度也增加.

为了验证所设计的斜坡补偿电路的有效性 & 改善,因为本文所设计的二次特性斜坡是由一次斜坡

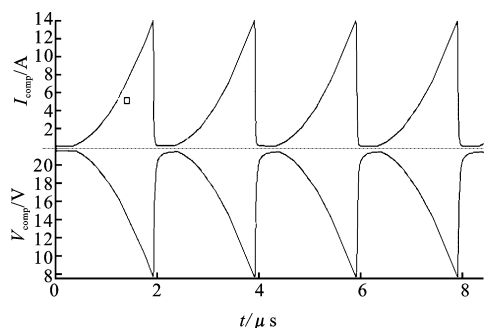


图 4 斜坡电流与 EA 叠加后波形

产生,故利用单独接成一次线性斜坡补偿时系统带载能力与接成具有二次特性的斜坡补偿带负载能力作对比,仿真结果如图 5、图 6 所示,两种补偿方法的带负载能力是有明显差异的,使用本文所设计的斜坡补偿的带载能力为 9.6 A,而单独的一次线性斜坡补偿的带载能力为 7.6 A,相差 2 A,带载能力提高 26%。故本文所设计的二次特性的斜坡补偿可以极大的提高开关电源系统的带载能力。

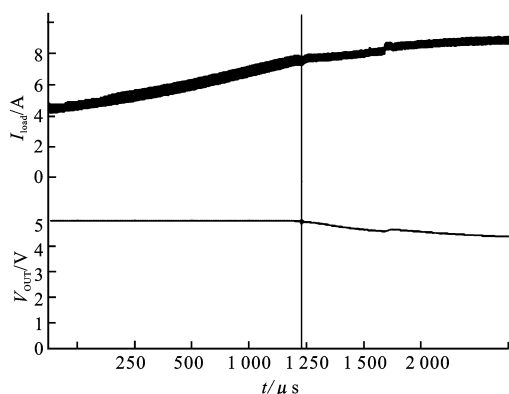


图 5 一次线性补偿带载能力仿真

为了验证二次特性斜坡补偿对瞬态响应的改善,利用上述类似方法,对系统瞬态响应进行仿真,结果如图 7 所示,图上方所示的波形为二次特性的斜坡补偿系统的瞬态响应结果,图下方所示的波形为接成一次斜坡补偿时系统的瞬态响应结果。通过仿真图可以看出,当负载跳变时,基于二次特性的斜坡实现的斜坡补偿的瞬态响应时间 $70 \mu\text{s}$,而基于一次线性斜坡补偿的响应时间接近 $120 \mu\text{s}$,可知本文中的补偿结构可以极大地改善传统线性补偿的系统瞬态响应能力。

5 结束语

本文利用一次线性斜坡电流和 BJT 的输入输出特性来产生能适应占空比变化的二次特性的斜坡补偿,用二次曲线来拟合不同占空比情况下的不同

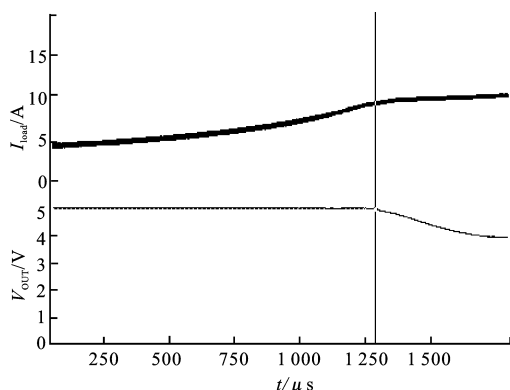


图 6 二次特性补偿带载能力仿真

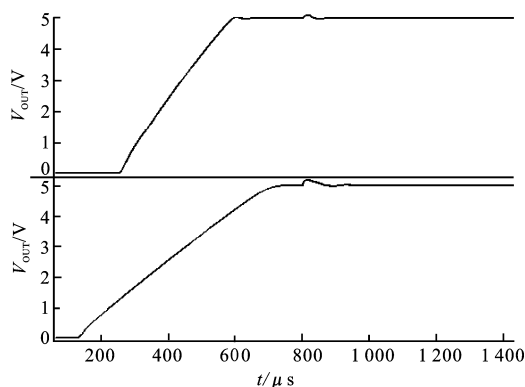


图 7 一次、二次特性斜坡的瞬态特性

补偿斜率,适合在宽频率范围内工作。同时,该斜坡补偿与温度及器件的工艺参数的关系不密切,故可以保证拟合的精度。仿真结果验证了该补偿电路的有效性,能极大地提高带载能力和改善瞬态响应。

参考文献:

- [1] 王留杰 王松林. 峰值电流模升压变换器分段线性斜坡补偿设计 [J]. 固体电子学与进展, 2007, 27(2): 269-274.
- [2] 周泽坤,王锐,张波,等. 一种自适应斜坡补偿电路[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(1): 47-49.
- [3] 李演明, 来新泉, 王红义. 降压型 DC-DC 转换器自调节型斜坡补偿电路设计[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(3): 274-276.
- [4] 薛彦红, 吴金, 张亮. 具有二次特性的斜坡补偿电路的设计 [C]// 第五届中国测试学术会. 中国苏州, 2008: 107-110.
- [5] Modelling. Analysis and Compensation of the Current Mode Converter Unitrode Application Note: 3. 44~3. 46. [R]. 1999.
- [6] Liao C. Switching regulator with slope compensation independent of changes in switching frequency. US: Patent 7,342,392[P]. 2008-3-11.

度下降,而过短则不能反映统计特征,致使预测误差变大^[13],因此要考虑服务器实际计算性能选择合适样本长度。算法初始化过程,报警次数 n 取值越大,采集到最短劣化时长概率越大,算法效果越好。

4 结束语

本文使用动态 ARMA 预测模型实时预测,在设备劣化过程中根据数据变化动态改变数据采集频率,平均采集频率较小情况下可以预测报警并采集到报警附近详细的关键信息,对数据挖掘及故障诊断提供有效数据。实验结果证明,对渐变性故障,动态频率采集算法具有良好的效果。

参考文献:

[1] 蒋瑜等. 机械设备故障规律及运行趋势预测方法综述[J]. 机电一体化 2001,9(3): 14-17.

[2] 王衍学. 机械故障监测诊断的若干新方法及其应用研究[D]. 西安:西安交通大学 2009.

[3] 邵富杰. 远程故障诊断技术在数据采集系统中的应用[J]. 工业控制计算机,2007,20(7)15-20.

[4] 丁明. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J]. 电力自动化设备,2005 25(8)32-34.

[5] Youqiang Sun. Prediction about time series based on updated prediction ARMA Model[C] // International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovery. Shenyang:IEEE,2013:680-684.

[6] Pappas S S, Ekonomou L, Karamousantas D Ch, et

al. Electricity demand loads modeling using Auto Regressive Moving Average (ARMA) models [J]. Energy, 2008, 33(9): 1353-1360.

[7] 杨叔子. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2007.

[8] 耿宏,刘晓萌,刘富学,等. 基于飞行计划的惯性导航误差模型分析[J]. 计算机测量与控制,2015,23 (7) 2528-2531.

[9] 李向前. 复杂装备故障预测与健康管理关键技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2014.

[10] 张树京. 时间序列分析简明教程[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[11] Chao Wu. Ambient Singals based Power System Oscillation Modes Identification considering Model Order Selection[C] // Power & Energy Society General Meeting. Calgary,AB: IEEE, 2009:1-7.

[12] 刘刚,郝敬敏,邝继双,等. 机械设备事故趋势与超限综合报警方法[J]河北农业大学学报,2000,23(4)88-92.

[13] 王可东,熊少锋. ARMA 建模及其在 Kalman 滤波中的应用[J]. 宇航学报,2012,33(8):1048-1055.

作者简介:

张 斌 男,(1970-),副教授. 研究方向为计算机网络与应用技术、计算机控制技术、网络安全.

朱建涛(通讯作者) 男,(1989-),硕士研究生. 研究方向为物联网应用.

E-mail:974813505@qq. com

徐 翌 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为工业监控.

(上接第 85 页)

作者简介:

陈远龙 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路的研究. E-mail:1257569194@qq. com.

张 涛 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路的研究.

张国俊 男,(1960-),教授. 研究方向为新型功率半导体器件与集成电路和系统设计.