

基于电容 ESR 和预测调制的 DC-DC 变换器 双环控制策略研究

张黄鹏¹, 邹雪城¹, 谢 文², 童乔凌¹

(1 华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;

2 中国人民解放军第二炮兵指挥学院 通信系信息作战教研室, 湖北 武汉 430012)

摘 要: 针对 boost 型 DC-DC 变换器, 研究基于输出电容 ESR 纹波电压的预测调制控制策略. 首先提出了无需电流采样, 并采用输出电容 ESR 纹波电压的双环控制系统. 其次, 为了提升 DC-DC 变换器系统性能, 引入了预测调制策略, 可以提高变换器瞬态响应速度, 减小由输入电压及负载变化引起的扰动. 同时, 为避免次谐波振荡, 采用谷值后缘预测调制技术. 最后, 对该变换器进行 Simulink 仿真, 结果表明, 采用基于输出电容 ESR 纹波电压的双环控制, 结合谷值后缘预测调制技术, 可以稳定变换器输出电压, 提升瞬态响应性能. 该策略无需电流采样以及谐波补偿等模块, 能够有效降低硬件成本.

关键词: DC-DC 变换器; ESR 纹波电压; 预测调制; 次谐波振荡

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)03-0142-04

A Control Strategy Research with Two Loops Based on the Output ESR of the Capacitor for the DC-DC Converter

ZHANG Huang-peng¹, ZOU Xue-cheng¹, XIE Wen², TONG Qiao-ling¹

(1 School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2 Information Warfare Staff Room of Communication Department, Second Artillery Command College of the Chinese PLA, Wuhan 430012, China)

Abstract: This paper researches a predictive modulation based on the output ripple voltage across of the ESR of the capacitor for the boost DC-DC converter. Firstly, this paper introduces the converter has two voltage feedback loops, which samples the ripple voltage across ESR of capacitor without sampling current. Secondly, in order to improve the digital control performance, the predictive technique is used. With that technique, the converter has faster transient response and perturbation is decreased. And at the same time, to avoid sub-harmonic oscillation, voltage valley trailing-edge modulation is adopted. Finally, boost DC-DC converter is controlled by above techniques and the simulation results made by Simulink show that it has good stability and transient response performance under perturbation. No current sensor or slope compensation needed in the implementation, and the cost of the converter is effectively reduced.

Key words: DC-DC converters; ripple voltage across ESR; predictive modulation; sub-harmonic oscillation

1 引言

基于数字控制的 DC-DC 变换器以其损耗低、可靠性高、可编程、开发周期短等特性日益成为开关电

源重要研究方向^[1-6]. 目前, 主流开关电源采用电压模式或者电流模式控制方法. 电压模式为单环控制, 其控制策略简单但响应速度较慢. 电流模式为双环控制, 包括电压外环和电流内环, 其相比电压模式控

收稿日期: 2014-05-28; 修回日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61202469); 教育部博士点基金项目(20120142120102)

制可以提升响应速度,又具有模拟和数字两种实现方式。

为了用数字电路实现电流模式控制,文献[7-9]中提出了预测调制技术。该方法通过对电感电流的预测,计算转换器所需要的占空比,进而调整输出电压。在电流模式控制中,为了检测内环电流,需要采用高分辨率、高带宽的电流传感器,这就大大增加了硬件成本。为了降低电流采样的成本,文献[10]中提出了一种无电流传感器的双环控制策略,它同样具有两个反馈环路,但却没有检测电感电流来实现电流内环,而是检测输出电容 ESR(Equivalent Series Resistance, 等效串联电阻)上电压纹波来实现电压内环。该方法无须检测电流,而且可以获得更快的负载响应,但必需采样连续的电压纹波,所以不便于其数字实现。

为了用数字方式实现基于 ESR 电压纹波的电压双环控制,文献[11]中提出了一种采用预测调制的控制方法,实现了电压双环控制,但是该方法需要引入谐波补偿来消除次谐波振荡。本文基于 boost 型 DC-DC 变换器,采用谷值后缘预测调制技术,实现 ESR 电压纹波的电压双环控制,消除次谐波振荡。

2 基于输出电容 ESR 的 DC-DC 变换器预测调制理论分析

基于输出电容 ESR 的控制方法,是一种通过采样输出电容 ESR 纹波电压代替电感电流,实现输出电压控制的方法。将该方法应用到 Boost 型 DC-DC 转换器上,得到如图 1 所示的结构图。图中: R_e 是电容 ESR;ADC 是电压采样模块;DPWM 是数字脉宽调制器。输出电容 ESR 电压控制器通过对误差放大器输出的控制电压,以及 ADC 输出的采样电压进行计算,得到下个周期占空比输出到 DPWM 模块,控制变换器输出稳定电压。

本文基于连续传导模式(CCM),采用电压谷值后缘预测调制方法。该方法目标是确保采样谷值电压 V_s 谷值跟随参考电压值 V_c ,其中采样电压是带纹波的输出电压,参考电压是经过误差放大器模块处理的控制电压。如图 2 所示,图中实线波形为稳定状态采样电压波形,虚线波形为叠加了扰动电压 ΔV 的采样电压波形。如果扰动在第 n 周期开始时观测到,它将保持一个周期。为了减小扰动,到达第 $(n+1)$ 周期时,该周期的占空比 $d[n+1]$ 将会根据第 n 周期的电压值计算。第 $(n+1)$ 周期结束,采样电

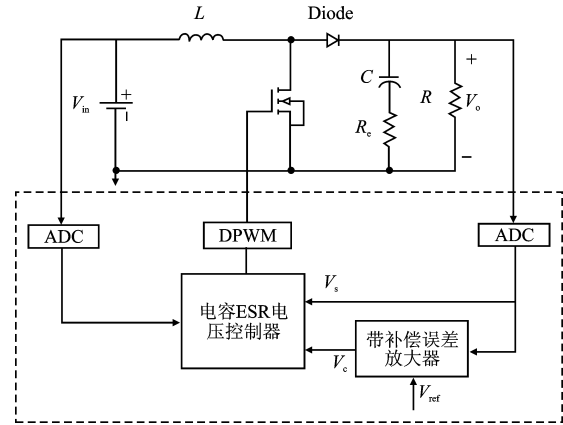


图 1 基于输出电容 ESR 的 boost 型 DC-DC 变换器结构图

压谷值再次跟随参考电压,误差消除。

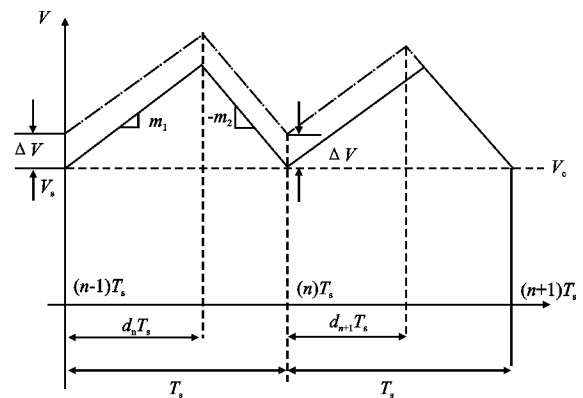


图 2 基于电压谷值后缘预测调制模式下的电压波形

对于 boost 型 DC-DC 变换器,稳定状态下电感电流纹波会流过电容支路。如果电容较大,其阻抗远小于等效串联电阻 R_e ,电感电流纹波对电容的影响忽略不计,只引起 R_e 上的电压纹波。结合本文 DC-DC 变换器特性以及图 2 所示,给出采样电压斜率表达式如下所示:

$$m_1 = \frac{V_{in} R_e}{L} \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{V_o - V_{in} R_e}{L} \quad (2)$$

根据调制方法,为了推导第 $(n+1)$ 周期占空比,必须采样第 n 周期占空比。采样电压谷值表达式为

$$V_s(n+1) = V_s(n) + m_1 d_n T_s - m_2 d'_n T_s + m_1 d_{n+1} T_s - m_2 d'_{n+1} T_s \quad (3)$$

式中, $V_s(n+1)$ 是第 $(n+1)$ 周期结束时观测电压谷值, d_n 是第 n 周期占空比, $d'_n = 1 - d_n$ 。

当满足条件 $V_s(n+1) = V_c$ 时,谷值电压跟随

参考电压,代入表达式(3)中得出:

$$V_c = V_s(n) + m_1 d_n T_s - m_2 d'_n T_s + m_1 d_{n+1} T_s - m_2 d'_{n+1} T_s \quad (4)$$

由表达式(4)解出经过预测调制第 $(n+1)$ 周期的占空比为

$$d_{n+1} = \frac{V_c - V_s(n) - m_1 d_n T_s + m_2 d'_n T_s + m_2 T_s}{(m_1 + m_2) T_s} \quad (5)$$

稳定状态下 boost 型 DC-DC 变换器输入输出关系如下所示:

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \quad (6)$$

将式(1)、(2)以及式(6)代入表达式(5)得到:

$$d_{n+1} = \frac{V_c - V_s(n)}{V_o R_e T_s} L - d_n + 2D \quad (7)$$

表达式(7)是预测调制方法实现的基础,结合图2可以分析出, $V_c - V_s(n)$ 可以看作采样电压出现的电压扰动。第 n 周期采样电压,保持一个周期。在第 $(n+1)$ 周期,通过计算前一周期的输入输出信息,调节占空比,减少前一周期带来的扰动。因此,使用基于电容 ESR 电压控制 boost 型 DC-DC 变换器,采取谷值电压后缘调制方法能够使所有工作点趋于稳定。

3 DC-DC 变换器电压扰动分析

在稳定状态下,boost 型 DC-DC 变换器,参考电压与采样电压可以表示为

$$V_c = V_s + m_1 D T_s - m_2 D T_s \quad (8)$$

式中, V_s 是稳定状态下每个周期开始时的采样电压, D 是稳定状态下的占空比 $D' = 1 - D$ 。

假设在第 n 周期出现电压扰动 ΔV ,如图2所示。同时,为了满足谷值电压后缘调制方法,必须使得 $V_s = V_c$,因此可以得出下式:

$$V_c = V_s + \Delta V + m_1 d_{n+1} T_s - m_2 d'_{n+1} T_s \quad (9)$$

将稳定状态下的方程(8)代入式(9),可以得出稳定状态下某周期出现电压扰动,下一个周期占空比为

$$d_{n+1} = \frac{-\Delta V}{(m_1 + m_2) T_s} + D \quad (10)$$

结合纹波斜率式(1)、(2),可以得出占空比与电压扰动之间的表达式为

$$d_{n+1} = \frac{-\Delta V}{V_o R_e T_s} L + D \quad (11)$$

将第 $(n+1)$ 周期占空比表达式(11)代入表达式(9),计算第 $(n+1)$ 周期结束时新的电压扰动为

$$\Delta V = V_c - V_s = \Delta V - m_1 d_{n+1} T_s + m_2 d'_{n+1} T_s = 0 \quad (12)$$

由此可知,理论上第 $(n+1)$ 周期后,新的电压误差为零,即电压误差消除,采样电压跟随参考电压。同时,该式也证明在无需谐波补偿的前提下,采用电压谷值后缘调制方式,即可避免产生次谐波振荡。

4 仿真分析

在 Simulink 中建立整个系统的仿真模型。本节引入传统电压控制模式作对比,检验新型控制模式下变换器瞬态响应性能。对于一个 boost 型 DC-DC 变换器,采用电路基本参数为: $V_{in} = 5 \text{ V}$; $L = 28 \mu\text{H}$; $C = 300 \mu\text{F}$; $R = 15 \Omega$; 开关频率 $f_{sw} = 100 \text{ kHz}$; 电容上的串联电阻 $R_e = 0.1 \Omega$; 输出电压 $V_o = 15 \text{ V}$ 。

由图3可知,在扰动出现之前,控制器可以将变换器调整至稳态。由于采样点被设置成电压谷值,即周期起始点,从图中可以看出,输出电压在每个周期的起始点被调整到 15 V 。

因此,输出电压不存在稳态误差。同时看出,运用谷值后缘预测调制可以消除次谐波振荡。

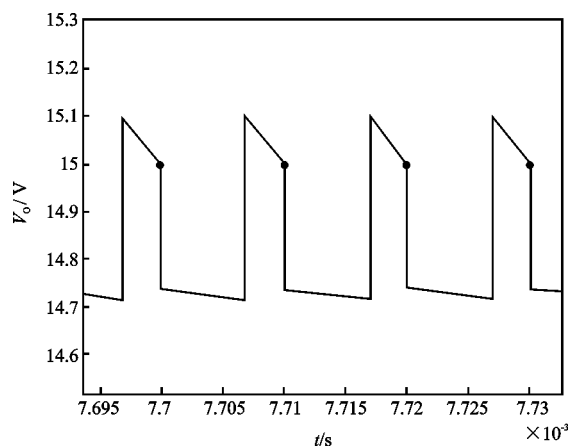


图3 稳态下 DC-DC 变换器输出电压波形

DC-DC 变换器对于负载扰动的调节能力,是非常重要的设计指标。为了检验响应性能,设置了负载电阻阶跃变化,从 15Ω 变为 7.5Ω 。由于负载电阻突然变小,输出电压随之减小,由图4(a)可知,经过 $70 \mu\text{s}$,控制器就调节输出电压至稳定状态。由图4(b)可知,传统电压控制模式需要 $200 \mu\text{s}$ 瞬态响应时间。

对于输入电压变化的瞬态响应也是衡量 DC-DC 变换器的一项重要参数,因此设置输入电压由 5

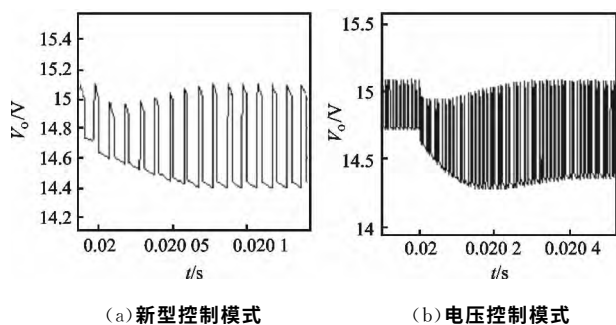


图4 负载变化时变换器输出电压波形对比图

V 阶跃变化至 7 V. 由于输入电压阶跃升高, 输入电压随之升高, 由图 5(a) 所示, 经过 $90 \mu\text{s}$, 输出电压回到稳定状态. 由图 5(b) 可知, 传统电压控制模式需要 $300 \mu\text{s}$ 瞬态响应时间.

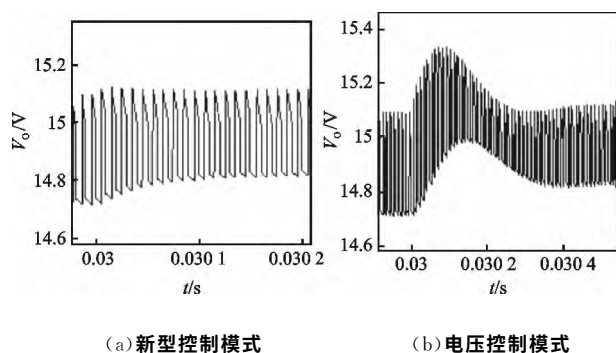


图5 输入电压变化时变换器输出电压波形对比图

通过仿真稳定状态以及出现扰动状态, 分析该模式下和电压模式下输出电压波形变化. 由此得出运用谷值后缘预测调制策略, 结合基于输出电容 ESR 纹波电压的双环控制方法, 可以稳定调节 boost 型 DC-DC 变换器输出电压, 消除次谐波振荡. 与传统电压模式相比, 具有更快的瞬态响应速度.

5 结束语

本文研究了基于输出电容 ESR 上纹波和预测调制的电压双环控制策略, 并对 boost 型 DC-DC 变换器进行了控制. 理论分析和仿真表明, 所提出的控制策略不仅可以稳定变换器输出电压, 而且具有较快的瞬态响应速度, 具有一定的抗输入电压扰动和负载扰动的能力. 同时, 该策略无需电流采样以及谐波补偿等模块, 简化了设计, 降低了硬件成本.

参考文献:

[1] 布朗. 开关电源设计指南[M]. 徐德鸿, 沈旭, 译. 北

京: 机械工业出版社, 2005.

- [2] 师娅, 唐威. 一种电流型 PWM 控制芯片的设计[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(08): 147-150.
- [3] Vilathgamuwa M, Ranjith Perera A. A. D, Choi S. S. Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control[J]. IEEE Trans Power Electron, 2002, 17(5): 824-834.
- [4] Oliva A R, Ang S S, Bortolotto G E. Digital control of a voltage-mode synchronous buck converter[J]. IEEE Trans Power Electron, 2006, 21(1): 157-163.
- [5] Saggini S, Trevisan D, Mattavelli P, et al. Synchronous - Asynchronous Digital Voltage-Mode Control for DC - DC Converters[J]. IEEE Trans Power Electron, 2007, 22(4): 1 261-1 268.
- [6] Feng G, Meyer E, Liu Y F. A new digital control algorithm to achieve optimal dynamic performance in DC-to-DC converters[J]. IEEE Trans Power Electron, 2007, 22(4): 1489-1498.
- [7] Chang Y T, Lai Y S. Online parameter tuning technique for predictive Current-mode control operating in boundary conduction mode[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009, 56(8): 3214-3221.
- [8] Bibian S, Jin H. High performance predictive dead-beat digital controller for DC power supplies[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2002, 17(3): 420-427.
- [9] Trevisan D, Mattavelli P, Tenti P. Digital control of single-inductor multiple-output step-down DC - DC converters in CCM[J]. IEEE Trans Power Electron, 2008, 55(9): 3476-3483.
- [10] D Goder, W Pelletier. V2 architecture provides ultra-fast transient response in switch power supplies[J]. Proceedings of HFPC. [s. l.]: IEEE, 1996: 19-23.
- [11] Mingzhi He, Jiangping Xu. Digital Predictive V2 Control of Switching DC-DC Converters[C] // in Proc IEEE Ind Technol Conf. [s. l.]: IEEE, 2006: 116-120.

作者简介:

张黄鹏 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为开关电源变换器的控制. E-mail: esthpzhang@163.com

邹雪城 男, (1964-), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为超大规模集成电路设计.

谢文 男, (1980-), 硕士, 讲师. 研究方向为无线通信.

童乔凌 男, (1981-), 博士, 讲师, 硕士生导师. 研究方向为超大规模集成电路设计.