

Design of Improved Double Closed-Loop Controller of Vehicle-Mounted Bi-Directional DC-DC Translation Circuit

Hai Xu¹, Liang Wang¹, Hailong Zhang^{2*}

¹Jiangsu Keneng Power Engineering Consulting Co. LTD, Nanjing Jiangsu

²School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Email: xuhai@jspdi.com.cn, wangliang@jspdi.com.cn, *61204@njnu.edu.cn

Received: Dec. 6th, 2017; accepted: Dec. 20th, 2017; published: Dec. 27th, 2017

Abstract

In this paper, the control method and the improved topology of the staggered parallel buck circuit are studied. Under the condition of large duty cycle, the traditional double-closed-loop control of voltage and current is used to make the output of the system more stable. Then, the discrete inductors are merged into a coupling inductance in the interleaved parallel buck circuit, to reduce the output current ripple, improve the dynamic characteristics and meet the increasing requirement of power density of the system. The simulation results indicate that the coupling coefficient and the double closed-loop control have specific influences on the circuit performance, so as to verify the proposed design scheme.

Keywords

Interleaving, Coupling Inductance, Double-Closed-Loop Control

车载双向DC-DC变换电路改进型双闭环控制器设计

徐海¹, 王亮¹, 张海龙^{2*}

¹江苏科能电力工程咨询有限公司, 江苏 南京

²南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京

Email: xuhai@jspdi.com.cn, wangliang@jspdi.com.cn, *61204@njnu.edu.cn

*通讯作者。

摘要

本文针对交错并联Buck电路拓扑结构，进行了控制方式和改进拓扑结构的研究。在大占空比条件下，首先对传统的交错并联Buck电路采用电压电流双闭环控制，使得系统的输出更加稳定。然后将交错并联Buck电路中的分立电感合并成一个耦合电感，以此减小输出电流纹波和改善动态特性，满足系统对功率密度不断提高的要求。通过仿真验证，得出耦合系数和电压电流双闭环控制对电路性能的具体影响，从而验证了该系统的设计方案。

关键词

交错并联，耦合电感，双闭环控制

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现如今开关电源技术的不断发展，Buck 电路作为电源技术的重要组成部分，一直以来都是国内外专家学者研究的重点。为了减小变换器电流纹波和提高系统的功率密度，本文采用交错并联电路来满足要求[1] [2] [3]。

交错并联技术的运用必定会使电路磁性元件数量的增加，导致系统体积的增大，并且会使系统的功率密度降低。文献[4]采用分立电感对交错并联 DC/DC 变换器进行设计，使得系统的体积过大和电压电流纹波过高。文献[5]结合多种变换器，分析了耦合电感不同集成方式对电流脉动的影响。通过改变耦合电感的绕制方法来调整输出电流脉动和输出电压纹波。文献[6]给出了耦合电感用互感表征的等效电路，通过数学公式得出反向耦合时稳态等效电感增大，动态则相反减小，符合变化器低稳态纹波，动态响应快的要求。因此，在交错并联 Buck 电路中将分立电感合成耦合电感，不仅能够减小变换器的体积，而且在采取合适耦合系数的情况下，将会增大功率密度和减小输出电流纹波[7] [8]。

基于此，本文针对交错并联 Buck 电路，采用电压电流双闭环控制方法[8] [9] [10]，并在大占空比条件下设计了交错并联 Buck 电路的耦合电感，改进后的电路输出电压纹波变小并且具有更好的系统鲁棒性和更快的动态响应。

2. 双闭环交错并联 Buck 电路

2.1. 工作原理

图 1 所示为交错并联 Buck 电路拓扑结构。相对应与经典 Buck 电路，它是将两个半桥电路并联而成，两相开关管的驱动信号相差 180° 。

电路主要工作过程如图 2 所示。在 $t_0 \sim t_1$ 阶段，开关 Q1 导通，Q2 关断，电感 L1 通过 D1 充电，电感 L2 通过 D2 释放能量；在 $t_1 \sim t_2$ 阶段，开关 Q1、Q2 同时导通，电感 L1、L2 分别通过 D1、D2 充电；在 $t_2 \sim t_4$ 阶段，电路顺序重复上面两个模式，开关管 Q1 先关断后导通，开关管 Q2 保持导通状态。采用

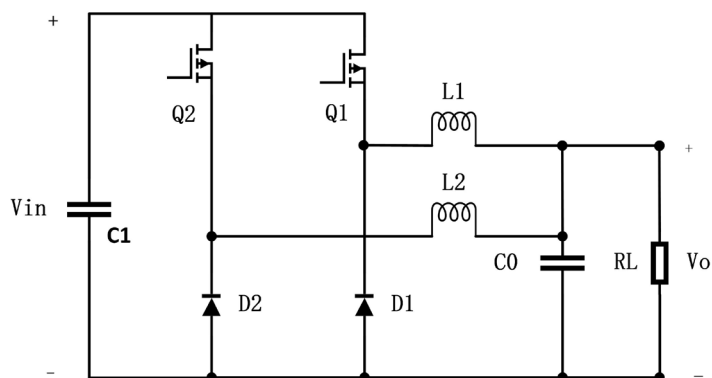


Figure 1. Interleaved parallel buck circuit

图 1. 交错并联 Buck 电路

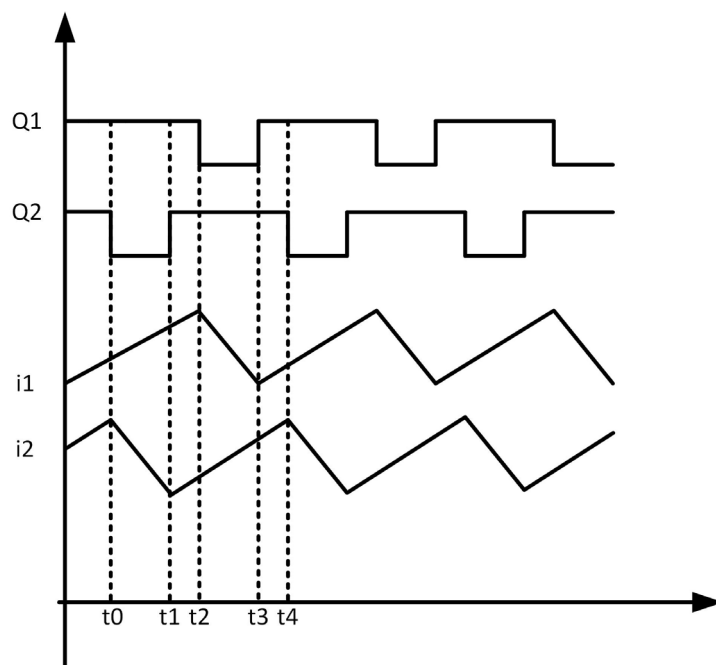


Figure 2. Current curve of interleaved parallel buck circuit when $D > 0.5$

图 2. 交错并联 Buck $D > 0.5$ 电流波形

交错并联技术可以减小储能元件的体积，并且使得变换器输出的总电流纹波足够小。

2.2. 控制器设计

利用状态空间平均法求得 Buck 电路的交流小信号方程[11]:

$$\begin{aligned}
 L_1 \frac{d\hat{i}_{L1}(t)}{dt} &= D_1 \hat{V}_{in}(t) + V_{in} \hat{d}_1(t) - \hat{V}_c(t) - [\hat{i}_{L1}(t) + \hat{i}_{L2}(t)] R_E \\
 L_2 \frac{d\hat{i}_{L2}(t)}{dt} &= D_2 \hat{V}_{in}(t) + V_{in} \hat{d}_2(t) - \hat{V}_c(t) - [\hat{i}_{L1}(t) + \hat{i}_{L2}(t)] R_E \\
 C_{UC} \frac{d\hat{V}_{UC}(t)}{dt} &= \hat{i}_{L1}(t) + \hat{i}_{L2}(t)
 \end{aligned} \quad (1)$$

如图 3 所示，为 Buck 电路小信号电路等效模型， C_{UC} 为输出侧超级电容，其等效串联电阻为 R_E ，

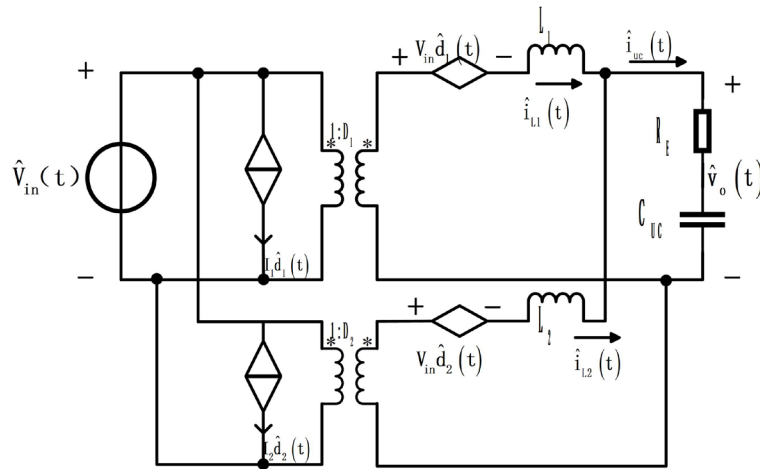


Figure 3. Equivalent model of small signal circuit in descending pressure
图3. 降压时小信号电路等效模型

等效并联电阻由于阻值一般为兆欧级，可忽略不计。

为了方便计算，设定 Buck 电路中 $L_1 = L_2 = L$ ， $I_{L1} = I_{L2} = I_L$ ， $\hat{i}_{L1}(t) = \hat{i}_{L2}(t) = \hat{i}_L(t)$ ， $\hat{d}_1(t) = \hat{d}_2(t) = \hat{d}(t)$ ，稳态值 $D_1 = D_2 = D$ 。

依据上述所设定的值求得 Buck 电路占空比到电感电流的传递函数[12]：

$$G_{id}(s) = \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{V}_{in}(s)=0} = \frac{V_{in}(2 + R_E C_{UC} s)}{LC_{UC} s^2 + 2R_E C_{UC} s + 2} \quad (2)$$

占空比到输出电压的传递函数：

$$G_{vd}(s) = \left. \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{V}_{in}(s)=0} = \frac{V_{in}(2 + R_E C_{UC} s)}{LC_{UC} s^2 + 2R_E C_{UC} s + 2} \quad (3)$$

以及电感电流到输出电压的传递函数：

$$G_{ui}(s) = \left. \frac{\hat{V}_o(s)}{\hat{i}_L(s)} \right|_{\hat{V}_{in}(s)=0} = \frac{2 + R_E C_{UC} s}{C_{UC} s} \quad (4)$$

Buck 电路将采用电压电流双闭环控制策略对其进行闭环控制。如图 4 所示，电压外环将超级电容 C_{UC} 两端电压 V_o 与参考电压 V_{ref} 进行比较，起到稳定输出电压的作用。电流内环将通过 PI 调节后的电压环输出值作为电流内环的给定值 i_{ref} ，因为此处的给定值为两相电感电流的总和，所以两个电流内环分别得到一半的给定值，起到限制电流过大和加快响应速度的作用[13]。

3. 交错并联 Buck 电路中耦合电感设计

3.1. 耦合电感设计

由图 1 可以发现，功率器件是由两相并联连接构成，理论上电路所消耗的功率将会是每一相电路的两倍。采用分立电感导致磁性元件的增加，从而使得电路体积变大，对于多相交错并联 Buck 电路而言，体积会更加大，所产生的消耗也会随之增加[14] [15] [16]。因此，为提高功率密度，将电感合并成耦合电感。如图 5 所示为耦合电感形式及其等效电路。

其中 M 为 L_1 、 L_2 的互感， v_1 、 v_2 分别为电感 L_1 、 L_2 两端的电压， i_1 、 i_2 为流过电感的电流，则得到

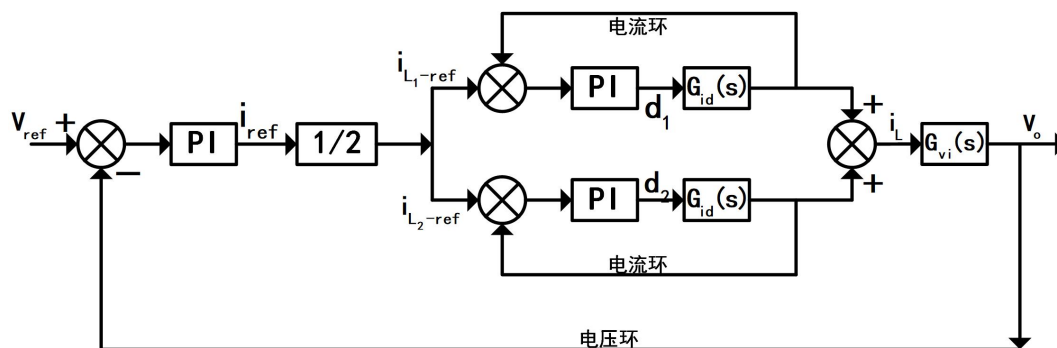


Figure 4. Control scheme of buck circuit

图 4. Buck 状态控制框图

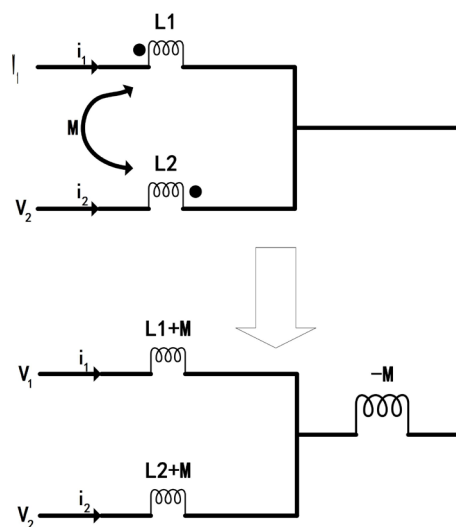


Figure 5. Curve: system result of standard experiment

图 5. 标准试验系统结果曲线

如下关系式:

$$\begin{cases} v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

对于交错并联 Buck 电路而言, 式(5)中的 v_1 和 v_2 在开关开通和关断时取得, 一般只有两个取值, 即 $(V_{in} - V_o)$ 和 $-V_o$ 。耦合系数 $\alpha = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, 根据之前的假设 $L_1 = L_2 = L$, 代入(5)式可得到:

$$(v_1 - \alpha v_2) = (1 - \alpha) L \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

进一步将式(6)简化得:

$$v_1 = L_{eq} \frac{di_1}{dt} \quad (7)$$

式中, L_{eq} 为电感 L_1 的等效电感。在交错并联 Buck 电路中, v_1 与 v_2 的关系会随着时间的变化而变化, 因

此在不同的时间段所对应的等效电感 L_{eq} 的值也会不一样,但在一个开关周期中,电感需要遵守伏秒平衡原则,所以基于此原则可以计算出不同时间段的等效电感值。

$$\begin{cases} v_1 = V_{in} - V_o \\ v_2 = -V_o \end{cases} \Rightarrow v_2 = -\frac{D}{1-D}v_1$$

$$\begin{cases} v_1 = V_{in} - V_o \\ v_2 = -V_o \end{cases} \Rightarrow v_2 = -\frac{D}{1-D}v_1 \quad (8)$$

$$\begin{cases} v_1 = V_{in} - V_o \\ V_2 = -V_o \end{cases} \Rightarrow v_2 = -\frac{D}{1-D}v_1$$

将(8)中各式代入(6)中,从而得出不同时间段的等效电感为:

$$\begin{cases} L_{eq1} = \frac{1-\alpha^2}{1+\frac{D}{1-D}\alpha}L \\ L_{eq2} = (1+\alpha)L \\ L_{eq3} = \frac{1-\alpha^2}{1+\frac{1-D}{D}\alpha}L \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)绘制出电感电流在分立电感和耦合电感的波形,图中分立电感 L_1 、 L_2 的电感电流波形用虚线表示,实线则为耦合电感下的电感电流波形。

可以看出,在 $D > 0.5$ 时,一个开关周期当中,等效电感 L_{eq3} 所对应的电感电流波动最大,即波形的斜率最大。所以为了减小电感电流的纹波,只要控制等效电感 L_{eq3} 的斜率就行了。这里设 L_{st} 为稳态等效电感值,可令 $L_{st} = L_{eq3}$ 。在图 6 中, $t_0 \sim t_1$ 时间段内,电流 i_1 的斜率 $k = \frac{di_1}{dt} = \frac{-v_o}{L_{eq3}}$, L_1 的稳态电流纹波峰-峰值:

$$I_{pp} = -k(t_1 - t_0) = \frac{v_o(1-D)}{L_{eq3}f_s} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, L_{eq3} 取值越大,稳态电流纹波将变小。由式(9)可以得出,当耦合系数取到一定值时,会使 L_{eq3} 取到最大值。

通过电感电流的变化量 Δi 与 ΔD 的比值来确定系统的动态响应,即 $\frac{\Delta i}{\Delta D}$,其中 ΔD 为占空比 D 发生微小变化时的取值。

由图 7 可知,当占空比 D 产生微小变化时,电感电流也会随之发生变化,在一个开关周期中,电感电流的变化量 Δi 可分为 5 个时间段的变化之和。

$$\begin{cases} t_0 \sim t_1 : \Delta i_1 = \left(\frac{V_{in} - V_o}{L_{eq2}} - \frac{-V_o}{L_{eq3}} \right) \frac{\Delta D}{f_s} \\ t_1 \sim t_2 : \Delta i_2 = 0 \\ t_2 \sim t_3 : \Delta i_3 = 0 \\ t_3 \sim t_4 : \Delta i_4 = \left(\frac{V_{in} - V_o}{L_{eq2}} - \frac{V_{in} - V_o}{L_{eq1}} \right) \frac{\Delta D}{f_s} \\ t_4 \sim t_5 : \Delta i_5 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

根据上式可以求得一个周期中总的电流变化量是:

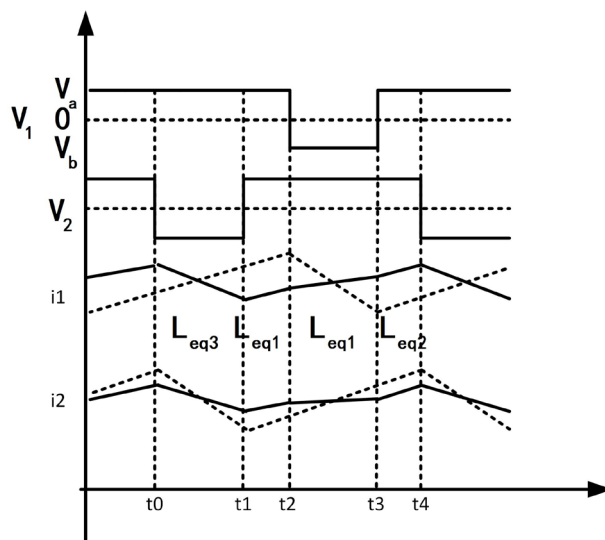


Figure 6. Voltage and current waveform of coupling inductance
图 6. 耦合电感的电压、电流波形

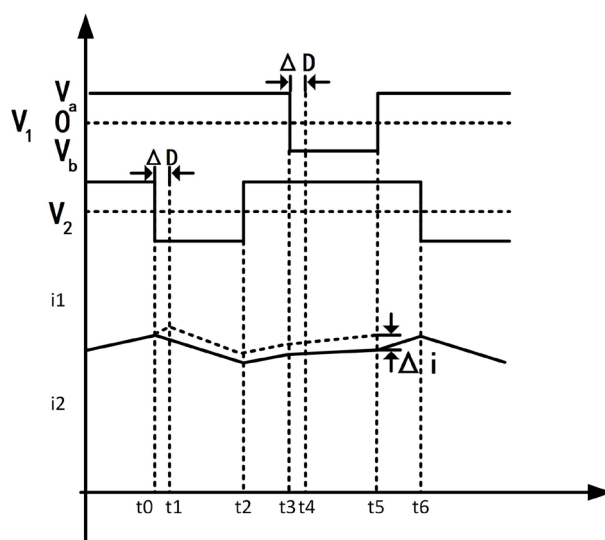


Figure 7. The waveform of a transient change
图 7. 瞬态变化时的波形图

$$\Delta i = \sum_{k=1}^5 \Delta i_k = \left(\frac{2(V_{in} - V_o)}{L_{eq2}} - \frac{V_{in} - V_o}{L_{eq1}} - \frac{-V_o}{L_{eq3}} \right) \frac{\Delta D}{f_s} \quad (12)$$

稳态条件下，电感电流的总变化量为零则有：

$$(1-D) \frac{-V_o}{L_{eq3}} + [1-2(1-D)] \frac{V_{in} - V_o}{L_{eq2}} + (1-D) \frac{V_{in} - V_o}{L_{eq1}} = 0 \quad (13)$$

联合式(12)和(13)，可得到：

$$\Delta i = \frac{V_{in} \Delta D}{L_{eq2} f_s} \quad (14)$$

因此得到系统的动态响应速度为:

$$\frac{\Delta i}{\Delta D} = \frac{V_m}{L_{eq2} f_s} \quad (15)$$

根据式(15)可以得出等效电感 L_{eq2} 的值将会决定动态响应速度, L_{eq2} 的值越小, 响应速度越快, 这里设 L_{tr} 为动态等效电感值, 可令 $L_{tr} = L_{eq2}$ 。

3.2. 耦合系数对交错并联 Buck 电路的影响

根据上述分析可知, 采取不同耦合系数对系统的动稳态特性以及输出电流纹波都有很大的影响。系统的稳态等效电感值和瞬态等效电感值的关系式如下:

$$\frac{L_{tr}}{L_{st}} = \frac{1 + \frac{D}{1-D} \alpha}{1 - \alpha} \quad (16)$$

式中, 当占空比 D 和耦合系数 α 发生变化时, $\frac{L_{tr}}{L_{st}}$ 的值将会发生相应的改变。关系如图 8 所示。

由图可知, 在占空比一定的时候, $|\alpha|$ 的值越大, 则系统瞬态等效电感值与稳态等效电感值越小, 从而使得电路的输出电流纹波以及动态响应特性较好。当系统的耦合系数一定时, 占空比在 0.5 左右的时候, 所得到的电路性能最好。

4. 仿真结果

进一步验证上述理论分析, 在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真研究, 电路指标为: 输入侧电压 $V_m = 12 \text{ V}$, 输出侧电压 $V_o = 7 \text{ V}$, 开关频率 $f_{sw} = 20 \text{ kHz}$, 计算出的电路参数为: 储能电感 $L_1 = L_2 = 40 \mu\text{H}$, 滤波电容 $C_1 = 100 \mu\text{F}$, 功率开关器选取 IPB036N12N3_G 型功率 MOSFET。根据系统的传递函数设计电压电流双闭环控制器, 在实际调整过程中对参数进行调整, 最终取电压外环 $P = 0.02$, $I = 200$, 电流内环 $P = 0.02$, $I = 20$ 。

图 9 和图 10 分别为交错并联 Buck 电路输出电感电流波形和输出电压波形, 从图中明显的可以发现

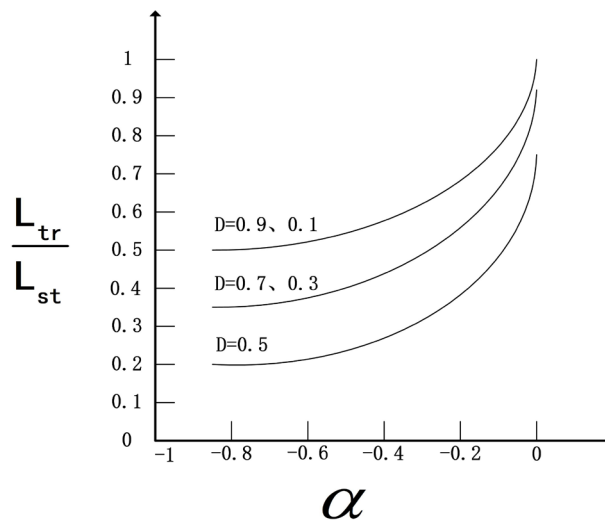


Figure 8. The relationship between coupling coefficient and circuit performance

图 8. 耦合系数与电路性能的关系

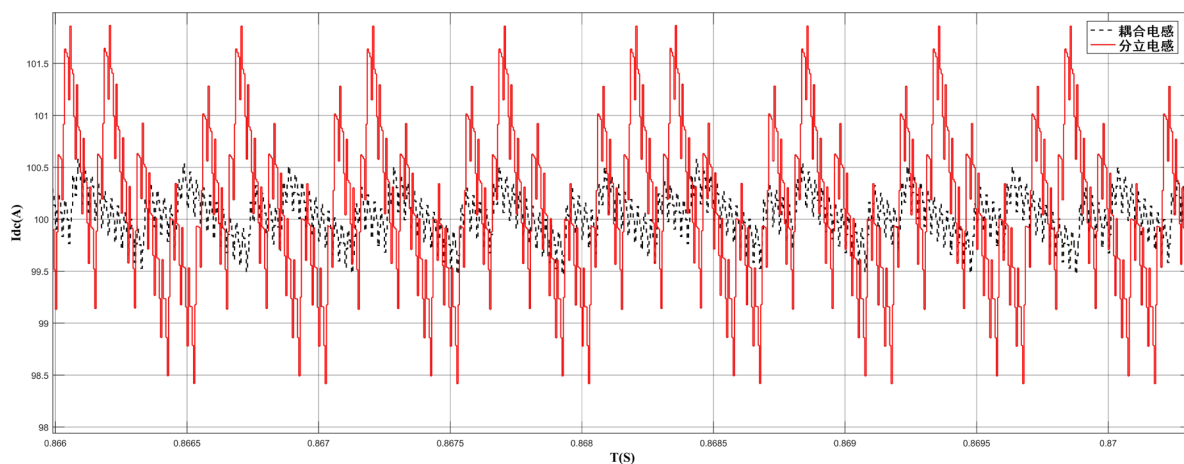


Figure 9. Output inductance current waveform
图 9. 输出电感电流波形

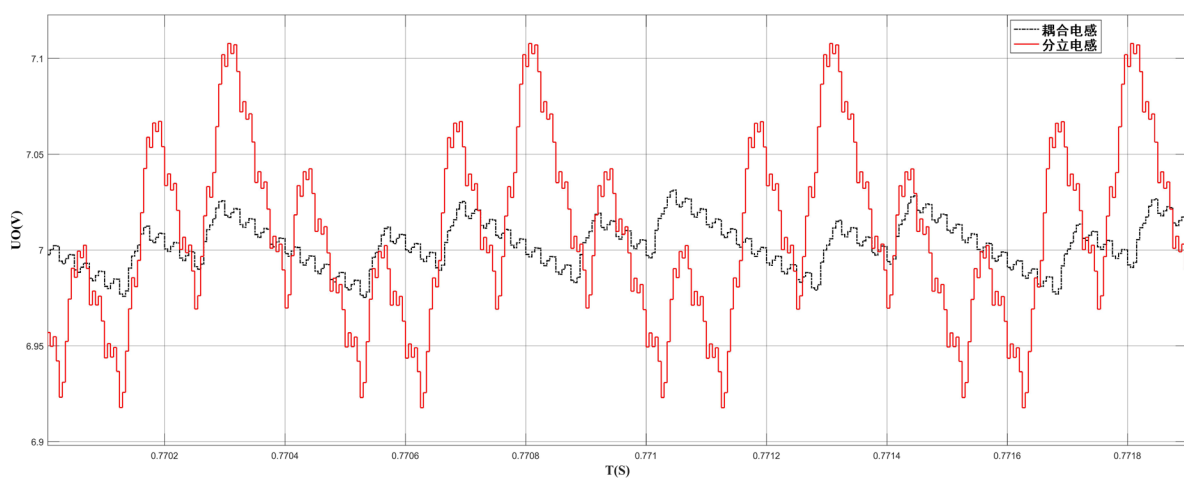


Figure 10. Output voltage wave form
图 10. 输出电压波形

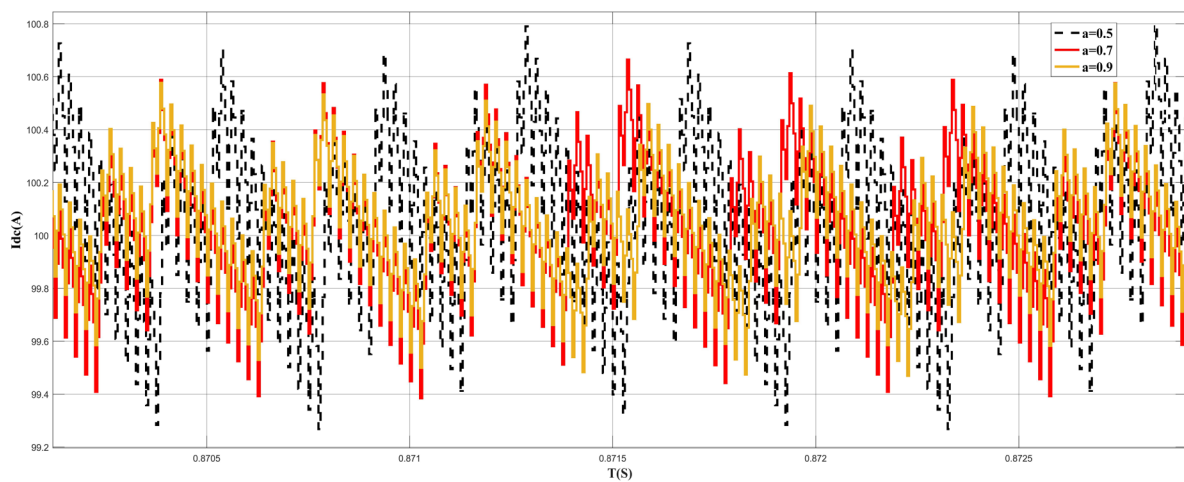


Figure 11. The current waveform under different coupling coefficients
图 11. 不同耦合系数下的电流波形

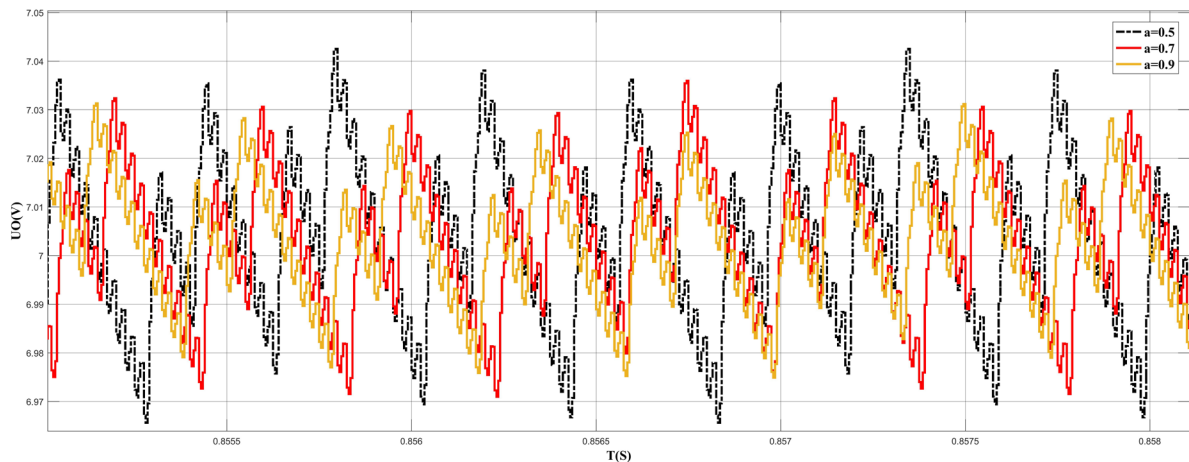


Figure 12. Output voltage waveform under different coupling coefficients

图 12. 不同耦合系数下的输出电压波形

耦合电感下的电感电流和输出电压纹波变小，输出电压纹波降到 4%，输出电流纹波也减小到了 7%。

进一步观察不同耦合系数下的电流波形，如图 11 所示，在耦合系数 α 为 0.5 时，系统的电流峰峰值大约为 1.4 A，耦合系数 α 为 0.7 时系统的电流峰峰值达到 1.2 A，耦合系数 α 为 0.9 时系统电流峰峰值小于 1 A。当耦合系数为 0.9 时，其动态响应速度也变快了，从而提高了系统的效率。

图 12 中，分别比较了耦合系数 α 在不同取值下的输出电压波形，可以看出在 α 为 0.9 时输出电压纹波最小，为 4% 左右，从而验证了之前的理论分析。

5. 总结

本文针对交错并联 Buck 电路的小信号模型，设计了电压电流双闭环控制；进一步设计了耦合电感，给出了详细的计算方法，并分析了不同耦合系数对电路动稳态特性的影响。理论分析与仿真结果表明，电路占空比在 0.5 附近的电流纹波较小，当占空比大于 0.5 时，较大的耦合系数能够有效降低电流纹波。采用耦合电感降低了交错并联 Buck 电路开关器件电流应力，同时使得系统体积和输出电压纹波变小、动稳态特性提高。接下来的工作将改进控制方式，加强系统的鲁棒性，并搭建硬件电路进行实验研究。

致 谢

感谢编辑和审稿人百忙之中抽空评审文章，并提出了宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] 徐立刚. 适用于交错并联电路的新型耦合电感[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [2] 陈建龙. 电动汽车的双向 DC-DC 变换器的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [3] 严仰光. 双向直流变换器[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2004.
- [4] Wang, J., Li, S. and Yang, J. ((2015) Extended State Observer-Based Sliding Mode Control for PWM-Based DC-DC Buck Power Converter System with Mismatched Disturbances. *IET Control Theory & Applications*, **9**, 579-586. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2014.0220>
- [5] 陈乾宏. 开关电源中磁集成技术的应用研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- [6] Forest, F., Laboure, E. and Meynard, T.A. (2007) Multicell Interleaved Flyback Using Intercell Transformers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **22**, 1662-1671. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.904194>
- [7] Wen, W. and Lee, Y.S. (2004) A Two-Channel Inter-Leaved Boost Converter with Reduced Core Loss and Copper Loss. 2004 *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, 20-25 June 2004, 1003-1009.

<https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355558>

- [8] 李薇, 张凤鸣. 多 Agent 技术研究与应用[J]. 微计算机信息, 2006, 22(8): 293-295.
- [9] 吴爱国, 李际涛. DC-DC 变换器控制方法研究现状[J]. 电力电子技术, 1999, 33(2): 75-78.
- [10] Ahmadi, M., Mohammadi, M.R. and Adib, E. (2012) Family of Non-Isolated Zero Current Transition Bi-Directional Converters with One Auxiliary Switch. *IET Power Electronics*, **5**, 158-165. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2011.0098>
- [11] Pahlevaninezhad, M., Das, P. and Drobnik, J.A. (2012) ZVS Interleaved Boost AC/DC Converter Used in Plug-In Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **27**, 3513-3529. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2186320>
- [12] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 11-19.
- [13] Rathore, A.K., Bhat, A.K.S., Nandi, S., *et al.* (2011) Small Signal Analysis and Closed Loop Control Design of Active-Clamped Zero-Voltage Switched Two Inductor Current-Fed Isolated DC-DC Converter. *IET Power Electronics*, **4**, 51-62. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2009.0093>
- [14] Yang, Y., Dong, Y. and Lee, F.C. (2009) A New Coupled Inductors Design in 2-Phase Interleaving VRM. *Proceedings of the IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Wuhan, 17-20 May 2009, 344-350. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157410>
- [15] 杨玉岗, 于庆广, 李洪珠, 等. 四相电压调整模块中平面型可消除直流偏磁集成磁件研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 179-185.
- [16] 陈为, 卢增艺, 王凯. 电压调整模块耦合电感性能分析与设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 127-132.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org