

交错并联Boost电路中反向耦合电感参数设计

刘志鹏^{1,2}, 邹爱龙^{1,2}, 付有良^{1,2}, 王朋辉^{1,2}, 王永军^{1,2}

¹内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊

²潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊

收稿日期: 2023年10月11日; 录用日期: 2023年10月16日; 发布日期: 2023年12月14日

摘要

本文针对交错并联Boost电路工作原理、开关模态以及不同开关模态下的电流纹波的计算方法, 通过工程计算的方式分析了反向耦合电感关键参数对于交错并联Boost电路产生的影响, 然后根据目标性能设计合理的反向耦合电感参数, 最后通过试验验证了所设计参数的合理性。本文所介绍的方法对于氢燃料电池用DC/DC变换器的设计具有重要参考价值。

关键词

耦合电感, DC/DC变换器, 纹波电流

Design of Reverse Coupling Inductor in Interleaving Parallel Boost Circuit

Zhipeng Liu^{1,2}, Ailong Zou^{1,2}, Youliang Fu^{1,2}, Penghui Wang^{1,2}, Yongjun Wang^{1,2}

¹National Key Laboratory of Internal Combustion Engine and Power System, Weifang Shandong

²Weichai Power Co., Ltd., Weifang Shandong

Received: Oct. 11th, 2023; accepted: Oct. 16th, 2023; published: Dec. 14th, 2023

Abstract

This paper analyzes the impact of the reverse coupling inductance key parameters on interleaved parallel boost circuits by engineering calculations for the theory of operation of staggered boost circuits, switch modes, and current ripple calculations in different switch modes. The reverse coupling inductance parameters are then designed according to the targeted performance, and the design parameters are validated through experiments. The methods described in this document are important reference points for the design of DC/DC converters for hydrogen-fuel batteries.

Keywords

Coupled Inductance, DC/DC Converter, Ripple Current

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

近几年新能源的发展进入高峰期,氢能作为一种重要的清洁能源,其相关产业迎来了新的发展机遇。氢燃料电池的零排放、效率高、功率密度大、燃料加注方便等特点使得其成为新能源汽车行业关注的焦点,但是氢燃料电池动态响应慢,而且在大功率状态下电压会降低,无法直接向负载供电[1][2]。因此,针对于氢燃料电池的 DC/DC 大功率变换器也应运而生,与光伏发电等行业的应用不同的是氢燃料电池所用的 DC/DC 变换器需要保证纹波电流要足够小,因为纹波电流过大会对氢燃料电池产生的严重的寿命影响[3]。由于 DC/DC 流过的直流电流较大,其电感磁芯中存在较大的直流磁通分量,加上对纹波要求较高,这导致电感体积过大[4],为解决这个问题,反向耦合电感的 Boost 电路被提出,因为电感的反向耦合,其磁通纹波分量相互增强,可以降低纹波,减小电感体积[5]。而在 DC/DC 变换器设计中,最重要的就是电感参数的计算,现阶段常见的方式为通过既定参数计算耦合电感参数,对于电感参数变化对系统产生的影响并没有分析[6],而且针对于电感参数的确定,大多数研究方式为通过仿真软件修改参数,观测系统结果的变化,难以寻找到最优解。

本文针对于氢燃料电池用 DC/DC 变换器,通过系统化建模的方式分析了耦合电感的参数对于 DC/DC 变换器的纹波的影响,进而选取最优的耦合电感设计参数。同时所建立的模型可以用于研究其他参数对整个系统性能的影响,为系统设计提供指导意义。

2. DC/DC 工作原理分析

本文以升压 DC/DC 变换器为例,其拓扑结构如图 1 所示。

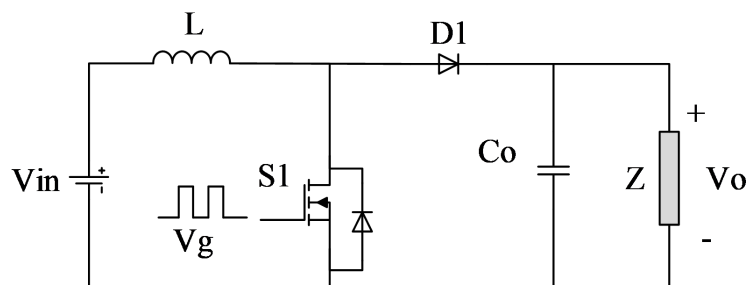


Figure 1. Single phase DC/DC circuit

图 1. 单相 DC/DC 电路

为增大通过电流,采用多路并联的方式,每一路包含两相,每一相中的拓扑和硬件结构完全相同,且两相输入滤波电感反向耦合。以四相交错并联为例,每一路中的两相驱动信号相差 180° ,两路的驱动信号相差 90° ,其拓扑结构如图 2 所示。

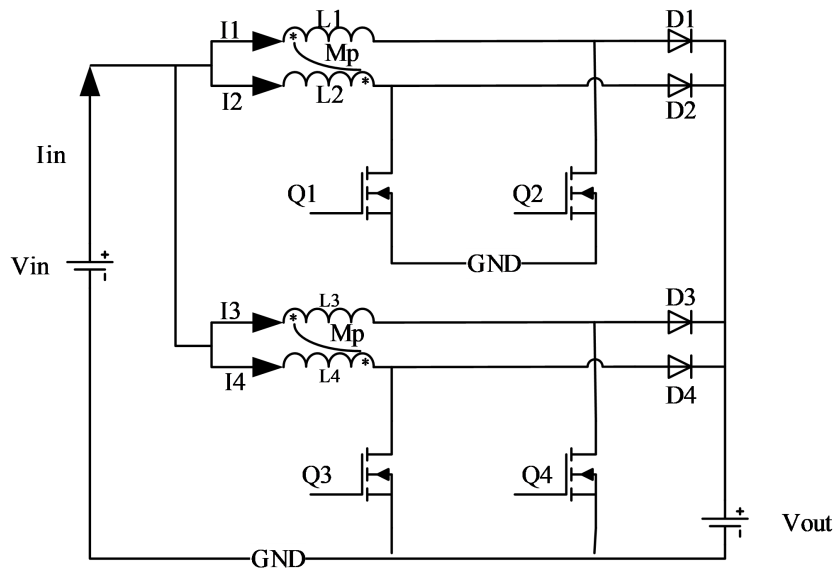


Figure 2. Main power topology
图 2. 两路四相主功率拓扑

其中，输入电源为 V_{in} ，总输入电流为 I_{in} 。第一相至第四相的电感分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ，电感值都相同，等于 L_p 。 L_1 和 L_2 之间、 L_3 和 L_4 之间的耦合系数为 k_p ，互感为 M_p 。通过四相的电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 。

互感系数和互感的关系为：

$$k_p = \frac{M_p}{L_p} \tag{1}$$

Boost 电路工作时，定义驱动信号为 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 ，四路驱动信号之间相位相差 90° 。以 G_1 为参考， G_2 、 G_3 、 G_4 的相位分别为 180° 、 90° 、 270° ，驱动信号示意图如图 3 所示。

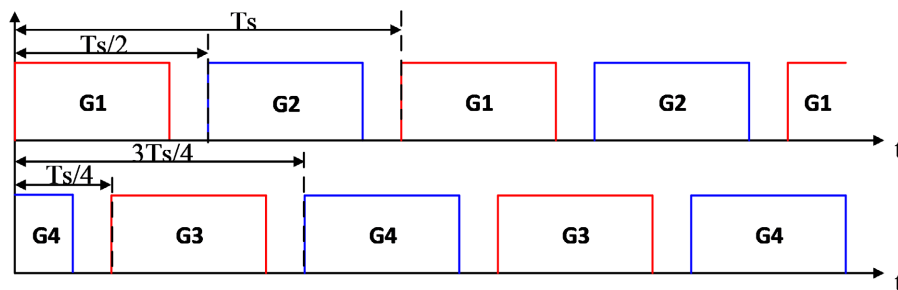


Figure 3. Driving sequence diagram
图 3. 驱动信号时序图

3. 电感参数设计

3.1. 电路模型分析

通过建立电路的电流电压关系，以获取电感设计相关参数在电路中的作用。

由图 2 可以得出电流之间的关系，如式(2)所示。

$$i_{in} = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 \quad (2)$$

电流的导数如式(3)所示。

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \quad (3)$$

令 $\frac{di_n}{dt} = k_n$ ($n=1,2,3,4$), k_n 为电流 i_n 的电流变化率。则可将式(3)写作式(4)。

$$k_c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 \quad (4)$$

假设每一路 Boost 电路工作在电流连续模式, 根据 KVL 定律, 列写每一相的环路电压方程, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} L_p k_1 - M_p k_2 = V_{in} - S_1 V_{out} \\ L_p k_2 - M_p k_1 = V_{in} - S_2 V_{out} \\ L_p k_3 - M_p k_4 = V_{in} - S_3 V_{out} \\ L_p k_4 - M_p k_3 = V_{in} - S_4 V_{out} \end{cases} \quad (5)$$

其中 S_x 为开关函数, 见式(6)。

$$S_x = \begin{cases} 1, Q_x \text{ ON} \\ 0, Q_x \text{ OFF} \end{cases}, (x=1,2,3,4) \quad (6)$$

在不同的开关状态下, 确定 S_x 的值, 然后带入到式(5)中, 解方程组即可以得到不同状态下电流的变化率。

3.2. 开关模态分析

通过对系统开关模态的分析, 计算出每一相的电流变化率, 进而计算纹波电流与各参数的关系, 最终确定电流峰峰值与电感相关参数的关系。

3.2.1. 电流变化率计算

列出每个状态下四相的 KVL 方程进行求解。

计算得出的相电流电流变化率见式(7)~(10)。

$$k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} \frac{(1-d) \cdot V_0}{L_p \cdot (1-k_p)}, 0.5 \leq d < 1 \\ \frac{(1-d) \cdot V_0}{L_p \cdot (1-k_p)} - \frac{V_0}{2L_p \cdot (1-k_p)} + \frac{(1-d) \cdot V_0}{2L_p \cdot (1+k_p)}, 0 \leq d < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

$$k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} \frac{(1-d) \cdot V_0}{L_p \cdot (1-k_p)} - \frac{V_0}{2L_p \cdot (1-k_p)} + \frac{V_0}{2L_p \cdot (1+k_p)}, 0.5 \leq d < 1 \\ \frac{(-d) \cdot V_0}{L_p \cdot (1-k_p)}, 0 \leq d < 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$k_{p3}(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p), 0.5 \leq d < 1 \\ \left[\frac{(1-d) \cdot V_0}{L_p \cdot (1-k_p)} - \frac{V_0}{2L_p \cdot (1-k_p)} \right] - \frac{V_0}{2L_p \cdot (1+k_p)}, 0 \leq d < 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

$$k_{p4}(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} \left[\frac{(1-d) \cdot V_0}{L_p \cdot (1-k_p)} - \frac{V_0}{2L_p \cdot (1-k_p)} \right] - \frac{V_0}{2L_p \cdot (1+k_p)}, & 0.5 \leq d < 1 \\ k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p), & 0 \leq d < 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

计算得出的路电流电流变化率见式(11)~(12)。

$$k_{c1}(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} 2k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p4}(d, V_0, L_p, k_p), & 0.75 \leq d < 1 \\ k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + 2k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p3}(d, V_0, L_p, k_p), & 0 \leq d < 0.25 \\ 2k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + 2k_{p3}(d, V_0, L_p, k_p), & 0.25 \leq d < 0.5 \\ 2k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p4}(d, V_0, L_p, k_p), & 0.5 \leq d < 0.75 \end{cases} \quad (11)$$

$$k_{c2}(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} 2k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p4}(d, V_0, L_p, k_p), & 0.75 \leq d < 1 \\ k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + 2k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p3}(d, V_0, L_p, k_p), & 0 \leq d < 0.25 \\ 2k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p3}(d, V_0, L_p, k_p), & 0.25 \leq d < 0.5 \\ 2k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p2}(d, V_0, L_p, k_p) + k_{p4}(d, V_0, L_p, k_p), & 0.5 \leq d < 0.75 \end{cases} \quad (12)$$

3.2.2. 不同开关模式的持续时间

在 3.2.1 节中对不同开关模式下的各相电流的变化率进行了分析和计算。如果再计算出不同模式的持续时间，就可以计算电流变化率在时间上的积分，得到各个电流的纹波电流波形，并计算出电流纹波的峰峰值。经过分析计算，得出了开关模式的持续时间如表 1 所示。

Table 1. Duration of different switching modes

表 1. 不同开关模式的持续时间

| 开关模式持续时间 | $0 < d \leq 0.5$ | $0.5 < d \leq 1$ |
|-----------------|------------------|------------------|
| ΔT_{S1} | dT_s | $(d-0.5)T_s$ |
| ΔT_{S2} | $(0.5-d)T_s$ | $(1-d)T_s$ |
| ΔT_{S3} | dT_s | $(d-0.5)T_s$ |
| ΔT_{S4} | $(0.5-d)T_s$ | $(1-d)T_s$ |

3.3. 纹波电流计算

在 3.2 节中对不同模式，不同占空比下各相电流斜率和开关模式的持续时间进行了计算，然后通过式(13)来计算各相电流在不同占空比下的纹波电流波形。

$$\tilde{i}_x(t) = \int_0^t k_x(\tau) d\tau \quad (13)$$

计算出纹波电流的波形后，可以根据纹波电流波形计算出纹波电流的峰峰值。因为四相电流波形相同，只是相位相差固定角度。因此本文以第一相电流 I_1 来计算相电流的峰峰值。通过对各相电流在各个模式下的变化率和持续时间的计算分析，以及电流变化阶段的分析计算，可以计算出各相电流的峰峰值。以电流上升阶段或下降阶段来计算电流的峰峰值，相电流峰峰值 Δi_p 和路电流峰峰值 Δi_c 计算结果分别见式(14)和(15)。

$$\Delta i_p(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} k_{p4}(d, V_0, L_p, k_p) \cdot (d-1) \cdot T_s, 0.5 \leq d < 1 \\ k_{p1}(d, V_0, L_p, k_p) \cdot d \cdot T_s, 0 \leq d < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta i_p(d, V_0, L_p, k_p) = \begin{cases} k_{c2}(d, V_0, L_p, k_p) \cdot (d-1) \cdot T_s, 0.75 \leq d < 1 \\ k_{c1}(d, V_0, L_p, k_p) \cdot d \cdot T_s, 0 \leq d < 0.25 \\ k_{c2}(d, V_0, L_p, k_p) \cdot (d-0.5) \cdot T_s, 0.25 \leq d < 1 \\ k_{c1}(d, V_0, L_p, k_p) \cdot (d-0.5) \cdot T_s, 0.5 \leq d < 0.75 \end{cases} \quad (15)$$

3.4. 电流峰峰值与电感参数的关系

通过以上章节对电路模态、电流变化率以及电流峰峰值与各参数之间关系的分析，可以利用工程计算软件根据上面介绍的方法计算出相电流峰峰值 Δi_p 、路电流峰峰值 Δi_c 与占空比 d 、输出电压 V_0 、相电感 L_p 、相电感耦合系数 k_p 之间的数量关系。根据设计需求，依据电流峰峰值与电感参数的关系，选择合适的相电感大小和耦合系数。

4. 试验验证

根据计算，选择电感为 300 μH ，耦合系数为 0.6，结构设计采用“EIE”结构，磁芯材料为铁硅铝磁粉，气隙结构为分布式，测试平台为大功率 DC/DC 变换器，设计纹波电流 $\leq 1\%$ 。

DC/DC 变换器输入电压为 300 V，输出电压为 600 V，输入电流为 200 A。测试结果如图 4 所示。其中 CH1-2 为 1、2 相 MOS 管的 V_{gs} 电压，CH3-6 为 1、2、3、4 相 MOS 管的 V_{ds} 电压，CH7、CH8 为第 1、2 相电感电流，由测试结果可知，实测波形与计算分析一致。

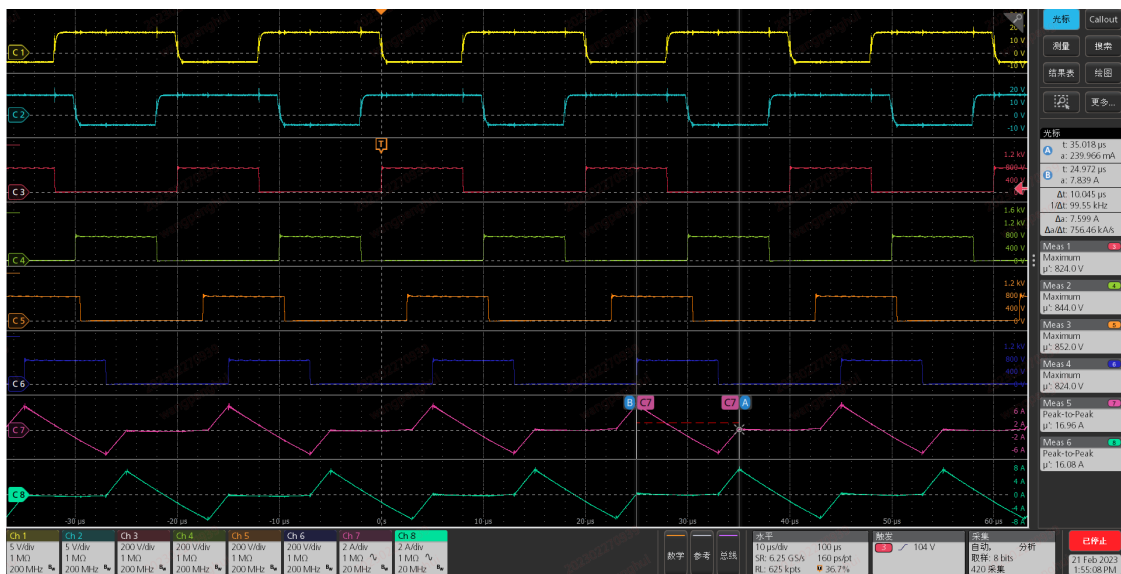


Figure 4. Current test waveform

图 4. 电流测试波形

纹波测试如图 5 所示，其中 CH1-4 为 1、2、3、4 相 MOS 管的 V_{ds} 电压，CH5、CH6 为 3、4 相耦合电感电流，CH7 为总输出电流，CH8 为总输入电流。通过示波器可以读出所测总输入电流峰峰值为 6 A，平均值为 405.4 A，由此计算得到输入电流纹波为 0.74%。

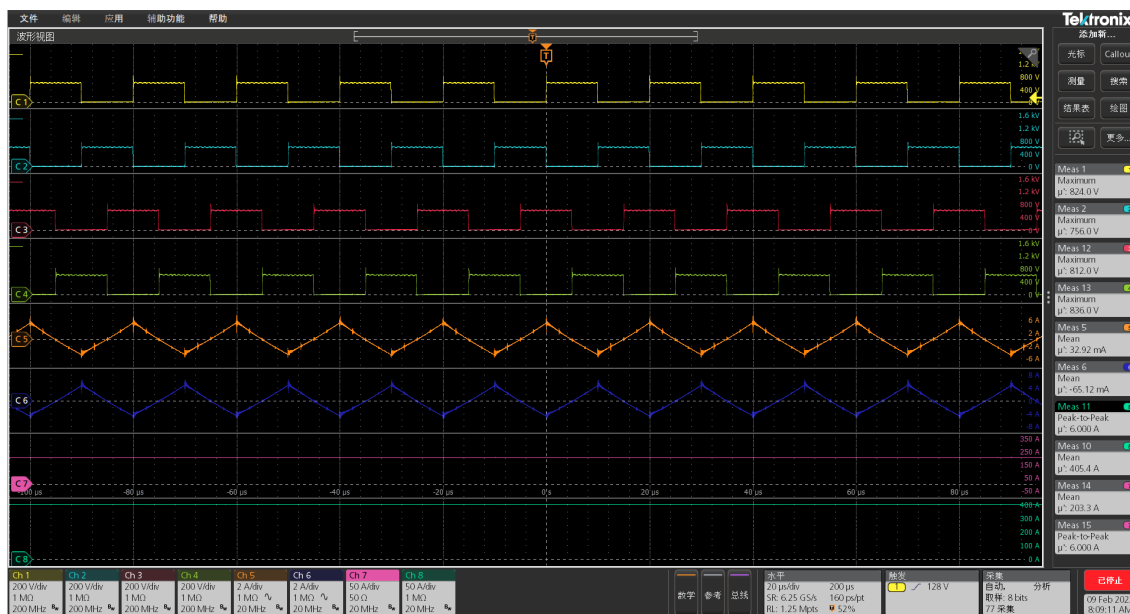


Figure 5. Peak to peak test result graph
图 5. 峰峰值测试结果图

5. 总结

本文介绍了一种应用于交错并联电路的反向耦合电感的设计方法，通过分析开关模态、分析电流变化率、计算电流纹波，从而获取电流纹波与耦合电感参数的关系表达式，从而选择合适的耦合电感参数。即通过系统化建模的方式，可以准确地根据项目指标选择耦合电感参数最优解，本文介绍的耦合电感参数设计方法是电感设计的基础，具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 程志, 曾纯. 氢燃料电池用离心式空压机气动性能试验技术[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(3): 17-20.
- [2] 金海彬. 质子交换膜燃料电池的建模与输出特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(11): 90-95.
- [3] 黄进. 低纹波高效燃料电池 DCDC 的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [4] 李洪珠, 王泽明, 范茏茏. 磁集成变换器耦合电感电流纹波研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 97-107.
- [5] 荣德生, 李洪珠. 耦合电感对交错并联变换器输出特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008(S1): 172-174.
- [6] 薛鹏飞, 张民, 赵振伟, 等. 新型高电压耦合电感 DC-DC 变换器[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 215-223.
<https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-0368>