

文章编号:1671-251X(2014)08-0046-04 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.08.012
张培彦,余泽通.交错并联三绕组耦合 Buck 变换器设计[J].工矿自动化,2014,40(8):46-49.

交错并联三绕组耦合 Buck 变换器设计

张培彦¹, 余泽通²

(1. 郑州旅游职业学院 机电工程系, 河南 郑州 450009;
2. 河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003)

摘要:针对传统交错并联 Buck 变换器存在占空比小的问题,将三绕组耦合电感引入反激变换器,设计了一种交错并联三绕组耦合 Buck 变换器。分析了该变换器中开关管和输出二极管的电压应力,进而得到该变换器的输出电压增益,并对该变换器拓扑进行了优化。仿真和实验结果表明,该优化拓扑可有效抑制开关管两端的电压波动,降低开关管的电压应力。

关键词:Buck 变换器;反激变换器;占空比;三绕组耦合电感;交错并联
中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:
网络出版地址:

Design of interleaved three-winding coupling Buck converter

ZHANG Peiyan¹, YU Zetong²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Tourism College, Zhengzhou 450009, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract:In view of problem of small duty cycle existed in traditional interleaved Buck converter, an interleaved three-winding coupling Buck converter was designed by introducing three-winding coupling inductance into flyback converter. Voltage stress of switching tube and output diode of the converter were analyzed, then output voltage gain of the converter was achieved, and topology of the converter was optimized. The simulation and experiment results show that the optimized topology can suppress voltage fluctuation between both ends of switching tube effectively and reduce voltage stress of switching tube.

Key words:Buck converter; flyback converter; duty cycle; three-winding coupling inductance; interleaved

0 引言

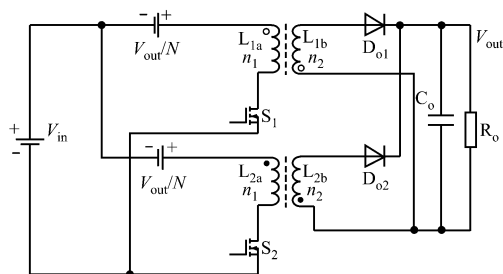
目前应用于微处理器供电的电压调整模块普遍采用交错并联 Buck 变换器作为电路架构来满足动态响应和效率要求^[1-3]。但是传统交错并联 Buck 变换器存在占空比过小的缺点,导致以下问题:① 开关管的选择较为困难。输入端的开关管在导通时承担输出大电流,关断时承担输入高电压,这就对它的电流定额和 SOA (Safe Operation Area,安全工作区)都有较高的要求。② 在输出电流纹波不变时,输出滤波电感较大。③ 系统容易受干扰因素

影响。④ 输出滤波器难以进行优化设计。参考文献[4-8]提出了三绕组的概念,并将其应用在 Buck 变换器中来提高变换器的占空比。本文在此基础上,设计了交错并联三绕组耦合 Buck 变换器,分析了其工作原理,并对该变换器拓扑结构进行了优化设计。仿真和实验结果表明,该优化设计提高了占空比,抑制了开关管两端电压波动,降低了开关损耗,使该变换器的性能得到优化。

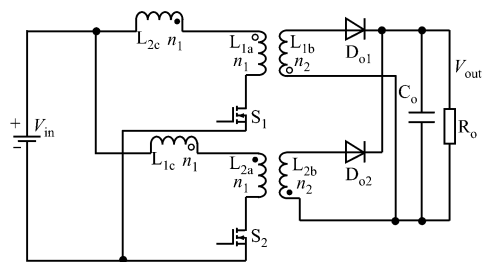
1 原理分析

在交错并联反激变换器的基础上,通过在输入

电压 V_{in} 和耦合电感原边绕组之间引入一个 V_{out}/N (V_{out} 为输出电压, N 为耦合电感的匝比) 的直流电压源, 可以把反激变换器演绎为 Buck 变换器, 如图 1(a) 所示。由参考文献[7]可知, 采用三绕组耦合电感可实现 V_{out}/N 的直流电压源功能, 如图 1(b) 所示。该变换器中有 2 组耦合电感, 分别为 L_1 (包括 L_{1a} , L_{1b} 和 L_{1c}) 和 L_2 (包括 L_{2a} , L_{2b} 和 L_{2c})。 L_{1a} , L_{1c} , L_{2a} 和 L_{2c} 的匝数均为 n_1 , L_{1b} 和 L_{2b} 的匝数为 n_2 , $n_2/n_1 = N$ 。



(a) 交错并联 Buck 变换器



(b) 采用三绕组耦合电感的交错并联 Buck 变换器

图 1 交错并联 Buck 变换器拓扑结构

为了简化三绕组耦合 Buck 变换器的静态工作分析, 假定耦合电感的耦合因数等于 1, 漏感等于 0, 电路稳态工作。分析可知, 在 1 个开关周期内, 变换器工作模态可分为 4 个主要的工作阶段。开关管 S_1 和 S_2 的门极信号在相位上相差 180° , 电路具有对称性。因此, 分析其中的 2 个工作阶段即可得出该变换器的特性。

在阶段 1, 开关管 S_1 处于导通状态, 开关管 S_2 处于关断状态, 输出二极管 D_{o1} 处于反向截止状态, 输出二极管 D_{o2} 处于正向导通状态。耦合电感 L_2 的能量通过 D_{o2} 向负载传输, L_2 工作于能量传输状态。同时, L_2 的第二绕组 L_{2b} 和第三绕组 L_{2c} 等效为一个变压器, L_{2c} 在原边输入电压 V_{in} 和耦合电感 L_1 的第一绕组 L_{1a} 之间感应出 V_{out}/N 的电压。因此, L_{1a} 两端的激励电压为

$$V_{L_{1a}} = V_{in} - \frac{V_{out}}{N} \quad (1)$$

S_2 的电压应力为

$$V_{S_2} = 2V_{in} \quad (2)$$

D_{o1} 的反向耐压为

$$V_{D_{o1}} = NV_{in} \quad (3)$$

在阶段 2, 开关管 S_1 和 S_2 处于关断状态, 输出二极管 D_{o1} 和 D_{o2} 处于正向导通状态, 耦合电感 L_1 和 L_2 工作于能量传输状态。 D_{o1} 和 D_{o2} 的输出电流在输出电压 V_{out} 的作用下线性下降。 L_{1a} 两端的激励电压为

$$V_{L_{1a}} = \frac{V_{out}}{N} \quad (4)$$

S_2 的电压应力为

$$V_{S_2} = V_{in} \quad (5)$$

阶段 3、阶段 4 与阶段 1、阶段 2 的工作状态相似, 具体的工作过程在这里不再赘述。根据耦合电感 L_1 的原边绕组 L_{1a} 的伏-秒平衡原理可以推导出三绕组耦合 Buck 变换器的电压增益 K 为

$$K = ND \quad (6)$$

式中: D 为变换器开关管的占空比。

由式(6)可知, 该变换器具有 Buck 型变换器的特性, 且由反激变换器加入三绕组耦合电感演绎而来, 因此可命名为交错并联三绕组耦合 Buck 变换器。该变换器电路结构简单, 具有对称性, 在高压输入、低压输出的隔离型中小功率应用场合具有一定的优势。该变换器还可以在输入端采用电容分压的办法来降低开关管的电压应力。

2 拓扑优化

图 1(b) 所示的变换器拓扑弥补了简单交错并联 Buck 变换器占空比小的缺点, 但是当开关管 S_1 和 S_2 处于关断状态, 输出二极管 D_{o1} 和 D_{o2} 处于正向导通状态, 耦合电感 L_1 和 L_2 工作于能量传输状态时, 耦合电感的第二绕组和第三绕组的漏感和开关管 S_1 和 S_2 的寄生电容之间会产生谐振, 存储在耦合电感的第二绕组和第三绕组的漏感上的能量会在开关管上产生一定的电压振荡, 既会增加开关管的电压应力, 又会影响变换器的效率。因此对变换器拓扑进行优化至关重要。将图 1(b) 中的开关管位置改变后可以得到如图 2 所示的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑结构。

当开关管 S_1 处于导通状态、开关管 S_2 处于关断状态, 输出二极管 D_{o1} 处于反向截止状态、输出二极管 D_{o2} 处于正向导通状态时, S_1 处 A 点和 S_2 处 B 点的电压应力分别为

$$V_A = V_{in} - \frac{V_{out}}{N} \quad (7)$$

$$V_B = -\frac{V_{out}}{N} \quad (8)$$

A 点和 B 点的电位差为

$$V_A - V_B = V_{in} \quad (9)$$

当开关管 S_1 和 S_2 处于关断状态,输出二极管 D_{o1} 和 D_{o2} 处于正向导通状态时, S_1 处 A 点和 S_2 处 B 点的电压应力分别为

$$V_A = V_{in} - \frac{V_{out}}{N} \quad (10)$$

$$V_B = -\frac{V_{out}}{N} \quad (11)$$

A 点和 B 点的电位差为

$$V_A - V_B = V_{in} \quad (12)$$

由此可知,变换器的整个工作周期内 A 点和 B 点的电位差为恒定值,所以可在 A 点和 B 点之间串入电容 C_1 ;同理,C 点和 D 点的电位差也为恒定值,所以可在 C 点和 D 点之间串入电容 C_2 。改进后的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑结构如图 3 所示。其中 C_{s1} 和 C_{s2} 为开关管的寄生电容。

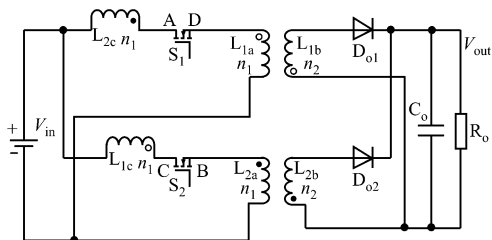


图 2 改变开关管位置后的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑结构

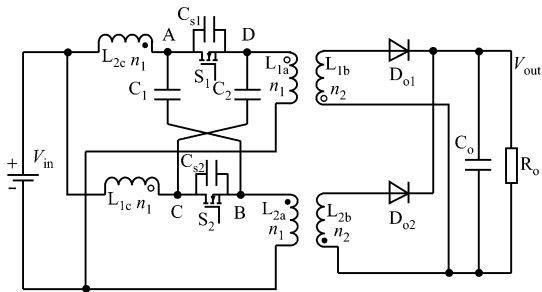


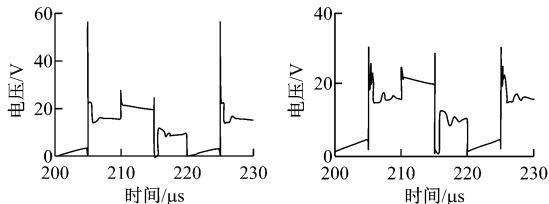
图 3 改进后的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑结构

改进后的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑结构相当于在变换器内引入了一个低通滤波器,有效抑制了开关管两端的电压波动,提高了变换器的效率,降低了开关管两端的电压应力。

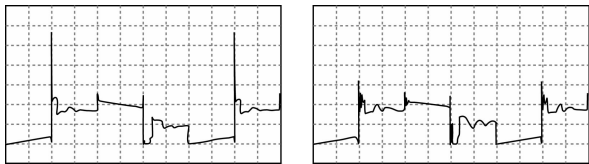
3 仿真与实验

为了验证理论分析的正确性,利用 Saber 电路仿真软件对改进前后的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑中开关管两端的电压进行仿真,并搭建

硬件电路进行实验。实验主要参数:输入电压 V_{in} 为 12 V,输出电压 V_{out} 为 220 V,开关频率为 50 kHz,耦合电感的匝比 N 为 30:10,控制芯片为 UC3825,开关管 S_1 和 S_2 为 IRF3710,输出二极管 D_{o1} 和 D_{o2} 为 RHRP15120,输出滤波电容 C_o 为 8 μ F,负载电阻 R_o 为 18~100 Ω 。开关管 S_1 两端电压的仿真、实验波形分别如图 4、图 5 所示,其中图 5 横向每格代表时间 2.5 μ s,纵向每格代表电压 10 V。



(a) 改进前 (b) 改进后
图 4 开关管 S_1 两端电压的仿真波形



(a) 改进前 (b) 改进后
图 5 开关管 S_1 两端电压的实验波形

从图 4 和图 5 可看出,改进后的交错并联三绕组耦合 Buck 变换器开关管漏源极上的电压应力约为 18 V,远低于 220 V 输出电压,与传统交错并联 Buck 变换器相比,开关管上电压应力大大降低;同时降低了由于漏感产生的电压振荡,使开关管上的电压波动得到进一步抑制,有效吸收了电压尖峰。

4 结语

将三绕组耦合电感引入反激变换器中构成交错并联三绕组耦合 Buck 变换器,分析了该变换器中开关管和输出二极管的电压应力,进而得到该变换器的输出电压增益;对交错并联三绕组耦合 Buck 变换器拓扑进行了进一步的优化,可有效抑制开关管两端的电压波动,提高变换器的效率。仿真和实验结果验证了设计的可行性。

参考文献:

[1] PENG X, MAO Y, LEE F C. Single magnetic push-pull forward converter featuring built-in input filter and coupled-inductor current doubler for 48 V VRM[C]// The 17th Annual IEEE Applied Power Electronics

Conference and Exposition,Dallas,2002;843-849.

[2] 牛犇,宋书中,马建伟,等. 一种新型软开关 Buck 变换器的研究[J]. 工矿自动化,2009,35(12):38-42.

[3] LI J L, SULLIVAN C R, SCHULTZ A. Coupled-inductor design optimization for fast-response low-voltage DC-DC converters[C]//The 17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas,2002:817-823.

[4] 李武华. 三绕组耦合电感实现高增益、高效率交错并联软开关 Boost 变流器[D]. 杭州:浙江大学,2008.

[5] 李武华,何湘宁,吴剑勇. 隔离型三绕组耦合电感交错式 DC/DC 变换器[J]. 电工技术学报,2009,24(9):99-106.

[6] 李武华,何湘宁,吕晓东. 三绕组耦合电感组成的交错并联基本单元[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(6):1134-1140.

[7] 吕晓东,李武华,吴建德,等. 一种隔离型有源箝位交错并联 Boost 软开关变换器[J]. 中国电机工程学报,2008,28(27):7-11.

[8] 姚刚,沈燕群,李武华,等. 一种新型的有源交错并联 Boost 软开关电路[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):65-69.