

Super Junction MOSFET 系列

通过 PrestoMOS™提高移相全桥电路的功率

转换效率

服务器用电源或OBC等,使用大功率的电源一般使用全桥电路。特别是移相全桥(Phase Shift Full Bridge:以下称为 PSFB)电路在Super Junction MOSFET(以下称为SJ-MOS)或IGBT等开关元件的开启时能够进行零电压开关(Zero Voltage Switching: 以下称为ZVS) 动作与一般的硬开关相比,可以进一步降低开关损耗,因此适用于大功率化。

本应用笔记显示了PSFB电路中SJ-MOS的基本动作,说明了MOSFET BodyDiode恢复特性的重要性。并且,在实际的PSFB电 路中,提示了罗姆阵容的高速恢复型SJ-MOS的"PrestoMOS™"和其他公司产品的效率比较结果,显示出本系列在PSFB电路中 非常有用。

1. PSFB 电路的基本构成

Figure 1表示PSFB电路的基本构成。为了实现ZVS动作,作为谐振用电感器利用变压器的泄漏电感,不过,为了扩大ZVS动作的 范围,也有与变压器串联附加电感器的情况。本应用笔记以使用该串联附加电感器Ls的电路为前提。

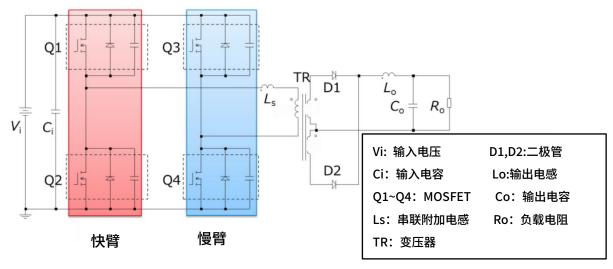


Figure 1. PSFB 电路的基本电路图

在Figure 2中,展示PSFB电路中的各开关元件Q1~Q4的 时序图。图下部的数字是电路动作模式 由此可以知道,Q1和Q2切换ON/OFF状态后,经过一定相位 延迟之后,Q3和Q4进入ON/OFF的切换状态。从这点来说, 一般把 Q1、Q2的桥臂, 称为"快臂"、Q3、Q4的桥臂称 之为"慢臂"。

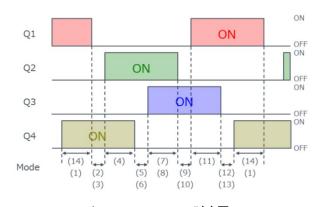


Figure 2. Q1~Q4 时序图

© 2018 ROHM Co., Ltd. No. 65AN039C Rev.002 1/8

2. PSFB 电路的基本动作

PSFB电路中的ZVS动作是开关器件MOSFET的输出容量Coss对充电电荷进行放电,接着BodyDiode进行导通,漏极-源极间电 压VDS大约下降到0后,使MOSFET导通,由此成立。

Figure 3表示PSFB电路Q1~Q4的漏极电流以及1次侧变压器中流动的电流波形。漏极→源极,如果将流经的电流方向设为正, 则可以确认在Q1~Q4中分别有负方向的漏极电流流动的期间,即BodyDiode有正向电流流动的期间。例如在Q3中,Mode(7) 的区间就是这个期间。在这个期间内,由于VDS电压几乎为0,所以在这个期间内通过反转ON,ZVS动作成立。

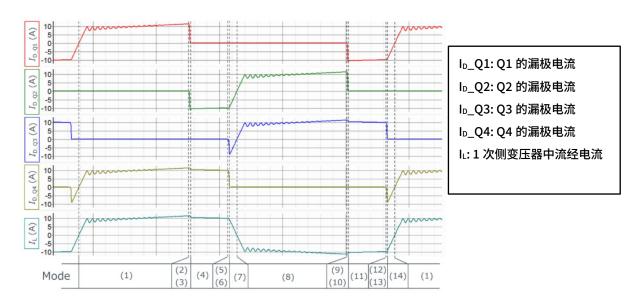


Figure 3. Q1~Q4的漏极电流及向变压器 1次侧流动的电流波形

从 Figure 3 可以看出,快臂和慢臂的电流波形不同,不仅仅是简单地错开了相位。关于 Figure 2 和 3 中记载的 Mode(1)~ Mode(14),考虑到彼此的电流路径的话就可以理解了。以下 Figure 4~7 表示各 Mode 的电流路径,说明为何会产生 Figure 3 那样的电流波形。

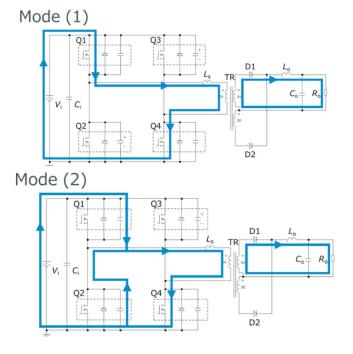


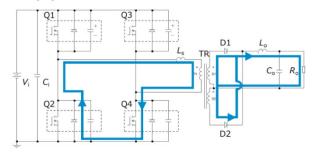
Figure 4. Mode (1)~(2)的电流路径

- ·Q2和Q3处于OFF状态,所以Q2的输出容量Coss_Q2 及Q3的输出容量Coss_Q3正在充电。
- ・向1次侧变压器施加输入电压Vi。
- ·Ls电流流动,Ls会积蓄能量。

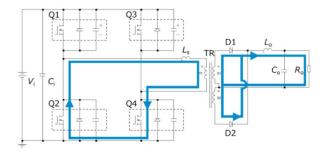
Mode (2)

- ·仅01进行OFF操作。
- · 因为Q1处于OFF状态,所以输出容量Coss_Q1被充 电。由此,由于Q2的漏极侧的电位下降,同时Coss_Q2 开始放电。

Mode (3)



Mode (4)



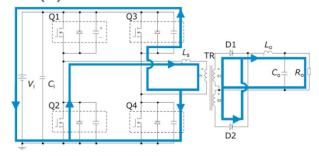
Mode (3)

- · Coss_Q1充电、Coss_Q2放电结束后,Ls仍残留能量 时,通过Q2的BodyDiode(DQ2)电流流动,开始回流 动作。
- ·由于回流动作,能量无法传递到2次侧,但由于Lo的 作用,电流会持续流动。由于Lo的电流对于D1、D2来 说是顺方向,所以电流会流向两个二极管。

Mode (4)

·Q2进行ON开启。此时因为DQ2导通了,所以Q2的漏 源极间电压VDS_Q2几乎是0V。也就是说,因为是ZVS 动作,所以不会发生开启损耗。

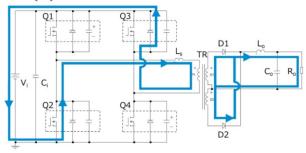
Mode (5)



Mode (5)

- ・Q4进行OFF关闭。
- ·Q4处于OFF状态,因此Q4的输出容量Coss_Q4被充 电。同时由于Q3的源极侧的电位上升,所以输出容量 Coss_Q3放电。

Mode (6)



Mode (6)

· Coss_Q4充电、Coss_Q3放电结束后,Ls仍残留能量 时,通过Q3的BodyDiode(DQ3)电流流动,开始回流 动作。

Mode (7)

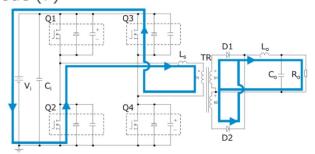


Figure 5. Mode (3)~(7)的电流路径

Mode (7)

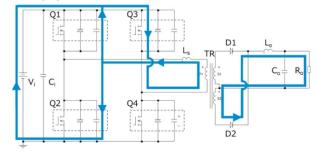
- ·Q3进行ON开启。此时因为DQ3导通了,所以Q3的漏 源极间电压VDS_Q3大致为0V,即ZVS动作,因此不会 发生导通损失。
- ・Q3接通后,Ls会急速释放能量,与Mode(1)~ Mode(6)中的L相反,因此电流的朝向会急速反转。

Mode (8) C

Mode (8)

- ・Q2、Q3为ON,Q1和Q4为OFF。
- ・因此Coss_Q1及Coss_Q4正在充电。
- ・1次侧变压器与Mode(1)相反的方向上施加了Vi。
- ·Ls会有电流流动,Ls会积蓄能量。

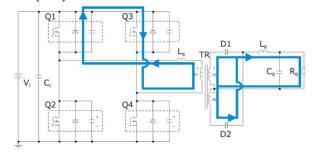
Mode (9)



Mode (9)

- ・Q2进行OFF关闭。
- ・Q2处于OFF状态,CossQ2会充电。同时CossQ1放电。

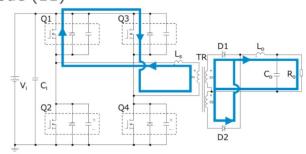
Mode (10)



Mode (10)

- ・Coss_Q2充电、Coss_Q1放电结束后,Ls仍残留能量 时,通过Q1的BodyDiode(DQ1)电流流动,开始回流动
- ·由于回流动作,能量无法传递到2次侧,但由于Lo的作 用,电流会持续流动。由于Lo的电流对于D1、D2来说是 顺方向,所以无论哪一个二极管都会有电流流动。

Mode (11)



Mode (11)

·Q1进行ON开启。此时因为DQ1导通了,所以Q1的漏极 间电压VDS_Q1大致为0V,即ZVS动作,因此不会发生开 启损耗。

Mode (12)

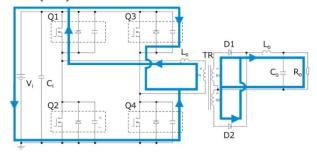
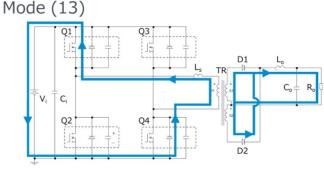


Figure 6. Mode (8)~(12) 的电流路径

Mode (12)

- ·Q3 进行OFF关闭。
- ·Q3处于OFF状态,因此Coss_Q3会充电。同时Coss_Q4 被放电。



Mode (14)

Figure 7. Mode (13)~(14) 的电流路径

Mode (13)

· Coss_Q3充电、Coss_Q4放电结束后,Ls仍残留能量 时,通过Q4的BodyDiode(DQ4)电流流动,开始回流 动作。

Mode (14)

- ·Q4进行ON开启。此时因为DQ4导通了,所以Q4的漏 源极间电压VDS_Q4大致为0V,也就是说由于ZVS动 作,不产生开启损耗。
- ·Ls快速放出能量,为了使与Mode(8)~Mode (13) 中的 / 相反方向的电流流动而施加电压,电流的 方向急速反转。

特别是如Mode(7)和(14)所说明的那样,由于慢臂的MOSFET的开启,输入电源和Ls串联连接,Ls的能量急速减少。由于 该动作不会在快臂中发生,结果快臂和慢臂的电流波形会产生差异(通常慢臂的沟道导通时间变长)。从这一点可以看出,在快 臂的MOSFET和慢臂的MOSFET中,功率损失会产生差异,这一点在热设计时需要注意。

3. PSFB电路轻负载时的注意点

3-1. ZVS的成立条件与Dead Time的重要性

如在第2章的动作Mode(5)和(6)、以及(12)和(13)中说明的那样,在慢臂中,如果Ls的积蓄能量不超过MOSFET的 Coss所积蓄的能量,则MOSFET的充放电无法完成,因此ZVS动作不成立。也就是说,以Mode(5)为例表示ZVS的成立条件 时,如下的(1)式。但是,将L1作为Mode(4)结束时的L1、 E_{oss_Q3} 1、 E_{oss_Q4} 分别表示Q3、Q4的输出容量的充放电完成所需的 能量。

$$\frac{1}{2}L_{S}I_{L1}^{2} > E_{OSS_Q3} + E_{OSS_Q4} \cdots (1)$$

与此(1)式相比,轻负荷时由于 £1较小,ZVS动作难以成立,负荷越大,ZVS的成立就越容易。

另一方面,快臂的MOSFET,在Coss充放电时,通过变压器向2次侧传递能量。和刚才一样,考虑到ZVS在能量收支中的成立条 件,以Mode(2)为例,将反式的卷数比设为n,快臂的ZVS成立条件可以用以下公式(2)来表示。(2)从式,在快臂中,由 于二次侧负载电感的能量也有助于充放电,因此可知ZVS动作容易。

$$\frac{1}{2}(L_S + n^2L_0)I_{L2}^2 > E_{OSS_Q1} + E_{OSS_Q2} \cdots (2)$$

但是, h_2 是Mode(1)结束时刻的 h_1 、 E_{oss_Q1} 、 E_{oss_Q2} 分别定义为Q1、Q2的Coss充放电完成所需的能量。

在实际的电路动作中,为了防止上下臂短路,一般会设置Dead Time。如上所述,轻负荷时特别是慢臂的MOSFET的充放电未完 成,也就是说可能残留有VDS电压,因此根据Dead Time的设定,慢臂的开启损耗有可能增大。因此,在PSFB电路的慢臂中,轻 负荷时的Dead Time设定尤其重要。

在Figure 8中,表示Dead Time合适的情况和不适合的情况下的开启波形的概略图

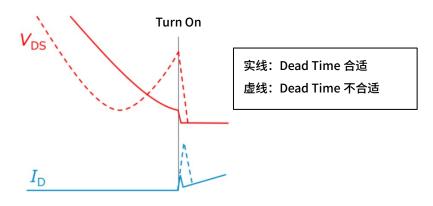


Figure 8. 轻负荷时慢臂的 MOSFET 的开启的概略图

另外,在Dead Time不合适的情况下,有时会瞬间观察到大的漏极电流ld。这有以下两个理由。

- ①:根据VDS的变化,由于瞬间的G-S间电压VGS超过阈值电压Vth(误开启),观察到贯通电流。
- ②:观察到逆臂MOSFET向Coss的充电电流。

后者向Coss的充电电流一般在硬开关动作时会发生。另外,由于前者误ON导致的贯通电流,通过适当设置MOSFET的G-D间容量Cgd及G-S间容量Cgs的容量比,可以防止于未然。

由于PrestoMOS™的Cgd和Cgs的容量比设计得当,因此可以期待通过抑制贯通电流来减少开关损耗。

3-2. 寄生双极晶体管的相关注意点

一般来说,在PSFB电路中,在轻负荷下MOSFET的BodyDiode的恢复时间trr变长。理由是PSFB电路在恢复期间施加到 BodyDiode的VDS电压几乎为0V,因此电荷释放变慢。在PSFB电路中,MOSFET的OFF时如果这个恢复电流残留着的话,寄生双 极晶体管有误导通而使MOSFET破坏的可能性[1]。

在Figure 9中,表示快臂的恢复时间trr和ld导通时间以及寄生双极晶体管误ON的关系。随着轻负荷和VDS下降,trr会像红虚线一样变长。而且,如果这个trr比lD的导通时间长的话,由于恢复剩余电荷有使寄生双极晶体管会误ON,MOSFET破坏的可能性。

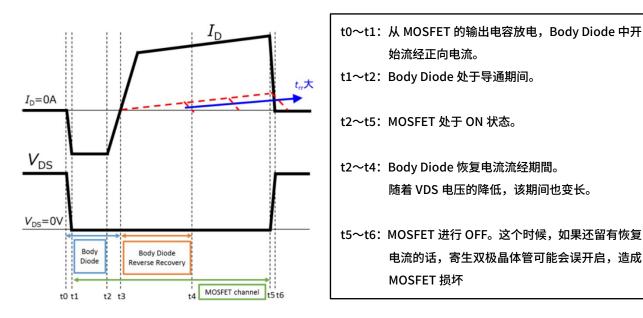
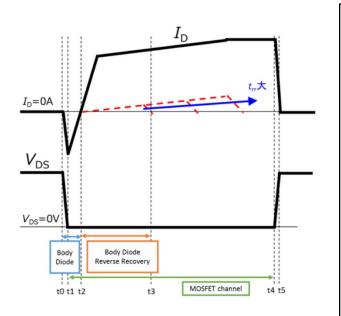


Figure 9. 在快臂中恢复时间 trr 和 ld 导通时间以及寄生双极晶体管误 ON 的关系

综上所述,PSFB电路中选择trr较小的MOSFET比较好。由于PrestoMOS™具有业界最高级别的高速恢复性能,因此是很难产 生这样的问题的MOSFET

关于慢臂,在OFF时寄生双极晶体管也有误导通的可能性,但是正如第2章所说明的那样,慢臂比快臂的ID的导通期间长 (Figure 10),因此很难受到trr增大的影响。也就是说,慢管相比于快管,由于寄生双极晶体管的误ON导致的MOSFET的破坏 风险比较小。



t0~t1: 从 MOSFET 的输出电容放电, Body Diode 中开 始流经正向电流。

t0~t1: Body Diode 处于导通期间。

t1~t4: MOSFET 处于 ON 状态。

t1~t3: Body Diode 恢复电流流经期間。 随着 VDS 电压的降低,该期间也变长。

t4~t5: MOSFET OFF 关闭。 与快臂比较,由于 ID 导通时间长,在 OFF 动作 时,恢复电流残留的可能性很低(难以发生寄生 双极晶体管的误导通)

Figure 10. 慢臂的恢复时间 trr 和 ld 导通时间以及寄生双极晶体管误 ON 的关系

5. 效率评估结果

我想在到现在为止的说明中,可以理解trr小的PrestoMOS™在PSFB电路中有用。接下来,Figure 11表示使用实际电源电路对电 源最重要的指标之一的电力转换效率进行评价的结果。作为Q1~Q4的MOSFET,在导通电阻200mΩ左右的PrestoMOS™及同级别 的其他公司产品中进行了比较。

从Figure 11可以看出,作为PrestoMOS™最新一代产品的R6018VNX,在全负荷范围内获得了最高效率的结果。由此可知, R60×VNX系列在高速恢复型SJ-MOS中,具有业界顶级的开关性能,最适合PSFB电路。

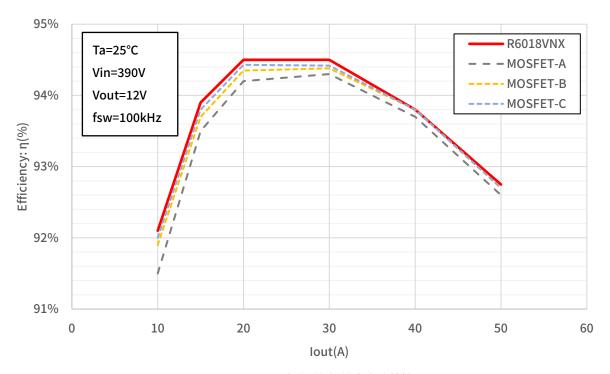


Figure 11. PSFB 电路 效率-输出电流特性

6. 总结

- ・轻负荷时,由于慢臂的MOSFET的ZVS动作难以成立,因此容易发生开启损耗。为了减小这个开启损耗损耗,一般来说Dead Time的调整是很重要的。
- ・在轻负荷时的快臂中,如果MOSFET的BodyDiode的trr较大,则MOSFET的寄生双极晶体管有可能会误导通。因此,在PSFB 电路中,BodyDiode的trr选定较小的MOSFET非常重要。
- ・罗姆最新一代PrestoMOS™ R60×VNx系列在高速恢复型SJ-MOS中具有业界顶级的开关性能,最适合PSFB电路。

7. 参考文献

[1] L. Saro, et al., "High-Voltage MOSFET Behavior in Soft-Switching Converter: Analysis and Reliability Improvements," International Tel-communication Conference, San Francisco, 1998.

Notes

- 1) The information contained herein is subject to change without notice.
- Before you use our Products, please contact our sales representative and verify the latest specifications:
- 3) Although ROHM is continuously working to improve product reliability and quality, semiconductors can break down and malfunction due to various factors. Therefore, in order to prevent personal injury or fire arising from failure, please take safety measures such as complying with the derating characteristics, implementing redundant and fire prevention designs, and utilizing backups and fail-safe procedures. ROHM shall have no responsibility for any damages arising out of the use of our Poducts beyond the rating specified by ROHM.
- 4) Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein are provided only to illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.
- 5) The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM or any other parties. ROHM shall have no responsibility whatsoever for any dispute arising out of the use of such technical information.
- 6) The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.
- 7) For use of our Products in applications requiring a high degree of reliability (as exemplified below), please contact and consult with a ROHM representative: transportation equipment (i.e. cars, ships, trains), primary communication equipment, traffic lights, fire/crime prevention, safety equipment, medical systems, servers, solar cells, and power transmission systems.
- 8) Do not use our Products in applications requiring extremely high reliability, such as aerospace equipment, nuclear power control systems, and submarine repeaters.
- 9) ROHM shall have no responsibility for any damages or injury arising from non-compliance with the recommended usage conditions and specifications contained herein.
- 10) ROHM has used reasonable care to ensure the accuracy of the information contained in this document. However, ROHM does not warrants that such information is error-free, and ROHM shall have no responsibility for any damages arising from any inaccuracy or misprint of such information.
- 11) Please use the Products in accordance with any applicable environmental laws and regulations, such as the RoHS Directive. For more details, including RoHS compatibility, please contact a ROHM sales office. ROHM shall have no responsibility for any damages or losses resulting non-compliance with any applicable laws or regulations.
- 12) When providing our Products and technologies contained in this document to other countries, you must abide by the procedures and provisions stipulated in all applicable export laws and regulations, including without limitation the US Export Administration Regulations and the Foreign Exchange and Foreign Trade Act.
- 13) This document, in part or in whole, may not be reprinted or reproduced without prior consent of ROHM.



Thank you for your accessing to ROHM product informations. More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

ROHM Customer Support System

https://www.rohm.com.cn/contactus