

用降压型单电感多输出 DC-DC 变换器输出高电压

吕昌辉,周 锋,马海峰

(复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室,上海 201203)

摘 要: 本文发现并证明了降压型单电感多输出 DC-DC 变换器当电感工作于连续导通模式下能够产生高于电源电压的输出.这个发现将降低需要同时输出高压和低压的 DC-DC 变换器的结构复杂性.本文实现了一个降压型结构的单电感双输出的直流变换器,供电电压 3.3V,输出为 1V 和 4V.实验结果很好的证明了本文的结论.

关键词: DC-DC 变换器;单电感多输出;连续导通模式

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 02-0493-04

Supply High Voltages with Single-Inductor Multiple-Output DC-DC Buck Converter

LÜ Chang-hui, ZHOU Feng, MA Hai-feng

(State Key Laboratory of ASIC and System, Fudan University, Shanghai 201203, China)

Abstract: This paper proves that a Single-inductor multiple-output (SIMO) DC-DC buck converter in Continuous-Conduction Mode (CCM) can supply the output voltages higher than the input voltage, which will greatly reduce the design complexity of SIMO DC-DC converters. A two-branch-output SIMO DC-DC experiment is carried out, with its input voltage 3.3V and output voltages 1V and 4V respectively. The experimental results correspond well to the theoretically calculated ones, thus verifying our derivations.

Key words: DC-DC converter; SIMO (single-inductor multiple-output); CCM (continuous-conduction mode)

1 引言

许多电子设备需要提供多个相互独立的电源,如数码相机、个人数字助理、移动电话等.这些电子设备要求高效的电源管理系统.研究证明^[1],采用单电感多输出(SIMO)变换器是效率最高的.与非连续导通模式(DCM)^[2~4]及伪连续模式(PCCM/DCM)^[5]相比,连续导通模式(CCM)^[1,6~11]有更高的变换效率和较低的电感电流纹波.尽管如此,SIMO 直流变换器工作于 CCM 时,存在串扰和不易稳定的问题.

在本文中,我们扩展了文献[1,9,10]等对降压型 SIMO DC-DC 变换器的静态分析,并且发现,降压型 SIMO DC-DC 变换器工作于 CCM 时,如果加以适当的控制函数,能够提供比供电电压高的输出.

文献[8]也是一种能同时输出比输入电压高或低的多路输出电压的 SIMO DC-DC 变换器,如图 1 所示.这种结构为降压升压型 DC-DC 变换器,比降压型 SIMO 变换器多一个开关 S_{o_N+1} ,增加了电路和控制函数设计的复杂度;此外,开关 S_{in_L} 和 S_{o_N+1} 不能同时导通,增加了电路对寄生参数的敏感度.本文的发现适用于单纯降

压结构的 SIMO DC-DC 变换器,据作者所知,还未被已发表的文献所提及.

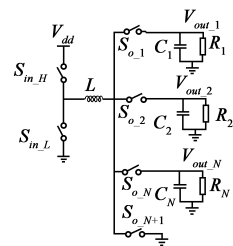


图1 文献[8]提出的降压升压型SIMO DC-DC变换器结构

2 降压型 SIMO DC-DC 的稳态分析

图 2 给出了一个 N 路输出的降压型 SIMO 变换器.开关 S_{in_H} 和 S_{in_L} 的工作方式与传统的降压型 DC-DC 变换器相同,支路开关从 S_{o_1} 到 S_{o_N} 交替导通,在任何时刻,有且只有一条支路的开关处于导通状态.

为了方便分析,作两点合理的假设:一,电感上电流纹波远小于其平均值;二,支路输出电压纹波远小于其平均值.基于此,CCM 模式下的降压型 SIMO DC-DC 变换器有^[1]:

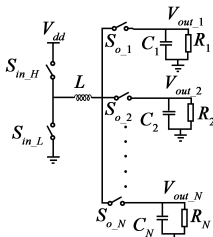


图2 降压型SIMO变换器的电路结构

$$\sum_{i=1}^N D_i = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N I_{out_i} = I_L \quad (2)$$

$$I_{out_i} = I_L D_i = V_{out_i} / R_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

其中 D_i 是支路开关 S_{o_i} 的占空比, I_{out_i} 为支路负载 R_i 上的电流, I_{out_T} 为所有支路电流之和. V_{out_i} 是支路 i 的输出电压, I_L 是电感上的平均电流. 由式(2)和(3)可以得到 D_i 和 I_L 的表达式如下:

$$D_i = \frac{V_{out_i} / R_i}{\sum_{j=1}^N V_{out_j} / R_j} \quad (4)$$

$$I_L = \sum_{j=1}^N \frac{V_{out_j}}{R_j} \quad (5)$$

式中 j 也是支路编号. 式(4)说明某一支路的占空比 D_i 与所有支路的负载有关. 从文献[7,9,10]中得出结论:

$$V_{dd} D = \sum_{j=1}^N V_{out_j} D_j \quad (6)$$

$$D = \sum_{j=1}^N V_{out_j} D_j / V_{dd} \quad (7)$$

式中 D 是主控开关 S_{in_H} 的占空比.

稳态时, 支路 i 的稳态纹波:

$$\Delta v_{out_i} = \frac{V_{out_i}}{R_i C_i} (1 - D_i) T_s \quad (8)$$

Δv_{out_i} 为支路 i 稳态峰峰值纹波, V_{out_i} 为支路 i 稳态平均值.

3 降压型 SIMO DC-DC 产生高压的原理

为了得到本文的结论, 由式(3)可以得到:

$$-\frac{R_i D_i}{R_1 D_1} V_{out_1} + V_{out_i} = 0, \quad i = 2, \dots, N \quad (9)$$

式(6)和(9)中, 把支路输出电压看成变量, 其余看成参数, 则 N 个变量 N 个方程. 解此方程组, 得到:

$$V_{out_i} = K R_i D_i V_{dd}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

其中,
$$K = 1 / \sum_{j=1}^N R_j D_j^2 \quad (11)$$

我们定义“支路增益”为:

$$M_i = \frac{V_{out_i}}{V_{dd}} = K R_i D_i D, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式(10)和(11)揭示了降压型 SIMO DC-DC 变换器工作于 CCM 时的三个特点:

(1) 输出电压 V_{out_i} 与输入电压 V_{dd} 和主控开关的占空比 D 成线性关系;

(2) 输出电压 V_{out_i} 不仅与本支路负载 R_i 及占空比 D_i 有关, 而且与其它所有支路负载有关;

(3) 支路电压 V_{out_i} 在一些情况下可以大于输入电压.

前两点通过式(10)和(11)可以直接看出. 下面证明第三点.

如果系统工作时满足以下条件:

$$R_i D_i^2 \geq \sum_{j=1, j \neq i}^N R_j D_j^2 \quad (13)$$

且 $D > D_i$, 输出 V_{out_i} 近似为:

$$V_{out_i} = K R_i D_i D V_{dd} = D V_{dd} / D_i > V_{dd} \quad (14)$$

式(14)是式(7)在满足条件式(13)和 $D > D_i$ 时的近似.

为了进一步说明结论(3), 现给出一个 2 路输出的简单例子. $N = 2, D_2 = 1 - D_1$, 并定义 $\lambda = R_1 / R_2$. 则支路增益:

$$M_1 = \frac{\lambda D_1}{\lambda D_1^2 + 1(1 - D_1)^2} D = f_1(D_1, \lambda) D \quad (15)$$

$$M_2 = \frac{1 - D_1}{\lambda D_1^2 + 1(1 - D_1)^2} D = f_2(D_1, \lambda) D \quad (16)$$

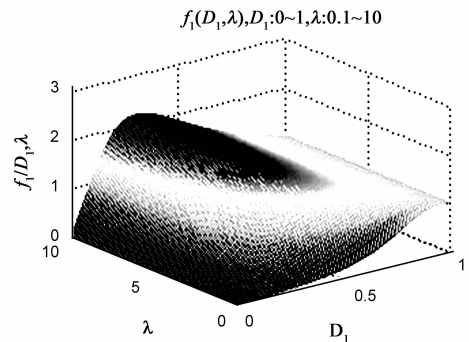


图3 $f_1(D_1, \lambda), D_1 \in [0, 1], \lambda \in [0.1, 10]$

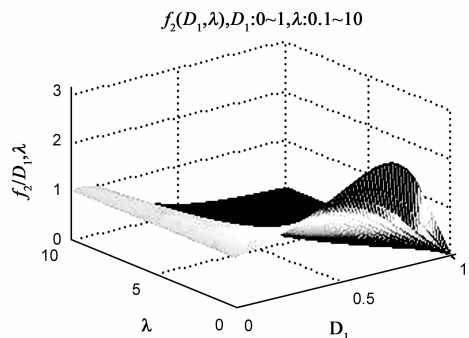


图4 $f_2(D_1, \lambda), D_1 \in [0, 1], \lambda \in [0.1, 10]$

图 3 和图 4 分别显示了 $f_1(D_1, \lambda)$ 和 $f_2(D_1, \lambda)$ 随 D_1 和 λ 变化的曲线. 从图中可以看出, 当 D_1 和 λ 处于某些范围内时, $f_1(D_1, \lambda)$ 或者 $f_2(D_1, \lambda)$ 大于 1. 当 $f_1(D_1, \lambda) > 1$ 时, 选择合适的 D 使得 D 满足: $1/f_1(D_1, \lambda) < D < 1$, 则有 $M_1 = f_1(D_1, \lambda)D > 1$. 这个结论同样适合于 $N(N > 2)$ 路输出的情况. 因此得出本文的第一个结论:

结论 1 降压型 SIMO DC-DC 变换器工作于 CCM 时能够输出比输入更高的电压.

把式(4)代入式(7)则有

$$D = \frac{1}{V_{dd}} \frac{\sum_{i=1}^N \frac{V_{out_i}^2/R_i}{\sum_{j=1}^N V_{out_j}/R_j}}{\sum_{i=1}^N \frac{V_{out_i}^2/R_i}{V_{dd} \sum_{i=1}^N V_{out_i}/R_i}} \quad (17)$$

由 $D \leq 1$ 可以得到存在高压输出时必须满足的约束条件:

$$\sum_{i=1}^N V_{out_i}^2/R_i \leq V_{dd} \sum_{i=1}^N V_{out_i}/R_i \quad (18)$$

假如所有输出都高于输入, $V_{out_i} > V_{dd}$ ($i = 1, 2, \dots, N$)

则有 $V_{out_i}^2/R_i > V_{dd}V_{out_i}/R_i$, 所以:

$$\sum_{i=1}^N V_{out_i}^2/R_i > V_{dd} \sum_{i=1}^N V_{out_i}/R_i \quad (19)$$

与式(18)相矛盾. 因此得出第二个结论:

结论 2 降压型 SIMO DC-DC 变换器不能使所有输出电压同时高于输入电压.

4 结果与验证

本文采用数字控制的降压型单电感双输出 (SIDO) DC-DC 变换器验证本文的结论 (如图 5) 所示. 图中 S_{in_H} 和 S_{in_L} 为主控开关; S_{o_1} 和 S_{o_2} 是支路开关; C_1 和 C_2 为滤波电容; V_{ref_1} 和 V_{ref_2} 为支路参考电压; 二极管 d_{i_1} 和 d_{i_2} 用于防止支路开关的体效应二极管导通.

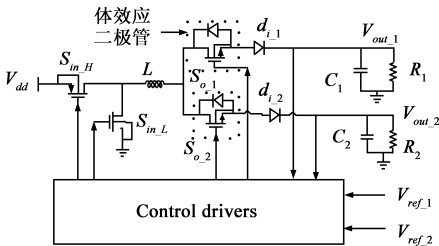


图5 降压型SIDO DC-DC变换器系统结构

仿真的相关参数为: $V_{dd} = 3.3V$; $L = 100\mu H$; $C_1 = C_2 = 100\mu f$; $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 75\Omega$; $f_{sw} = 200kHz$; $V_{ref_1} = 1V$; $V_{ref_2} = 4V$; 数字脉宽调制 (DPWM) 的位数 8bits; ADC 精度 50mV. 电感的电流波形 i_L 以及开关控制信号 S_{in_H} 、 S_{o_1} 、 S_{o_2} 如图 6 所示. 图 7 为输出电压的仿真波形. 稳

态平均值 $V_{out_1_simu} = 1.011V$; $V_{out_2_simu} = 4.082V$. 稳态纹波 $\Delta v_{out_1} = 1.53mV$; $\Delta v_{out_2} = 1.34mV$. 仿真的纹波与由式(8)计算的值接近. 通过式(4)和(7)得出的各占空比 D 、 D_1 、 D_2 的理论计算值为: $D = 0.772$, $D_1 = 0.484$, $D_2 = 0.516$; 而由仿真结果为: $D = 0.961$, $D_1 = 0.483$, $D_2 = 0.517$. 支路占空比的仿真值与理论计算值相近, 而主控开关的占空比的仿真值比理论计算值大. 产生这个结果的主要原因是二极管 d_{i_1} 和 d_{i_2} 的导通压降 (0.6V ~ 0.7V). 因为二极管 d_{i_1} 和 d_{i_2} 的影响, 主控开关占空比的计算公式(6)必须修正为:

$$V_{dd}D = \sum_{j=1}^N V_{out_j}D_j + V_{th} \quad (20)$$

式中 V_{th} 为二极管导通压降. 考虑了二极管影响的修正式(20)计算出的主控开关占空比 $D = 0.984$ ($V_{th} = 0.7V$), 与仿真得到的值 $D = 0.961$ 比较接近.

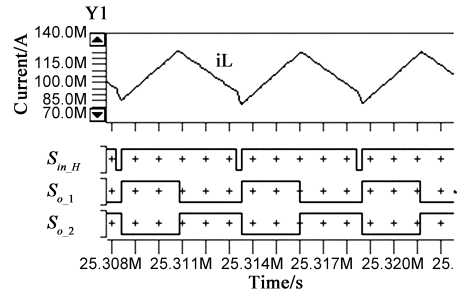


图6 降压型SIDO DC-DC变换器的仿真结果

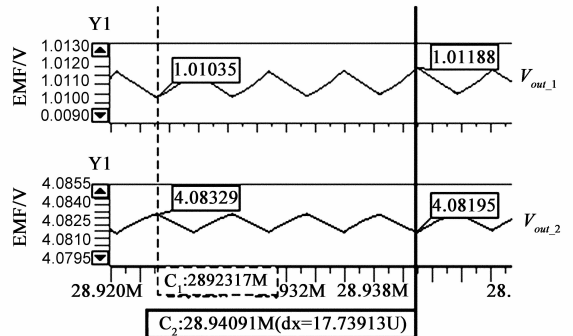


图7 降压型SIDO DC-DC变换器的仿真结果

实验采用系统级验证, 数字控制部分用 FPGA 实现. 电路的相关参数与仿真参数相同. 结果如图 8 所示, 其值分别为 $V_{out_1_exper} = 1.01V$ 和 $V_{out_2_exper} = 4.03V$, 与仿真结果接近. 仿真结果以及试验结果都验证了本文前面得到的结论.

5 结论

本文通过理论分析推导和仿真/实验的验证, 证明了降压型单电感多输出 (SIMO) DC-DC 变换器工作在连续导通模式下时能够产生比输入更高的输出电压. 因此在需要同时输出高于和低于输入电压的应用场合,

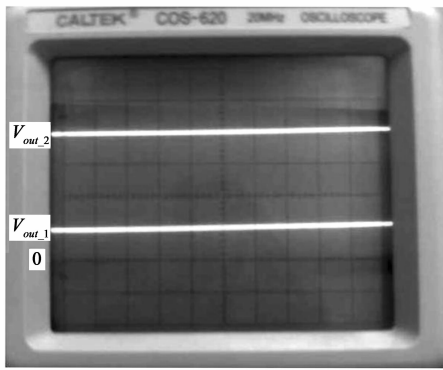


图8 降压型SIMO DC-DC 变换器实验结果

(V_{out_1} , V_{out_2} : 1V/div; V_{out_1} 和 V_{out_2} 的0电位重合, 如图标注, 时间: 2 μ s/div)

降压型 SIMO DC-DC 变换器将是简单高效的解决方案。

参考文献:

- [1] D Trevisan, W Stefanutti, P Mattavelli, P Tenti. FPGA control of SIMO dc-dc converters using load current estimation[A]. Annual Conference of IEEE Industrial Electronics[C]. Raleigh North Carolina, USA. 6 - 10, Nov. 2005. 2243 - 2248.
- [2] D Ma, W H Ki, Chi-Ying Tsui, P K T Mok. A 1.8V single-inductor dual-output switching converter for power reduction technique[A]. Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers[C]. Kyoto, Japan. June 2001. 137 - 140.
- [3] W H Ki, D Ma. Single-inductor multiple-output switching converters[A]. 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference[C]. Vancouver, Canada, June 2001, 1. 226 - 231.
- [4] D Ma, W H Ki, Chi-Ying Tsui, P K T Mok. Single-inductor multiple-output switching converters with time-multiplexing control in discontinuous conduction mode[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), 2003, 38(1): 89 - 100.
- [5] D Ma, W H Ki, Chi-Ying Tsui. A pseudo-CCM/DCM SIMO switching converter with freewheel switching[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits (JSSC), 2003, 38(6): 1007 - 1014.
- [6] Erich Bayer, Gerhard Thiele. A single-inductor multiple-output converter with peak current state-machine control[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Dallas USA, March, 2006. 153 - 159.

- [7] D Trevisan, W Stefanutti, P Tenti. Digital control of single-inductor dual-output dc-dc converters in continuous-conduction mode[A]. Power Electronics Specialists Conference PESC'05. IEEE 36th[C]. Recife Brazil. 12 - 16 June 2005. 2616 - 2622.
- [8] Anmol Sharma, Y Shanthy Pavan. A single inductor multiple output converter with adaptive delta current mode control[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)[C]. Island of Kos, Greece. May 2006. 5643 - 5646.
- [9] D Trevisan, P Mattavelli, P Tenti. Digital control of single-inductor multiple-output step-down dc-dc converters in CCM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(9): 3476 - 3483.
- [10] M Belloni, E Bonizzoni, F Maloberti. On the design of single-inductor multiple-output DC-DC converters[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)[C]. Seattle, Washington, USA. May 2008. 3049 - 3052.
- [11] A Pizzutelli, M Ghioni. Novel control technique for single inductor multiple output converters operating in CCM with reduced cross-regulation[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Austin, Texas, USA. Feb. 2008. 1502 - 1507.

作者简介:



吕昌辉 男, 1984年12月出生于江西. 现为复旦大学微电子研究院硕士, 主要研究方向为降压型 DC-DC 变换器.



周 锋 男, 1966年出生于浙江杭州. 现为复旦大学副教授, 主要研究方向为数模混合集成电路设计和高性能电源管理芯片设计.

Email: fengzhou@fudan.edu.cn