

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.5.25

中图分类号:TM46

文献标志码:A

交错并联双向直流变换器的一种新型相频控制策略

杨玉岗,江 威,苗 闯,张书淇

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院,葫芦岛 125105)

摘要:为解决多相 DC/DC 变换器轻载工作效率低的问题,提出了一种用于多相交错并联 DC/DC 变换器的相频结合的控制方式,该控制方式能够有效提高变换器的中轻载效率。多相交错并联 DC/DC 变换器采取减少工作相数的方式降低开关管损耗,提高一定负载范围内的效率。在 PFM 频率控制技术的基础上,通过多频控制技术,提高变换器的轻载效率。而针对更轻负载变换器采取 PSM 频率控制技术,提高变换器的能量传输效率。相频控制的结合应用能够拓宽变换器的高效运行区间,提高变换器全负载范围内的效率。最后,通过实验验证了理论推导的正确性。

关键词:相频控制;多相交错并联;轻载效率

Novel Phase-frequency Control Strategy for Interleaved Parallel Bidirectional DC/DC Converter

YANG Yugang, JIANG Wei, MIAO Chuang, ZHANG Shuqi

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To solve the problem of low efficiency of a multi-phase DC/DC converter in light-load status, a phase-frequency control method is proposed for a multi-phase interleaved parallel DC /DC converter, which can effectively improve the efficiency of the converter in middle- and light-load statuses. The number of working phases is reduced to lower the switch tube loss, and thus improve the efficiency of the multi-phase interleaved parallel DC/DC converter in a certain load range. On the basis of PFM frequency control technology, multi-frequency control technology is used to improve the efficiency of the converter in light-load status. Meanwhile, PSM frequency control technology is used to improve the energy transfer efficiency of the converter in lighter-load status. The phase-frequency control can broaden the high-efficient operation range of the converter, and improve its efficiency in a full-load range. Finally, the correctness of the theoretical deduction was verified by experiments.

Keywords: phase-frequency control; multi-phase interleaved parallel; efficiency of light-load status

双向 DC/DC 变换器以其体积小、重量轻、成本低、易于控制等优点越来越多地应用于能量需要双

向流动の場合^[1]。交错并联技术的应用对进一步减小滤波电感和电容、降低功率开关的电应力和热应力、减小电流纹波、减小电感损耗、改善电路的动态和稳态性能、增加功率密度及提高可靠性等有着重要的作用^[2-4]。为了获得最高的满载效率,通常在变换器中按照最大工作电流进行硬件电路的设计。然而在实际应用中,输出的可变性会导致变换器工作状态的不稳定,并且多相并联在增大变换器的输出功率、减小输出总电流纹波的同时,还会增加轻载时的开关损耗进而降低变换器的效率,所以轻载效

收稿日期:2016-11-29;修回日期:2018-03-21

基金项目:国家自然科学基金委员会-山西省人民政府煤基低碳联合基金资助项目(U1510128);辽宁省教育厅重点实验室基础研究资助项目(LZ2015045)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China-Shanxi Provincial People's Government Coal-based Low-carbon Joint Fund Project(U1510128); Liaoning Provincial Department of Education Key Laboratory of Basic Research Project(LZ2015045)

率低又成为多相并联变换器的一个突出问题。针对此问题,本文在 4 相交错并联双向 DC/DC 变换器中采用相数控制,即根据负载大小动态调整变换器相数的方法,有效减小开关损耗,提高变换器的轻载能量传输效率。然而,当变换器单通道运行时,就不能再通过减小相数的方式减小开关管的损耗。

为此,本文结合现有单通道变换器的频率控制技术^[5-9],提出一种能够适用于多相交错并联双向 DC/DC 变换器的频率控制策略,该策略能够有效提高单通道更轻负载时变换器的效率。最后,通过相数控制与频率控制相结合的方式,实现了全负载范围内变换器的高效运行。

1 相频控制方式的控制策略

1.1 多相交错并联双向直流变换器的相数控制

图 1 为 4 相交错并联直流变换器拓扑结构。变换器正常工作运行时,各通道均对称运行,当变换器工作相数发生改变时,剩余相若按照原有的相移方式继续运行,变换器的输出将不再平衡,并且总输出电流波形也会因为各相电流不平衡特性的叠加导致输出性能变差,交错并联的优点将会大打折扣。因此,当改变变换器的控制脉冲减小时,相应地还要调整剩余各通道的相位差,使其能够达到最佳的输出性能。

当变换器满载运行时,4 通道变换器的每一相

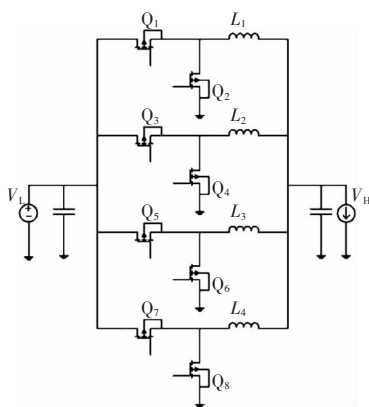


图 1 4 相交错并联直流变换器拓扑结构

Fig.1 Topological structure of four-phase interleaved parallel DC/DC converter

中所有的主开关管均投入工作状态,如图 2 所示。当运行于 Buck 模式下时,4 路主开关管 Q_1 、 Q_3 、 Q_5 、 Q_7 依次导通,导通相位相差 90° ,其运行能对称性能够达到交错并联技术的要求。

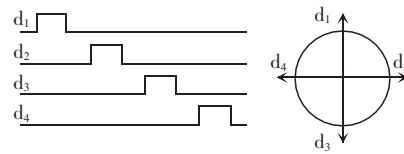


图 2 4 通道主开关管导通图

Fig.2 Conduction diagram of four-channel main switch tube

当负载功率从额定功率的 100%降低到 75%时,若按照 4 相通道同时运行,则流过各相的电流均会降低;当功率降至 75%以下时,若此时关闭 1 条通道,将相数从 4 相减小至 3 相,则流过各相的电流将重新增大到满载额定电流的 25%,此时相位也将发生变化,剩余三相的主开关管的导通角互差 120° ,如图 3 所示。

当负载功率从额定功率的 75%降至 50%时,如上面操作,令再关闭其中 1 条通道,相数减至 2 相,各相流过的电流重新达到额定电流的 25%,这时导通角再次发生变化,互差 180° ,如图 4 所示。同理,当负载功率降低到额定功率的 25%时,需要继续减少相数至单相。

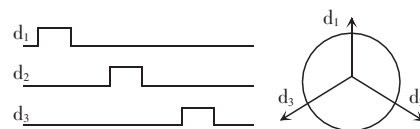


图 3 3 通道主开关管导通图

Fig.3 Conduction diagram of three-channel main switch tube

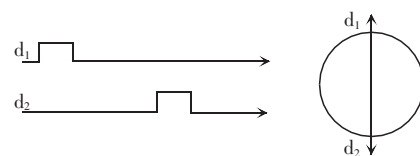


图 4 2 通道主开关管导通图

Fig.4 Conduction diagram of two-channel main switch tube

利用相数控制技术能够有效提高变换器在非满载情况下的工作效率。当相数发生改变后,变换器的总电感电流纹波如表 1 所示。表中, f 为开关管的开关频率; d 为主开关管占空比; L 为电感; V_{in} 为变换器输入电压。

表 1 总电感电流纹波

Tab.1 Total inductance current ripple

相数	总电感电流纹波
4	$\frac{(1-4d)d}{Lf} V_{in}$
3	$\frac{(1-3d)d}{Lf} V_{in}$
2	$\frac{(1-2d)d}{Lf} V_{in}$
1	$\frac{(1-d)d}{Lf} V_{in}$

1.2 多相交错并联双向直流变换器的频率控制

相数控制是实现频率控制的基础,当变换器相数减小到单相时,不能再通过减小相数的方式提高效率。变频控制技术是指变换器的周期不固定,通过改变脉冲宽度,或者改变开关管的关断时间,改变变换器的控制频率,也就是脉冲频率调制 PFM (pulse frequency modulation) 技术;脉冲跨周期调制 PSM (pulse skipping modulation) 技术是通过控制频率和占空比恒定,仅随着输出电流的变化,跳过一些控制脉冲,在跳过控制脉冲这段时间内,开关管不工作,通过改变跳过控制脉冲数量来对变换器进行开关控制。不同频率控制方式如图 5 所示。

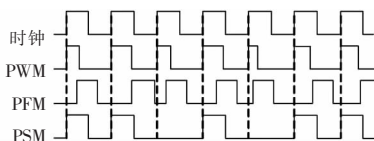


图 5 不同频率控制方式

Fig.5 Different frequency control modes

采用多频控制的基本思路为:在开关管满足满载额定功率运行条件时,采用较高开关频率的传统 PWM 控制方式;在开关管运行于中等额定功率时,在不影响电子元器件性能的情况下,采用多个控制频率对变换器进行控制,减少开关损耗从而提高变换器的效率;在开关管运行于极轻额定功率时,采

用 PSM 控制方式进一步减小变换器的开关频率,从而解决轻载传输效率低的问题。和传统的 PFM 控制技术相比,多频控制技术控制简单,仅仅需要产生几种频率的 PWM 控制脉冲,在每个负载段,变换器都是采用稳定的 PWM 脉冲来控制,工作时的电感电流纹波稳定。

2 相频控制方式的流程控制方法

2.1 通道数控制流程

通道数控制流程如图 6 所示,给控制电路通电后,单片机开始执行初始化设置。将定时器中断周期设定为 0.5 ms,每隔 0.5 ms 进行 10 次 A/D 采样,将 10 次采样结果进行均值滤波,得到更准确的电压/电流数据。初始化设置执行完毕后,采样低压侧电流 I_L ,并与已经测量出的通道数控制点电流进行比较。若满足 $I_3 < I_L < I_4$ 条件,变换器工作状态为 4 相交错并联运行;若满足 $I_2 < I_L < I_3$ 条件,变换器工作状态为 3 相交错并联运行,各相相位差变成 120° ;若满足 $I_1 < I_L < I_2$ 条件,变换器工作状态为 2 相交错并联运行,相位差变成 180° ;若满足 $0 < I_L < I_1$ 条件,变换器只有 1 相处于工作状态。循环采样与判断,执行通道数控制策略。

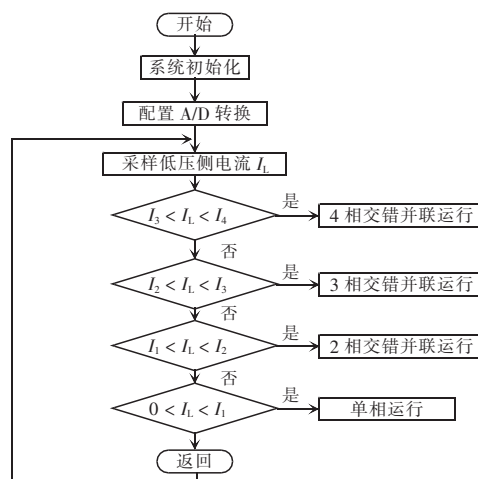


图 6 通道数控制流程

Fig.6 Flow chart of control of channel numbers

2.2 频率控制流程

频率控制流程如图 7 所示。频率控制的思路 and

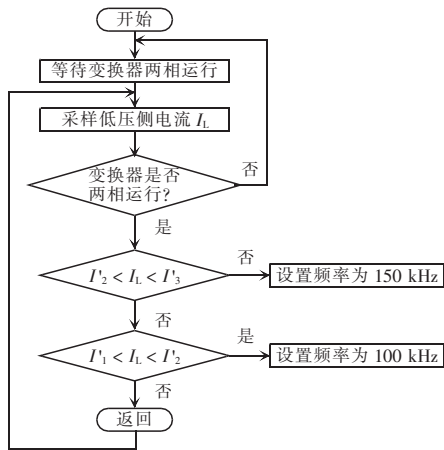


图 7 频率控制流程

Fig.7 Flow chart of frequency control

通道数控制基本类似,区别在于频率控制仅仅是在变换器两相运行后才执行。在程序中设定一个变换器两相运行时的标志位,只要判断标志位置 1 后,才调用频率控制子函数,当标志位清零后,再调用通道数控制子函数。根据低压侧电流的变化将变换器的工作频率分别设定为 150 kHz 和 100 kHz。

2.3 FPGA 控制流程

现场可编程门阵列 FPGA (field-programmable gate array) 主要承担改变 PWM 的频率、相位角和控制方式等职责,只要当 FPGA 接收到单片机发出的信号,就立即调用相应的子函数来改变频率、相位角或者控制方式。其控制流程如图 8 所示。实时读取端口 B_0 、 B_1 的数据从而改变 PWM 的频率;读取端口 C_0 、 C_1 的数据改变 PWM 的相位角;读取端口

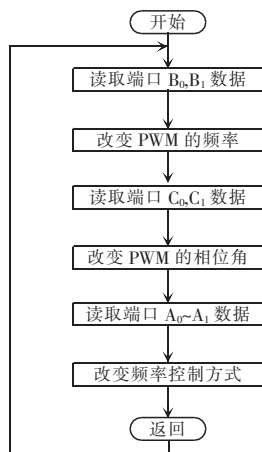


图 8 FPGA 控制流程

Fig.8 Flow chart of FPGA control

A_0 、 A_1 的数据,改变频率控制方式。这里需要注意的是,FGPA 的不同进程模块是并行执行的,即在同一个时钟沿到来时,读取端口数据的同时执行的,这样保证了与单片机实时地通讯,提高变换器的响应速度。

3 实验验证

实验样机如图 9 所示。其中,控制电路的供电电压为 12 V,由 EM1719A 直流稳压源(0~32 V,0~2 A)提供;主电路输入电压由 IT6154 大功率直流电源(0~60 V,0~9 A)提供,输出接电子负载 IT8513C(120 V,120 A);额定高压侧电压 $V_{in}=12$ V,额定低压电压 $V_o=4.8$ V。

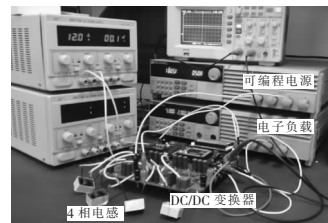


图 9 实验样机

Fig.9 Experimental prototype

3.1 相数控制实验

图 10 为 4 相交错并联 DC-DC 变换器切相时工作在临界状态下的相电感电流波形,图 11 是临界状态下总输出电流波形,电流测试采用 CHB-25NP,匝比 $n=1\ 000/1$,检测电阻 $R_M=1\ 000\ \Omega$,通过示波器测试的电流 $i=vn/R_M$ 。

图 12 是变换器在不同相数工作时的效率曲线。由图可见,当输出电流相同、工作相数不同的情况下,变换器的效率不同,不论几相工作,变换器的效率随着变换器输出电流的逐渐增大,呈现出先提高后降低的现象。随着相数增加,轻载效率降低,最高效率点对应的电流增大,高效负载段增加;随着电流变化,当 3 相工作效率高于 4 相时变换器转换为 3 相工作,当 2 相工作效率高于 3 相时变换器转换为 2 相工作,当单相效率高于 2 相时变换器转换为单相工作,工作相数的减少导致开关损耗的降

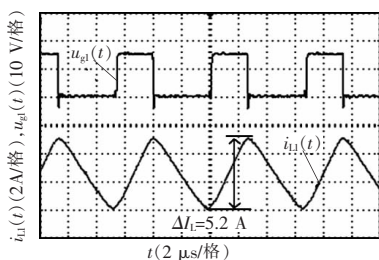


图 10 4相相电流实验波形

Fig.10 Experimental waveform of four-phase phase current

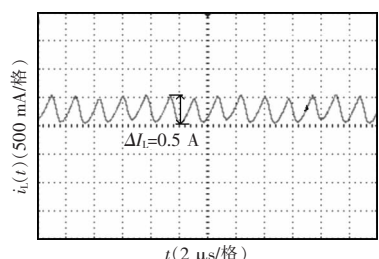


图 11 4相电感总输出电流实验波形

Fig.11 Experimental waveform of total output current of four-phase inductor

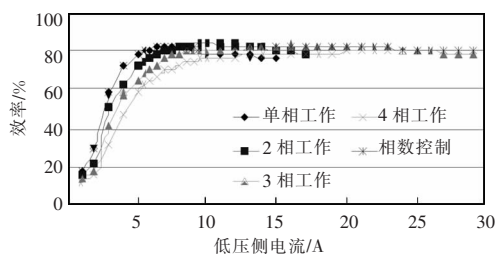


图 12 不同相数工作的效率曲线

Fig.12 Efficiency curves with different numbers of working phases

低,进而电能传输的效率得到提高。

3.2 频率控制实验

图 13 是 PSM 控制方式的驱动波形,当变换器转换为单相运行时,在极轻负载下,采用 PSM 控制方式,有规律地跳过一些时钟周期,使得开关管在一个周期内的导通次数减小,从而降低开关管的导通损耗。图 14 为单相工作时不同频率下变换器轻载范围内的效率,可见,降低控制频率,能够提高变换器的轻载效率。

图 15 是 $f=100\text{ kHz}$ 时 PSM 和 PWM 控制方式下变换器的电能传输效率。由图可明显看出,在低压侧电流为 $0\sim 2.5\text{ A}$ 时,变换器的电能传输效率采

用 PSM 控制方式高于采用 PWM 控制方式;对比图 14 可见,变换器在 PWM 控制方式下,当 $f=100\text{ kHz}$ 时电能传输效率高于 $f=150\text{ kHz}$ 的电能传输效率。

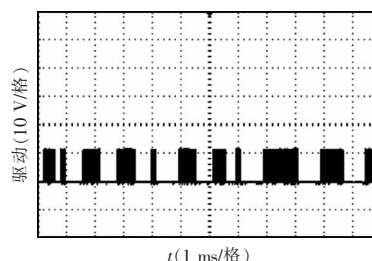


图 13 单通道变换器 PSM 控制方式实验波形

Fig.13 Experimental waveform of one-channel converter under PSM control

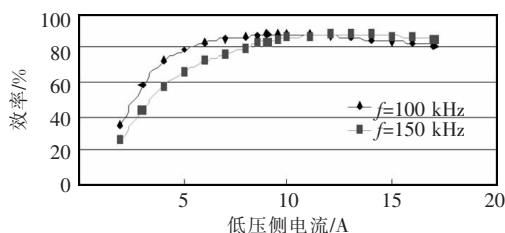


图 14 单通道变换器不同频率轻载的效率

Fig.14 Light-load efficiency of one-channel converter at different frequencies

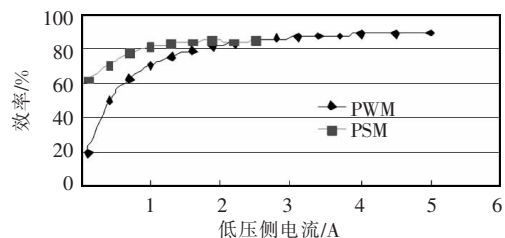


图 15 $f=100\text{ kHz}$ 时不同控制方式效率

Fig.15 Load efficiency in different control modes when $f=100\text{ kHz}$

3.3 多相交错并联双向直流变换器控制实验

将相数控制技术、多频控制技术和 PSM 频率控制技术相结合,综合提高变换器的电能传输效率。图 16 是采用本文所提控制方案得到的 4 相交错并联 DC-DC 变换器全负载范围内的效率曲线。从图中能够明显看出,轻载效率有了显著的提高,因而达到了变换器全负载范围内保持较高的能量传输效率的目的。

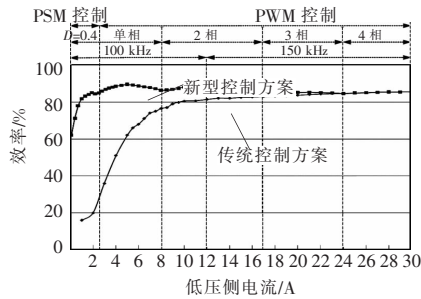


图 16 频率控制变换器效率曲线

Fig.16 Efficiency curves of converter under frequency control

4 结语

本文将相数控制、多频控制及 PSM 控制方法结合起来,拓宽了变换器的高效运行区间,提升了轻载电能传输效率。该控制方法从设计和成本的角度来讲,能够有效地提高全负载范围内的效率,而且元器件寿命也会得到一定的延长。

参考文献:

- [1] 张方华. 双向 DC-DC 变换器的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
Zhang Fanghua. Research on bi-directional DC-DC converter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese).
- [2] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 39-46.
Lu Zhiguo, Zhu Wanping, Liu Jiefeng, et al. A novel interleaved parallel bidirectional DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 39-46(in Chinese).
- [3] Yang Yugang, Yan Dong, Lee F C. A new coupled inductors design in 2-phase interleaving VRM[C]. IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. Wuhan, China, 2009: 344-350.
- [4] 袁冰. 高效率大负载高集成电源芯片设计技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
Yuan Bing. Research on the design techniques of high-efficiency, high-current and high-integrated power chips[D]. Xi'an: Xidian University, 2009(in Chinese).

- [5] 石刚, 唐圣兰, 罗萍. 一种离散频率的 PFM 控制方式[J]. 微电子学, 2006, 36(3): 304-306.

Shi Gang, Tang Shenglan, Luo Ping. Design of a discrete pulse frequency modulation[J]. Microelectronics, 2006, 36(3): 304-306(in Chinese).

- [6] 罗萍, 李肇基, 熊富贵, 等. PSM 开关变换器的平均模型与特性分析[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 19-23.

Luo Ping, Li Zhaoji, Xiong Fugui, et al. Average mode of PSM switching converter and analysis of its characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 19-23(in Chinese).

- [7] 罗全明. 基本 DC/DC 变换器的组合拓扑及控制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

Luo Quanming. Study on the combined topologies and control methods of the basic DC/DC converter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008(in Chinese).

- [8] Hartnett K J, Hayes J G, Egan M G, et al. CCTT-core split-winding integrated magnetic interleaved boost converter for renewable energy applications[A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013: 635-642.

- [9] 马杰, 杨玉岗, 马云巧. 交错并联双向 DC/DC 变换器 Buck 模式下的耦合电感设计规则[J]. 电源学报, 2014, 12(3):80-86.

Ma Jie, Yang Yugang, Ma Yunqiao. Coupled inductor design rule for interleaving bidirectional DC/DC converter in Buck mode[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(3): 80-86(in Chinese).



杨玉岗

作者简介:

杨玉岗(1967-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:电力电子技术及其磁集成技术,E-mail:yangyugang21@126.com。

江威(1991-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力电子技术及其磁集成技术,E-mail:455133924@qq.com。

苗闯(1986-),男,博士,研究方向:工程机械智能控制系统,E-mail:cmiao2005@163.com。

张书淇(1992-),女,硕士研究生,研究方向:电力电子技术及其磁集成技术,E-mail:sqzhang2010@163.com。