

基于 LDO 电荷泵的快速瞬态响应的 DC-DC 电源

王 翀, 蒋 鸿

(长园深瑞继保自动化有限公司 南京技术中心, 江苏 南京 211106)

摘要: 为了提高 DC-DC 电源的瞬态响应能力, 提出一种新的电荷泵结构。该电荷泵由主开关电源模块和低压差稳压器(LDO)模块组成。主开关电源模块在稳态和瞬态响应时均处于工作状态; LDO 模块由功率管、误差放大器及反馈环路组成, 稳态时功率管关断, 降低系统的功耗; 当负载电流突然变化, 引起输出电压变化时, LDO 模块启动, 其提供的充/放电电流达到理想值, 使负载电流迅速恢复, 将输出电压箝位在一个设定的阈值内。仿真结果表明, 所提电荷泵在负载电流的变化较大时, 可以很好地改善系统输出电压的瞬态响应, 避免电压过冲。

关键词: DC-DC 电源; 瞬态响应; 电荷泵; 低压差稳压器; 仿真

中图分类号: TP 47

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.018

0 引言

新一代的微处理器、DSP 和片上系统(SOC)在手持设备上得到了广泛应用, 其功耗低、低压输出和负载快速变化的特点, 对其供电的电压变换器提出了苛刻的要求^[1]。DC-DC 电压变换器因体积小、重量轻、效率高、性能稳定等优点在电子、电器设备、家电领域得到了广泛的应用^[2]。这类交换式转换器至少会使用 1 个电感器作为电能储存元件, 但当其负载发生较大变化时, 因为输出电感的存在, 电感中的电流无法快速变化来满足负载电流的变化, 因此输出电容会通过放电、充电的形式, 来补偿负载电流和电感中电流之间的差值, 直到电感电流上升或下降到负载电流的水平。由于输出电容寄生电阻上的压降和电容两端电荷的变化, 导致输出电容两端电压即输出电压会发生较大变化, 且其恢复时间比较长, 这在对输出电压要求性能比较高的电源中是坚决不允许的^[3]。

目前有很多提高开关电源瞬态响应的技术^[4-11], 主要有 3 种。

a. 改善环路控制如 U^2 控制、 U^2C 控制、迟滞控制等非线性控制, 通过提高其开环单位增益带宽来提高开关电源的瞬态响应。此技术在负载电流发生较小变化时效果很明显, 但是当负载电流发生较大突变, 反馈环路发生饱和(占空比为 1 或 0)时, 电源为一个开环系统, 输出电感中的电流线性增加或减少。很明显, 输出电压会继续增加或减少, 因为输出电感中的电流无法快速响应满足其要求。因此在方法 **b** 中, 采用步进的输出电感来提高瞬态响应。

b. 当负载电流发生变化时把输出电感调至较小的瞬态值, 使得电感中电流可以快速变化至负载电流; 当开关电源工作在稳态时, 把输出电感调至较大的稳态值, 保证系统稳定工作, 降低电压纹波。

c. 采用一个辅助的电荷泵^[11-12], 主开关电源一直工作, 而此电荷泵仅在瞬态响应时工作, 向负载提供需要的电流, 这样既不影响转化效率, 又可以提高其瞬态响应。目前, 该技术广泛使用一个输出电感

收稿日期: 2012-02-23; 修回日期: 2013-05-11

Calculation of zero-sequence mutual inductance for multi-circuit parallel transmission line

XU Yang^{1,2}, LU Yuping¹, YUAN Yubo²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Electric Power Research Institute of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210036, China)

Abstract: A method for calculating the zero-sequence mutual inductance of multi-circuit parallel transmission line on the same tower is proposed. It is pointed out that, the zero-sequence mutual inductance matrix is a set of independent parameters, based on which, the zero-sequence parameters of transmission line in different operation modes can be deduced by matrix transformation. Without the repeating experimental measurement, the proposed method simplifies significantly the acquisition of zero-sequence mutual inductance, which improves the work efficiency. Results of field test for a four-circuit parallel transmission line show its correctness and accuracy.

Key words: multi-circuit parallel transmission line; zero-sequence mutual inductance; repair mode; electric lines; matrix transformation; relay protection; electric grounding

很小的开环的开关电源作为电荷泵,其工作原理和方法**b**一致。

方法**b**、**c**中都会增加多余的变压器或电感,且其控制开关的芯片面积会很大,成本增加;且电荷泵提供的电流是未知的不可控电流,因此输出电压会有阻尼振荡,引入电磁干扰。

而本文提出的基于低压差稳压器(LDO)的电荷泵可以很好地克服方法**c**所带来的多余的变压器、电感以及不可控的充/放电电流,因为此电荷泵的环路中不存在任何电感、电容等迟滞原件,因此充/放电电流可以更加快速地响应到需要的电流值;而LDO电荷泵的另一个优势是在瞬态调节时,输出电压会被LDO箝位在一个设定值,大幅降低了输出电压的波动;且没有电感、电容,更方便系统的电路集成。

1 新型电荷泵技术

当负载电流突然发生较大变化时,因为电感中电流无法产生突变满足负载电流,多余的电流将由输出电容提供,因此输出电容就会进行充放电。这种情况会导致输出电容的电压即输出电压过冲或者下降^[13],而且恢复时间比较长,如图1所示。图中, I_{o1} 为系统负载变化前的输出电流, I_{o2} 为系统负载变化后的输出电流。当负载变化瞬间,输出电压在负载电流阶跃增加时会突然下降 ΔU_o (由输出电容的寄生电阻导致),电感中电流 I_L 虽然一直线性增加,但始终低于 I_{o2} ,因此输出电容一直处于放电状态;当 $I_L=I_{o2}$ 时,输出电压最大降低 ΔU_o ;当 $I_L>I_{o2}$ 时,输出电压开始上升,直至输出电压恢复为设定值。图中阴影部分 A_1 、 A_2 分别代表了输出电容上充、放的电荷,当输出电压稳定时 $A_1=A_2$ 。且输出电压变化的最大值 ΔU_o 、恢复时间 T_{on} 由输出电容 C_o 的放电电荷面积 A_1 决定,因此可得:

$$U_o = \frac{\Delta I^2 L}{2(U_{in} - U_o)C_o} \quad (1)$$

$$T_{on} = \frac{\Delta I L}{U_{in} - U_o} \left(1 + \sqrt{\frac{U_{in}}{U_o}} \right) \quad (2)$$

其中, ΔI 为负载电流变化值, U_{in} 、 U_o 分别为输入、输出电压, L 、 C_o 分别为输出滤波电感、电容。

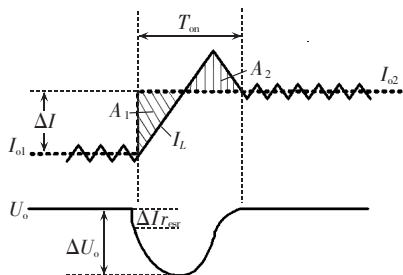
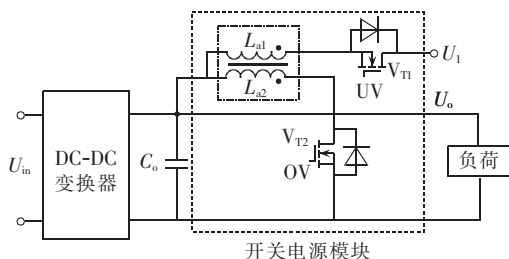


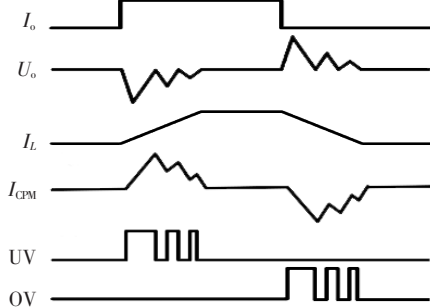
图1 瞬态响应时电感电流、输出电压
Fig.1 Inductive current and output voltage during transient response

根据式(1)、(2),当负载电流变化超过1 A,输出电感为 $4.7 \mu\text{H}$ 、电容为 $20 \mu\text{F}$ 、输入电压为3.3 V、输出电压为1.8 V时,输出电压的过冲和降低会超过80 mV,恢复时间超过 $6.5 \mu\text{s}$,对于微处理器是不可接受的。因此在负载发生变化时,可以通过增加一个外部电荷泵补偿输出电感电流和负载电流之间的差距,如图1所示的阴影部分 A_1 。

图2是文献[12]提出的电荷泵技术及其工作波形。当负载电流突然增大,输出电压下降小于 U_{th-} ,UV为高电平, V_{T1} 导通,电流通过电感 L_{a1} 从0开始线性上升,向输出电容 C_o 充电;输出电压开始缓慢下降,并逐渐转为上升,当输出电压升至并超过 U_{th-} 时,UV为0, V_{T1} 关断,此时电感中电流通过 V_{T2} 的体二极管续流并开始下降,如图2(b)所示;若输出电压仍在降低,则打开 V_{T1} 继续充电,若输出电压超过 U_{th+} 则打开 V_{T2} ,不管如何都会保证输出电压在 $[U_{th-}, U_{th+}]$ 区域之间;当负载电流突然降低时,原理同上。由图2(a)可以看出在负载电流外部增加了变压器和电感,由图2(b)中可以看出,电感和变压器引入了迟滞,使得电荷泵的充/放电电流无法快速充/放至 ΔI ,且UV、OV信号会不断变化,导致电荷泵电流 I_{CPM} 不断上升/下降,不易控制,引入电磁干扰。



(a) 文献[12]提出的电荷泵结构



(b) 文献[12]的电荷泵结构工作波形

图2 文献[12]提出的电荷泵技术

Fig.2 Current pump proposed in reference[12]

为了克服上述问题,本文提出了新的电荷泵结构,采用LDO代替普通的电荷泵,如图3所示。该电荷泵由主开关电源模块和LDO电荷泵模块组成。主开关电源模块如虚线框内所示,是一个完整的Buck型DC-DC变换器; L 、 C_o 分别为输出滤波电感和滤波电容, R_o 为负载;内部的点划线框内为控制环路,

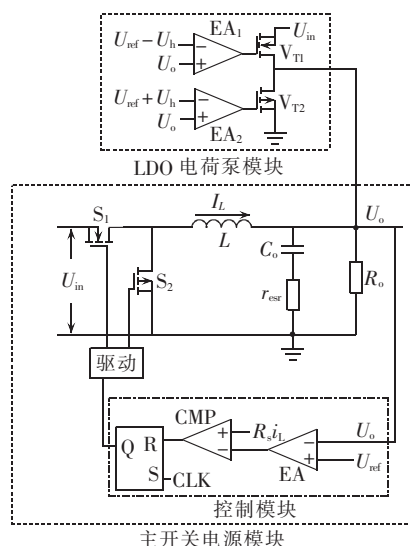
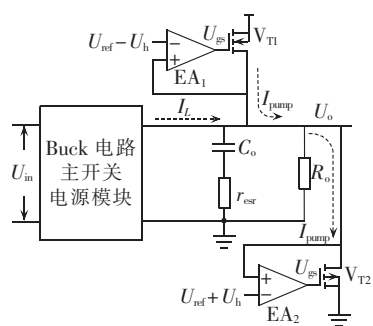


图 3 本文所提电荷泵

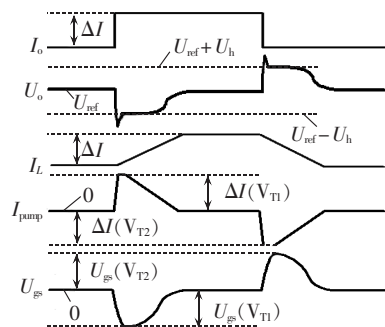
Fig.3 Current pump consisting of SPS module and LDO module

R_s 为采样电阻, i_L 为负载电流。主开关模块参数的取值遵循单独 DC-DC 变换器的参数设计, 和电荷泵无关; 且其在稳态和瞬态响应时均处于工作状态。LDO 电荷泵是一个 LDO 模块, 由功率管、误差放大器和反馈回路组成。功率管 V_{T1} 和 V_{T2} 工作在饱和区, 分别由欠压 $U_{ref} - U_h$ 和过压 $U_{ref} + U_h$ 经过误差放大器来控制。误差放大器工作在线性区, 且其放大倍数足够大 (约 60 dB), 保证在电源稳态 (没有负载发生变化) 时 LDO 电荷泵的功率管 V_{T1} 和 V_{T2} 被关断, 降低系统的功耗。LDO 电荷泵工作原理和普通 LDO 的工作原理相同, 因此其提供的充/放电电流瞬间可以达到理想值 ΔI , 满足其需要的电荷, 相比文献 [12] 的电荷泵结构提高了瞬态响应; LDO 电荷泵只在负载电流发生变化, 并且输出电压值超出设定的阈值时启动工作。因此输出电压被 LDO 电荷泵箝位在一个设定的阈值内。

当负载电流突然增大, 电感电流保持不变, 因此欠缺的电流由输出电容提供, 导致输出电压下降。当输出电压 U_o 低于输出电压参考值的下限值电压 $U_{ref} - U_h$ 时, 二者的差值通过第一误差放大器 EA_1 进行放大后驱动并调节第一功率管 V_{T1} , 产生从输入电压 U_{in} 注入到主开关电源模块输出端的电流; 电荷泵电路中没有电感, 因此注入的电流可以快速上升到 ΔI , 如图 4(b) 所示。输出电压将被 LDO 电荷泵箝位在 $U_{ref} - U_h$, 如图 4(a) 所示, 从而保证输出电压不小于 $U_{ref} - U_h$ 。同时, 由于主开关电源模块的环路使得占空比饱和达到 0, 所以电感电流将线性上升。但是在 LDO 电荷泵启动阶段, 输出电容的寄生电阻会引入一个小毛刺。当电感电流上升至负载电流时, 输出电压会逐渐上升并大于 $U_{ref} - U_h$, 因此 LDO 电荷泵将会被关闭, 主开关电源将恢复到稳态状态。在



(a) LDO 电荷泵原理图



(b) LDO 电荷泵波形图

图 4 电荷泵工作原理

Fig.4 Operating principle of LDO current pump

动态调节的过程中, 电荷泵提供的电流为:

$$I_{pump} = kw(U_{gs} - U_{th})^2 / l \quad (3)$$

因此为了得到足够的充电电流, 假设负载电流变化最大值为 I_{max} , 充/放电的 LDO 功率管两端电压 U_{ds} 为 $U_{in} - U_o$ (U_{in} 、 U_o 分别为开关电源的输入、输出电压), 因此根据 MOSFET 的输出特性曲线可知, 只有当 $U_{gs} - U_{th} = U_{ds} = U_{in} - U_o$ 时, LDO 充/放电电流达到最大为 I_{max} , 因此 V_{T1} 的宽长比 w/l 为:

$$\frac{w}{l} = \frac{I_{max}}{k(U_{in} - U_o)^2} \quad (4)$$

因为 LDO 功率管工作在饱和区, DC-DC 开关管工作在线性区, 因此主开关电源的开关管的宽长比 w/l 为:

$$\frac{w}{l} = \frac{I_{max}}{k(U_{in} - U_{th})U_{ds}} \quad (5)$$

为提高 DC-DC 主开关电源的效率, U_{ds} 的取值会很小, 为百毫伏级, 且 U_{in} 相比 U_o 越大时, $(U_{in} - U_o)^2$ 相比 $(U_{in} - U_{th})U_{ds}$ 就越大。假设输入电压为 3.3 V, 输出电压为 1.5 V, U_{ds} 为 0.2 V, 阈值电压 U_{th} 为 0.7 V, 最大输出电流为 2 A, 很显然 V_{T1} 的宽长比约为主开关电源的开关管的宽长比的 1/6, 因此非常容易集成。

当负载电流突然下降时, 电感中电流保持不变, 多余的电流将流向输出电容, 导致输出电压上升。当输出电压 U_o 高于输出电压参考值的上限值电压 $U_{ref} + U_h$ 时, 二者的差值通过第二误差放大器 EA_2 进行放大, 驱动并调节第二功率管 V_{T2} , 产生从主开关

电源模块输出端到地的放电电流,其输出电压 U_o 被箝位在 $U_{ref} + U_h$,直至电感电流下降至负载电流为止。其原理图和充/放电的工作波形如图 4 所示。

通过增加 2 个额外的电荷泵,输出电压可以快速恢复到设定的电压区域 $[U_{ref} - U_h, U_{ref} + U_h]$ 。此 LDO 电荷泵的主极点为 $1/(2\pi R_o C_o)$,次极点由误差放大器引入,其零点为 $1/(2\pi r_{esr} C_o)$ [14]。因此在动态调节中,只要保证此 LDO 电荷泵在最大输出电流时稳定,则其会在整个负载电流域中稳定,且电源系统将不会受到额外增加模块的稳定性影响。因为若主开关电源模块在动态调节时是开环系统,则占空比为 1 或者 0,保证电源系统的稳定性;若主开关电源模块在动态调节时是闭环系统,由于 LDO 承担了部分充放电的功能,因此主开关模块的等效负载电流会减小,相当于等效负载电阻 R_o 变大,而 Buck 电路主开关电源模块的负载电阻 R_o 越大,其主极点会越小,主开关电源模块的系统稳定性越好。因此在动态调节增加 DC-DC 电源瞬态响应的过程中,LDO 电荷泵和主开关电源模块双环路系统会保持稳定。

2 仿真验证

把基于 LDO 电荷泵的快速瞬态响应的 DC-DC 电源应用在 Buck 电源中,其原理图见图 2。在峰值电流型 Buck 变换器中应用本文提出的技术,通过 Saber 仿真软件验证性能指标。仿真参数如下: $U_{in}=3.3\text{ V}$, $U_o=1.5\text{ V}$, $f=2\text{ MHz}$, $C_o=20\text{ }\mu\text{F}$, $L=4.7\times10^{-6}\text{ H}$, $r_{esr}=0.02\text{ }\Omega$, $U_h=20\text{ mV}$, $\frac{w}{l}\bigg|_{s_1}=\frac{26\text{ }000}{0.35}$, $\frac{w}{l}\bigg|_{s_2}=\frac{9\text{ }000}{0.35}$, 电流采样系数为 0.42。

为了降低 LDO 电荷泵的启动时间,减小输出电压的毛刺,需要一个放大倍数大、驱动能力强、输出电阻小的误差放大器,可以参考文献 [15-16] 的结构。因为 LDO 功率管的宽长比较小,因此 LDO 电荷泵的次极点将远远大于主极点,从而保证 LDO 电荷泵的稳定性 [14]。本文 LDO 的结构如图 5 所示,分为功率管、误差放大器、负载 3 个部分。 M_p 为 LDO 的功率管;虚线框内为 LDO 的误差放大器; A_0 、 A_1 、 A_2 为

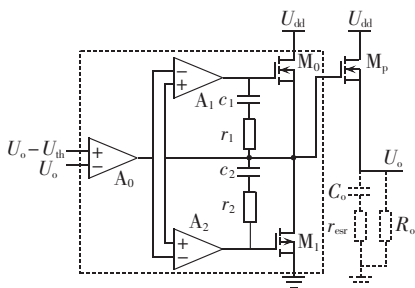
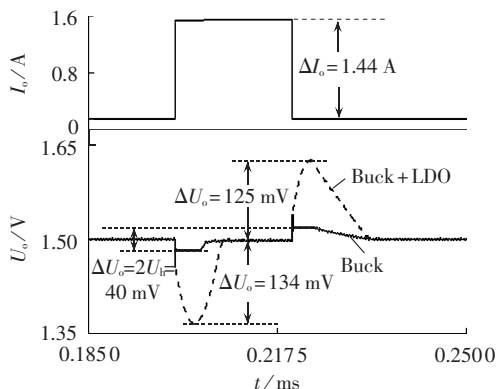


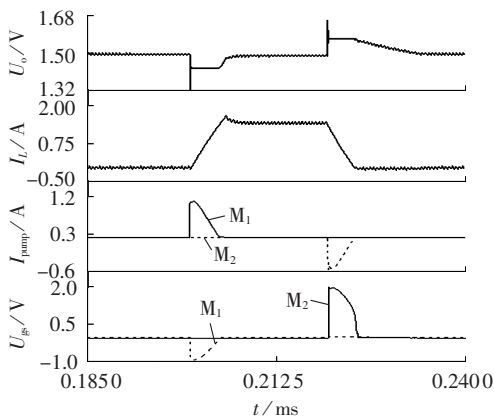
图 5 电荷泵结构
Fig.5 Structure of current pump

一般的普通放大器,可以采用基本的差分运放结构; c_1 、 c_2 和 r_1 、 r_2 分别为密勒补偿电容和电阻,用于保持 LDO 误差放大器的稳定性。负载如图右下角虚线所示,即 DC-DC 负载。根据式 (4) 计算出 LDO 功率管的宽长比为 $3\text{ }000/0.35$,用于驱动 LDO 功率管的误差放大器必须具有较大的驱动能力,因此 LDO 误差放大器的输出端 M_0 、 M_1 的宽长比分别为 $60/0.35$ 、 $18/0.35$ 。

当负载电流发生较大变化时,使用 LDO 电荷泵技术前、后电源系统的输出电压如图 6(a) 所示。图 6(b) 为利用 LDO 电荷泵技术的电源系统的工作波形。从图 6(a) 中可以看出,在负载电流变化 1.44 A 时,没有采用 LDO 电荷泵技术的电源系统的输出电压的恢复时间为 $70\text{ }\mu\text{s}$,电压过冲和电压下降都大于 100 mV ;而采用 LDO 电荷泵技术的电源系统的输出电压的恢复时间有明显改善,可以在瞬间恢复,且没有电压过冲和下降(毛刺除外,由输出电容的寄生电阻导致)。因此,本文提出的基于 LDO 电荷泵技术的电源系统在负载电流变化较大时,可以很好地改善其输出电压的瞬态响应,降低电压过冲和电压下降。



(a) 使用 LDO 电荷泵前后的对比波形



(b) 使用 LDO 电荷泵的工作波形

图 6 使用 LDO 前后系统输出波形对比
Fig.6 Comparison of output waveforms between system with and without LDO

3 结语

LDO电荷泵技术满足了DC-DC电源变换器对快速瞬态响应的要求,由于其充/放电回路没有任何电感、电容等迟滞元件,保证了充/放电电流快速响应到一个较大值,满足负载需要,比普通电荷泵技术更加优越,且输出电压的误差可以很好地控制在一定范围之内。通过系统仿真软件Saber,将此LDO电荷泵技术应用于Buck电源中,其仿真结果验证了使用此技术可以更好地改善输出电压的瞬态响应。

参考文献:

- [1] SENANAYAKE T, NINOMIYA T. Fast-response inductor-switching auto-reset forward DC-DC converter[C]//IEEE PEDS. Singapore:IEEE, 2003:893-898.
- [2] 余华, 邹雪城, 陈朝阳. 高性能PWM型DC-DC升压变换器研究[J]. 固体电子学研究与进展, 2006, 26(3):420-425.
YU Hua, ZOU Xuecheng, CHEN Chaoyang. Research of a high performance PWM DC-DC Boost converter[J]. Research & Progress of Solid State Electronics, 2006, 26(3):420-425.
- [3] BARRADO A, UKQUEZ R, LBARO A, et al. Stability analysis of Linear-Non Linear Control (LNLC) applied to fast transient response DC-DC converters[C]//IEEE APEC. Aachen, Germany: IEEE, 2004:1329-1335.
- [4] NABESHIMA T, SATO T, YOSHIDA S, et al. Analysis and design considerations of a Buck converters with a hysteretic PWM controller[C]//IEEE PEDS. [S.l.]:IEEE, 2004:1711-1716.
- [5] VENABLE D. Practical techniques for analyzing, measuring and stabilizing feedback control loop in switching regulators and converters[C]//PowerCon 7 Proceedings. San Diego, California, USA: [s.n.]: 1-17.
- [6] CHETTY P R K. Modeling and design of switching regulators [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electric Systems, 1992, 5:333-343.
- [7] JAMERSON C, HOSSEINI A. A simplified procedure for compensation current-mode control loops[J]. HFPC Proceedings, 1991,

6:299-318.

- [8] WANG F, XU J, WANG B. Comparison study of switching DC-DC converter control techniques[C]//IEEE Commu., Circuits Syst. Conf. Guilin, China:IEEE, 2006:2713-2717.
- [9] SREEKUMAR C, AGARWAL U. A hybrid control algorithm for voltage regulation in DC-DC Boost converter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(6):2530-2538.
- [10] BARRADO A, LÁZARO A, PLEITE J, et al. Linear-Non Linear Control (LNLC) for DC-DC Buck converters stability and transient response analysis[C]//IEEE APEC. Aachen, Germany: IEEE, 2004:1329-1335.
- [11] BARRADO A, LAZARO A, UAZQUEZ R, et al. The Fast Response Double Buck (FRDB) DC-DC converter: operation and output filter Influence[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(6):1261-1270.
- [12] LIU Pangjung, CHIU Huangjen, LO Yukang, et al. A fast transient recovery module for DC-DC converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(7):2522-2529.
- [13] REDL R, ERISMAN B P, ZANSKY Z. Optimizing the load transient response of the Buck converter[C]//IEEE APEC. [S.l.]: IEEE, 1998:170-176.
- [14] RINCON-MORA G A. Current efficient, low voltage, low dropout regulators [D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 1996.
- [15] KIH Joongsik, CHANG Byungsoo, JEONG Deogkyoon. Class-AB large-swing CMOS buffer amplifier with controlled bias current[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1993, 28(12): 151-153.
- [16] LU Chihwen, HSU Kuojen. A large-swing high-driving low-power class-AB buffer amplifier employing adaptive-gain error amplifiers[C]//IEEE ICCDCS. [S.l.]: IEEE, 2006:243-246.

作者简介:

王 翀(1977-),男,江苏南京人,工程师,硕士,主要研究方向为工业自动化(E-mail:wangchong@sznari.com);

蒋 鸿(1985-),男,江苏南通人,主要研究方向为继电保护装置硬件平台开发(E-mail:jianghong@sznari.com)。

DC-DC source with fast transient response based on LDO current pump

WANG Chong, JIANG Hong

(Nanjing Technical Center, CYG Sunri Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: A kind of current pump is proposed to improve the transient response of DC-DC source, which consists of the main SPS (Switching Power Supply) module and the LDO (Low DropOut regulator) module. The SPS works at both steady and transient states while the LDO, consisting of power tubes, error amplifiers and back-forward loop, turns its power tubes off at the steady state to reduce the power consumption and supplies ideal charge/discharge current to rapidly recover the load current and to clamp the output voltage variation below the threshold value when the output voltage varies due to the load current change. Simulative results show that the proposed current pump enhances the transient response of DC-DC source and suppresses the output voltage overshoot excellently when the load current changes greatly.

Key words: DC-DC source; transient response; current pump; low dropout regulator; computer simulation