

## 同步整流器自驱动方式及其典型整流电路分析

**摘要:** 低电压大电流输出是今后 DC-DC 变换器的一个发展趋势, 基于如何减小低压大电流变换器的整流损耗, 提高整流和转换效率的同步整流技术已成为其核心技术。本文结合最新的研究成果, 阐述了不同同步整流器自驱动方式, 并分析了其典型的整流电路工作原理及特点。

**关键词:** 栅极电荷保持; 栅极电荷转换; 寄生电感耦合电压; 能量反馈电流驱动

### 引言

随着电子技术的迅速发展及各种微处理器、IC 芯片和 DSP 的普及应用, 对低压大电流输出的低压变换器的研究与应用成为日益重要的发展方向。整流损耗是变换器的主要损耗, 采用低导通电阻的 MOSFET 进行整流可以有效地降低整流损耗、提高功率变换器的效率, 于是同步整流技术应运而生。同步整流管驱动可分为自驱动方式

和外部驱动方式, 根据信号性质的不同, 自驱动方式又可以分为电压型驱动方式和电流型驱动方式。

根据驱动信号来源不同, 电压型同步整流器主要有副边绕组电压驱动; 辅助绕组电压驱动和滤波电感耦合电压驱动。副边绕组电压驱动是一种传统的电压自驱动同步整流拓扑; 辅助绕组电压驱动应用最为广泛; 而滤波电感耦合电压驱动则是一种新近提出的驱动方式。电

是较早提出的一种同步整流驱动方式, 驱动信号直接来自变压器次级, 电路结构简单, 其同步整流电路如图 1 所示。驱动电压直接来自于副边输出电压信号, 变压器原边可采用任意的磁复位方式, 整流电路为半波整流拓扑。在以下分析中均认为各器件为理想器件, 电路工作在理想状态, 输出滤波电感足够大, 滤波电路可以等效为恒流源。

**电路工作原理:** 主开关管 S 开通后, 变压器副边存在正向输出电压, 同步整流管  $S_3$  的栅极为高电平而导通,  $S_4$  由于栅极承受低电平而截止, 电流全部流过  $S_3$ ; 当主开关管断开后, 变压器副边变为负向输出电压,  $S_3$  栅极由于承受低电平而截止,  $S_4$  栅极为高电平而导通, 电流转而流过  $S_4$ ; 变压器原边电路磁复位后, 原边和副边电压都变为 0, 从这个时刻到整个工作周期结束的时间为死区时间, 两个同步整流管都截止, 电流流经  $S_4$  的体二极管, 直到开始新的一个工作周期。由于是低电压输出必须使用阈值电压比较低的同步整流

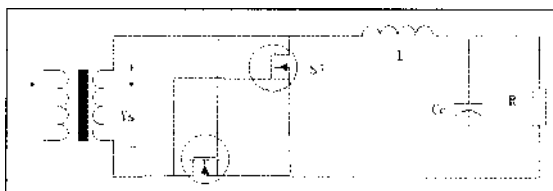


图 1 副边绕组电压驱动同步整流电路

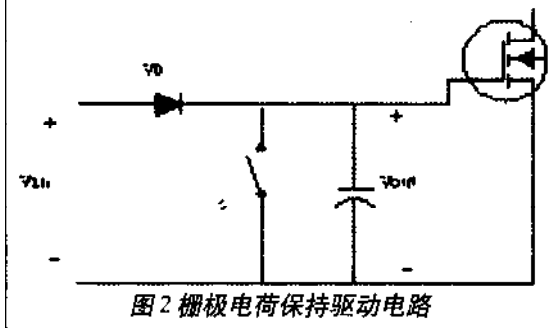


图 2 栅极电荷保持驱动电路

压型同步整流器结构简单, 经济高效, 成为目前受到广泛关注的同步整流器驱动技术。另外, 电流型同步整流器由于其易于并联运行, 具有通用性等优点, 今年也取得新的进展。

### 电压型驱动同步整流器

副边绕组电压驱动同步整流器

副边绕组电压驱动

YRTS UDN  
SISYLANA  
RETUP MOC &  
NOI TA MOT UA SNICTACI NUMMOC  
S MEIUSINE MERUSAE M &  
DEDDER ME  
VLPPUSRE MOP  
SEI GCL ONHICET  
F O NCI TACILPPA  
S WENI TUCUDORP CI

管,且由于死区时间的存在,电路的整流效率受到了影响。

### 辅助绕组电压驱动同步整流器

辅助绕组电压驱动方式中,驱动信号来自辅助绕组输出电压。对于不同的功率 MOSFET 管,驱动电压可能有较大差异,由于辅助绕组的匝数可以根据输出电压的需要而设计,可以有效地驱动不同导通门阈电压的功率 MOSFET 管,因而辅助绕组电压驱动方法成为广泛采用的电压型同步整流驱动方式,是当前同步整流技术的一个研究热点。

### 栅极电荷保持驱动方式

如图2所示电路的工作原理:电路工作前,输入电压  $V_{in}$  为0,开关 S 关断,电容 C 的初始电压为0。当输入电压  $V_{in}$  为正后,通过二极管 D 对电容 C 正向充电。然后  $V_{in}$  再次变为0,二极管由于承受反向电压截止。只要开关管 S 保持关断,电容上的电荷得以继续保持,  $V_{out}$  则维持高电平, MOSFET 管的栅极为高电平而导通。一旦开关 S 导通,电容 C 通过开关放电,  $V_{out}$  变为0。如果电容 C 是同步整流管的栅源寄生电容,那么这就是栅源寄生电容的驱动应用,即栅极电荷保持驱动技术。

图3为栅极电荷保持驱动方式在单端正激式拓扑整流电路中的应用,电路采用有源箝位的磁复位方式。箝位电容  $C_c$  值很大,故可等效为一个直流电流源,  $S_1$  是主开关管,  $S_2$  是辅助开关管。在副边电路,  $S_3$  和  $S_4$  是同步整流管,  $S_5$  用来实现栅极电荷保持在死区时间驱动  $Q_4$ , 在一个工作周期内,其电流基本不变。图3电路整流部分基本工作过程如下:

当主开关管  $S_1$  导通时,输入电压加在变压器原边。副边电路从图

4(a)逐渐过渡到图(b),(c),(d)。输出电流开始从  $S_4$  换流到  $S_3$ 。在  $S_3$  的栅极驱动电压上升到门阈电压之前,  $S_3$  的体二极管导通。该过渡过程为零电压开关 (ZVS),因而可以减少开通损耗。如果忽略二二极管的正向导通压降和同步整流管的导通电阻,同步整流管  $S_3$  的电流从0上升到输出电流的时间为:

$$t_{(on)} = L_{ks} * I_o / V_{in} * N_s * N_p$$

式中,  $L_{ks}$  是变压器副边漏感,  $I_o$  为输出电流,  $V_{in}$  为输入电压,  $N_s$  为副边绕组匝数,  $N_p$  为变压器原边绕组匝数。在主开关管开通的过渡过程中,随着  $S_3$  电流的增加,  $S_4$  电流相应减少。当该过渡过程结束后,输出电流流经  $S_3$  的功率 MOSFET,而不是其体二极管,  $S_4$  因此而关断。

在开通过渡过程结束后,  $S_3$  导通,  $S_4$  关断,输出电流全部流经导通电阻很低的  $S_3$ , 能量从变压器原边传送到副边。变换器的工作过程和传统的正激变换器一样。当主开关管关断时,变压器开始磁复位。变压器副边电路如图4(e)、(f)、(a)所示。在关断过渡过程中,输出电流从  $S_3$  向  $S_4$  换流。  $S_4$  也是 ZVS 开通,

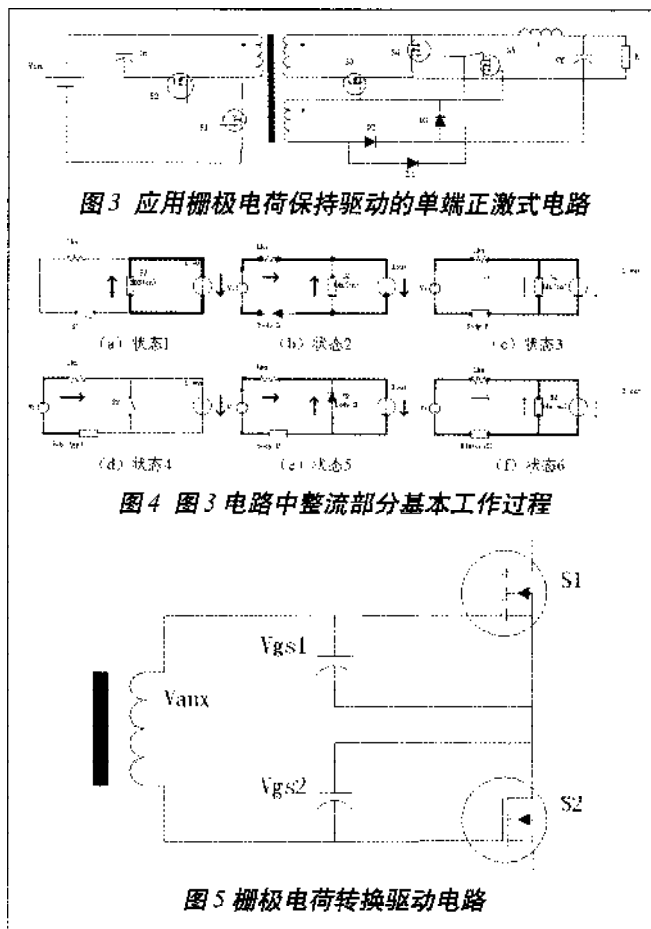


图3 应用栅极电荷保持驱动的单端正激式电路

图4 图3电路中整流部分基本工作过程

图5 栅极电荷转换驱动电路

因为在其栅极驱动电压上升至门阈电压之前,电流流经体二极管。在该过渡过程结束后,  $S_3$  关断,  $S_4$  导通。同步整流管电流从0上升到输出电流的时间为:

$$t_{(off)} = L_{ks} * I_o * N_p / V_{clamp} * N_a$$

式中,  $V_{clamp}$  为箝位电压。

当该过渡过程结束后,  $S_3$  完全关断,  $S_4$  完全导通,输出电流流经  $S_4$  的 MOSFET。当磁复位结束后,该过程结束。变压器副边等效电路如图4(a)所示。辅助绕组电压将为0,  $S_3$  和  $S_5$  的栅极驱动电压也保持为0。因为  $D_1$  反向截止,并且  $S_5$  保持关断,  $S_4$  的栅源寄生电容没有放电途径。栅极电压保持高电平,所以继续导通。这就实现了栅极电荷保持功能。

应注意的是,在由从  $S_4$  换流到

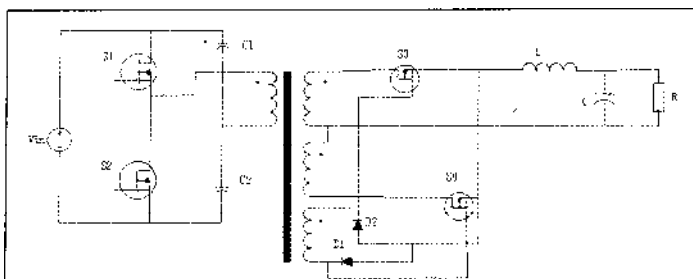


图6 栅极电荷转换驱动半桥变换电路

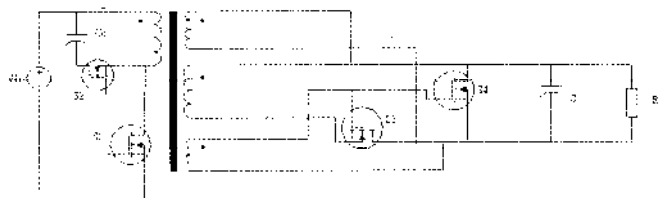


图7 两辅助绕组电压驱动同步整流电路

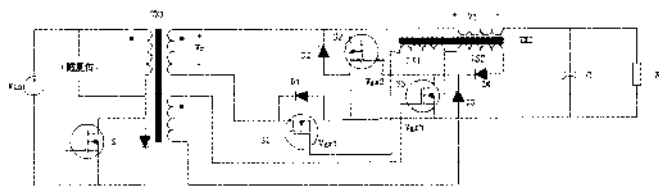


图8 滤波电感耦合电压驱动同步整流电路

$S_3$ 的换流过程中，换流结束之前，必须确保 $S_4$ 的栅极驱动电压降到门电压之下，否则变压器副边会出现环流现象使损耗增加。较好的办法是尽快关断 $Q_4$ ，可以通过降低辅助绕组漏感，采用低门电压和低导通电阻的 $S_5$ 来加速 $S_4$ 的关断。同样在 $S_3$ 到 $S_4$ 的换流过程中，应尽快关断 $S_3$ ，可以采取降低辅助绕组漏感的办法。

栅极电荷保持驱动方式解决了死区时间内续流整流管体二极管的导通问题，在减少整流损耗的同时，提高了整流效率，电路的转换效率也得到了很大的提高。

### ¥ 栅极电荷转换驱动方式

图5所示为栅源寄生电容电压的另一种驱动情形。变压器的辅助绕组分别和两个同步整流管的栅极相连，功率MOSFET的栅源极驱动

电压完全由自己的栅源寄生电容提供。当辅助绕组电压一定时，两个功率MOSFET的栅极驱动电压 $V_{gs}$ 基本上是绕组电压的一半。该驱动电路中流过功率MOSFET栅源寄生电容的电流绝对值相等，即存贮在栅源寄生电容中

的能量由一个转送到另一个，这就是栅极电荷转换驱动技术。

图6为栅极电荷转换驱动的改进电路。在栅源极之间分别并联了一个二极管，辅助绕组电压全部加在了同步整流管的栅源极之间，当一个同步整流管导通时，另一个同步整流管的栅源极负电压的幅值等于二极管的正向导通压降。当辅助绕组电压为0时，两个同步整流管均导通在死区时间内，栅极驱动电压为辅助绕组电压的一半，用于同步整流的低导通电阻的功率MOSFET仍然可以完成导通。

栅极电荷转换电压驱动技术可以用于变压器对称工作的变换器(如推挽变换器、半桥变换器等)；当该驱动技术用于变压器非对称工作的变换器(如正激变换器)，并且占空比不等于0.5时，同步整流管可能

导通，因而在非对称工作的应用受到很大的限制。图5解决了同步整流管死区时间内体二极管的导通问题。

### ¥ 两辅助绕组电压驱动方式

图7的同步整流电路的整流管和续流管的驱动电压分别来自两个辅助绕组输出电压。电路采用有源箝位的磁复位方式。两辅助绕组驱动的方式由于采用不同的输出分别驱动整流管和续流管，能够更有效地控制同步整流管的开通与关断。

### 滤波电感耦合电压驱动同步整流器

滤波电感耦合电压驱动方式是新近提出了一种同步整流电压型驱动方法。该驱动方式中，电路采用一个三绕组电压互感器，两个副边绕组电压分别驱动两个功率MOSFET管，以达到有效地驱动。图8是滤波电感耦合电压驱动同步整流电路。其工作原理：当主开关管S导通，变压器副边电压为正，电压互感器原边电压为正，绕组 $L_{s1}$ 的正电压驱动 $S_1$ 导通，绕组 $L_{s2}$ 的电压保持为负，关断 $S_2$ ，负载电流流经 $S_1$ ；当主开关管关断，电压互感器原边电压为负，绕组 $L_{s1}$ 的负电压关断 $S_1$ ，绕组 $L_{s2}$ 的正电压驱动 $S_2$ ，负载电流流过 $S_2$ ，磁复位结束，变压器副边电压为0，在死区时间里，电压互感器原边电压为负，绕组 $L_{s1}$ 的负电压继续关断 $S_1$ ，绕组 $L_{s2}$ 的正电压继续驱动 $S_2$ 。

开关 $S_3$ 的作用是避免变压器副边出现瞬时短路。当主开关管Q导通时，变压器副边绕组电压应上升为正。但是，主开关管开通时，因为 $S_2$ 在上一个开关周期未保持导通，变压器副边出现暂时的短路现象，在实际电路中，这是不允许的。

因此在下一个周期开始前,必须关断 $S_2$ ,就应该加一个辅助开关 $S_3$ 。新周期开始时,开通 $S_3$ ,使 $S_2$ 的栅极驱动电压降低为0, $S_2$ 关断,一直到主开关管关断。

二极管 $D_4$ 的作用是避免电压互感器副边出现短路回路。主开关管导通时,绕组 $L_{S1}$ 电压为正,绕组 $L_{S2}$ 电压为负。 $L_{S1}$ 的电压对 $S_1$ 的栅极寄生电容充电。如果没有 $D_4$ ,那么 $L_{S2}$ 的负电压通过 $S_3$ 的体二极管形成短路回路。

滤波电感耦合电压驱动方式中,变压器原边可以采取任意一种磁复位方式,很好地解决了传统电压驱动方式续流MOSFET体二极管的导通问题,从而得到很高的变换器转换效率。缺点是多了一个耦合互感器,电路不够简单。

### 电流型驱动同步整流器

电流驱动同步整流器具有以下优点:输入电压范围宽;适合于并联运行;具有通用性等。

#### 能量反馈电流驱动同步整流器

图9所示为能量反馈电流驱动同步整流器。外加功率转换电路实现电流检测能量反馈至直流电源。通过反馈电流检测器件上的能量,电流检测电压可以高于同步整流管的导通压降,而且不引起额外的损耗。比如,电流检测器件两端的电压为0.5V,即同步整流管导通压降的5倍。为了将该电流检测信号转化为5V的驱动电压信号,需要10倍的电压放大。也就是说,同样增益带宽的电压放大器可以工作在高频情况下。如果电流检测和电压放大采用变流器,那么所需要的变流比为10:1,因此简化了变流器的设

计。小变流比同时有很多其他优点,比如电流增益高,漏感小等。能量反馈电流驱动同步整流器不仅可以工作在高频状态,还可表现出良好的电气特性。

图9电路工作过程:当

电流从同步整流器的源级流向漏极时,绕组 $N_1$ 感应电压 $V_{cs}$ 为正,二极管 $D_1$ 导通,因此能量从绕组 $N_1$ 通过二极管 $D_1$ 传递到直流电源。绕组 $N_2$ 的感应正电压驱动同步整流管并使其导通。只要同步整流管上的电流继续流过变流器,并且直流电源保持稳定,不管网压如何波动,同步整流管的驱动电压保持不变。当同步整流管的正向电流降低为零并开始反向时,二极管 $D_1$ 反向截止,二极管 $D_2$ 导通并反馈变流器能量。同步整流管的栅极驱动电压变为负值,因此关断。能量反馈电流驱动同步整流器的工作特性与理想二极管是一致的。

图10所示是一种能量反馈电流驱动同步整流器模块。该模块有四个端口,两个端口是同步整流管的漏极和源极,两个端口是能量反馈端口,分别和直流电源输出端的正极和负极连接。它可以用在各种开关电源中代替二极管整流。

能量反馈电流驱动同步整流器的优点有:具有CCM和DCM双工

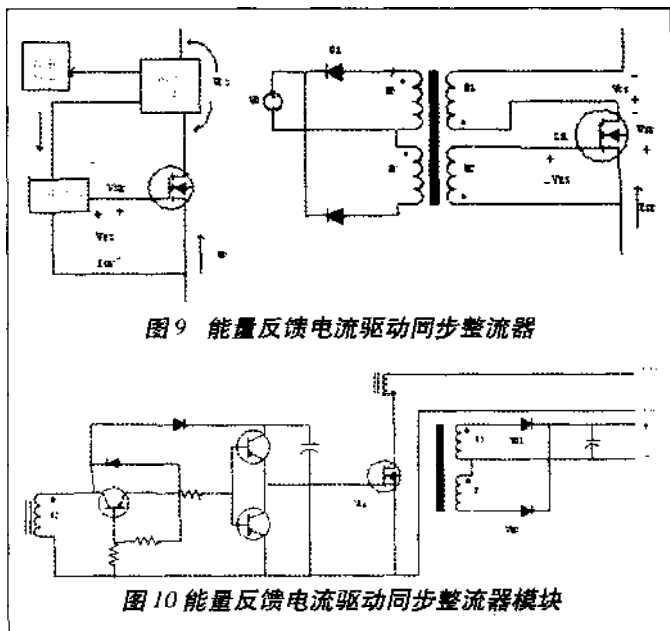


图9 能量反馈电流驱动同步整流器

图10 能量反馈电流驱动同步整流器模块

作模式,输入低压时工作在CCM模式,输入高压时工作在非DCM模式,通过改变绕组匝数,可以调节驱动电压大小;更易于实现并联运行;第三是具有通用性,可以应用于不同拓扑的变换器。

### 结语

本文结合电压驱动同步整流器和电流驱动同步整流器的最新研究成果,对各类不同驱动方式及其典型应用整流电路进行了详细分析,指出了各自特点及适用范围。随着电子通讯和计算机技术的快速发展,对低压大电流的DC-DC功率变换器的需求必然进一步扩大,可以预见,同步整流技术将得到广泛的应用和发展。

### 参考文献

- 1 阮新波,严仰光.直流开关电源的软开关技术.北京:科学出版社
- 2 刘军,詹晓东,严仰光.适合低压大电流应用的DC/DC变换器的研究.电力电子技术.2002(6)