

MOSFET 系列

采用了 PrestoMOS™ R60xxVNx 系列的 移相全桥电路的开关损耗降低的要点

移相全桥（Phase-Shift Full-Bridge: PSFB）DC-DC 转换器在以服务器或通信基站为代表的各种工业机器的电源、太阳能发电蓄电系统等领域有着广泛应用。并且在近年随着电动汽车(EV)的急速普及，电动车充电器相关的充电桩、PSFB 电路等应用范围也在日益扩大。

PSFB 电路的特点是：

- 1 次侧全桥电路使用零压开关(Zero Voltage Switching : ZVS) ，因此开关损耗低。
- 1 次侧输入与 2 次侧输出之间可绝缘。
- 可大功率(数 kW~)的运行

等等，有着诸多的优势。但另一方面，这种电路相对于一般硬开关方式的 DC-DC 转换器，其电路设计较难，电路设计如果与所用元器件特性不匹配，可能会无法发挥预期的性能。

本应用笔记解说了 PSFB 电路基本动作、1 次侧 MOSFET 开关特性和电路设计优化要点。通过理解这些内容，将有助于充分发挥本公司 PSFB 电路所用 Super Junction MOSFET(以下 SJ-MOSFET) 「PrestoMOS™ R60xxVNx」系列的性能。

1. PSFB 转换器的应用示例

Figure1 所示的是 PSFB 电路的应用示例。PSFB 电路在以服务器和通信基站为代表的各种产机用电源、以太阳能发电为代表的可再生能源的蓄电系统、EV 充电系统(充电桩)等「绝缘分离・大功率・高效率」的系统中广泛使用。一般而言，主要应用在数百 W 到 10kW 以上的大功率产品中（这以下的小功率应用由于成本和实装空间等原因，一般不适用）。此外，PSFB 电路不仅可应用在单向运行产品，也可用于同步整流方式的 2 次侧整流电路这样的双向产品。



Figure 1. PSFB 电路应用示例

2. PSFB 转换器的基础知识

2-1. 基本电路结构

Figure 2 所示的是 PSFB 转换器的基本电路图。PSFB 电路的 1 次侧一般为 4 个功率开关元件（MOSFET 或 IGBT 等）组成的全桥电路结构。根据 PSFB 电路的这些功率开关素子的 ON/OFF 的时间，适当地进行移相来实现 ZVS 零压开关。

PSFB 的 1 次侧的谐振电感一般可利用变压器的漏电感，但为了扩大 ZVS 的动作范围，有时会在变压器外串联一个外置电感。本应用笔记内容的讨论前提是串联了附加电感 L_s 的电路。此外，Figure 2 的红色部分 Q1 和 Q2 构成了「超前桥臂(Leading leg)」，蓝色部分 Q3 和 Q4 构成了「滞后桥臂(Lagging leg)」，各桥臂如此命名的理由将在下一节 2-2 中说明。

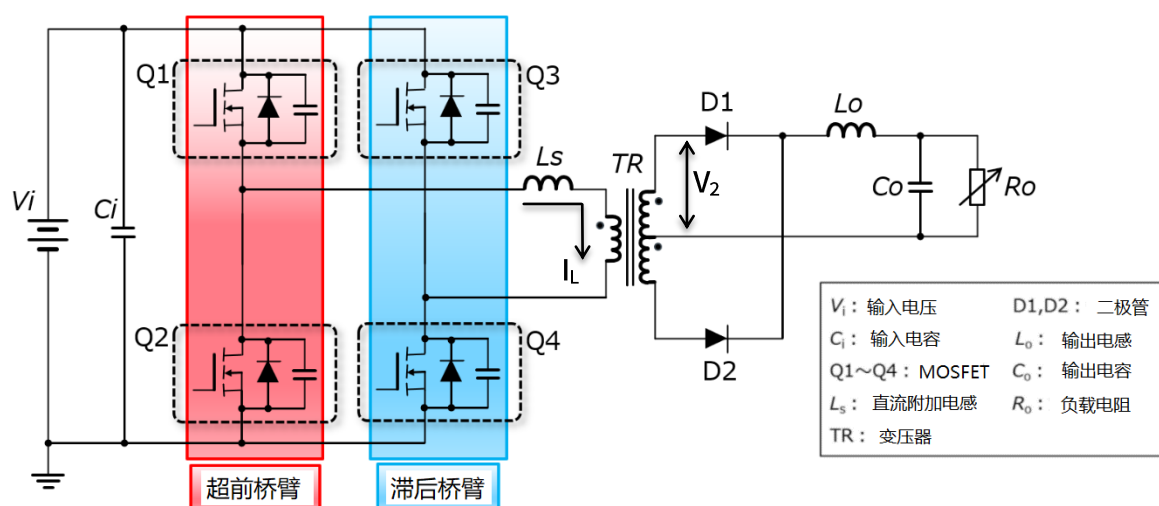


Figure 2. PSFB 转换器的基本电路图

2-2. 基本动作波形

Figure 3 所示的是 PSFB 电路的动作波形示例。图中可知，Q1 和 Q2 的 ON/OFF 状态发生变化后，经过相位迟延后 Q3 和 Q4 的 ON/OFF 状态也发生改变。因此，一般将 Q1、Q2 称作超前桥臂，将 Q3、Q4 称作滞后桥臂。另外，Q1~Q4 的详细动作在本公司的应用笔记「通过 PrestoMOS™ 提高移相全桥电路的功率转换效率」^[1] 中有详细说明，如有需要请参考。

仔细观察 Figure 3，可发现超前桥臂和滞后桥臂的波形并不相同。也就是说，两者并不是单纯的波形的相位移动。有一点需要注意，即 Turn On 后电流波形的差别。例如，以超前桥臂 Q1 以及滞后桥臂 Q4 为例，超前桥臂 Q1 在 Turn On 后，电感电流 I_L （漏极电流 I_D ）的方向反转之前有一定程度的时间余量。但滞后桥臂 Q4 在 Turn On 后，由于短时间内电流就发生反转，与超前桥臂 Q1 相比，电流反转前的时间余量少。这一点会造成滞后桥臂容易出现不彻底的 ZVS 零压开关（详细在下一节 2-3 有说明）。

而 Turn On 时的 ZVS 零压开关如果不彻底的话，会造成开关损耗增大，因此需要让滞后桥臂的 Turn On 时 ZVS 零压开关彻底，这对于提高 PSFB 电路的效率是非常重要的。

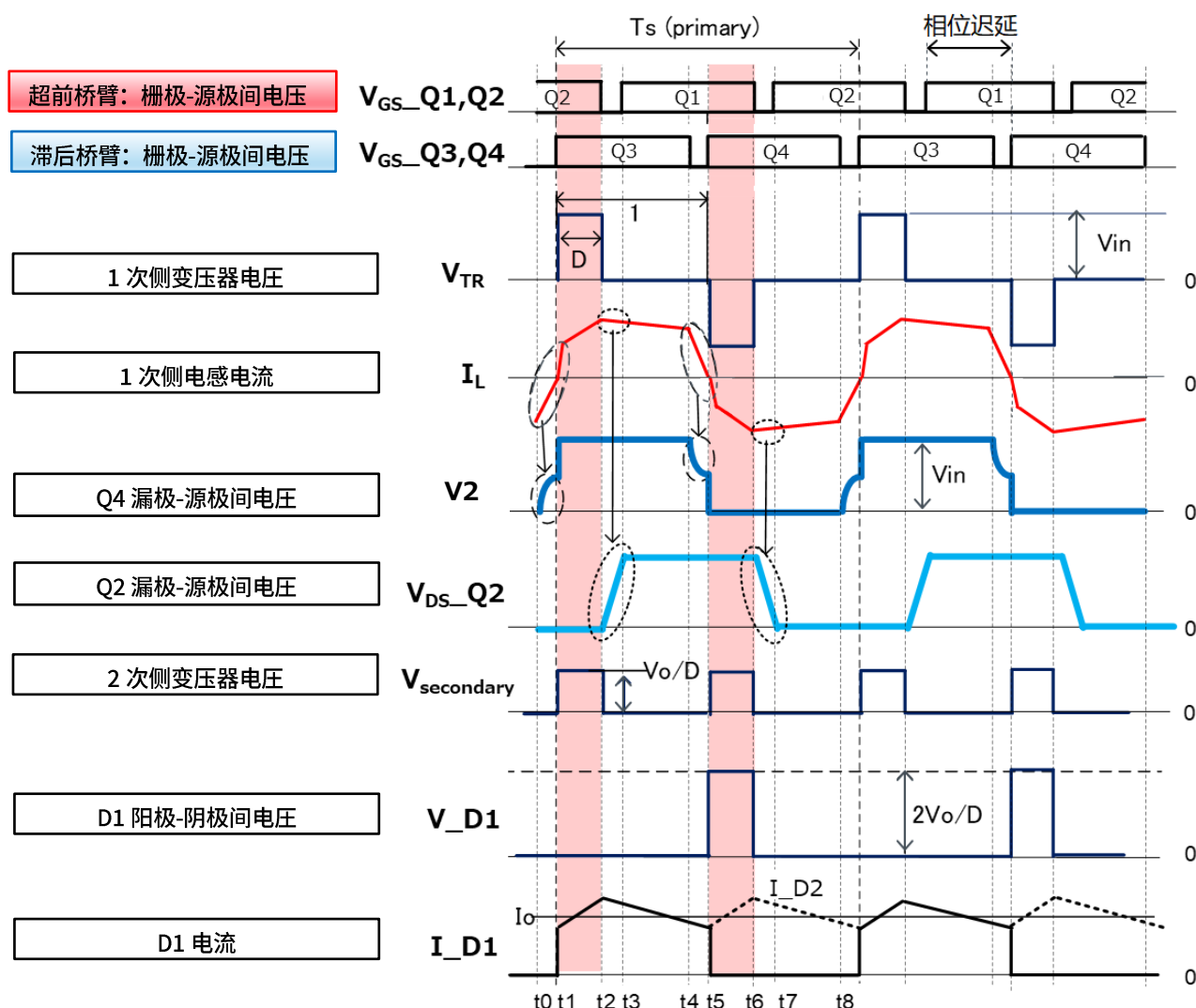


Figure 3. PSFB 转换器的动作波形示例

2-3. PSFB 的 ZVS 零压开关(Turn On)和注意点

Figure 4 所示的是 PSFB 电路的 ZVS 零压开关的流程。这里以下臂从 OFF(C_{oss} 充电)状态到 ON(通道导通)状态的过程为例来说明。从 Figure 4 可知, PSFB 电路中 Turn On 为 ZVS 零压开关。STEP1~4 的动作超前桥臂、滞后桥臂基本上是一样的,但如上一节 2-2 说明的那样,滞后桥臂在 Figure 4 的 STEP4 之后,电流方向反转(Source \Rightarrow 漏极方向 转变为 漏极 \Rightarrow Source 方向)的时间比超前桥臂的时间要短得多。也就是说对于滞后桥臂,如果不能在电流反转的短时间内充分释放掉 MOSFET 寄生电容 C_{oss} 的电荷并充分导通的话,Turn On 损耗会增大,这一点请注意。特别是轻负载时,为了释放掉 C_{oss} 的电荷而设置的 L_s 的能量 $(1/2 \times L_s I^2)$ 比重负载情况下要小,需注意此种情况下电荷释放易于变得不充分。此外,所使用 MOSFET 的 Turn On 速度等电气特性有所不同,根据元器件特性进行匹配调整也是非常重要的(详细内容在第 3 章有说明)。

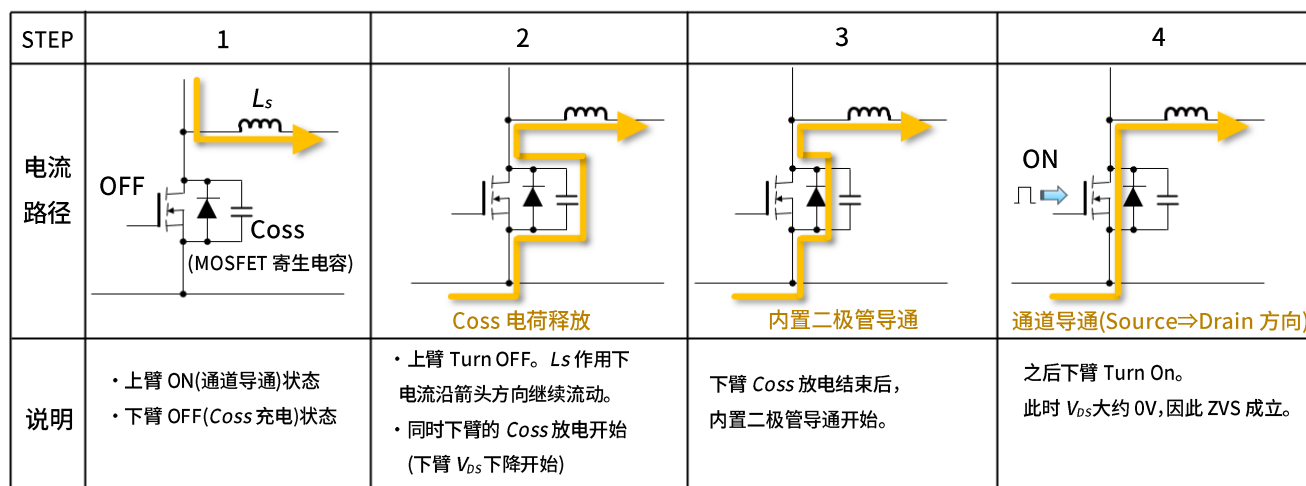


Figure 4. PSFB 的 ZVS 零压开关的概念图

2-4. ZVS 的成立条件与 Turn On 时序的重要性

如2-3节的说明, PSFB电路的Turn On动作中为了释放Coss电荷, 会使用Ls的能量。因此, 如果Ls的能量超过Coss的充电能量并且电荷释放时间充足的话, 漏极-源极间电压Vds会接近0V, 使得ZVS成立。ZVS是PSFB电路的理想软开关动作, 其Turn On损耗几乎是0。滞后桥臂的ZVS成立条件一般可表示为计算式(1)。式中, I_{L1} 为滞后桥臂Q3、Q4在ON/OFF切换时的电感电流、 E_{OSS_Q3} 、 E_{OSS_Q4} 为Q3、Q4 的输出电容Coss充放电完毕需要的能量。

$$\frac{1}{2} L_s I_{L1}^2 > E_{OSS_Q3} + E_{OSS_Q4} \dots\dots\dots (1)$$

根据算式(1), 轻负载时比重负载时 I_{L1} 要小所以ZVS的难以成立, 负载较大时ZVS易于成立。

另一方面, 超前桥臂的MOSFET的ZVS的成立条件, 一般可以表示为计算式(2)。式中, n 是变压器的卷数比, I_{L2} 为超前桥臂Q1、Q2的ON/OFF切换时的电感电流、 E_{OSS_Q1} 、 E_{OSS_Q2} 为Q1、Q2 的Coss的充放电完毕需要的能量。

根据算式(2), 超前桥臂的2次侧负载电感值Lo的能量也与Coss的充放电有关, 比滞后桥臂更易实现彻底的ZVS零压开关。

$$\frac{1}{2} (L_s + n^2 L_o) I_{L2}^2 > E_{OSS_Q1} + E_{OSS_Q2} \dots\dots\dots (2)$$

根据以上可知, 轻负载时滞后桥臂的Coss的电荷释放易于出现不充分(Vds电压残留)的情况。这种Vds电压残留的状态下, Turn On时间过早, 会增大开关损耗。反过来, Turn On时间过晚的话, 如2-3节说明, 电流反转实际通道ON的时间不匹配, Turn On损耗会增大。于是PSFB电路在轻负载时的滞后桥臂Turn On时序平衡调整就显得非常重要(详细请看第3章的实际调整示例介绍)。

当然, L_s 足够大的话, 如果能在设计上实现轻负载域的稳定 ZVS 零压开关, 就能简化以上的调整。只不过由于实装面积的等方面的制约, 一般很难确保有足够大的 L_s 。

3. 器件特性与 Turn On 时序的调整示例

3-1. 栅极电阻 R_{g_source} 和功率转换效率

Figure 5-(a)所示的是 Turn On 侧的栅极电阻 R_{g_source} 在不同条件(①: 82Ω、②: 120Ω、③: 220Ω)的效率评价结果, Figure 5-(b)所示的是输出功率 $P_{out}=1kW$ 的各条件①~③的滞后桥臂 Turn On 波形。使用的元件是本公司的高速恢复型 SJ-MOSFET 最新产品「PrestoMOS™ R6055VNZ4」。根据 Figure 5-(a), 随着 R_{g_source} 的值的变化的, 效率会大幅变化(条件①与③之间有最大 0.5%幅度的变化)。

观察 Figure 5-(b)的 Turn On 波形, 各条件的 C_{oss} 的电荷都没有完全释放完毕、漏极-源极间残留了约 150V 电压。如 2-4 节的说明, 一般来说 PSFB 电路的滞后桥臂易于发生这样不完全的 ZVS 零压开关。随着 R_{g_source} 减小, 该残留电压下降到接近 0V 的时间 t_f 变短, 这部分 Turn On 损耗也会减少, 所以条件①效率最高 (若进一步降低 R_{g_source} , 尖峰增大反而会使效率降低)。

该残留电压如第 2 章所说, 电荷释放不充分, 或者说 Turn On 时序过早。另外, 如果是理想的 ZVS 零压开关, 一般的是观察不到有 V_{DS} 残留电压的。

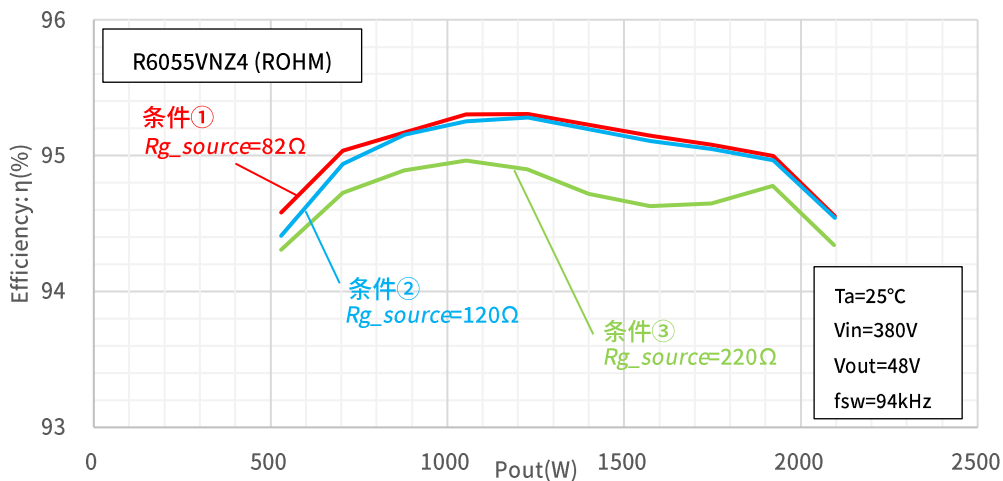
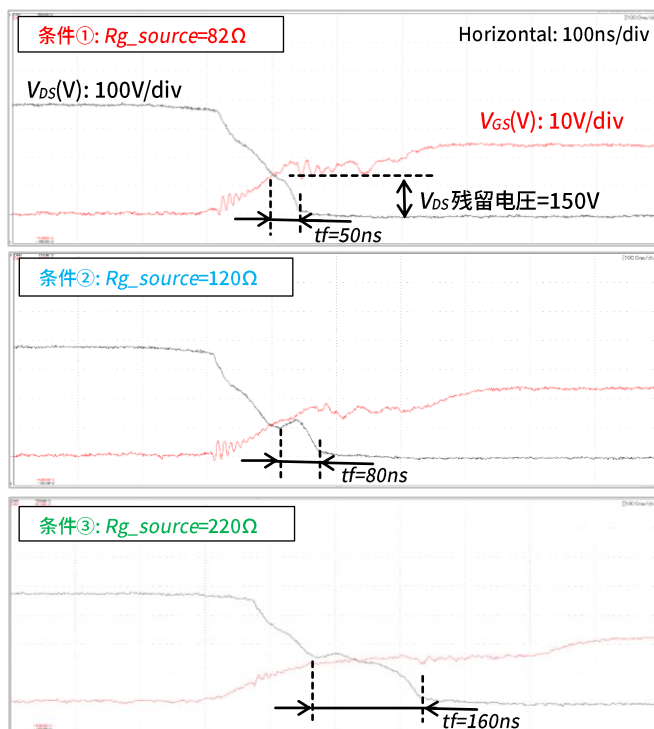


Figure 5-(a). 各个 R_{g_source} 的效率评价结果



V_{DS} 残留电压下降时间 t_f 较短
⇒ Turn On 损耗最小

与条件①相比 t_f 要长
⇒ 与条件①相比 Turn On 损耗增加

与条件①相比 t_f 大幅变长
⇒ 与条件①相比 Turn On 损耗显著增加

- 死区时间(DT)的设定, 条件①与②相同(200ns*).
- 条件③为了回避破坏风险设置为 150ns*.

* $P_{out}=1kW$ 时

Figure 5-(b). $P_{out}=1kW$ 时条件①~③的 Turn On 波形(滞后桥臂)

3-2. 死区时间(DT)和功率转换效率

Figure 6-(a)所示的是滞后桥臂的不同死区时间(DT_{lag})的效率评价结果。 R_{g_source} 参照 3-1 节, 设定为最高效率的 $R_{g_source}=82\Omega$ 。使用的元器件和 3-1 节一样, 都是本公司的 SJ-MOSFET 「R6055VNZ4」。从 Figure 6-(a)可以看出, 条件 B($DT=300ns$)是最高效率的, 而该条件附近即使稍微上下调整 $100ns$, 也会造成效率大幅下降。另外, 这里的效率差值在轻负载时很明显, 而随着负载的上升效率差值会变小。会造成这种现象的原因如第 2 章所说明, 负载越大, 为释放 C_{oss} 电荷而设置的 L_s 的能量就越大, 于是为了接近理想的 ZVS, Turn On 损耗会接近为 0, DT_{lag} 的影响会变小。

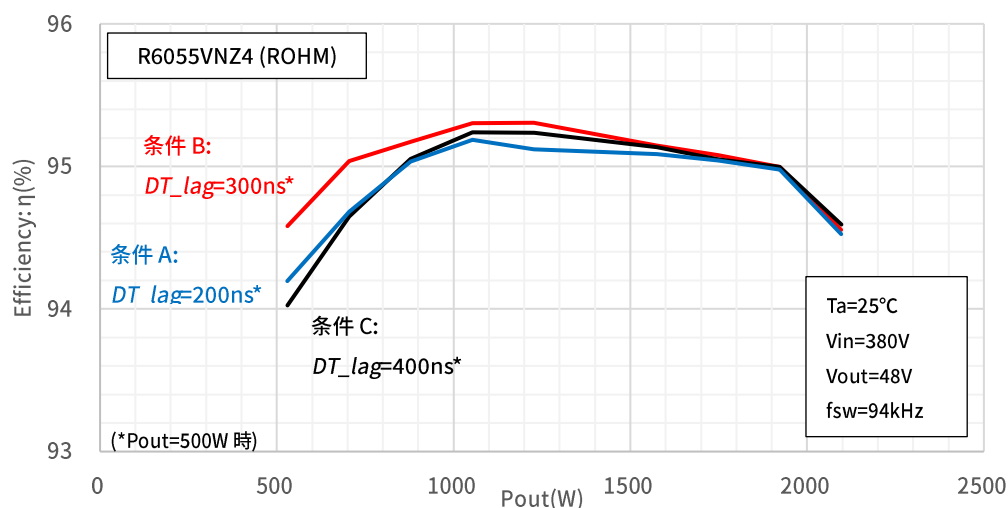


Figure 6-(a). 死区时间(DT)别的效率评价结果

接下来 Figure 6-(b)所示的是输出功率 $P_{out}=500W$ 时各条件的滞后桥臂 Turn On 波形。由此可见条件 B($DT_{lag}=300ns$)的 V_{DS} 残留电压(≈220V)是最低的, 所以 Turn On 损耗也是最小的。而 DT_{lag} 更短的条件 A 相对于条件 B, 由于电荷释放的时间短、 V_{DS} 的残留电压更大, Turn On 损耗更大。而 DT_{lag} 更长的条件 C 相对于条件 B, 反而由于通道 ON 太迟, 会迟于电流反转的时间, 导致释放的 C_{oss} 电荷发生再充电(V_{DS} 再上升), 这种情况比条件 B 的 Turn On 损耗要更大。根据以上结果, 轻负载的死区时间设定平衡调整是非常重要的。

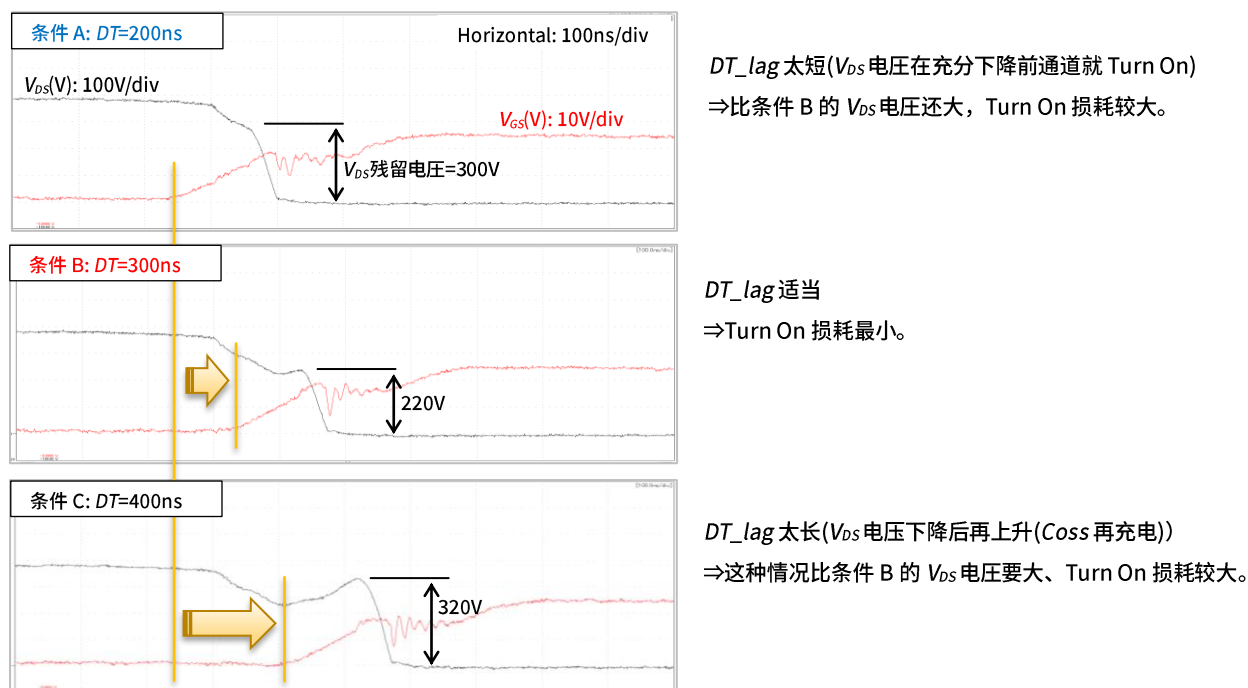


Figure 6-(b). $P_{out}=500W$ 条件 A~C 的 Turn On 波形(滞后桥臂)

3-3. 超前桥臂的死区时间(DT_{lead})设定

3-2 节说明了轻负载时为了降低滞后桥臂的 Turn On 损耗,合理设置决定 ON 时序的 Rg_source 、以及平衡设定死区时间(DT_lag)的重要性。另一方面,超前桥臂方面如 2-2 节所说明的,与滞后桥臂相比电流反转前的时间充裕,可充分释放电荷(V_{DS} 充分下降),因此 ZVS 零压开关的实现较为容易。此外,如 2-4 节的算式(2)所说明的,超前桥臂的 2 次侧的负载电流也与电荷释放有关,从这方面看,也可以得知与滞后桥臂相比,ZVS 零压开关的实现较为容易。

Figure 7 所示的是 Pout=500W 的超前桥臂 Turn On 波形示例。如前面所述, 内置二极管导通开始的时间点, V_{DS} 大约为 0V, 从这个时间点开始到电流反转的区间之内 Turn On 完毕的话 ZVS 是成立的。从 Figure 7 可看出, 超前桥臂与滞后桥臂相比该区间非常长, DT_{lead} 的可调整范围很广。所以, 一般会将超前桥臂的 DT_{lead} 设置为比滞后桥臂的长, 设定时要避免免通电流发生 (Figure 7 中 $DT_{lead}=800\text{ns}$, 设置为滞后桥臂的 2 倍以上)。

此外，从 Figure 7 的 V_{GS} 波形可见，在完整的 ZVS 零压开关情况下，一般 V_{GS} 的 Turn On 波形中不会有平台(plateau)。

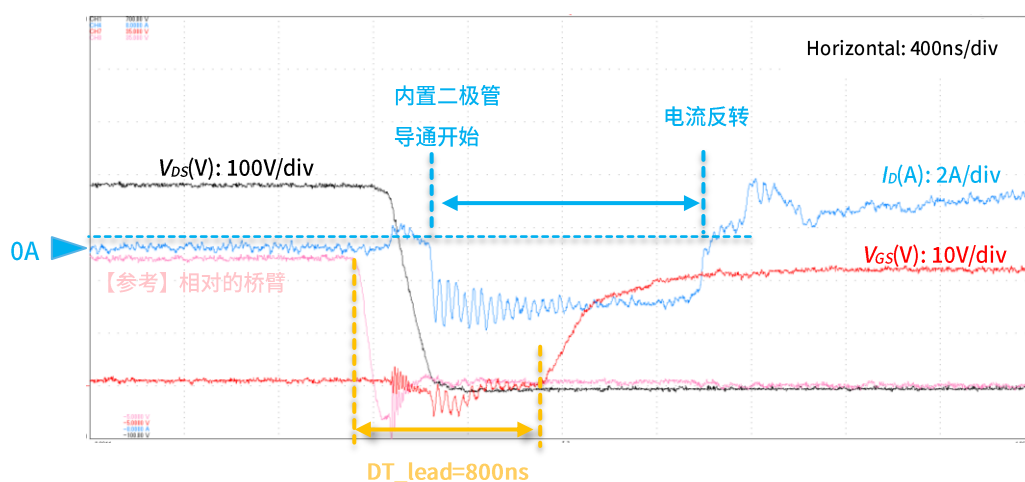


Figure 7. 超前桥臂的 Turn On 波形示例 (Pout=500W)

4. 不同元器件特性的适当条件的区别（与其他公司比较）

Figure 8 所示的是先前的 ROHM R6055VNZ4 与同 Ron 性能水平的其他公司产品(MOSFET-A)的效率对比结果。

R6055VNZ4 的 R_{g_source} 和 DT_{lag} , 按照最高效率的第 3 章的使用条件。MOSFET-A 的 R_{g_source} 和 DT_{lag} 的条件也和 R6055VNZ4 一样, 按照第 3 章的方法调整为最高效率。从这里可得知, 两个元器件无关是否为同 Ron 性能水平的产品, 特别是 R_{g_source} 的条件区别很大。这是因为两器件的开关特性大有不同。而谈到开关方面的器件特性, 一般会说到 Qg 特性, 其中的 Qgd 特性在 V_{DS} 电压残留时会对 Turn On 损耗造成较大影响, 所以 Qgd 特性的调整就显得特别重要。Figure 9 所示的是 R6055VNZ4 和 MOSFET-A 的 Qg 特性对比。可以看出, 两器件的 Qg 特性、特别是 Qgd 特性的区别很大。MOSFET-A 的 Qgd 只有 R6055VNZ4 的不到一半 (43nC 对比 18nC)。因此对于 MOSFET-A, 在调整 PSFB 电路滞后桥臂最重要的 Turn On 时序时, R_{g_source} 的值需要调整为 R6055VNZ4 的 2 倍以上。作为参考, 这里也记录了同 Ron 水平的其他公司产品「MOSFET-B」的 Qg 特性。该产品与 MOSFET-A 相反, 比 R6055VNZ4 的 Qg 值还要大。像这样即使是同 Ron 水平的产品, 由于开关特性不同, 也必须重视 Turn On 时序的调整。

话题回到效率对比, 从 Figure 8 可知, 随着负载变小, R6055VNZ4 的效率提高(Pout=500W 条件下提高 0.4%)。R6055VNZ4 的结果对于在宽负载范围内有着安定高效率要求的计算机电源规格「80PLUS」等领域, 有着明显优势。

如以上所述, ROHM R6055VNZ4 兼顾了业界最高水平的开关特性和低 Ron 特性, 因此在 PSFB 电路可实现高功率转换效率。当然, 如第 3 章所说明, 为了在 PSFB 电路充分发挥 R6055VNZ4 的优秀性能, Turn On 时序的调试是非常重要的。

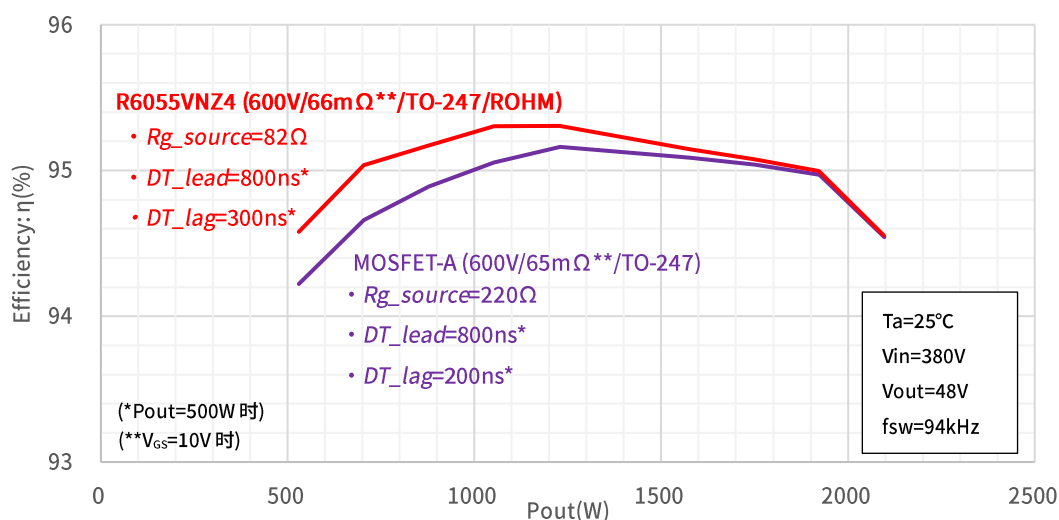


Figure 8. 效率对比结果

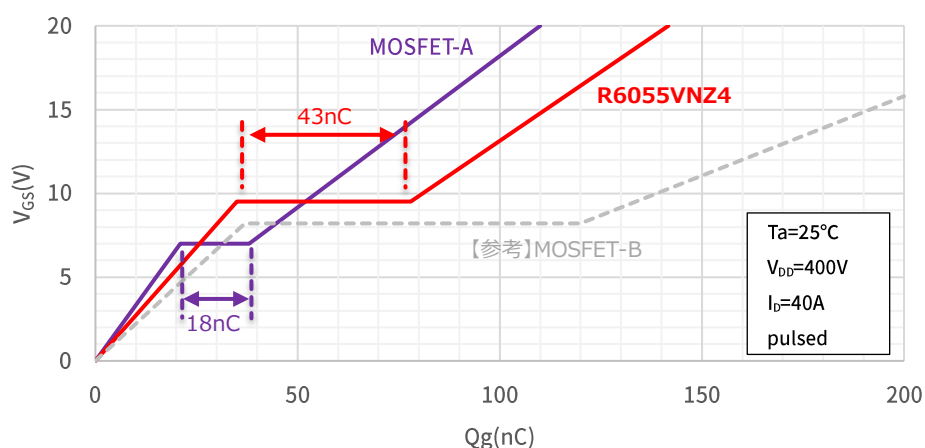
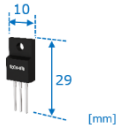
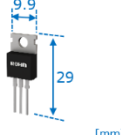
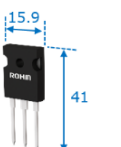


Figure 9. Qg 特性对比

5. R60xxVNx 系列 Line Up

Figure 10 所示的是本公司最新世代的高速恢复型 SJ-MOSFET 「PrestoMOS™ R60xxVNz 系列」的 LineUp。以这次评价所用的 R6055VNZ4 为代表，我们准备了 Ron 范围广泛的 LineUP，可对应各种功率带的 PSFB 电路。并且，由于本系列有着业界最高水平的高速恢复性能，不只在 PSFB 电路，在图腾柱 PFC、各种逆变器、电机驱动器等对高速恢复性能有要求的拓扑结构中也是非常适用的。以下规格以外预计还会有其他产品依次追加，如有需求欢迎咨询。

Package	Part No.	V _{DS} (V)	I _D (A)	Ron Typ. (mΩ) V _{GS} =15V	Ron Typ. (mΩ) V _{GS} =10V	Qg Typ. (nC) V _{GS} =10V	Trr Typ. (ns)
TO-220FM 	R6018VNX	600	10	170	188	27	68
	R6024VNX	600	13	127	138	38	80
	R6035VNX	600	17	95	99	50	92
TO-220AB 	R6024VNX3	600	24	127	138	38	80
	R6035VNX3	600	35	95	99	50	92
TO-247 	R6055VNZ4	600	55	59	66	80	112
	R6077VNZ4	600	77	42	46	108	125

• 详细规格请参考 datasheet

• 请注意正式产品规格可能会有变更。

Figure 10. PrestoMOS™ R60xxVNx 系列 Line Up

6. 总结

- PSFB 电路在轻负载时，滞后桥臂较难实现 ZVS 零压开关，这时若降低 Turn On 损耗有助于提高效率。
 - 为降低上述情况 Turn On 损耗，调整 R_g、死区时间(DT)和 Turn On 时序是很重要的。
- 此外，所使用的 MOSFET 的开关特性通常各有不同，请根据各元器件分别进行调整。
- 罗姆的最新一代 PrestoMOS™ R60xxVNx 系列有着高速恢复型 SJ-MOSFET 中业界 Top 级别的开关性能，并同时实现了低 Ron 特性，非常有助于提高 PSFB 电路的功率转换效率。

7. 参考文献

- [1] 通过 PrestoMOS™ 提高移相全桥电路的功率转换效率
应用笔记 (No.65AN039C, Rev.002) 罗姆株式会社, 2022 年 6 月

Notes

- 1) The information contained herein is subject to change without notice.
- 2) 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 Products 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 from 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>