

并联 H 桥 DC/DC 变换器软开关技术研究*

王志刚¹, 毛家惠², 夏益辉³

(1. 海军驻大连四二六厂军事代表室, 辽宁 大连 116000;

2. 海军原 91800 部队, 海南 三亚 572100;

3. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 与传统的 Buck 电路相比, 基于 H 桥并联的 DC/DC 变换器可以实现电压的双极性输出和故障时的冗余控制, 非常适合用于大功率电动机正反转控制的场合。分析了并联 H 桥型 DC/DC 变换器的结构组成和双脉宽调制(PWM)模式。为了降低双脉宽调制下 H 桥型 DC/DC 变换器的开通和关断损耗, 对无源软开关技术进行了分析, 重点探讨了 RCD 缓冲电路和最小应力缓冲电路之间的性能差异, 指出最小应力软开关技术可以获得更好的软开关性能, 并就将其用于双脉宽调制下的并联 H 桥 DC/DC 变换器进行了仿真研究。仿真结果表明: 最小应力软开关技术用于双脉宽调制下并联 H 桥 DC/DC 变换器时, 可以实现开关管的零电压开通和零电流关断。

关键词: 双极性输出; H 桥 DC/DC 变换器; 最小应力软开关; RCD 缓冲电路

中图分类号: TM 46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0096-05

Research on Soft Switching Technology of Parallel H-Bridge DC/DC Converter*

WANG Zhigang¹, MAO Jiahui², XIA Yihui³

(1. Navy Representatives Office in No.426 Factory, Dalian 116000, China;

2. Navy's Original 91800 Unit, Sanya 572100, China;

3. College of Electric Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Compared with the traditional buck circuit, the DC/DC converter based on H-bridge parallel connection can realize the bipolar output of voltage and redundancy control in case of failure, so it is very suitable for the situation that large power motor needs positive and negative rotation control. The structure of the parallel H-bridge DC/DC converter and the mode of dual pulse width modulation (PWM) were analyzed. To reduce the switching loss of H-bridge DC/DC converter under dual PWM, the passive soft switching technology was analyzed, and the performance difference between the RCD buffer circuit and the minimum stress buffer circuit was emphatically discussed. It was found that the minimum stress soft switching technology could obtain better soft switching performance. The minimum stress soft switch was used to simulate the parallel H-bridge DC/DC converter with dual PWM. Simulation results showed that the soft switching technology based on the minimum stress snubber circuit could be used in the parallel H-bridge DC/DC converter with dual PWM to achieve zero voltage switching on and zero current switching off.

Key words: bipolar output; H-bridge DC/DC converter; minimum stress soft switch; RCD snubber circuit

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507183)

作者简介: 王志刚(1986—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统自动化。

毛家惠(1976—), 男, 高级工程师, 研究方向为岛礁能源保障。

夏益辉(1987—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动、电力系统自动化。

0 引言

随着信息技术的快速发展和电动汽车在日常生活中的普及,为了快速安全地对手机、电脑和电动汽车等进行充电^[1-4],高性能直流电源的需求日益增加。

为了尽可能提高电源中 DC/DC 变换器的运行性能,学者们对其拓扑结构、调制策略、控制方法和软开关等方面进行了研究^[5-9]。目前已存在的 DC/DC 开关电源拓扑结构多种多样。按其电路中输入和输出部分之间是否存在电气隔离来分类,可将其分为隔离式和非隔离式。其中非隔离变换器按电路中开关器件的个数来分类,可分为单管、双管、四管等多种类型。单管直流变换器按照其输入和输出特性又可细分为 Buck 变换器、Boost 变换器、Sepic 变换器和 Poel 变换器等多种类型。对于双管直流变换器来说,典型结构为

Boost-Buck 变换器。Boost-Buck 变换器结构简单,可以拓展用于不同工作场合。

DC/DC 变换器调制策略应用较多的是单脉宽调制(PWM)策略,其原理简单、易于实现,但存在输出电压谐波含量高和谐波频次丰富等问题;而 DC/DC 变换器双脉宽调制,在一个开关周期内,开关管开通关断两次,使得变换器损耗较大。为了降低系统损耗,本文对 H 桥 DC/DC 变换器双脉宽调制软开关技术进行研究。

1 H 桥 DC/DC 变换器结构组成及双脉宽调制工作原理

1.1 结构组成

图 1 为 H 桥并联 DC/DC 变换器基本结构,主要包括直流供电电源、功率管、滤波电感和滤波电容。滤波电感用于滤除高频谐波电流,滤波电容用于滤除高频谐波电压。

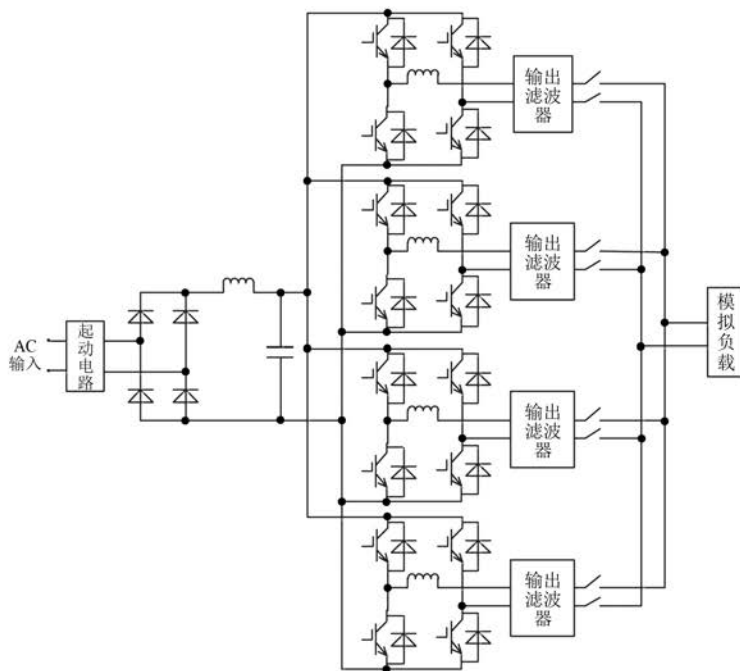


图 1 H 桥并联 DC/DC 变换器基本结构

1.2 双脉宽调制

假定电容上端“+”下端“-”,等效电路如图 2 所示。VT1 和 VT3 为方向管,用于控制电容输出极性;VT4 和 VT2 为斩波管,用于调整电容两端输出电压。

图 2 共有两种工作模态:VT1 和 VT4 同时导

通、VT1 导通 VT4 关断。VT1 和 VT4 同时导通如图 3(a) 所示,电流由直流电源“+”端流出,经 VT1、电感 L 向电容 C 和负载供电,经 VT4 流向直流电源“-”端,输出电压 U_c 为上“+”下“-”。VT1 导通、VT4 关断如图 3(b) 所示,电流经 VT1、电感 L 和电容 C (负载)以及 VT3 续流,在 VT4 下一个

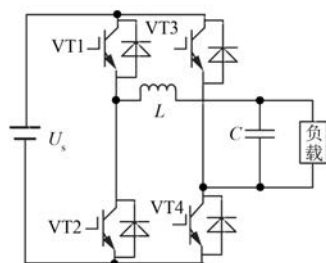


图2 电容上端“+”下端“-”等效电路

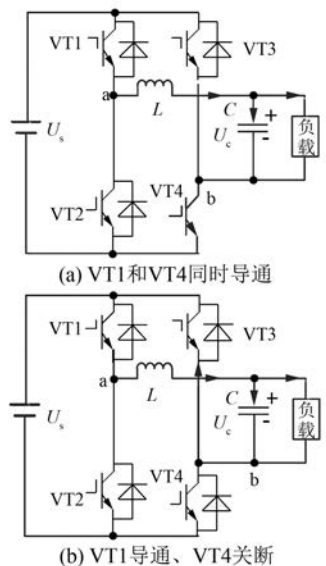


图3 VT1 和 VT4 不同开关状态工作模式

开关周期导通前,若电感中的电流不为0,则为续流模式;若电感电流为0,则为断流模式。

假定功率器件、电感和电容均为理想器件,线路中等效阻抗为零,从图3可以获得在一个开关周期 T_s 内电感电流和输出电压如图4所示。

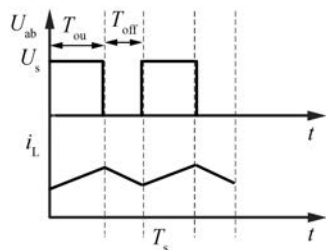


图4 电感电流和输出电压波形(连续模式)

由图4可得输出电压 U_{ab} 及其平均值 U_c 为

$$U_{ab} = \begin{cases} U_s & kT_s \leq t \leq T_{on} + kT_s \\ 0 & T_{on} + kT_s \leq t \leq (k+1)T_s \end{cases}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$U_c = \frac{T_{on}}{T_s} U_s \quad (2)$$

式中: T_{on} ——一个开关周期内导通时间。

2 软开关技术

2.1 软开关技术对比分析

软开关技术包括有源软开关和无源软开关。由于有源软开关需要额外增加功率器件,使得系统控制的复杂程度增加,为此,只针对无源软开关技术性能进行对比分析。

为了在开关动作时保护开关管,使其不受到过压或者过流的损坏,出现了使用缓冲电路的软开关技术。RCD 缓冲电路结构简单^[10],是最早出现的无源软开关电路,如图5(a)所示。电阻 R 用于吸收器件反向恢复电流所产生的多余电能,并转变成热量散发。但软开关结构增加了电子装置散热负担,且开关损耗依然存在,对许多要求高的工作场合并不适用。为此,提出了改进的 RCD 缓冲电路,通过引入电感来抑制电流的上升速率,如图5(b)所示。此种电路结构仍存在开关转换过程中电阻上的能量消耗和功率电阻,因此仍属于有损耗的无源软开关结构。

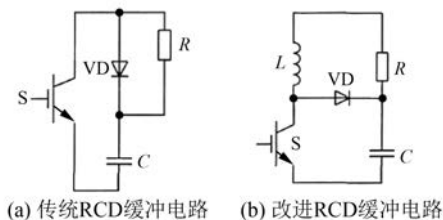


图5 传统和改进 RCD 缓冲电路

Ninomiya 等^[11]提出了一种新的无损缓冲电路,使其更适合于 DC/DC 变换器,如图6所示。图6中电感 L_r 与 Boost 二极管串联,用于抑制反向恢复电流。关断阶段的能量恢复路径也根据变换器的输出而改变。此种无源无损 Boost 缓冲电路存在开关管应力大和器件多等问题。

Smith 等^[12]对软开关技术进行了深入的研究和总结分析,提出了一个相对完整的体系用于设计无源无损软开关拓扑结构。根据最小应力的不同,可分为最小电压应力(MVS)软开关单元和非最小电压应力(NMVS)软开关单元。这些新型软

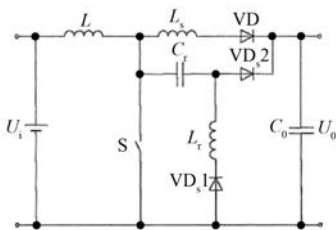


图6 改进无损缓冲电路

开关拓扑结构具有电路结构简单、元器件数量少和系统效率高等特点。典型的最小应力软开关管单元电路如图7所示。

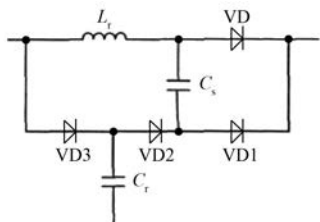


图7 最小应力软开关管单元电路

国内关于软开关的研究也比较多,大多集中在有源软开关的研究上,比如全桥变换器的软开关技术,对于无源无损技术关注较少。相比较而言,Smith等^[12]提出的软开关是近年来较新、较完整的研究成果,具有拓扑简单、适合模块化工作且附加应力小等优点。因此,本文在该软开关拓扑结构的基础上进行改进,以便其适用于双脉宽调制下的H桥DC/DC变换器。

2.2 基于双脉宽调制的软开关技术

图8为无损缓冲电路用于单个H桥DC/DC变换器的软开关拓扑结构图。其由输入电源 U_i 、主开关管 S_g 、续流二极管VD、滤波电感 L 、滤波电容 C 、负载电阻 R 、缓冲电感 L_r 、缓冲电容 C_r 、储能电容 C_s 和储能电感 L_s 组成。其中,缓冲电感 L_r 实现开关管的零电流导通,缓冲电容 C_r 实现开关管的零电压关断,储能电容 C_s 和储能电感 L_s 实现开关过程中能量的存储与转移,通过二极管辅助完成能量的恢复。

3 仿真研究

为了验证最小应力软开关技术是否适用于双脉宽调制并联H桥DC/DC变换器,搭建了仿真模型。仿真参数设置为:输入电压DC 200 V,开

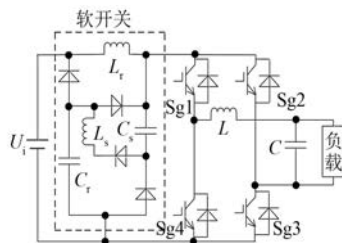


图8 单个H桥DC/DC变换器软开关结构

关频率10 kHz,负载电阻 $R=10\ \Omega$,滤波电感 $L=10\text{ mH}$,滤波电容 $C=1\ 000\ \mu\text{F}$,缓冲电感 $L_r=40\ \mu\text{H}$,储能电感 $L_s=5\ \mu\text{H}$,缓冲电容 $C_r=10\text{ nF}$,储能电容 $C_s=1.2\ \mu\text{F}$ 。

图9为单个H桥模块故障仿真波形,从上到下依次为开关管的电流、电压和驱动脉冲。从图9可以看出,开通时开关管的电流和电压波形的交叠区域较小,损耗减小,实现了零电流开通。在关断瞬间,加在漏源极之间的电压上升速度明显减慢,同时电压和电流的交叠区域减小,损耗减少,实现了零电压关断。

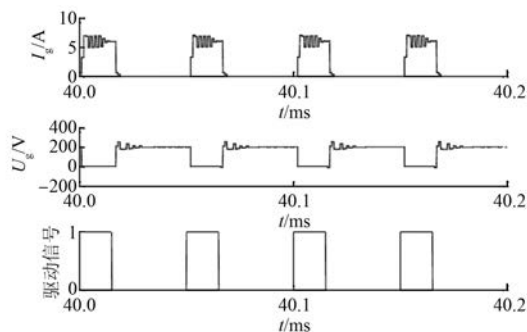


图9 单个H桥模块故障输出电压、电流和驱动脉冲波形

图10为2个H桥模块故障仿真波形,从上到下依次为模块1开关管的电流、电压和模块2开关管的电流、电压以及共同的驱动脉冲。从图10可以看出,开通时开关管的电流和电压波形的交叠区域同样较小,实现了零电流开通。在关断瞬间,加在漏源极之间的电压上升速度明显减慢,同时电压和电流的交叠区域减小,损耗减小,实现了零电压关断。

因此,采用改进无损缓冲的软开关技术用于H桥并联的DC/DC变换器可以获得较好的开通关断性能,实现了系统软开关的设计要求,降低了功率损耗。

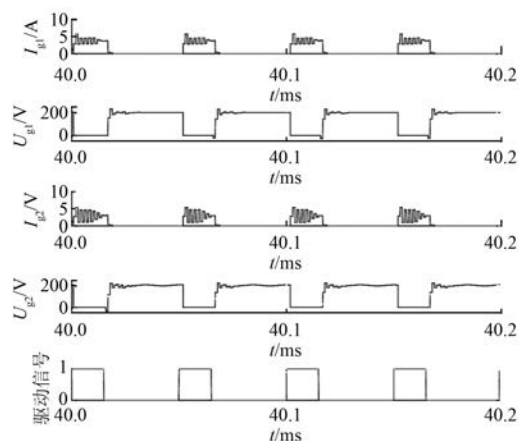


图 10 2 个 H 桥模块故障输出电压、电流和驱动脉冲波形

4 结 语

针对双脉宽调制策略开关管损耗大的问题,对已有的软开关技术进行了对比分析,提出采用基于最小应力的软开关技术,并对其用于双脉宽调制 H 桥并联 DC/DC 变换器进行了仿真研究和分析,得出如下结论:

(1) 最小应力软开关技术用于双脉宽调制下的 H 桥并联 DC/DC 变换器可以实现开关管的零电压开通和零电流关断。

(2) 最小应力软开关技术结合双脉宽调制用于 H 桥并联 DC/DC 变换器,在某一个或两个 H 桥模块出现故障时可以获得较好的软开关性能。

【参考文献】

- [1] NI L, PATTERSON D J, HUDGINS J L. High power current sensorless bidirectional 16-phase interleaved DC-DC converter for hybrid vehicle application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (3): 1141.
- [2] DE D, KLUMPNER C, PATEL C, et al. Modeling and control of a multi-stage interleaved DC-DC converter with coupled inductors for super-capacitor energy storage system[J]. IET Power Electronics, 2013, 6(7): 1360.
- [3] HEGAZY O, VAN MIERLO J, LATAIRE P. Analysis, modeling, and implementation of a multidevice interleaved DC/DC converter for fuel cell hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4445.
- [4] 侯川川,仇志丽,刘建华.双有源桥轻载下的软开关研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(8): 23.
- [5] DUDRIK J, BODOR M, PASTOR M. Soft-switching full-bridge PWM DC-DC converter with controlled output rectifier and secondary energy recovery turn-off snubber [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4116.
- [6] 张希,许建平,包伯成,等.固定关断时间控制 Buck 变换器斜坡补偿技术及其机理研究[J].中国电机工程学报,2014,34(36): 6426.
- [7] TAO C, FAYED A. Output spectrum analysis of buck converter in DCM with PFM control[C]//2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2012: 2267.
- [8] ZHANG X, MAKSIMOVIC D. Multimode digital controller for synchronous buck converters operating over wide ranges of input voltages and load currents [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(8): 1958.
- [9] 相春蕾,崔玉龙.无线电能传输 DC/AC 变换器的软开关可靠性分析[J].电器与能效管理技术,2017 (15): 10.
- [10] HUA G, LEE F C. Soft-switching techniques in PWM converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(6): 595.
- [11] NINOMIYA T, TANAKA T, HARADA K. Analysis and optimization of a nondissipative LC turn-off snubber [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(2): 147.
- [12] SMITH K M, SMEDLEY K M. Engineering design of lossless passive soft switching methods for PWM converters. I. With minimum voltage stress circuit cells[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(3): 336.

收稿日期: 2018-12-12