

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.019

基于移相全桥的车载辅助充电 DC-DC 变换器设计

徐晨汀, 吴新科*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对纯电动汽车辅助充电 DC-DC 变换器的设计问题,对纯电动汽车电气系统结构及 DC-DC 变换器的应用需求进行了分析。并根据实际需求设计了一款基于移相全桥拓扑的 DC-DC 变换器。该变换器通过在电路原边外加电感拓宽了电路的 ZVS 范围,通过在原边变压器及外加电感间增加两个箝位二极管抑制了电路的电压尖峰;同时副边采用同步整流技术进一步提升了电路效率。最后给出了电路关键参数的设计过程和控制的实现方法,并搭建了一台实验样机对理论分析进行了验证。研究表明,所设计的样机能够输出 160 A 电流并实现了轻载 96% 以上的效率。

关键词:车载充电器;DC-DC 变换器;移相全桥

中图分类号:TM461

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0347-05

Design of phase-shift full-bridge DC-DC converter with clamping diodes as automotive auxiliary charger

XU Chen-ting, WU Xin-ke

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the design of the auxiliary charger DC-DC converter in electric vehicles (EVs), EV Electrical system structure and the application requirements of DC-DC converter was analyzed. And based on the requirements, a Phase-shift Full-bridge DC-DC converter was designed, which achieves wide ZVS range and eliminates the voltage oscillation by introducing a resonant inductance and two clamping diodes in the primary side. Synchronous rectification was adopted in the secondary side for a higher efficiency. The design procedure of the key parameters and the control method of the converter were introduced. A prototype was built to verify the theoretical analysis. The results indicate that the prototype can output 160A current and achieve above 96% efficiency at light load.

Key words: automotive charger; DC-DC converter; Phase-shift Full-bridge

0 引 言

随着能源危机与环境污染的加剧,新能源汽车作为替代传统汽车的节能环保型交通工具,开始被越来越多的消费者认可。根据中国汽车工业协会的数据,2015 年 1~8 月份中国新能源汽车销量达到了 10.87 万辆,已远超 2014 年全年销量。纯电动汽车(EV)作为新能源车中最重要的一种,也被认为是未来汽车的

发展方向。为了满足汽车中不同电压等级负载的要求,目前电动汽车的电气系统包含高压系统和低压系统两部分。高压系统中由高压动力电池给电机,空调系统等提供电能;低压系统中则由低压蓄电池给仪表盘,雨刮器等汽车低压负载提供电能。高压动力电池和低压蓄电池之间通过一级车载辅助充电 DC-DC 变换器连接,用于高压电池给低压负载的供电,同时给低压电池充电。

收稿日期:2015-12-04

作者简介:徐晨汀(1992-),男,浙江金华人,硕士研究生,主要从事中小功率电源方面的研究。Email:21310162@zju.edu.cn

通信联系人:吴新科,男,教授,博士生导师。Email:wuxinke@zju.edu.cn

由于高压动力电池的电压等级为 400 V,而低压蓄电池电压等级为 12 V,因而要求 DC-DC 变换器能够实现高低压的电气隔离;为了加快电池的充电效率,要求 DC-DC 变换器具备输出大电流的能力;同时由于蓄电池的充电过程大多伴随着它的使用,变换器将较多地工作于轻载情况下,因而要求变换器拥有较高的轻载效率。常见的隔离型 DC-DC 拓扑主要有双管正激拓扑、半桥拓扑、全桥拓扑等。其中,全桥拓扑由于其更小的电压电流应力,更小的磁元件尺寸,更高的磁芯利用率,更灵活多变的控制方式,以及相同条件下能够输出更大功率的特点,更适合应用于车载辅助充电 DC-DC 中。而移相全桥作为全桥拓扑的一种,除了拥有上述全桥电路的优点外,还能够实现原边开关管的 ZVS,有利于提高变换器的开关频率,效率和功率密度,降低开关噪声,同时控制简单,在目前的中高功率场合得到了广泛的应用^[1-2]。

本研究针对车载辅助充电 DC-DC 变换器的应用场合,采用一种改进型的移相全桥拓扑设计制作一台工作频率 100 kHz,输入为 300 V ~ 400 V、输出为 12 V/160 A 的样机,并介绍电路设计方案及关键参数的设计过程,最后给出样机的关键波形及效率曲线。

1 变换器方案介绍

在实际应用的移相全桥电路中,存在一些问题,如轻载失去 ZVS 特性问题、副边整流二极管结电容引起的电压振荡问题、偏磁问题、占空比丢失问题等^[3]。针对以上问题,文献[4-7]从改变拓扑结构和改变控制策略两方面提出了多种移相全桥改进方案。文献[8-9]则提出了一种简单有效的改进型拓扑,即通过在原边外加电感,增大了电路的 ZVS 范围;通过在原边的外加电感与变压器中间添加两个箝位二极管,来箝位由副边整流二极管寄生电容引起的电压振荡,减小电压尖峰,降低器件的电压应力。文献[10]在上述移相全桥的基础上改变了外加电感和变压器的位置,使得箝位二极管每个开关周期只导通一次,其电路图及波形图如图 1 所示。

笔者所设计的移相全桥 DC-DC 变换器的主电路图及总体控制框图如图 2 所示。本研究在图 1 所示的改进型移相全桥拓扑基础上,在原边交流侧增加了隔直电容,以防止由桥臂不对称导通时间引起偏磁问题,从而防止变压器饱和,同时考虑到车载辅助充电 DC-DC 变换器要求输出大电流,因此副边采用了同步整流技术,以提升变换器整体效率。

图 2 中输出电压 V_o 经采样得到 V_{os} ,经过一级误

差放大器,得到误差信号 $COMP$, $COMP$ 作为 PWM 比较器第一个输入,与锯齿波比较产生 PWM 信号,PWM 信号再经逻辑模块产生原边 4 个开关管和副边 SR 的驱动信号。变换器采用副边控制即所有的控制电路均与副边共地,因而控制芯片产生的控制信号在经过驱动芯片后通过驱动变压器驱动原边开关管。

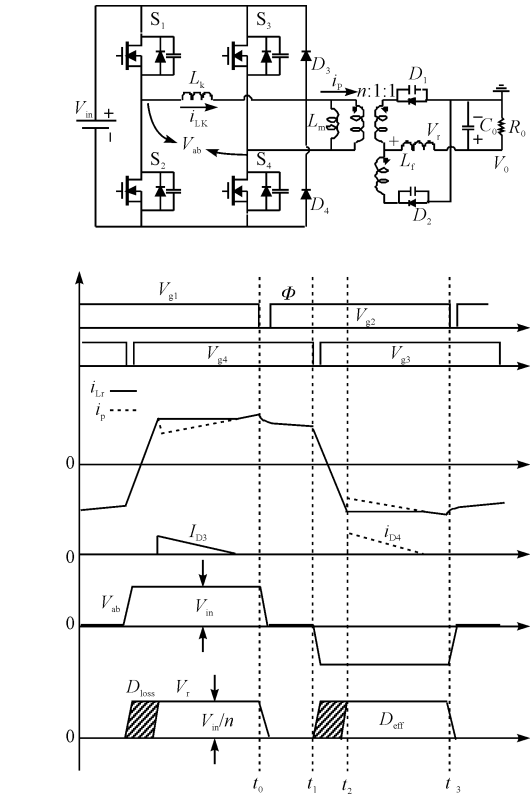


图 1 改进型移相全桥拓扑及波形图

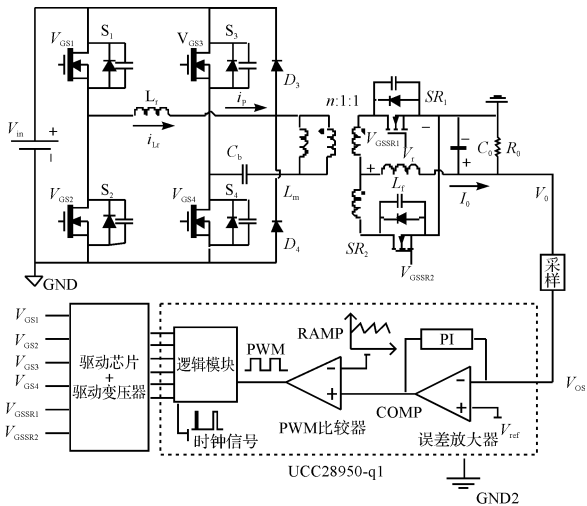


图 2 变换器电路图及控制框图

2 主电路参数设计及计算

2.1 变压器匝比 n 设计

由于移相全桥拓扑存在占空比丢失的问题,在设

计变压器匝比时,应当考虑在占空比丢失最大的情况下,电路能否输出所需的最大占空比。

移相全桥的占空比丢失的估算公式如式(1)所示:

$$\Delta D \approx \frac{4L_r f_s I_o}{nV_{in}} \quad (1)$$

从式(1)中可以判断,最大占空比丢失发生在电路工作于最小输入电压 V_{in_min} ,最大输出电压 V_{O_max} ,且满载时。因而可以根据图3的设计流程设计变压器的匝比:

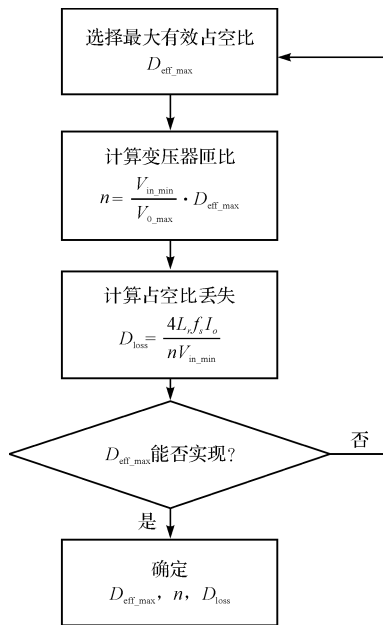


图3 变压器匝比设计流程图

考虑到 UCC28950 能够输出的最大占空比为 0.95,可以首先选择 $D_{eff_max1} = 0.9$,计算变压器匝比 $n = 14.5$,如果选择整数 14 为匝比继续计算,则此时最大占空比变为 $D_{eff_max2} = 0.868$ 。在计算占空比丢失时外加电感值暂时用 $L_r = 5 \mu\text{H}$ 代入计算,得到此时的占空比丢失 $D_{loss} = 0.078$ 。计算 $D_{eff_max2} + D_{loss} < 0.95$,最大占空比能够实现,因此确定变压器匝比为 14 : 1 : 1。

2.2 外加辅助电感 L_r 设计

移相全桥滞后臂 ZVS 的实现,依赖于开关管结电容与外加电感的谐振。当负载较重时,外加电感上的能量足够给滞后桥臂开关管的结电容完全充放电,因而滞后臂能够实现 ZVS,而当负载较轻时,外加电感上的能量不足以给滞后臂开关管结电容完全充放电,滞后臂开关管就失去了 ZVS 特性。因而要保证滞后臂实现 ZVS,要求外加电感的能量大于开关管充放电所需能量,即外加电感值需满足:

$$L_r i_p^2 \geq (C_{S3} + C_{S4}) V_{in}^2 \quad (2)$$

式中: i_p —滞后臂关断时的原边电流值; C_{S3}, C_{S4} —原边开关管的结电容。根据式(2)画出的当 $V_{in} = V_{in_max}$ 时外加电感 L_r 取值与负载的关系如图4所示。从图4中可以看到,若要求 25% 以上负载范围内电路实现 ZVS,则取谐振电感值 $L_r > 5 \mu\text{H}$ 即可。需要注意的是,实际中变压器的漏感 L_k 不可能为零,因此在计算了实现 ZVS 所需的电感值后,还应根据实际变压器漏感值调整外加电感值,以防止引起占空比丢失过大的问题。本研究中根据实际要求,选择外加电感 $L_r = 3 \mu\text{H}$ 。

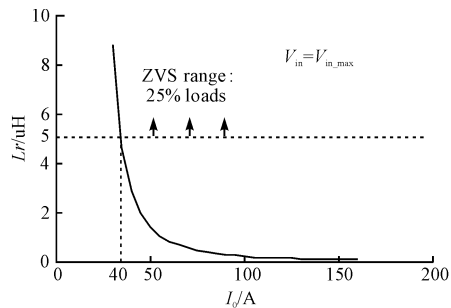


图4 外加电感 L_r 取值与负载的关系

2.3 输出滤波设计

在设计输出滤波电感值时,需要根据要求的电流纹波 ΔI_o 来计算输出滤波电感值:

$$L_o = \frac{V_o T_s}{2 \Delta I_o} \left(1 - \frac{n V_o}{V_{in}} \right) \quad (3)$$

同时,可以根据输出电流纹波 ΔI_o 计算出输出电容一次充(放)电的电荷量:

$$Q_o = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_o}{2} \cdot \frac{T_s}{2} \right) \quad (4)$$

式中: T_s —一个开关周期的时间。

由此,则可以根据所要求的最大输出纹波值 ΔV_o 计算所需的输出电容值:

$$C_o = \frac{Q_o}{\Delta V_o} \quad (5)$$

本研究中根据实际的要求,选择输出滤波电感 $L_o = 2.1 \mu\text{H}$,选择输出滤波电容 $C_o = 200 \mu\text{F}$ 。

3 实验结果

按照上述的分析,本研究设计制作了一台实验样机,样机关键电路参数如表1所示。

电路工作于 25% 负载情况下的关键波形如图5所示。图5中, T_0 刻到 T_2 时刻为一个开关周期,在一个开关周期中,电路先后经过了环流,换流,输出能量,环流,换流,输出能量6个阶段,箝位二极管 D_3 只在正半周的输出能量阶段导通一次,而在其余阶段均不导通。

表 1 样机参数

参数	符号	取值
控制芯片	IC	UCC28950-q1
功率 MOSFET	$S_{1,2,3,4}$	IPW60R099CPA
同步整流管	SR_1, SR_2	IPP045N10
变压器匝比	n	14
输出电感/ μH	C_o	2.1
外加电感/ μH	L_r	3

滞后臂上管 S_3 的 ZVS 波形如图 6 所示,对应于图 5 中的 T_1 时刻。 T_1 时刻滞后臂下管 S_4 关断,外加电感与滞后臂上下管的结电容发生谐振,使得 S_3 两端电压 V_{DS} 下降。由于采用了驱动变压器驱动,因而开关管的驱动波形 V_{GS} 在开关管关断时为负压,从图中看到,在 V_{GS} 还是负压时,也即 S_3 还未开通时, S_3 两端的 V_{DS} 波形就已下降到 0,因此开关管在开通时实现了 S_3 的零电压开通,降低了开关管的开关损耗。

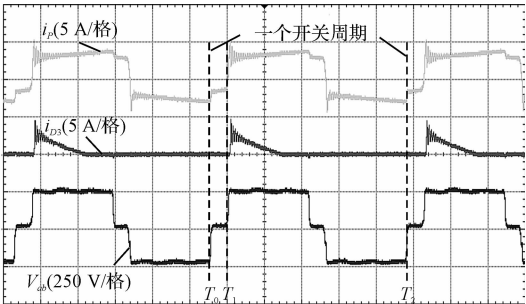


图 5 电路典型波形

i_p —变压器原边电流, i_{D3} —流过箝位二极管 D_3 的电流,
 V_{ab} —两个桥臂中点电压。

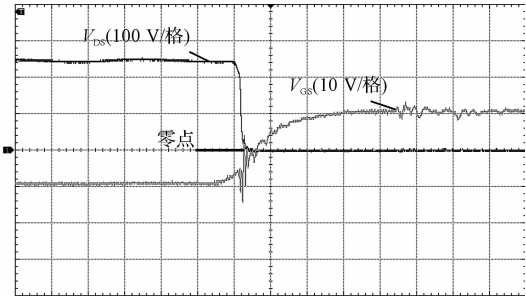


图 6 开关管 ZVS 波形

电路工作于额定输出电压时的效率曲线如图 7 所示。从效率曲线中看到,变换器在最大输入电压及额定输出电压的情况下峰值效率达到了 97.2%,且在输出最高 160 A 大电流的情况下,仍然保持了 92.4% 以上的较高效率值。而当变换器工作于轻载时(0 ~ 50% 负载范围),变换器的效率保持在了 96% 左右。

4 结束语

本研究针对电动汽车车载辅助充电 DC-DC 的应

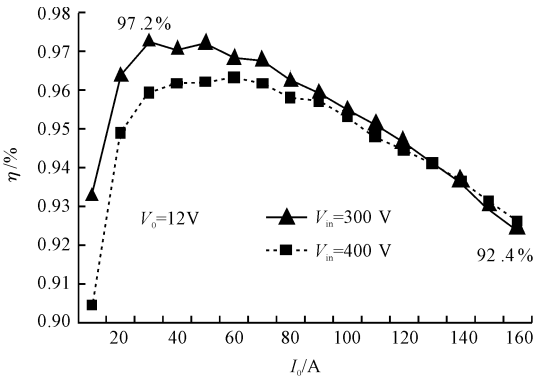


图 7 额定输出下实验样机效率测试结果

用领域,通过分析车载辅助充电 DC-DC 的应用需求,分析采用移相全桥拓扑。其次根据移相全桥存在的问题采用了一种带箝位二极管的改进型移相全桥拓扑,设计了一款 DC-DC 变换器,并搭建了样机进行测试。对样机的测试结果显示样机能够实现最高 160 A 的大电流输出,因而能够满足电动汽车低压电池的快速充电要求;同时变换器的滞后桥臂开关管能在 25% ~ 100% 负载范围内实现零电压开通,减小了开关损耗,提高了变换器的总体效率,特别是轻载时候效率,从而使得变换器在其主要工作状态下的性能得到了提升。

参考文献 (References) :

[1] MWEENE L H, WRIGHT C A, SCHLECHT M F. A 1 kW 500 kHz front-end converter for a distributed power supply system [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 1991, 6(3):398-407.

[2] SABATE J, VLATKOVIC V, RIDLEY R, et al. Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter[C]// **Applied Power Electronics Conference and Exposition**, 1990. APEC 90, Conference Proceedings 1990. , Fifth Annual. IEEE,1990:275-284.

[3] ZELJKOVIC S, REITER T, GERLING D. Analysis of rectifier topologies for automotive HV to LV phase shift ZVT DC/DC converter [C]// **Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)**, 2012 15th International. IEEE, 2012;DS1b.4-1 - DS1b.4-7.

[4] WU X, CHEN H, ZHANG J, et al. An improved high efficiency full bridge ZVS DC-DC converter with overall load range soft switching [C]// **Power Electronics Specialists Conference**, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. IEEE,2004:1605-1611.

[5] BORAGE M, TIWARI S, BHARDWAJ S, et al. A Full-Bridge DC-DC Converter With Zero-Voltage-Switching Over the Entire Conversion Range[J]. **Power Electronics IEEE**

- Transactions on**,2008,23(4):1743-1750.
- [6] WU X, XIE X, ZHAO C, et al. Low Voltage and Current Stress ZVZCS Full Bridge DC-DC Converter Using Center Tapped Rectifier Reset [J]. **Industrial Electronics IEEE Transactions on**,2008,55(3):1470-1477.
- [7] CHEN B Y, LAI Y S. Switching Control Technique of Phase-Shift-Controlled Full-Bridge Converter to Improve Efficiency Under Light-Load and Standby Conditions Without Additional Auxiliary Components [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**,2010,28(4):1001-1012.
- [8] REDL R, SOKAL N O, BALOGH L. A novel soft-switching full-bridge DC/DC converter; analysis, design considerations, and experimental results at 1.5 kW, 100 kHz [J]. **Power Electronics IEEE Transactions on**, 1991, 6: 408-418.
- [9] REDL R, BALOGH L, EDWARDS D W. Optimum ZVS full-bridge DC/DC converter with PWM phase-shift control; analysis, design considerations, and experimental results [C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994. APEC '94. Conference Proceedings 1994. , Ninth Annual. IEEE, 1994:159-165.
- [10] RUAN X, LIU F. An improved ZVS PWM full-bridge converter with clamping diodes [C]// Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. IEEE, 2004:1476-1481.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

徐晨汀,吴新科. 基于移相全桥的车载辅助充电 DC-DC 变换器设计[J]. 机电工程,2016,33(3):347-351.

XU Chen-ting, Wu Xin-ke. Design of Phase-shift Full-bridge DC-DC Converter with Clamping Diodes As Automotive Auxiliary Charger[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(3):347-351.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 302 页)

(3) 独立式散热舱系统阻力较小,整个系统的冷却气体总流量较大,所以在实际应用中应选择正常工作下风扇压升小、气体流量大的风扇与之相匹配。

参考文献 (References):

- [1] 陈细军,黎 滢,夏凌枫,等. 工程机械用发动机冷却风扇内部流场特性仿真分析[J]. 工程机械,2011,42(1):21-24.
- [2] SOLDNER J, ZOBEL W, EHLERS M, et al. A Compact Cooling System (CCSTM): The Key to Meet Future Demands in Heavy Truck Cooling [J]. **SAE**, 2001-01-1709, 2001.
- [3] 韩 松. 智能型工程机械冷却系统:中国,CN200910097274.6 [P]. 2009-09-09.
- [4] 黄翔翔,白延斌,汪 超. 多水-空气蒸发冷却空调系统的设计方法[J]. 流体机械,2014(3):60,84-88.
- [5] KENNEDY, I J. SPENCE, S W T. SPRAT G R., et al. Investigation of Heat Exchanger Inclination in Forced-draught Air-cooled Heat Exchangers[J]. **Applied Thermal Engineering**, 2013, 54(2):413-421.
- [6] HARUAKI K, KAZUHIKO M. Characteristics of inclined fin-tube heat exchanger for compact air conditioner [C]. American Society of Mechanical Engineers, 2002:55-61.
- [7] KIM M H, YOUN B, CLARK W. BULLARD. Effect of inclination on the air-side performance of a brazed aluminum heat exchanger under dry and wet conditions [J]. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2001, 44(24):4613-4623.
- [8] HALLQVIST T. The Cooling Airflow of Heavy Trucks-a Parametric Study [J]. **SAE Int. J. Commer. Veh.**, 2008, 1(1):119-133.
- [9] LISA HENRIKSSON, ERIK DAHL, PETER GULLBERG, et al. Lennart Lofdahl CFD Method and Simulations on a Section of a Detailed Multi-Louvered Fin Where the Incoming Air is Directed at 90° and 30° Relative to the Compact Heat-Exchanger [R]. SAE, 2013-01-2417.
- [10] 严兆大. 热能与动力机械测试技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [11] 吕 峰. 商用车冷却模块匹配设计方法研究 [D]. 杭州:浙江大学动力机械及车辆工程研究所, 2011.
- [12] 王 克,龚烈航,张梅军. 基于 fluent 分析的先导阀内的油液流动特性研究 [J]. 液压气动与密封, 2013(5):7-9.

[编辑:李 辉]