



**ROHM Solution Simulator**  
**Power Device**  
**用戶指南**  
**(PFC篇)**

# Power Device 用户指南 (PFC篇)

## 前言

本用户指南是为了便于充分灵活运用「Power Device Solution circuit」的 PFC 电路，对各参数的基本调整方法和知识的总结。对于 PFC 电路设计时遇到的各个难题，这里分别介绍具体的解决方法，请在面对「不能正常运行」「进一步优化条件」等课题时作为参考。

此外，「PFC 篇」的后续还有「逆变器篇」「DC-DC 转换器篇」等篇章会在今后依次公开，请一同在电路设计中灵活运用。

## 目次

- 1. PFC电路一览 . . . . . p.1
- 2. 电感值 L 的调整 . . . . . p.2
- 3. Switching 频率 fsw 的调整 . . . . . p.4
- 4. 栅极驱动电压 Vgs 值的检讨 . . . . . p.6
- 5. 栅极电阻 Rg 的变更 . . . . . p.8
- 6. Dead time 最佳值的检讨 . . . . . p.10

## 1. PFC电路一览

Table 1.是「Power Device Solution circuit」的PFC电路的总结。表中包含通常使用的临界(BCM)、连续(CCM)、不连续(DCM)各动作模式，以及大功率 3 相PFC电路。从基本的单机驱动，到交错式驱动、同步整流、无桥、Totem-pole等，我们针对不同情况均准备了介绍内容，请根据实际用途参考并应用。

分类	管理No.	电路名
PFC Boundary Current Mode	A-1	PFC BCM Vin=200V Iin=2.5A
	A-2	PFC BCM Diode-Bridge-Less Vin=200V Iin=2.5A
	A-3	PFC BCM Diode-Bridge-Less Vin=200V Iin=50A
PFC Continuous Current Mode	A-4	PFC CCM Vin=200V Iin=2.5A
	A-5	PFC CCM 2-Phase Vin=200V Iin=5A
	A-6	PFC CCM Synchro Vin=200V Iin=2.5A
	A-7	PFC CCM Synchro 2-Phase Vin=200V Iin=5A
	A-8	PFC CCM Diode-Bridge-Less Synchro Vin=200V Iin=50A
	A-9	PFC CCM Diode-Bridge-Less Full-Bridge Vin=200V Iin=20A
	A-10	PFC CCM Totem-Pole Synchro Vin=200V Iin=100A
PFC Discontinuous Current Mode	A-11	PFC DCM Vin=200V Iin=2.5A
	A-12	PFC DCM 2-Phase Vin=200V Iin=5A
	A-13	PFC DCM 3-Phase Vin=200V Iin=7.5A
	A-14	PFC DCM Synchro Vin=200V Iin=2.5A
	A-15	PFC DCM Synchro 2-Phase Vin=200V Iin=5A
	A-16	PFC DCM Synchro 3-Phase Vin=200V Iin=7.5A
	A-17	PFC DCM Diode-Bridge-Less Synchro Vin=200V Iin=50A
PFC 3-Phase	A-18	PFC 3-Phase 3-Wire Vin=200V Pin=25kW
	A-19	PFC 3-Phase 4-Wire Vin=115/200V Pin=25kW

Table 1. Power Device Solution Circuit PFC 电路一览

## 2. 电感值L的调整

这里介绍的是通过调整线圈电感值来调整电感电流的波动率的方法。调整的前提是动作模式为CCM（连续模式）。

### 2-1. 电路举例

这里以Figure 1.的电路「A-4 PFC CCM Vin=200V Iin=2.5A」为例，变更黄色方框内的条件，并针对变更后的条件来调整L值。

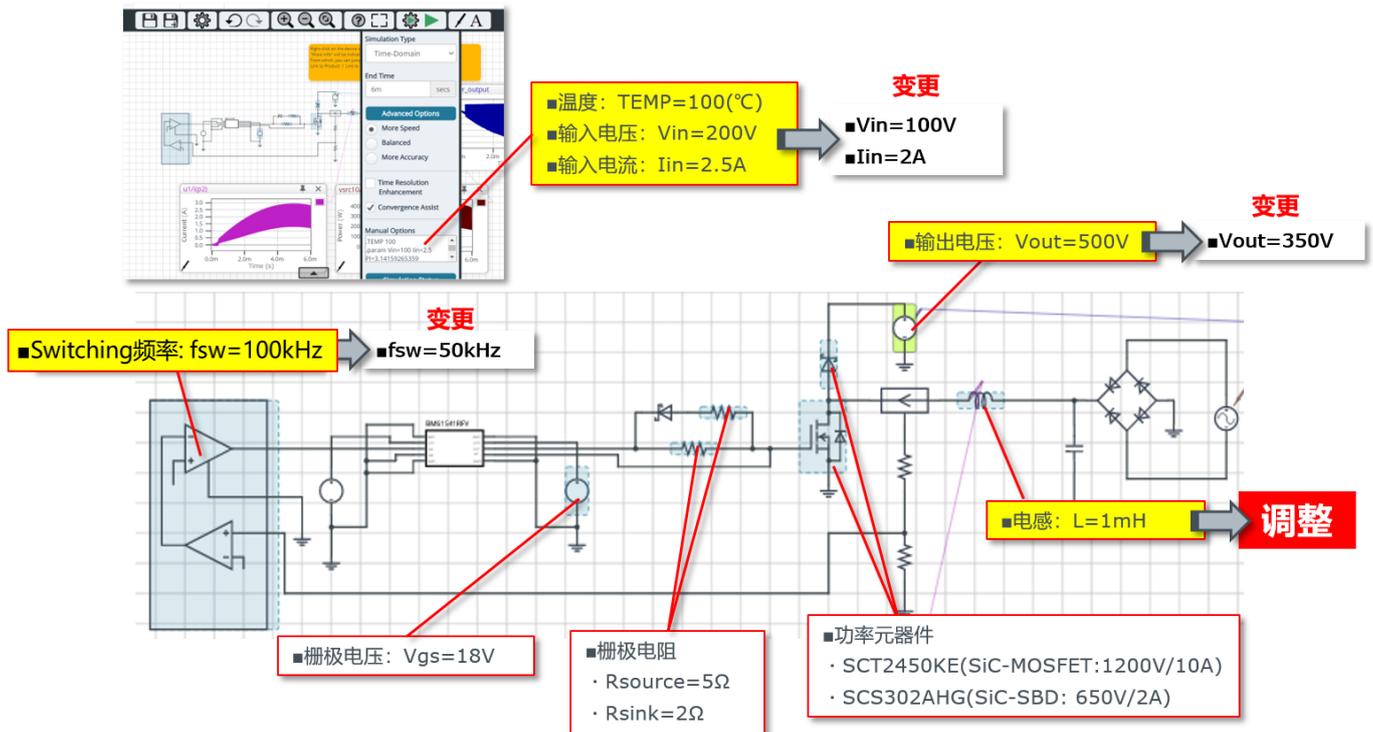


Figure 1. 电路举例 A-4 PFC CCM Vin=200V Iin=2.5A

### 2-2. L调整前的波动率

如图Figure 2.所示的是 L调整前（默认值 1mH）的电感电流 $I_L$ 。峰值  $I_{L\_peak} \approx 3.7A$ 。

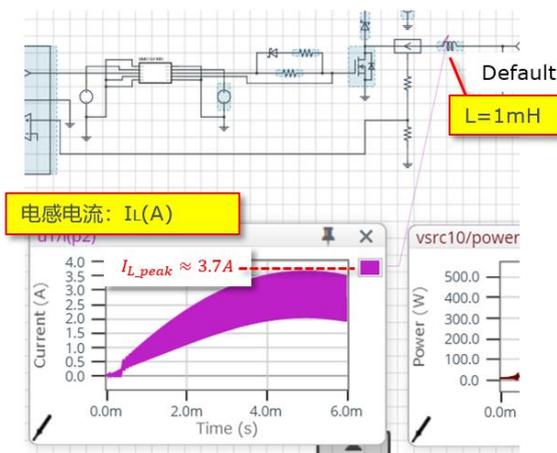


Figure 2. L 调整前的电感电流

此外，输入电流的峰值  $I_{in\_peak} = \sqrt{2} \times I_{in} \approx 2.82A$ ，以此可计算波动率 M

$$\text{波动率} M = (I_{L\_peak} - I_{in\_peak}) / I_{in\_peak} = (3.7 - 2.82) / 2.82 \approx 31.2\%$$

波动率通常会设定在 30%以下，在这种情况下有必要调整 L。

### 2-3. L的调整方法

电感值L一般如下式所述

$$L = \{(V_{out} - \sqrt{2} \times V_{in}) \times \eta \times V_{in}^2\} / (f_{sw} \times M \times P_{out} \times V_{out})$$

η: 效率、 M: 波动率

为计算合适的L值，设定η=0.95、M=0.3

$$L = \{(350 - \sqrt{2} \times 100) \times 0.95 \times 100^2\} / (50,000 \times 0.3 \times 200 \times 350) \approx 1.89[mH]$$

根据以上的计算结果调整 L=2mH 进行再仿真，电感电流的峰值入 Figure 3.所示  $I_{L\_peak} \approx 3.4A$ 。

依据上述内容可得，波动率  $M = (3.4 - 2.82) / 2.82 \approx 20.6\%$ ，符合低于 30%的要求。

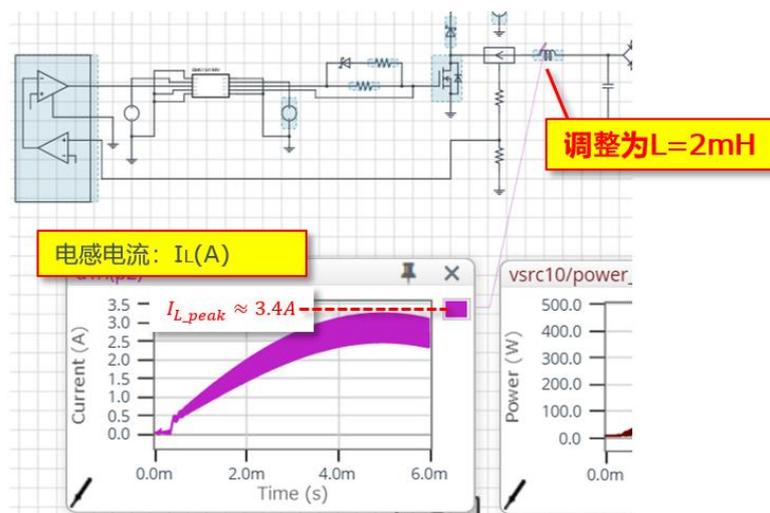


Figure 3. L 调整后的电感电流

### 3. Switching频率 $f_{sw}$ 的调整

这里介绍的是通过调整开关频率 $f_{sw}$ 来调节电感电流的波动率的方法。调整的前提是动作模式为CCM (连续模式)。

#### 3-1. 电路举例

这里以Figure 4.的电路「A-6. PFC CCM Synchro  $V_{in}=200V$   $I_{in}=2.5A$ 」为例来说明。变更黄色方框内的条件, 并针对变更后的条件来调整 $f_{sw}$ 值。

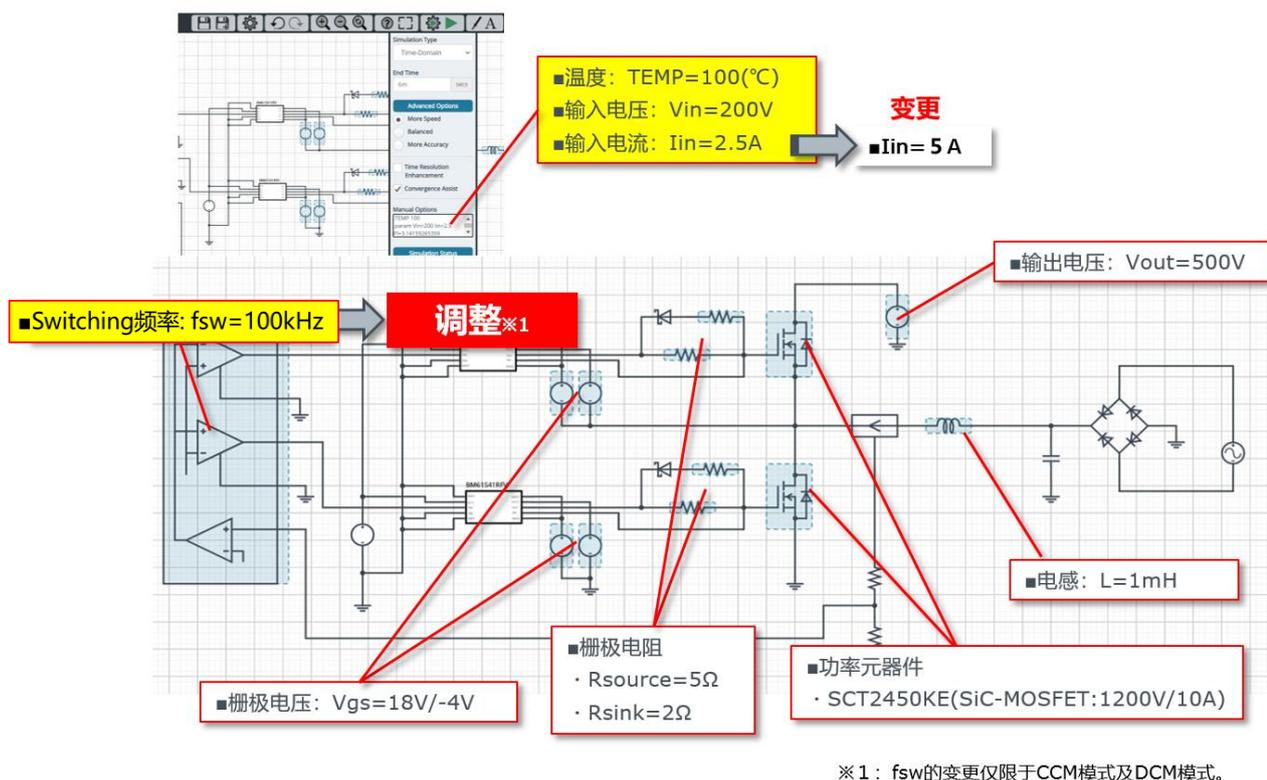
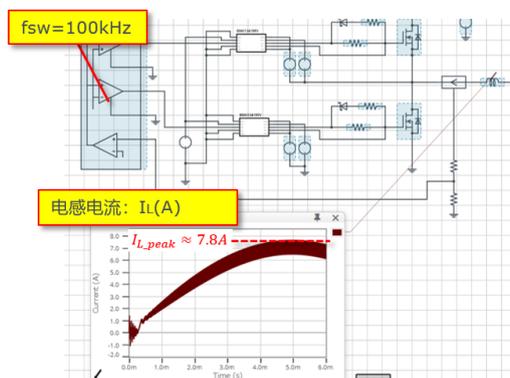


Figure 4. 电路举例 A-6. PFC CCM Synchro  $V_{in}=200V$   $I_{in}=2.5A$

#### 3-2. $f_{sw}$ 调整前的波动率

Figure 5.所示的是 $f_{sw}$ 调整前 (默认值 100kHz) 的电感电流 $I_L$ , 峰值为  $I_{L\_peak} \approx 7.8A$ 。



效率  $\eta = 97.2\%$

Figure 5.  $f_{sw}$  调整前的电感电流

此外, 输入电流的峰值  $I_{in\_peak} = \sqrt{2} \times I_{in} \approx 7.07A$  , 以此可计算波动率 M

$$\text{波动率} M = (I_{L\_peak} - I_{in\_peak}) / I_{in\_peak} = (7.8 - 7.07) / 7.07 \approx 10.3\%$$

由于波动率较小, 这里检讨通过降低 fsw 来实现效率改善。另外, fsw 调整前的效率  $\eta=97.2\%$ 。

### 3-3. fsw的调整方法

开关频率fswL一般如下式所述:

$$fsw = \{(V_{out} - \sqrt{2} \times V_{in}) \times \eta \times V_{in}^2\} / (L \times M \times P_{out} \times V_{out})$$

$\eta$ : 效率、 M: 波动率

设置 $\eta=0.972$ 、M=0.3来预估合适的fsw

$$fsw = \{(500 - \sqrt{2} \times 200) \times 0.95 \times 200^2\} / (0.001 \times 0.3 \times 1000 \times 500) \approx 56.3 [kHz]$$

根据以上计算, 调整 fsw=55kHz 后再次仿真, 电感电流峰值入 Figure 6.所示  $I_{L\_peak} \approx 8.5A$ 。

依据上述内容可得, 波动率  $M = (8.5 - 7.07) / 7.07 \approx 20.2\%$ 。

此外, 此时效率  $\eta=97.3\%$ , 相对 fsw 调整前提高了 0.1%。

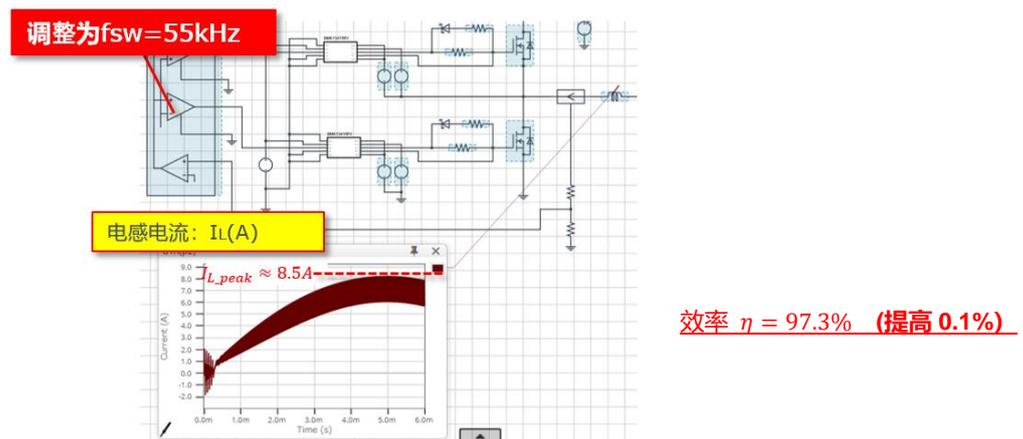


Figure 6. fsw 调整后的电感电流

## 4. 栅极驱动电压 $V_{gs}$ 值的检讨

这里特别对SiC-MOSFET的栅极驱动电压 $V_{gs}$ 的合适值进行检讨。

### 4-1. 电路举例

这里以Figure 7.电路 [ A-2. PFC BCM Diode-Bridge-Less  $V_{in}=200V$   $I_{in}=2.5A$  ] 为例来说明用来驱动低边Switching器件SiC-MOSFET SCT2450KE的合适 $V_{gs}$ 值。

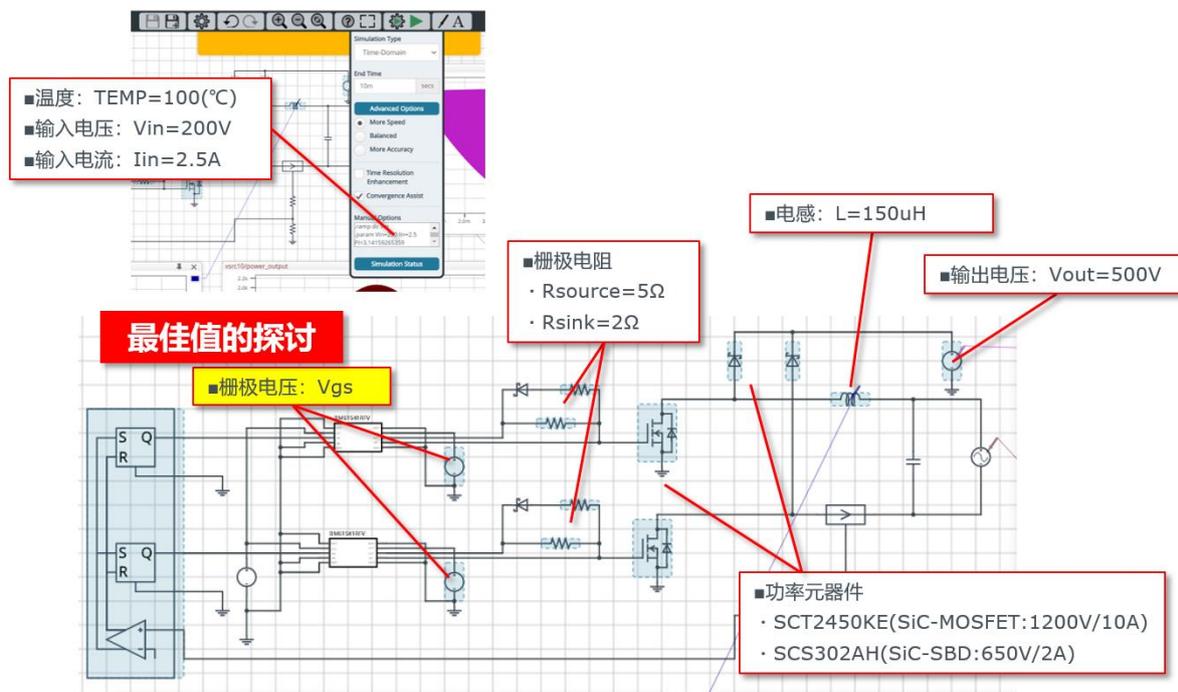


Figure 7. 电路举例 A-2. PFC BCM Diode-Bridge-Less  $V_{in}=200V$   $I_{in}=2.5A$

### 4-2. 导通电阻 $R_{on}$ 和栅极驱动电压 $V_{gs}$ 的关系

如Figure 8.所示,以往的Si-MOSFET的导通电阻 $R_{on}$ 在导通状态时,随着 $V_{gs}$ 的变化其导通电阻值是基本固定的。而SiC-MOSFET如Figure 9.所示,随着 $V_{gs}$ 变化 $R_{on}$ 也有显著变化。这是SiC相对于Si产品的重要特点。

也就是说, SiC-MOSFET在 $V_{gs}$ 较低时, 导通损耗增加、效率恶化。反过来, 若一味追求高效率而将 $V_{gs}$ 设置得过高的话会超过规格范围, 因此需要设置合适的 $V_{gs}$ 值, 这一点非常重要。

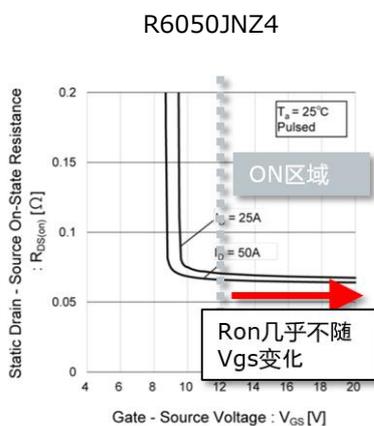


Figure 8. Si-MOSFET 的  $R_{on}$ - $V_{gs}$  关系

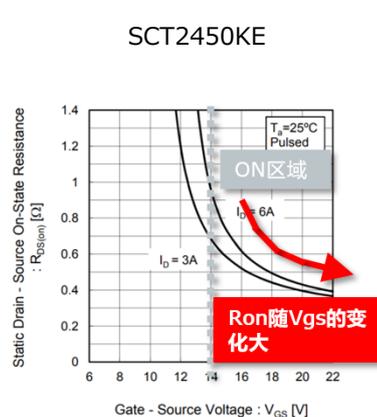


Figure 9. SiC-MOSFET 的  $R_{on}$ - $V_{gs}$  关系

### 4-3. 合适的栅极驱动电压Vgs值的检讨

关于4-1的电路 [A-2 PFC BCM Diode-Bridge-Less Vin=200V Iin=2.5A]，设置不同的Vgs值来进行效率仿真，结果如Figure 10所示。

Vgs在14V以下时，随着Ron上升、效率急速下降。该现象在低温下更为显著，在这个区域损坏的危险性会更大，因此不能实际使用。反过来，随着Vgs增大会使效率提高，但超过规格 (Vgs=22V) 后也是不能使用的。

综合考虑效率和安全性的平衡，设置Vgs=18V左右是最合适的\*1。

(\*1: 弊社SiC-MOSFET一般推荐在Vgs=18V左右的条件下使用)

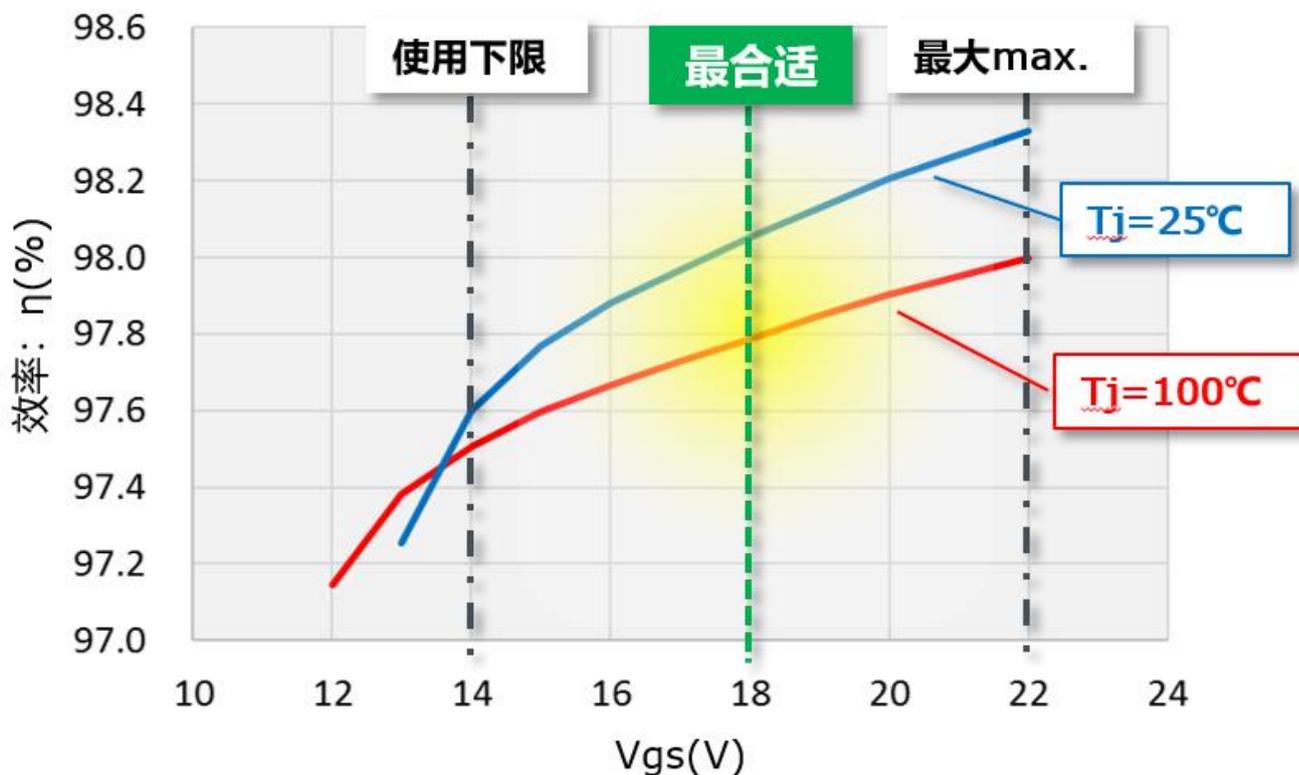


Figure 10. 效率-Vgs 的仿真结果

## 5. 栅极电阻Rg的变更

在实际电路设计中如何降低噪声是一个很大的课题。一般来说，增大栅极电阻Rg可以抑制噪声，但效率会变差（损耗增大），因此非常有必要找到一个使噪声和效率达到平衡的Rg值。

这里将MOSFET的损耗抑制在所定的值（假设为5W）以下，检讨作为噪声对策栅极电阻Rg的值最大可为多少。

此外，对于噪声需要进行实机评价，这里略过。

### 5-1. 电路举例

这里以Figure 11.的电路 [ A-5. PFC CCM 2-Phase Vin=200V Iin=5A ] 为例来说明。

将低边switching器件SiC-MOSFET SCT2450KE的损耗抑制在5W以下<sup>1</sup>，检讨Rg最大可为多少。

(\*1: 数字只是其中一例，顾客请根据自身情况予以调整。)

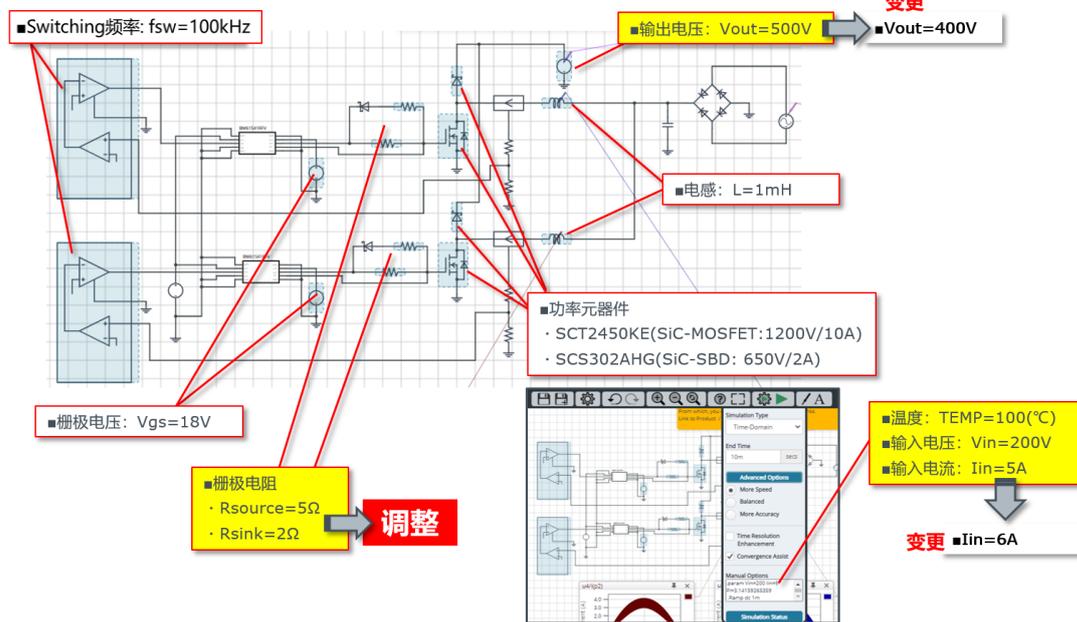


Figure 11. 电路举例 A-5. PFC CCM 2-Phase Vin=200V Iin=5A

### 5-2. Rg与损耗的关系

Switching-on (Turn-on) 时，损耗、漏极电流  $I_D$ 、漏源电压  $V_{DS}$ 、栅极电压  $V_{GS}$  的关系如 Figure 12.所示。

开关损耗（switching 损耗）发生期间的  $t_1$  以及  $t_2$  如以下所述：

$$t_1 = R_g \times (C_{gs} + C_{gd}) \times \ln \left( \frac{V_{gs} - V_{th}}{V_{gs} - V_{GP}} \right)$$

$$t_2 = Q_{gd} \times R_g / (V_{gs} - V_{GP})$$

据此可以了解开关损耗发生时间  $t_1, t_2$  与  $R_g$  成比例。

此外，这时  $I_D$  以及  $V_{DS}$  是接近直线变动，因此损耗也与  $R_g$  成比例。

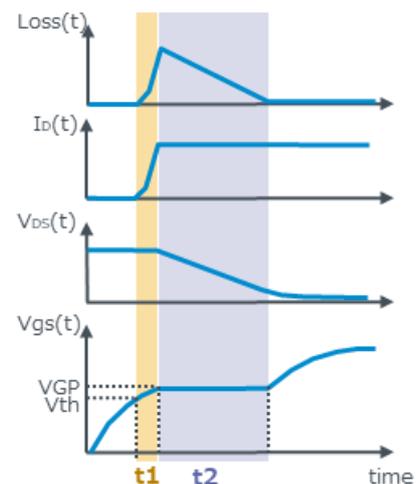


Figure 12. Switching-on 时 Loss,  $I_D$ ,  $V_{DS}$ ,  $V_{GS}$  的关系

### 5-3. Rg的调整

Figure 13.所示的是不同Rg值情况下的MOSFET损耗仿真结果。为便于理解，source侧和sink侧的电阻值设定为等倍率变化。

根据仿真结果，导通损耗不受Rg的影响、损耗值恒定，而开关损耗如5-2中所述、随着Rg值变化而成比例变化。并且为了将损耗抑制在5W以下，Rg的倍率设置在图中初始值(Rg(source)=5Ω、Rg(sink)=2Ω)的9倍以下、即 **Rg(source)=45Ω以下、Rg(sink)=18Ω以下** 这样设定的话较为合适。

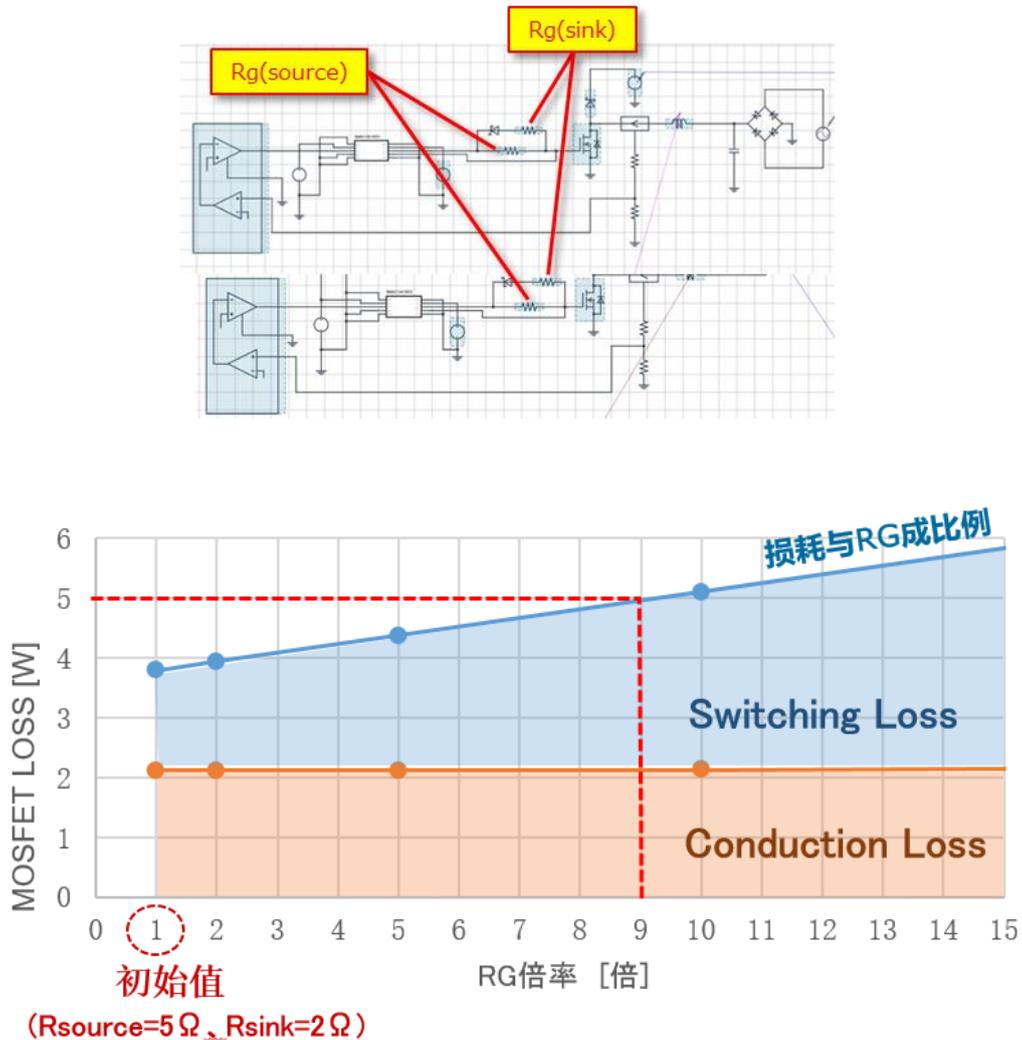


Figure 13. 损耗-Rg的仿真结果

## 6. Dead Time最佳值的检讨

这里对桥式电路的最佳(不发生贯通电流的最短)Dead time的计算方法进行检讨。

### 6-1. 电路举例

这里以Figure 14.的电路 [ A-6. PFC CCM Synchro  $V_{in}=200V$   $I_{in}=2.5A$  ] 为例来说明。  
检讨的是为了实现同步整流而将High · Low串联连接的SiC-MOSFET SCT2450KE的Dead Time的最佳值(不发生贯通的最短值)。Dead Time可由PWM控制器的 TD1 (高边) ,TD2 (低边) 分别设置。

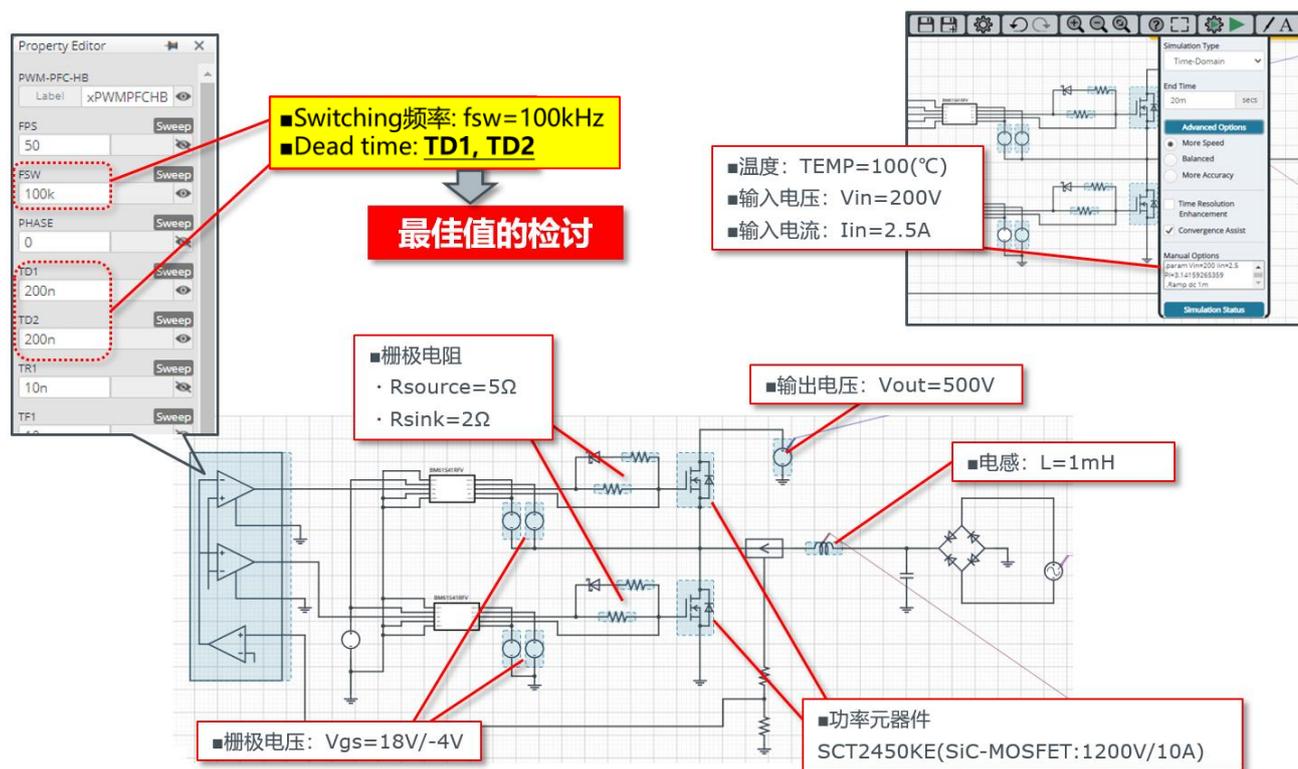


Figure 14. 电路举例 A-6. PFC CCM Synchro  $V_{in}=200V$   $I_{in}=2.5A$

### 6-2. Dead Time期间的损耗

Figure 15.所示的是Dead Time期间的电流的情况。HS表示高边、LS表示低边。  
关于桥式结构电路,防止贯通电流的出现需要确保足够长的Dead Time,但过长的话损耗会太大。这时因为在Dead Time期间,导通损耗较小的MOSFET那一路处于OFF状态,因此电流会倾向于流经导通损耗较大的MOSFET的内置二极管,增加不必要的损耗。

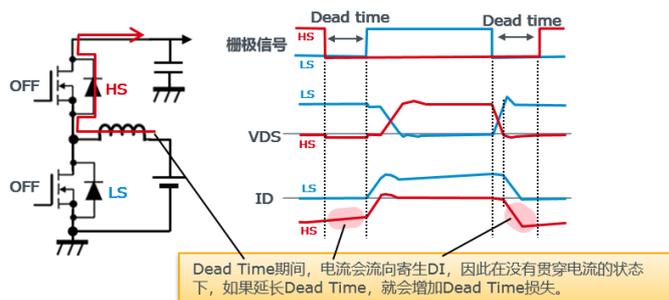


Figure 15. Dead Time期间的电流流动情况

### 6-3. Dead Time和功率因子

Figure 16.所示的是Dead Time长度和电感电流 $I_L$ 的关系。

Dead Time过长的话，低电压领域会变成不连续动作、电感电流波形发生歪曲、造成功率因子恶化。即从功率因子的角度，也可以得知不宜将Dead Time设置得过长。

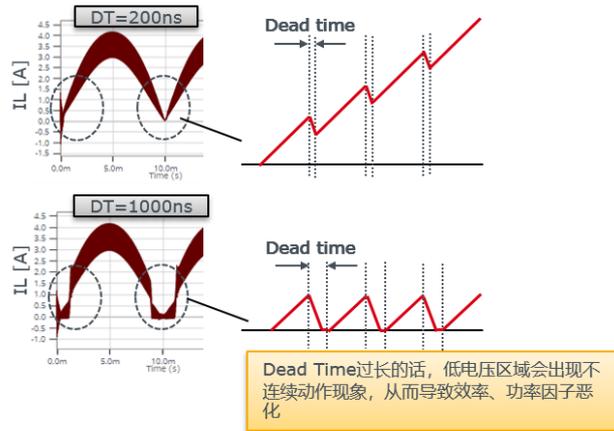


Figure 16. Dead Time长度和电感电流 $I_L$

### 6-4. 最佳的Dead Time的检讨

Figure 17.所示的是不同Dead Time时的MOSFET损耗的仿真结果。HS表示高边、LS表示低边。

Dead time设置为50ns以下时，由于有贯通电流流过、损耗会急剧增大。反过来，Dead time太长的话，HS-MOS内置二极管的导通时间变长，使得损耗也增大。不出现贯通电流的最短Dead Time时的MOSFET的损耗是最小的，这时的死区时间为 $T_D=100\text{ns}$ 。但考虑到开关速度受到温度、批次等影响而有一定波动，一般说来需要有100ns程度的余量。因此综合考虑，设置Dead time=200ns为最佳。

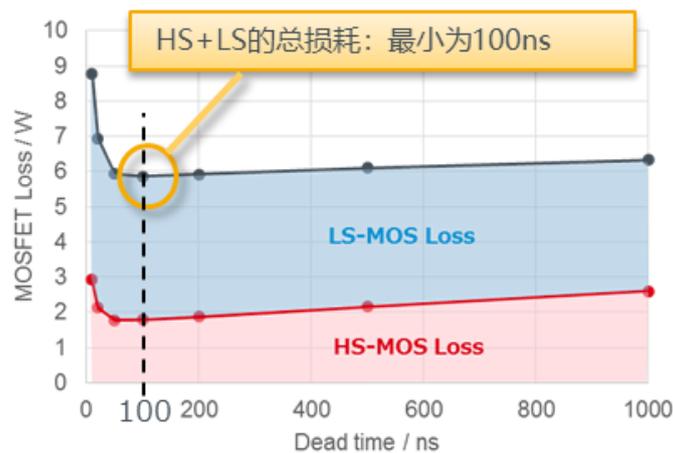


Figure 17. MOSFET的 损耗-Dead Time 的损耗仿真结果

## 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 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>