

파워 디바이스

스위칭 회로의 전력 손실 계산

파워 회로 설계 시에는, 각 디바이스에 허용되는 손실을 초과하지 않음을 확인하는 것이 중요합니다. 이를 간과하게 되면, 디바이스가 열 파괴에 이르게 되는 경우가 있습니다. 본 어플리케이션 노트에서는 SiC MOSFET 를 사용한 스위칭 회로에 있어서, 스위칭 동작 시 SiC MOSFET 에서 발생하는 전력 손실의 계산 방법에 대해 설명하겠습니다.

손실 측정 회로

파워 디바이스의 스위칭 파라미터를 측정하는 표준적인 방법으로, 더블 펄스 테스트가 있습니다. Figure 1 은 측정 회로입니다. 더블 펄스 테스트는 유도 부하와 전원으로 실시합니다. 대부분의 경우 스위칭 소자의 부하에는 인덕터가 사용되고 있으므로, 이와 동일한 조건을 만들기 위해 테스트 회로에서도 인덕터가 사용됩니다. 전원은 인덕터에 전압을 공급하기 위해 사용됩니다. 신호 발생기 (G)는 SiC MOSFET (Q1)의 게이트 구동을 위한 펄스를 출력하기 위해 사용됩니다. 벌크 콘덴서 (C1)은 일시적으로 급격한 대전류를 공급하기 위해 사용됩니다. 이는 전원의 응답성을 보완하기 위함입니다.

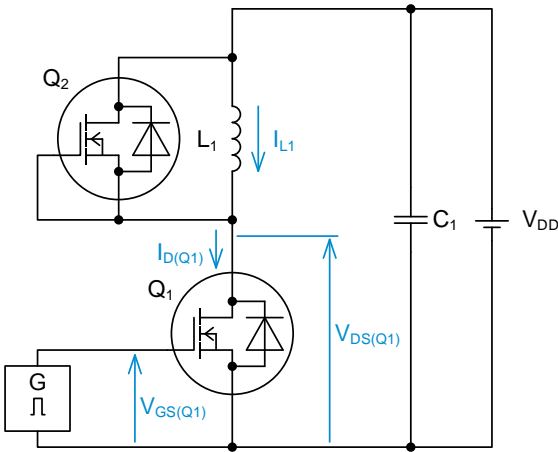


Figure 1. 더블 펄스 테스트 회로

Figure 2 는 대표적인 더블 펄스 테스트의 파형입니다. 가장 위쪽의 파형이 게이트 구동 펄스입니다. 첫번째 펄스의 하강 에지 (Falling Edge)에서 Turn-off 파라미터를 측정하고, 두번째 펄스의 상승 에지 (Rising Edge)에서 Turn-on 파라미터를 측정합니다.

Figure 3 은 Turn-off 부분을 상세하게 나타낸 것입니다. VGS가 90%로 저하된 지점에서, VDS가 VDD의 10% 저하된 지점까지를 Turn-off 시간 t_{off} 로 정의합니다. 그리고, VDS가

V_{DD} 의 90% 저하된 지점까지를 지연 시간 $t_{d(off)}$, VDS가 90%에서 10%까지 변화하는 구간을 하강 시간 (Fall Time) t_f 로 정의합니다. (주 : VDS의 10%와 90%의 표현은 IEC60747-8 과는 반대입니다.)

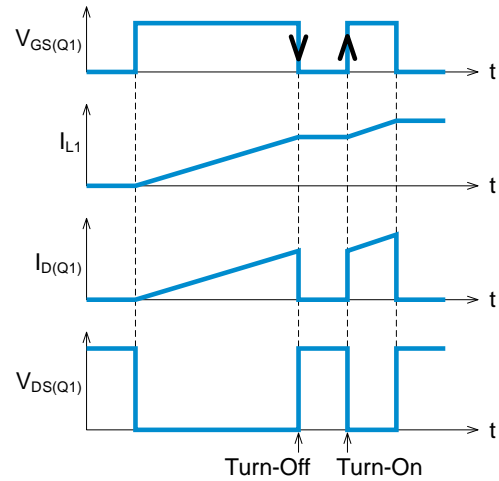


Figure 2. 더블 펄스 테스트 파형

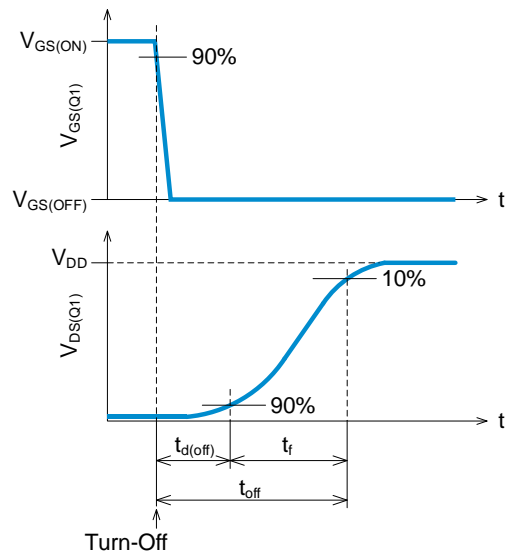


Figure 3. Turn-off 시간의 정의

Figure 4 는 Turn-on 부분을 상세하게 나타낸 것입니다. V_{GS} 가 10% 상승한 지점에서, V_{DS} 가 V_{DD} 의 90% 저하된 지점까지를 Turn-on 시간 t_{on} 으로 정의합니다. 그리고, V_{DS} 가 V_{DD} 의 10% 저하된 지점까지를 지연 시간 $t_{d(on)}$, V_{DS} 가 10%에서 90%까지 변화하는 구간을 상승 시간 (Rise Time) t_r 로 정의합니다. (주 : V_{DS} 의 10%와 90%의 표현은 IEC60747-8 과는 반대입니다.)

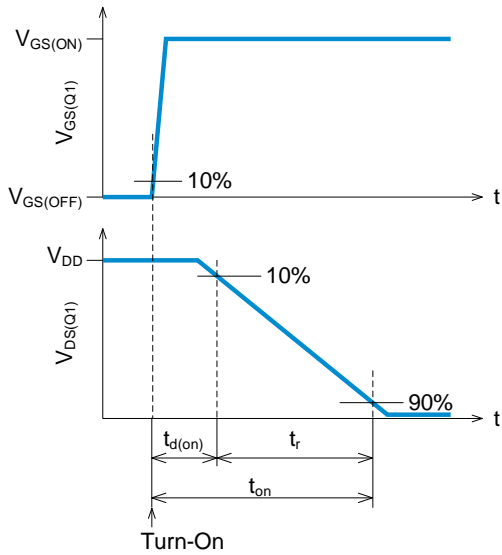


Figure 4. Turn-on 시간의 정의

다음으로 더블 펄스 테스트 각 스텝에서의 전류 흐름에 대해 Figure 5 를 참조하여 설명하겠습니다.

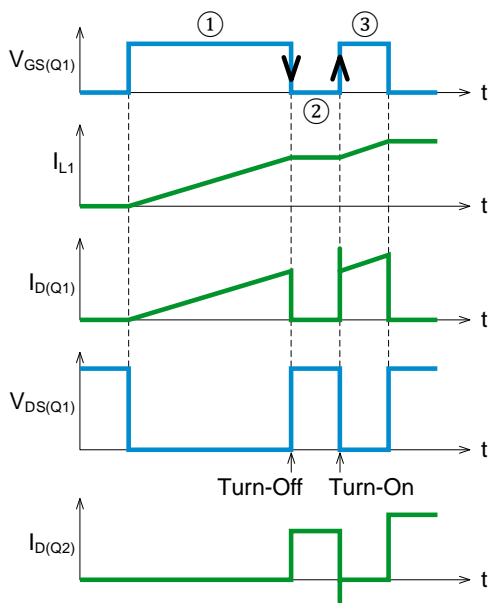
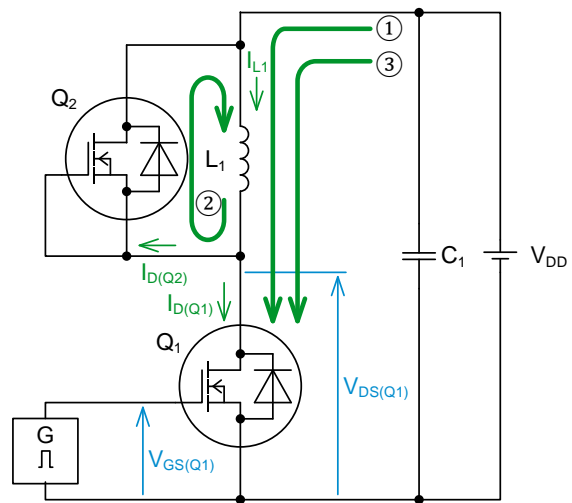


Figure 5. 더블 펄스 테스트 각 스텝에서의 전류 흐름

스텝 ① : 첫번째 Turn-on 구간입니다. Low-side SiC MOSFET Q1 이 ON 되어, 전원에서 인덕터로 전류가 공급됩니다. 이때 인덕터에 흐르는 전류가 자계를 발생시키고, 전기 에너지가 자기 에너지로 변환되어 인덕터에 축적됩니다. 인덕터 전류는 시간에 비례하여 증가하므로, 원하는 테스트 전류 (I_b)가 되도록 이 구간의 펄스 폭을 조정합니다.

스텝 ② : 첫번째 Turn-off 구간입니다. Q1 이 Turn-off 되면, 인덕터에 축적된 자기 에너지가 전류로 방출됩니다. 전류는 플라이휠 다이오드를 경유하여 다시 인덕터로 환류됩니다. 이 경우의 플라이휠 다이오드는 High-side SiC MOSFET Q2 의 보디 다이오드입니다. 이 구간의 펄스 폭은 부하 전류를 가능한 일정하게 유지시키기 위해 되도록 짧게 합니다. 또한, Q1 이 확실하게 Turn-off 되는 시간을 확보할 필요가 있으므로, 두가지 조건을 모두 만족하도록 시간을 설정합니다.

스텝 ③ : 두번째 Turn-on 구간입니다. Q1 이 Turn-on 된 직후 I_b 파형에 오버슈트가 관측됩니다. 이는 직전까지 Q2 의 보디 다이오드에 순방향 전류가 도통되고 있던 상태가 역저지 상태로 전환되었을 때, 단시간 역방향으로 도통되는 역회복 전류입니다. 이는 High-side SiC MOSFET 의 $I_{b(Q2)}$ 에서 측정됩니다. Q1 이 ON 됨에 따라 다시 전원에서 인덕터로 전류가 공급됩니다. 그리고, I_b 는 스텝 ②에서 환류된 전류치에서 다시 증가하기 시작합니다. 펄스 폭은 과전류와 열로 인해 디바이스가 파괴되지 않도록 첫번째 펄스보다 짧게 합니다. 그리고, Q1 이 확실하게 Turn-on 되는 시간을 확보할 필요가 있으므로, 두가지 조건을 모두 만족하도록 시간을 설정합니다.



손실 계산

Figure 1 의 테스트 회로에 있어서, Low-side SiC MOSFET 에서 발생하는 손실에는 스위칭 손실과 도통 손실이 있습니다. 이상적인 스위칭 파형에서는, Figure 5 와 같이 $V_{DS(Q1)}$ 및 $I_{D(Q1)}$ 는 지연되지 않고 전압과 전류가 수직으로 변화합니다. 이 상태에서는 여분의 전압, 전류가 발생하지 않으므로 손실이 발생하지 않습니다. 실제로는 기생 저항 및 기생 용량으로 인해 지연이 발생하므로, 전압, 전류 파형은 Figure 6 과 같이 t_{on} , t_{off} 가 존재하는 파형으로 변화합니다. 이러한 파형 부분의 전압과 전류가 겹쳐진 부분이 스위칭 손실이 됩니다.

실제의 회로에서는, Turn-on 및 Turn-off 시의 과도기 전압과 전류는 지수함수적으로 변화하지만, 관측된 파형에서 지수함수로 나타내기 어려우므로 선형근사 (linear approximation)를 사용하여 계산합니다.

Figure 6 의 파형에서, 각 구간으로 나누어 Q1 에서 소비하는 전력량을 계산합니다. 먼저, Turn-on t_{on} 및 Turn-off t_{off} 시간 (스위칭 시간)에 소비하는 전력량 W_{SW} 는 식 (1)로 근사할 수 있습니다.

$$\begin{aligned}
 W_{SW} \approx & \frac{1}{2} V_{DS1(on)} I_{D2(on)} t_{on1} \\
 & + \frac{1}{6} V_{DS1(on)} (2 I_{D2(on)} + I_{D3(on)}) t_{on2} \\
 & + \frac{1}{6} V_{DS2(off)} (I_{D1(off)} + 2 I_{D2(off)}) t_{off1} \\
 & + \frac{1}{2} V_{DS2(off)} I_{D2(off)} t_{off2} \quad [J] \quad (1)
 \end{aligned}$$

다음으로 도통 시에 소비하는 전력량을 계산합니다. Figure 6 에서는, T_{ON} 구간에서 Q1 이 도통하고 있으므로 V_{DS} 는 Q1 의 ON 저항과 I_D 의 곱이 됩니다. ON 저항의 값은 데이터시트를 참조합니다. 전력량 W_{ON} 은 식 (2)로 근사할 수 있습니다.

$$W_{ON} \approx \frac{1}{3} R_{ON(Q1)} (I_{D3(on)}^2 + I_{D3(on)} I_{D1(off)} + I_{D1(off)}^2) T_{ON} \quad [J] \quad (2)$$

단, $R_{ON(Q1)}$: Q1 의 ON 저항 [Ω]
 T_{ON} : Q1 의 ON 시간 [s]

다음은 Q1 이 OFF 일 때의 전력량입니다. Figure 6 에서는, T_{OFF} 구간에 해당됩니다. Q1 이 OFF 일 때는 I_D 가 zero 가 되므로 전력량 W_{OFF} 는 Zero 가 됩니다. (식 3)

$$W_{OFF} = 0 \quad [J] \quad (3)$$

Q1 의 총 전력량은 식 (4)로 구할 수 있으며, 식 (1)부터 식 (3)까지의 합계입니다.

$$W = W_{SW} + W_{ON} + W_{OFF} \quad [J] \quad (4)$$

Q1 의 전력 손실은 식 (5)로 구할 수 있습니다.

$$P = \frac{W_{SW} + W_{ON} + W_{OFF}}{T} = (W_{SW} + W_{ON} + W_{OFF}) f \quad [W] \quad (5)$$

단, T : 스위칭 주기 [s]
 f : 스위칭 주파수 [Hz]

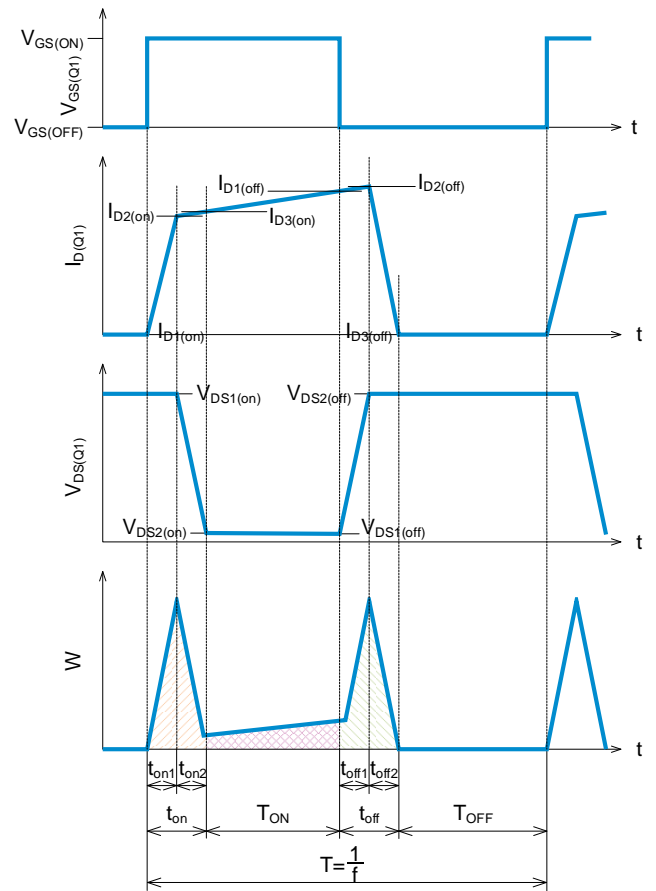


Figure 6. 손실 계산 파형의 일례

상기와 같이 손실은, 전압과 전류가 겹쳐지는 부분을 적분 근사하여 구하였습니다. 다른 자료에서는 상이한 식으로 게재 되어 있는 경우도 있습니다. 예를 들어 겹쳐지는 부분을 더 간략화하여 삼각형이나 사다리꼴의 면적을 구하는 식을 사용하는 경우도 있습니다. 이러한 사례는 간략화하더라도 계산 결과로서 오차가 적은 경우에 사용됩니다.

참고 자료

[1] IEC60747-8:2010, Semiconductor devices – Discrete devices – Part 8: Field-effect transistors

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

<http://www.rohm.com/contact/>