

· 自动化技术 ·

基于电容电荷平衡的Boost型变换器控制研究

方 炜¹, 邱亚杰¹, 刘晓东¹, 刘雁飞^{1,2}

(1. 安徽工业大学电力电子与运动控制重点实验室 安徽 马鞍山 243002; 2. 皇后大学电子与计算机工程系 加拿大 金斯顿市 K7L3N6)

【摘要】针对Boost型功率变换器的常规控制算法存在系统带宽较窄、动态响应缓慢等问题,基于电容电荷平衡原理提出一种新的非线性控制方案。该控制方案采用线性/非线性相结合的复合控制方法,当Boost变换器工作在稳态时采用传统的电压模式控制算法,而当负载电流发生跃变时,则采用非线性控制算法,通过电容电荷平衡控制计算开关管开通和关断的切换时间,从而保证Boost变换器获得最佳的动态性能。对自制的样机进行仿真验证和实验研究,结果表明,该方案能明显改善Boost型DC/DC变换器的超调量、调节时间等动态性能。

关键词 Boost变换器; 电容电荷平衡; 动态响应; 非线性控制

中图分类号 TM46

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.02.013

Research of Control Strategy Based on Capacitor Charge Balance for the Boost Converter

FANG Wei¹, QIU Ya-jie¹, LIU Xiao-dong¹, and LIU Yan-fei^{1,2}

(1. Key Lab of Power Electronics & Motion Control, Anhui University of Technology Maanshan Anhui 243002;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University Kingston Canada K7L3N6)

Abstract In view of the limitation on the performance of the Boost converter when the general controller is used, such as low-bandwidth and sluggish dynamic response. This paper proposes a novel nonlinear control scheme which is based on the capacitor charge balance control (CBC). Combined with the linear/nonlinear control method, the traditional voltage mode control is taken during the steady-state of the Boost converter, the scheme switches to the nonlinear control method while the load current has a step change. Using the CBC algorithm during the calculation of the switching time, the optimal dynamic performance of the Boost converter is achieved. Finally, the simulation results and the experimental results of the prototype show that the proposed algorithm, compared with the traditional voltage mode control, can significantly improve the dynamic performance of the Boost converter, such as the overshoot, dynamic setting time.

Key words Boost converter; charge balance control; dynamic response; nonlinear control

Boost变换器作为一种基本的DC/DC变换器,已广泛地应用于如混合动力汽车、航空电源、新能源开发等各类直流升压场合。随着应用场合的逐渐增多,对Boost变换器性能指标的要求也随之提高。另一方面,如果以输出电容的电压作为输出量进行反馈控制时,Boost变换器是一个非最小相位系统,因此采用传统的控制方法会导致系统带宽较窄,动态响应缓慢,无法满足当前对Boost变换器性能指标的苛刻要求。

近年来,为了改善DC/DC功率变换器的性能,国内外学者做了大量的研究工作。文献[1-2]以Boost变换器的电感电流作为内环,采用输入/输出反馈线

性化的方法设计了一类非线性控制器。文献[3]在线性化的基础上设计滑模控制器,用于改善Boost变换器的动态性能。文献[4-6]对一类三态Boost变换器的电流型控制器进行了研究,采用消除右半平面零点的方法来改善变换器的动态性能。文献[7]将指数趋近律引入滑模变结构控制器中,设计了一类Boost变换器的 Σ - Δ 滑模控制器。上述方法在一定程度上改善了Boost变换器的动态性能,但仍无法使其达到最优。文献[8]将Boost变换器进行状态反馈精确线性化后,设计了最优控制器,但控制律是基于线性化后的系统而设计的。文献[9-11]针对Buck变换器提出一种非线性优化控制,通过在动态过程中控制输出电

收稿日期: 2010-07-22; 修回日期: 2011-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(50877001); 安徽省高等学校自然科学基金项目(KJ2011A044)

作者简介: 方炜(1977-),男,博士生,副教授,主要从事DC/DC功率变换器技术、非线性控制方面的研究。

容的电荷平衡, 从而保证电路在动态过程中输出电压的欠调量/超调量达到最小, 调节时间最短, 但只对Buck变换器进行了分析和研究。

鉴于此, 为了改善Boost变换器的动态性能, 本文结合电容电荷平衡控制原理设计了一种线性/非线性复合控制方案。稳态时采用传统的电压模式控制算法稳定Boost变换器的输出电压, 在动态过程中, 则根据电容电荷平衡控制原理, 推导和分析Boost变换器电感电流、二极管电流和输出电压的最优动态响应轨迹, 给出开关管开通和关断的最优切换时间的计算方法。对自制的实验样机进行了仿真和实验研究, 验证了该控制方案的有效性。

1 电容电荷平衡控制基本原理

Boost变换器电路图如图1所示, 其中, v_{in} 、 v_o 为输入电压和输出电压, i_L 、 i_C 、 i_D 和 i_o 分别代表电感电流、电容电流、二极管电流以及负载电流, ESR是输出电容的等效串联电阻^[12]。

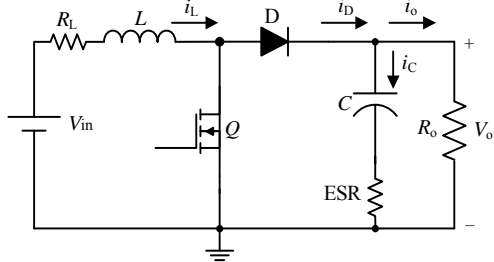


图1 Boost变换器电路图

电容充放电平衡原理^[13]是稳态时DC/DC功率变换器的输出电容在一个开关周期内充电电荷量和放电电荷量相等。将这一基本原理用来分析Boost变换器的动态过程, 则表示在动态过程结束时刻, 输出电容所含电荷量等于动态调节前的电荷量, 即充电电荷等于放电电荷:

$$Q_{charge} = Q_{discharge} \tag{1}$$

因此当Boost变换器受到大信号扰动时, 为了获得最佳动态性能, 必须满足: 1) 电感电流 i_L 以最快速度到达新的稳态值 i_{L_end} , 以保证动态过程的调节时间最短; 2) 输出电容的充电电荷量等于放电电荷量, 以保证输出电压在动态过程中的变化量最小。

2 Boost变换器的电容电荷平衡控制算法

2.1 理想动态响应曲线

以负载电流发生负跃变情况为例, 分析电容电荷平衡控制下Boost变换器的动态响应曲线, 如图2所示。

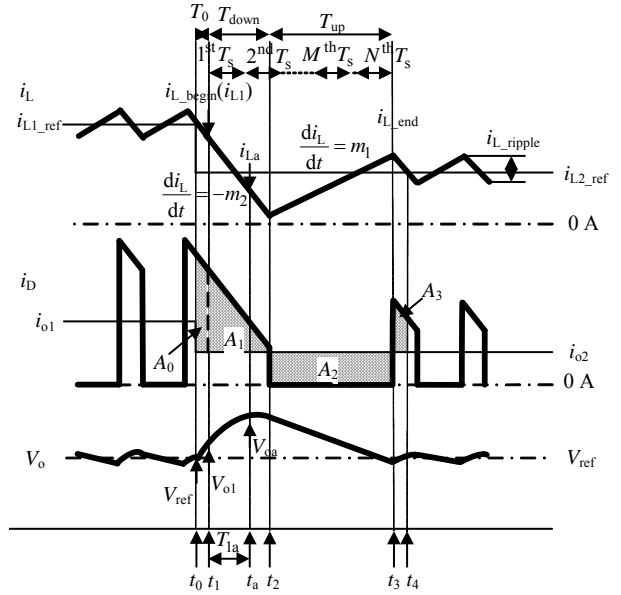


图2 电容电荷平衡控制下Boost电路负载跃变响应

电容电荷平衡控制下负载电流负跃变动态响应过程分为电感电流下降阶段 T_{down} 与电感电流上升阶段 T_{up} 两部分。为了使电路的调节过程最短, 在电感电流下降阶段 T_{down} , 占空比被置为0%, 电感电流以最快速率下降。在 t_2 时刻, 电感电流 i_L 达到最小值。随后进入电感电流的上升阶段, 在这一时期, 占空比信号设置为100%, 使得电感电流以最快速率上升。在 t_3 时刻, 电感电流达到了新的负载电流 i_{o2} 下的稳态值 i_{L_end} 。在 t_4 时刻, 电感电流达到稳态值 i_{L2_ref} , 与此同时, 输出电容的充电量等于其放电量, 输出电压恢复到参考值 V_{ref} , 切换回传统线性控制, Boost变换器进入下一个稳态。

2.2 理论分析

结合上述分析过程, 下面给出 Boost 变换器电容电荷平衡控制算法的理论分析和具体计算公式。

电感电流在动态过程结束时的稳态值 i_{L_end} 满足如下关系式^[14]:

$$i_{L_end} = i_{L_begin} - m_2 T_{down} + m_1 T_{up} \tag{2}$$

$$i_{L_begin} = i_{L1_ref} - \frac{1}{2} i_{L_ripple} \tag{3}$$

$$i_{L_end} = i_{L2_ref} + \frac{1}{2} i_{L_ripple} \tag{4}$$

式中, i_{L_begin} 、 i_{L_end} 分别为 t_1 和 t_3 时刻的电感电流; i_{L1_ref} 、 i_{L2_ref} 为负载跃变前、后的电感电流参考值; i_{L_ripple} 为稳态时电感电流的纹波值。

式(2)中 m_1 和 m_2 分别为:

$$m_1 = \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{rising} = \frac{v_{in}}{L} \tag{5}$$

$$m_2 = -\left. \frac{di_L}{dt} \right|_{\text{falling}} = \frac{v_o - v_{in}}{L} \quad (6)$$

输出电容在动态过程中的充电电荷和放电电荷平衡则可以表示为^[15]:

$$A_0 + A_1 - A_2 + A_3 = 0 \quad (7)$$

式中, A_0 为输出电容在 T_0 时间段内的充电量; A_1 、 A_2 分别为负载电流负跃变动态过程中电感电流下降及上升过程中输出电容的电荷变化量; A_3 为动态过程结束时输出电压回到参考值 V_{ref} 所需的充电量。如图 2 所示, 上述变量表示为二极管电流 i_D 与新负载电流 i_{o2} 所围成的面积。

为了求解式(7), 首先给出负载电流为:

$$i_{o2} = \frac{1}{2}(i_{La} + i_{L1}) - \frac{C(v_{oa} - v_{o1}) - C(i_{La} - i_{L1})ESR}{T_{1a}} \quad (8)$$

式中, C 为输出电容值; v_{o1} 、 v_{oa} 、 i_{L1} 和 i_{La} 分别为在 t_1 和 t_a 时刻检测的输出电压和电感电流值; T_{1a} 为 t_1 和 t_a 的时刻间隔。其次, 式(7)中的 A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 分别计算如下:

$$A_0 = C\Delta V_o = C[V_{ref} - V_{o1} + (i_{L1_ref} - i_{o2})ESR] \quad (9)$$

$$A_1 = \left(i_{L1_ref} - \frac{1}{2}i_{L_ripple} - \frac{1}{2}m_2T_{down} - i_{o2} \right) T_{down} \quad (10)$$

$$A_2 = i_{o2}T_{up} \quad (11)$$

$$A_3 = \left(i_{L2_ref} - i_{o2} + \frac{1}{4}i_{L_ripple} \right) T_3 \quad (12)$$

其中,

$$T_3 = D'm_2 = \left(1 - \frac{V_{in}}{V_o} \right) m_2 \quad (13)$$

联立求解式(2)和式(7)~式(13), 则有:

$$T_{up} = \frac{1}{m_1} \left(m_2T_{down} - \alpha + i_{o2} + \frac{1}{2}i_{L_ripple} \right) \quad (14)$$

$$T_{down} = \frac{\alpha}{m_1} - \frac{\beta}{m_2} - \frac{i_{o2}}{m_1} \quad (15)$$

其中, 参数 α 和 β 由下式给出:

$$\alpha = i_{L1_ref} - i_{o2} - \frac{1}{2}i_{L_ripple} \quad (16)$$

$$\beta = \left[\alpha^2 + 2\frac{m_2}{m_1}(i_{o2} - 1)\alpha + \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_2}{m_1} + 2 \right) i_{o2}^2 + \frac{m_2}{m_1} i_{o2} i_{L_ripple} + 2m_2 A_0 + 2m_2 A_3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

因此, 根据上述公式计算出的时间参数 T_{down} 和 T_{up} 控制开关管的开通和关断时间, 则Boost变换器在动态过程中满足电容电荷平衡的关系, 从而动态过程取得最优。

综上所述, Boost变换器电容电荷平衡控制算法的执行步骤如图3所示。

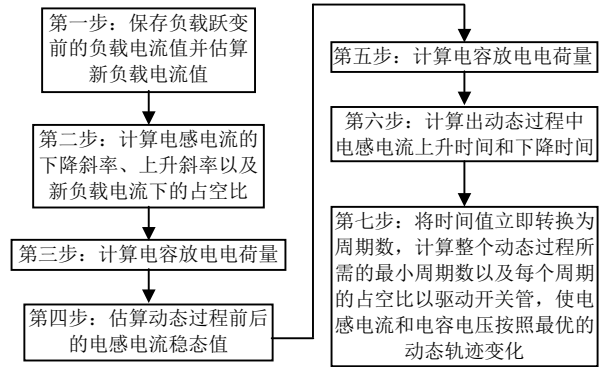


图3 电容电荷平衡控制算法的执行步骤

在每个开关周期检测变换器的输出电压变化, 如果系统处于稳态或只有小信号扰动时, 采用传统电压模式控制; 若检测到负载跃变大信号扰动时, 立即切换至电容电荷平衡控制算法, 按照图3所示步骤实现电容电荷平衡控制。当电荷平衡控制算法控制下的动态过程结束后, Boost变换器重新回到稳态, 则切换回线性控制模式(电压模式控制)。

负载电流发生正跃变的电容电荷平衡算法及公式推导过程与负载电流负跃变类似, 这里不再赘述。

3 仿真验证

为了验证本文控制方案的有效性, 采用MATLAB/Simulink予以验证。其中, Boost变换器主电路的参数为: 输入电压 $V_{in}=10$ V, 输出电压 $V_o=20$ V, $L=10$ μ H, $C=68$ μ F, 开关频率为250 kHz。将本文的控制算法与传统的电压模式控制算法作比较, 电容电荷平衡控制与电压模式控制的负载跃变动态性能仿真比较如图4所示。

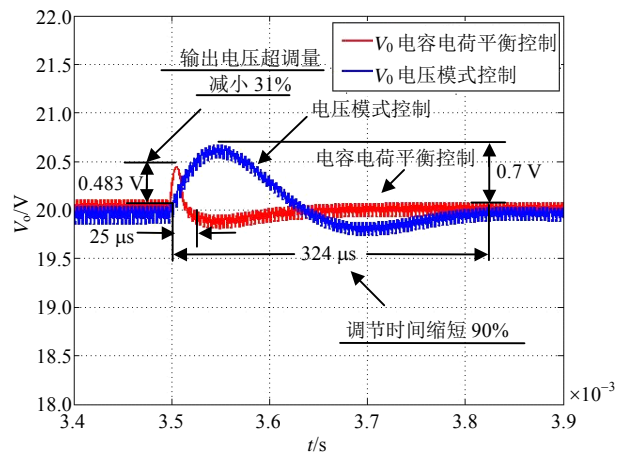


图4 电容电荷平衡控制与电压模式控制的负载跃变动态性能仿真比较(6 A 负载变至 4.5 A)

图4中, 负载电流在3.5 ms时从6 A负跃变至4.5 A, 输入电压仍保持10 V不变。从图中可以看出, 运用了电容电荷平衡控制算法后Boost变换器输出电压的超调量比传统电压模式控制减少了31%, 调节时间缩短了92%。

4 实验结果

为了验证该控制方案在实际电路中的可行性, 设计了一台额定功率为200 W的Boost测试样机。主电路实验参数与仿真研究中的参数相同, 通过两个8位A/D转换芯片采集输出电压和电感电流, 控制器部分使用的是Altera公司的DE2-70 FPGA开发板, 考虑到电容电荷平衡控制算法的计算量较大, 因此采用离线计算和查找表的方法实现控制方案, DPWM信号采用计数器加延迟线法的方法实现。Boost变换器电压模式控制实验结果如图5所示, BOOST变换器CBC控制算法的实验结果如图6所示。

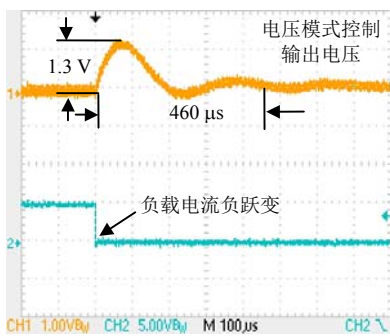


图5 Boost变换器电压模式控制算法实验结果
(6 A负跃变至4.5 A)

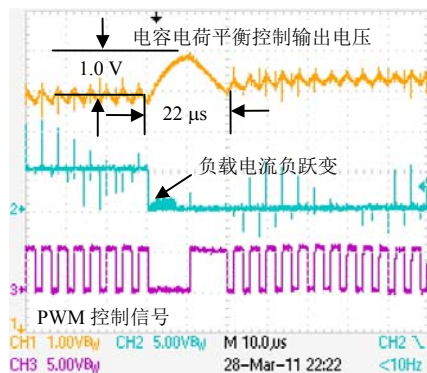


图6 BOOST变换器CBC控制算法的实验结果
(6 A负跃变至4.5 A)

从图5、图6中实验结果可以看出, 运用了本文研究的非线性控制方法后Boost变换器的电压超调量比传统电压模式控制减少了30%, 调节时间比传统电压模式控制缩短了95%。Boost变换器的动态响应明显得到了改善。

5 结束语

传统的控制方法已经很难满足当前对DC/DC变换器高精度、快速动态响应的要求。本文尝试将电容电荷平衡控制原理引入到Boost变换器的控制中, 并结合传统的电压模式控制来改善Boost变换器的控制性能。根据主电路的拓扑结构, 给出了Boost变换器的优化动态响应曲线, 对电容电荷平衡控制算法进行了理论分析和推导。为了验证所提出的控制策略, 本文对研制的实验样机进行了仿真和实验研究, 研究结果表明, 与传统的电压模式控制算法相比, 基于电容电荷平衡的非线性控制算法能明显地改善Boost变换器的动态响应性能。

参考文献

- [1] 刘锦波, 明文龙. 一种基于输入/输出反馈线性化的Boost型DC/DC变换器非线性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 55-61.
- [2] LIU Jin-bo, MING Wen-long. A novel scheme of nonlinear control strategy based on input-output linearization for Boost type DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 55-61.
- [3] 帅定新, 谢运祥, 王晓刚, 等. Boost变换器非线性电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 15-21.
- [4] SHUAI Ding-xin, XIE Yun-xiang, WANG Xiao-gang, et al. Nonlinear current control method for Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 15-21.
- [5] 乐江源, 谢运祥, 洪庆祖, 等. Boost变换器精确反馈线性化滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(30): 16-22.
- [6] LE Jiang-yuan, XIE Yun-xiang, HONG Qing-zu, et al. Sliding mode control of Boost converter based on exact feedback linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(30): 16-22.
- [7] KAPAT S, PATRA A, BANERJEE S. A current-controlled tri-state Boost converter with improved performance through RHP zero elimination[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 776-786.
- [8] LOH P C, BLAABJERG F, WONG C P, et al. Tri-state current source inverter with improved dynamic performance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1631-1639.
- [9] VISWANATHAN K, ORUGANTI R, SRINIVASAN D. Dual-mode control of tri-state Boost converter for improved performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 790-797.
- [10] 熊远生, 俞立, 徐建明. 基于 Σ - Δ 调制器的Boost变换器的滑模变结构控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 75-78.
- [11] XIONG Yuan-sheng, YU Li, XU Jian-ming. Sliding-mode variable-structure control of Boost converter based on Σ - Δ modulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 75-78.
- [12] 钟建伟, 杨永超. Boost变换器的非线性最优控制系统[J].

- 电力自动化设备, 2011, 31(9): 75-77.
ZHONG Jian-wei, YANG Yong-chao. Nonlinear optimal control system for Boost converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 75-77.
- [9] MEYER E, ZHANG Z, LIU Y F. An optimal control method for Buck converters using a practical capacitor charge balance technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23 (4): 1802-1812.
- [10] FENG G, MEYER E, LIU Y F. A digital two-switching-cycle compensation algorithm for input-voltage transients in DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1): 181-191.
- [11] FENG G, MEYER E, LIU Y F. High performance digital control algorithms for DC/DC converters based on the principle of capacitor charge balance[C]//IEEE 37th Annual Power Electronics Specialists Conference. [S.l.]: IEEE, 2006: 1-7.
- [12] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 修订版. 北京: 电子工业出版社, 2004: 27-30
ZHANG Zhan-song, CAI Xuan-san. Design of switch mode power supply[M]. Recension. Beijing: Publishing house of Electronics Industry, 2004.
- [13] 刘晓东, 蒋昌虎, 邱亚杰, 等. 电容充放电平衡控制 Buck变换器动态响应特性分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 77-82.
LIU Xiao-dong, JIANG Chang-hu, QIU Ya-jie, et al. Capacitor charge balance control strategy for transient response of Buck converter[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(6): 77-82.
- [14] 刘晓东, 邱亚杰, 方炜, 等. Boost变换器电容电荷平衡动态最优控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 63-66.
LIU Xiao-dong, QIU Ya-jie, FANG Wei, et al. Optimal dynamic control based on capacitor charge balance for Boost converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 63-66.
- [15] FANG Wei, QIU Ya-Jie, LIU Xiao-dong, et al. A new digital capacitor change balance control algorithm for Boost DC/DC converter[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 2035-2040.

编辑 漆蓉