

同步整流技术的特点与分析比较

宋辉淇, 林维明

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建, 福州 350002)

摘要: 同步整流技术在低压大电流开关模块电源领域得到了广泛的应用。文章从同步整流器件、主要电路结构以及工作方式等三个不同的角度, 对同步整流技术进行了分析和比较, 以便能够更好的理解和应用同步整流技术。文章最后给出了采用 PWM 控制、输出 3.3 V/8 A 的同步整流反激变换器的实验波形。

关键词: 同步整流技术; 同步整流 MOS 管; 电路拓扑; 驱动方式

中图分类号: TN703

文献标识码: A

The Comparison and Analysis of Synchronous Rectification

SONG Hui-qi, LIN Wei-ming

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The synchronous rectification have been analyzed and compared from several different points in this article. It is convenient to understand the synchronous rectification and applied it in practice. In the end of this paper, a hardware prototype of 25W(3.3 V/8 A), which applied the synchronous rectification to the flyback converter, has been built and some waveforms have been given.

Key words: synchronous rectification; devices; topologies; driving methods

0 引言

随着计算机、通信技术的发展, 低压大电流开关电源越来越成为目前一个重要的研究课题。而效率问题始终是开关电源发展的一个主旋律^[1], 同步整流技术的出现, 正是顺应了这一发展趋势。从出现至今, 国内外许多著名的大公司和研究机构都不断致力于该技术的研究, 为高效率二次电源的开发和应用提供了强大的技术基础。因此, 深入分析和掌握同步整流技术特点, 对于该技术的优化与发展及相关产品的开发具有十分重要的意义。

目前, 同步整流技术在 DC/DC 模块电源领域得到了广泛的应用。随着 MOSFET 设计工业技术的进步, 使当今的 MOSFET 的性能大大提高。例如 IR 公司的 MOS 管 IRF7821, 其最大导通电阻仅为 9.1 m Ω , 开关时间小于 10 ns, 栅电荷仅 9.3 nC, 而且在逻辑电平下驱动即可。同步整流技术几乎可以应用到各种电路拓扑, 并且可以与其它技术相结合, 从而形成了各具特色的同步整流技术。例如, 有源箝位技术与同步整流技术结合, 实现了软开关同步整流技术, 进一步降低了同步整流 MOS 管的开关损耗, 效率也得到了进一步的提高。同步整流技术的关键则在于同步整流管的驱动控制上, 不同的驱动方式对效率的影响是有很大的

差别的。鉴于目前同步整流技术应用的广泛性, 本文从器件、电路结构以及工作方式等三个不同的角度对同步整流技术进行了较为全面的分析和比较, 以利于更好的理解和掌握同步整流技术。

1 同步整流器件的特点

同步整流技术就是采用低导通电阻的功率 MOS 管代替开关变换器中的快恢复二极管, 起整流管的作用, 从而达到降低整流损耗, 提高效率的目的。通常, 变换器的主开关管也采用功率 MOS 管, 但是二者还是有一些差异的。

功率 MOS 管实际上是一个双向导电器件^[2], 其完整的漏源伏安特性应包括第一象限以及第三象限, 是基于原点对称的, 如图 1 所示。其中: 第一象限表示 MOSFET 的正向导电特性, 第三象限表示 MOSFET 的反向导电特性; 同步整流技术正是利用了 MOSFET 的这种双向导电特性来达到提高整流效率的目的。

由于工作原理的不同, 而导致了其他一些方面的差异。例如: 作为主开关的 MOS 管工作在第一象限, 通常都是硬开关, 因此要求开关速度快, 以减小开关损耗; 而作为整流/续流用的同步 MOS 管, 则要求 MOS 管具有低导通电阻、体二极管反向恢复电荷小、栅极电阻小和开关特性好等特点。因此, 虽然两者都是 MOS 管, 但是它们的工作特性和损耗机理并不一样, 它们的性能参数要求也不一样, 认识这一点, 对于如何正确选用 MOS 管是有益的。

收稿日期: 2006-01-11

作者简介: 宋辉淇(1981-), 男, 福建人, 硕士研究生, 研究方向为高频功率磁元件分析与应用。

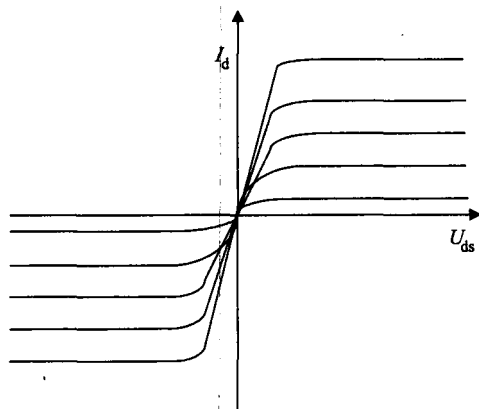


图1 MOSFET的伏安特性曲线

2 主要电路拓扑结构

众所周知,同步整流技术首先应用在非隔离型变换器,典型的应用如图2所示。然而,随着输出电压的不断降低,变换器的输入输出电压变比则不断增大,相应的占空比则不断减小。以同步整流 Buck 变换器为例,当占空比下降到 15~20% 以下时,其性能将严重下降^[3],主要的原因就是占空比太小而导致的。隔离型变换器则能够很好地解决这一问题,而且能够实现输入输出的电隔离,因此在许多隔离型变换器,如正激、反激、半桥、全桥等,也广泛采用同步整流技术,其典型的应用电路如图3所示。

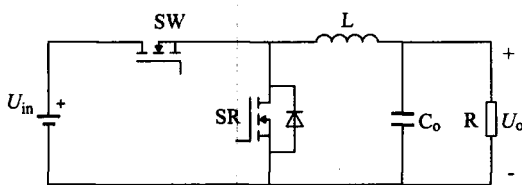


图2 同步整流 Buck 电路

从应用和设计的角度,隔离型变换器和非隔离型变换器对同步整流 MOS 管的设计、性能要求等方面的影响是不同的。

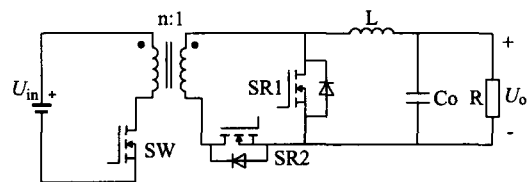
非隔离型变换器主要适用于小功率的场合,以 Buck 电路为例,输出电流通常被限制在 20~25 A;为了满足输出大电流的要求,往往必须采用多个模块并联均流的方法,这不但增加了电路的成本和体积,使可靠性降低,而且不符合开关电源高功率密度的发展趋势。在 Buck 电路中,同步整流 MOS 管通常是由控制 IC 驱动和控制,因此,其驱动信号具有控制时序准确,驱动电压恒定、不受输入或输出电压影响的优点。

近来, TI 公司推出的一款新型的同步整流控制 IC-UCC27221/2,它是通过采用检测同步整流 MOSFET 的开关状态,然后利用数字控制技术调整 MOSFET 开关时间的方法,以获得最优的开通和关断死区延迟时间,突破性的做出 ZVS 的同步整流,从而解决了非对称电路的软开关同步整流问题,使得效率在原

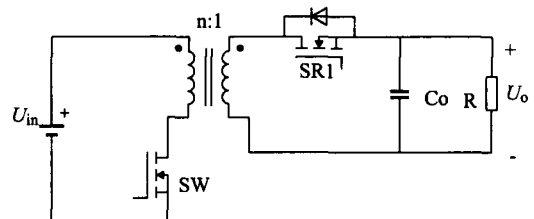
有技术的基础上又进一步提高了 2~4 个百分点。

隔离型变换器则适用于较大功率、对瞬态特性要求不高的场合,高功率密度、高性价比是其主要目标。对于隔离型变换器,同步 MOS 管的驱动方式依拓扑结构的不同而不同,具有较大的灵活性。若按工作方式来划分,可分为自驱动和外驱动。

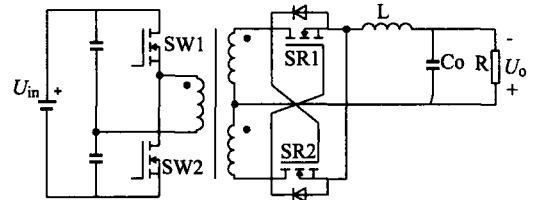
所谓自驱动,它是在变换器中取合适点的电压来驱动功率 MOSFET,一般包括变压器次级绕组的输出端电压和输出滤波电感的电压;自驱动同步整流变换器具有电路结构简单、元器件少的优点,已经普遍用于 5 V 以下的低压小功率输出场合,但是由于它的驱动电压和输入电压、输出电压成比例,而且对于某些电路拓扑,如 Buck、Forward 等,为了避免两个管子发生共通,要求两个 MOS 管的驱动信号之间必需留有一定的死区时间,所以在输入电压变化范围比较大或者输出电压偏低的情况下,为了使同步整流管能够有效的工作,需要对自驱动电路做进一步的改进^[4-5]。



(a) 同步整流 Forward 变换器



(b) 同步整流 Flyback 变换器



(c) 同步整流 Half-Bridge 变换器

图3 同步整流在隔离型变换器中的应用

所谓外驱动,它是由外部的控制电路通过计算或根据电路的状态,确定功率 MOSFET 的驱动时间,然后由一专门的控制 IC 驱动同步整流管。外驱动电路可以提供精确的控制时序,使同步整流管的驱动信号和理想的驱动波形一致,驱动信号不受输入电压或输出电压影响,但是电路结构复杂、所用的元件多、成本高。目前,对于 12 V 以上至 20 V 左右的同步整流,则多采用控制驱动 IC,这样可以收到较好的效果。现已开发出的一些外驱动控制 IC,如 ST 公司的 STSR2 和 STSR3 可以很好地用于正激和反激变换电路,IR 公

司的 IR1175 可直接从变换器副边取得外驱动控制信号, Linear Technology 公司的 LTC1681 和 LTC1698, 用于双管正激电路的同步整流驱动。

若按工作原理来划分, 则可以分为电压型驱动^[6-7], 电流型驱动^[8]和谐振型驱动^[9]等, 有关具体的驱动方案可查阅相关的文献。正是由于驱动方式的多样性, 因此, 在隔离型变换器中, 如何恰当地设计同步整流管的驱动电路, 对于变换器的性能具有十分重要的影响。

3 工作方式的比较

传统的同步整流方案基本上都是 PWM 型同步整流, 主开关与同步整流开关的驱动信号之间必须设置一定的死区时间, 以避免交叉导通, 因此, 同步整流 MOS 管就存在体二极管导通和反向恢复等问题, 从而降低同步整流电路的性能。

下面以 Flyback 变换器为例具体说明, 电路原理图如图 3(b) 所示, 典型的工作波形如图 4 所示。

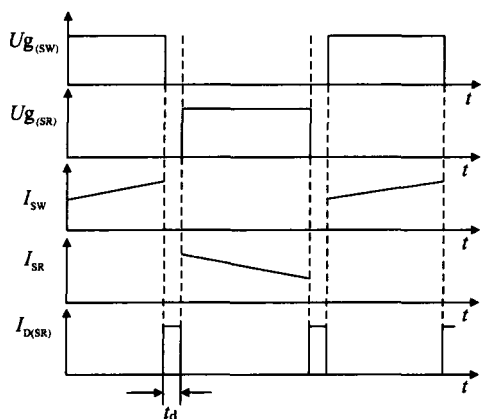


图 4 PWM 型 Flyback 电路的工作波形

由以上的分析和工作波形可以看出, 为了防止两个 MOS 管发生交叉导通, 它们的驱动信号之间必须设置一定的死区时间; 然而, 为了获得高效率, 则又必须尽量减小死区时间、避免同步整流管中的体二极管的导通。这也是在 PWM 型变换器中应用同步整流技术的关键所在, 也是研发人员面临的一大难点。

谐振型同步整流方案是利用 MOS 管在开关过程中发生谐振, 使得 MOS 管能够获得软开关的性能, 同时又能避免体二极管的导通问题。因此, 该方案对驱动信号的时序要求不会十分苛刻, 便于驱动电路的设计; 而且适用范围广, 可适用于隔离型和非隔离型变换器, 所以被认为是一种十分具有发展潜力的技术。

为了便于比较, 仍以 Flyback 变换器为例来说明, 电路原理图和典型的工作波形分别如图 5 和图 6 所示。

由图 6 的工作波形可以看出, 当同步整流管关断时, 谐振电感 L_r 和电容 C_r 开始发生谐振; 当谐振电容

C_r 上的电压过零时, 开通同步整流 MOS 管, 从而实现 ZVS 开通, 而且整个过程不存在体二极管导通的问题, 使得整流效率能够大大提高。其中, 谐振电感 L_r 可利用变压器的漏感, 谐振电容 C_r 可利用 MOS 管自身的寄生电容, 或者并联一个外部电容。虽然采用谐振技术, 但是, 在低输出电压场合, 经过合理的设计, 并不会提高对器件性能的要求, 也不会增加成本。

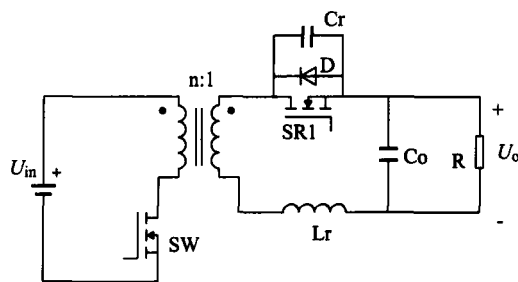


图 5 谐振型同步整流 Flyback 变换器

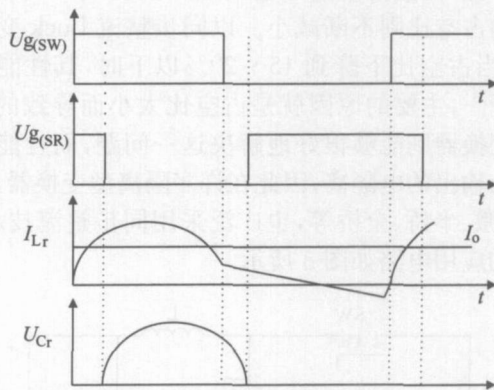


图 6 谐振型同步整流 Flyback 电路的工作波形

4 实验结果

为了充分说明上述的理论分析, 本文设计了一台功率 25 W、采用 PWM 控制的 DC/DC 反激型电源模块, 额定输入 48 V, 输出 3.3 V, 开关工作频率 250 kHz, 主开关管采用 IR 公司的 IRFR15N20D, 同步整流管用 IRF7821TR, 磁芯用铁氧体 FEE-18/8/10C, 按反激变压器设计原则设计。主要波形如图 7 所示, 图中 Ch1 为副边同步整流管的驱动电压波形, Ch2 为原边主开关管的驱动电压波形。为了更清楚的说明变压器原副边 MOS 管的开关过程, 图 7(b) 是图 7(a) 开关过程的一个放大图。

5 总结

本文从器件、拓扑结构、工作方式等几个不同的角度, 对同步整流技术进行了分析和比较, 介绍了该领域取得的一些新进展, 这有助于更全面理解同步整流技术, 为开拓同步整流技术应用的新局面提供了一个良好的理论分析平台。同步整流管的驱动控制仍然是同步整流技术的核心, 不同的驱动方式对同步整流技术

的性能优劣具有决定性的影响,因此,高性价比的同步整流驱动电路仍将是未来电力电子技术工程师努力和追求的目标。

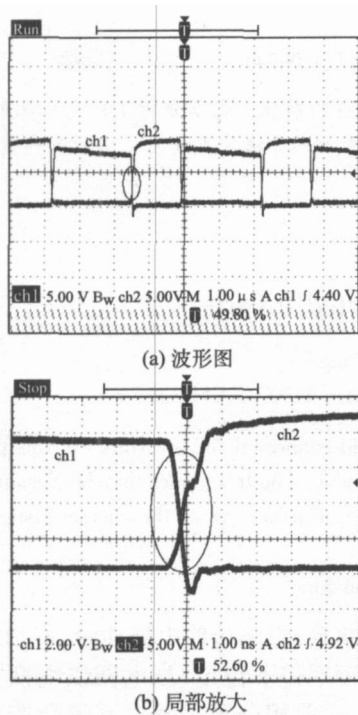


图7 原副边 MOS 管的驱动电压波形

参考文献:

[1] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计[M].北京:电子

工业出版社,2002.

- [2] 胡宗波,张波.同步整流器中 MOSFET 的双向导电特性和整流损耗研究[J].中国电机工程学报,2002,(3):88-93.
- [3] Charles E Mullett. A 5-Year Power Technology Roadmap [C]. IEEE Proceeding of Applied Power Electronics Conference 2004,1:11-17.
- [4] Goran Stojcic, Chien Nguyen. MOSFET Synchronous Rectifiers for Isolated, Board-Mounted DC-DC Converters[C]. IEEE INTEL EC 2000,1:258-266.
- [5] Xie X F, Liu C P, Poon N K, Pong M H. Two methods to Drive Synchronous Rectifier During Dead Time in Forward Topology[C]. IEEE Proceeding of Applied Power Electronics Conference 2000,1:993-999.
- [6] Fernandez A, Sebastian J, Hernando M M, Villegas P. Optimisation of a Self-Driven Synchronous Rectification System for Converters with a Symmetrically Driven Transformer[C]. IEEE Proceeding of Applied Power Electronics Conference 2004,12:858-864.
- [7] Xie X F, Chung H Y, Pong M H. Studies of Self-driven synchronous rectification in low voltage Power Conversion[C]. IEEE PEDS 1999,1:212-217.
- [8] Joe C P Liu, Franki N K Poon, Xie X F, Pong M H. Current Driven Synchronous Rectifier with Energy Recovery Sensor[C]. IEEE PIEMC 2000,1:375-380.
- [9] Ming Xu, Jinghai Zhou, Yang Qiu, Kaiwei Yao, Fred C Lee. Resonant Synchronous Rectification for High Frequency DC/DC Converter [C]. IEEE Proceeding of Applied Power Electronics Conference 2004,2:865-871.

行业信息

电源管理要超越芯片层面

在一个功耗敏感的时代,创新的超低功耗产品已成为电源行业共同的研发方向。一直以来,很多电源管理芯片都是针对电子系统中的应用功能芯片与模块的,目的是使其功耗达到最有效水平。而现在一些厂商开始考虑电源管理芯片对整机总体功耗的作用与影响,设计工程师的目光也不再只是瞄准一些芯片的管脚。

促成这一转变的原因有两个方面:

一是,解决超低功耗,仅仅从元器件上下手,远远解决不了整个系统对低功耗的要求。功耗问题已开始直接或间接地影响到系统的成本、性能与适用性,日益成为半导体元器件设计应用中的一个重要考虑因素。而目前大多数电源管理系统开发者还一直处于器件层面,这就决定了其供电系统只发挥出 85%~86% 的能效。因此,将器件级设计思路提升至系统层面,开发出智能化的电源管理系统,是解决当前基于硅材料电源技术发展瓶颈的重要手段。

二是,IC 设计师要适应新的设计思路,业内行家经常提到的一句话是,做一个 IC 设计师一定要具备“瞻前顾后”的能力。“瞻前”就是要对系统了解,这样研发出来的解决方案才能对整个系统发挥出更高的效率。“顾后”就是对芯片的制造工艺技术要熟悉,研发出来的产品才能良品率高。IC 设计不能仅把眼光局限于芯片本身,而是要考虑芯片在整个系统中所能发挥的作用。否则,一个电源 IC 设计的再好,即便达到 100% 的节能、高效,但整个系统方案不好,也只能是前功尽弃。

过去的 10 年,IC 发展的瓶颈问题是尺寸、速度和成本,然而近年来 IC 发展的重头戏是如何降低功耗。充分用好每一库仑,不仅是消费者所希望的,也是众厂商所期待和追求的。2006 年,让更多的电源厂商给行业带来惊喜。

(摘自:中电网)