

Power Switching Device

Bridge 구성에서의 Gate-source 전압 작용

MOSFET 및 IGBT 등의 파워 스위칭 디바이스는 다양한 전원 어플리케이션이나 전력 라인의 스위칭 소자로 사용되고 있습니다. 또 사용되고 있는 회로 방식도 다방면에 걸쳐 단독 사용은 물론, 직렬 접속이나 병렬 접속으로의 사용 방법도 다수 있습니다. 특히 디바이스를 상하로 직렬 접속하는 브릿지 구성에서는 각각의 디바이스를 교대로 온오프 하는 것이 일반적이며, 각 디바이스에 흐르는 전류나 변화하는 전압에 의해 서로 복잡하게 영향을 주고 있습니다. 따라서 이 어플리케이션 노트에서는 MOSFET 브릿지 구성에 있어서 각 MOSFET 의 게이트 소스간 전압에 주목해 가장 간단한 동기 방식 boost 회로를 예로 들어, 스위칭 동작을 상세하게 이해하는 것을 목적으로 합니다.

MOSFET bridge 구성

MOSFET 을 브릿지 구성으로 사용하는 가장 간단한 동기 방식 boost 회로를 나타냅니다(Figure 1).

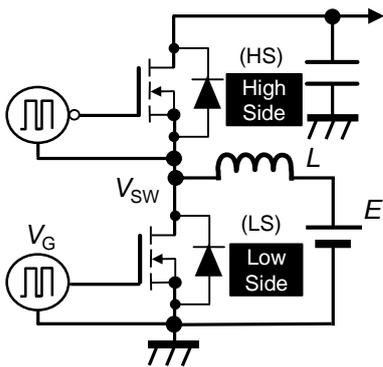


Figure 1. 동기 방식 boost 회로

이 회로에 사용되는 MOSFET 상측(HS)과 하측(LS)은 교대로 on 하며, 동시 on 을 방지하기 위해 두 MOSFET 가 off 되고있는 dead time 이 설정되어 있습니다(Figure 2).

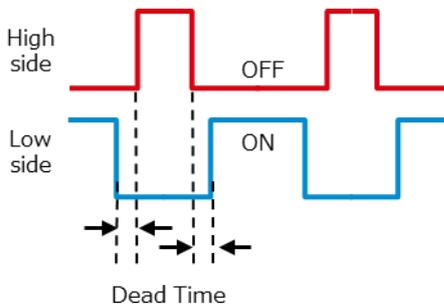


Figure 2. gate 신호(V_G) 타이밍

이 동작의 경우 HS 와 LS 각 MOSFET 드레인-소스 전압(V_{DS}), 드레인 전류(I_d)파형 개략의 형태를 Figure 3 에 나타냈습니다. 이 파형은 인덕터 L 의 전류가 연속동작이 되는 이른바 하드 스위칭 상태에 대해 생각하고 있습니다.

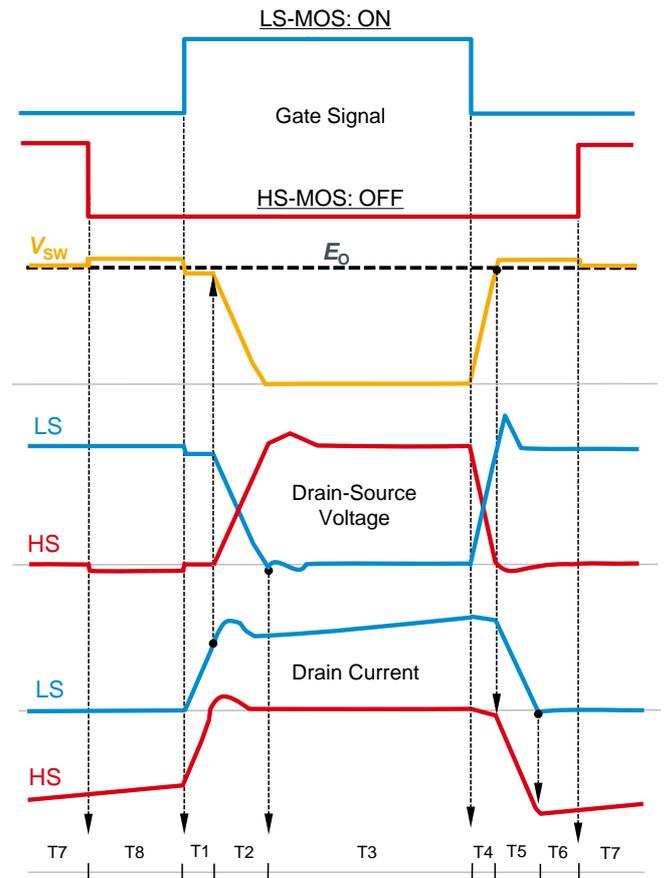


Figure 3. 각 MOSFET 전압 · 전류 파형

횡축은 시간을 나타내며, 시간영역 Tk(k=1~8)의 정의는 각각 아래와 같습니다.

- T1:LS 가 ON 하여 MOSFET 전류가 변화하는 기간
- T2:LS 가 ON 하여 MOSFET 전압이 변화하는 기간
- T3:LS 가 ON 하고 있는 기간
- T4:LS 가 OFF 하여 MOSFET 전압이 변화하는 기간
- T5:LS 가 OFF 하여 MOSFET 전류가 변화하는 기간
- T4-T6:HS 가 ON 하기 까지의 dead time 기간
- T7:HS 가 ON 하는 기간(동기정류기간)
- T8:HS 가 OFF 하여 LS 가 ON 하기까지의 dead time 기간

Gate 구동 회로

LS 측의 턴온시와 턴오프시에 있어서 V_{DS} 및 b 의 변화방식이 다르다는 것은 알고 있습니다만, 그것들이 변화함으로써 게이트-소스 전압(V_{GS})으로의 영향에 대해 고려할 경우에는 게이트 구동회로의 등가회로가 중요합니다.

Figure 4 에 기본이 되는 등가회로를 나타내었습니다.

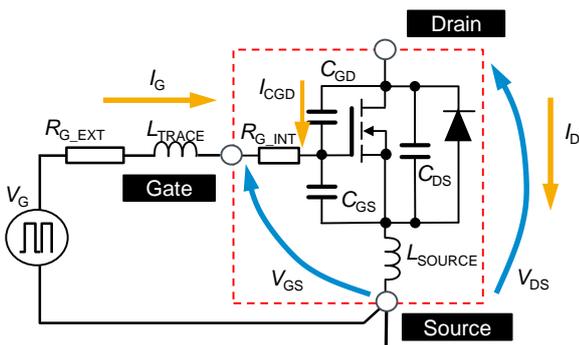


Figure 4. Gate 구동회로와 MOSFET 등가회로

게이트 구동회로에는 게이트 신호(V_G), 디바이스 내부의 게이트 배선에 의한 저항(R_{G_INT}) 및 디바이스 패키지의 소스 인덕턴스(L_{SOURCE})와 게이트 회로 패턴의 인덕턴스(L_{TRACE}), 외부 게이트 저항(R_{G_EXT})이 존재합니다. Figure 3 에도 나타낸 것처럼 각 전압전류의 극성은 게이트 전류(I_G) 및 b 가 Figure 4 에 나타낸 방향을 플러스로 하고, 소스 단자를 기준으로 V_{GS} 및 V_{DS} 를 정의하였습니다. 또한, 디바이스 내부의 게이트 배선 인덕턴스도 존재하지만, L_{TRACE} 에 비해 작기 때문에 여기에서는 생략합니다.

Turn-on·Turn-off 동작

Figure 3 파형의 상세를 다음에 설명하겠습니다.

LS 측을 ON 하기 위해 LS 측 게이트 신호에 플러스 V_G 가 인가 되면 게이트-소스간 용량(C_{GS})으로의 충전이 시작되고 V_{GS} 가 상승, 디바이스의 게이트 문턱전압($V_{GS(th)}$) 이상이 되면 LS 에서 b 가 흐르기 시작하고 동시에 소스→드레인 방향으로 흐르고 있던 HS 측의 b 가 감소를 시작합니다(Figure 3-T1). 다음으로 HS 측의 b 가 0 이 되고 기생 다이오드가 턴오프하면 중간점의 전압(V_{sw})이 강하하기 시작함과 동시에 HS 측의 드레인-소스간 용량(C_{DS}) 및 드레인-게이트간 용량(C_{GD})으로의 충전이 이루어집니다.(Figure 3-T2). 이 HS 측에서의 $C_{DS} + C_{GD}$ 에 대한 충전(LS 측은 방전)이 완료 후, LS 측의 V_{GS} 가 소정의 전압에 도달했을 때 LS 측 턴온 동작이 완료됩니다.

한편, 턴오프 동작은 LS 측 V_G 가 오프함으로써 시작되고, LS 측의 C_{GS} 충전전하가 방전을 시작해 MOSFET 의 플라토 전압에 이르면(밀러효과 영역에 들어감) LS 측의 V_{DS} 가 상승을 시작함과 동시에 V_{sw} 가 상승합니다. 이 시점에서는 대부분의 부하전류는 아직 LS 측에 흐르고 있는 상태(Figure 3-T4)이며, HS 측의 기생 다이오드에는 아직 반전전류가 흐르고 있지 않습니다. LS 측의 $C_{DS} + C_{GD}$ 로의 충전(HS 측은 방전)이 완료되면 V_{sw} 가 입력전압(E)를 넘어 HS 측의 기생 다이오드가 턴온하여, LS 측의 b 가 HS 측으로 반전하기 시작합니다(Figure 3-T5). LS 측의 b 는 결국 0 이 되어 dead time 기간(Figure 3 -T6)으로 들어가 HS 측 MOSFET 의 게이트 신호에 플러스 V_G 가 인가되면 턴온하여, 동기동작 기간이 됩니다.(Figure 3-T7).

이 일련의 스위칭 동작에서 HS 측 및 LS 측 MOSFET 의 V_{DS} 및 b 의 변화에 기인하여 다양한 게이트 전류가 흐르고, 그것이 인가신호 V_G 와는 다른 V_{GS} 변화로 나타납니다. 이런 다양한 게이트 전류를 Figure 5 에 나타냈습니다. 그림 중 (I), (I'), (II), (III)는 V_{GS} 가 변화하는 개별현상을 나타낸 것입니다.

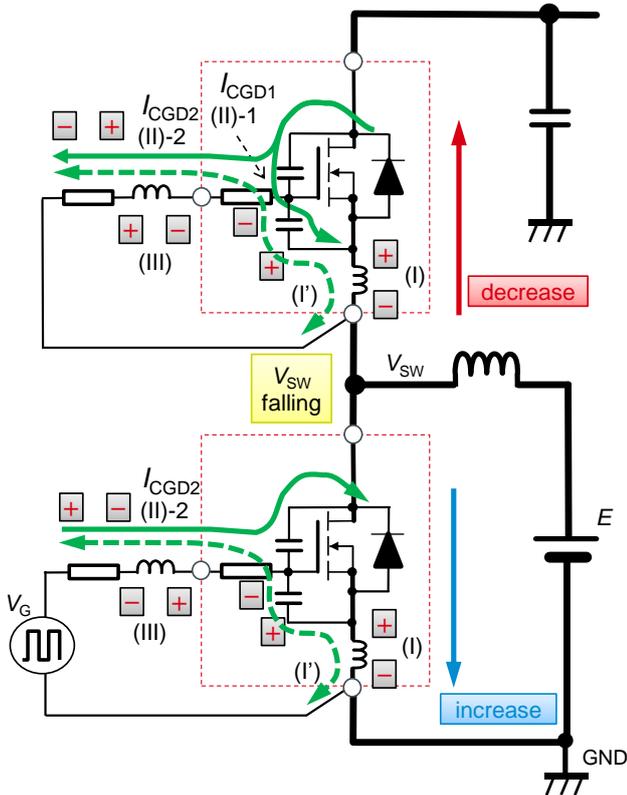


Figure 5. LS 턴온 시의 게이트 신호 전류동작

dV_{DS}/dt 에 의해 발생하는 전류

Figure 4 에 나타난 것처럼 V_{DS} 가 변화하면 C_{GD} 에 전류(I_{CGD})가 흐릅니다. 이 전류는 Figure5 에 나타나듯이 C_{GS} 측에 흐르는 전류(I_{CGD1}: (II)-1)와 게이트 회로측에 흐르는 전류(I_{CGD2}: (II)-2)로 나뉩니다. 변화 시작시는 게이트 회로 측의 임피던스가 크고, I_{CGD} 는 대부분 C_{GS} 측에 흐르며, 이 때 I_{CGD1} 은 식 (1)과 같이 됩니다.

$$I_{CGD} \cong I_{CGD1} = \frac{C_{GD}}{1+C_{GD}/C_{GS}} \cdot \frac{dV_{DS}}{dt} \quad (1)$$

이것보다 C_{GD} 가 크거나 C_{GD}/C_{GS} 비가 작아지면 I_{CGD1} 이 커지는 것을 알 수 있습니다.

dI_D/dt 에 의해 발생하는 전압

I_D 의 변화 dI_D/dt 에 의해 발생하는 전압은,

$$V_{LSOURCE} = L_{SOURCE} \cdot \frac{dI_D}{dt} \quad (2)$$

가 됩니다. 이것이 현상(I)입니다. 이 전압에 의해 전류(I')가 흐릅니다.

dV_{DS}/dt 나 db/dt 는 +도 -도 되기 때문에 그것에 의해 발생하는 전류나 전압의 극성은 턴온과 턴오프시에서 다릅니다.

Turn-On 시의 Gate 신호 작용

LS 턴온 시에는 우선 I_D 가 변화합니다(Figure 3-T1). LS 측, HS 측 모두 db/dt>0 입니다. 그 때문에 현상 (I)에 의해 Figure5 에 나타난 극성에서 기전식 (2))이 발생합니다. 이때 흐르는 전류는 C_{GS} 를 소스측을 + 로써 충전하기 때문에 LS 에서는 V_{GS} 를 억제하는 한편 HS 에서는 V_{GS} 가 마이너스 측으로 당겨져 마이너스 surge 로써 보입니다.

I_D 의 변화가 끝나면 LS 측의 V_{GS} 전위가 감소합니다 (Figure 3-T2). 따라서 식 (1)에 의한 전류가 Figure 5 중의 (II)-1, (II)-2 와 같이 흐르며 각각 다음 식으로 나타나는 전압상승이 V_{GS} 에서 일어납니다.

$$V_{surge2-1} = \frac{1}{C_{GS}} \int (I_{CGD1})dt$$

$$= \frac{1}{1+C_{GS}/C_{GD}} \cdot \Delta V_{DS} \quad (3)$$

$$V_{surge2-2} = I_{CGD2} \cdot R_{G_EXT} + L_{TRACE} \cdot \frac{dI_{CGD2}}{dt} \quad (4)$$

V_{GS} 가 변화를 개시한 직후는 식 (3)에 의한 V_{GS} 상승이 주류를 이루고 있지만, 시간에 따라 식(4)에 의한 V_{GS} 상승도 보이게 됩니다. 즉, MOSFET 의 C_{GD}/C_{GS} 비나 구동회로의 R_{G_EXT} 나 게이트 구동신호 패턴의 인덕턴스 L_{TRACE} 가 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있습니다.

Figure5 에 제시한 바와 같이 HS 측에서 (II)-2 의 전류 I_{CGD2} 는 V_{GS} 를 끌어올리는 방향으로 되어 있습니다. 그 때문에 본래 오프하고 있어야 할 HS 측은 V_{GS} 의 상승 정도에 따라서 턴온 동작을 시작하여(셀프 턴온), LS 측의 on 동작과 겹쳐 상하 MOSFET 의 동시 온이 발생해 관통 전류가 흐릅니다.

I_{CGD2} 는 턴온 동작이 완료될 때까지 계속 흘러 L_{TRACE} 에 축적되지만 V_{SW} 변화가 완료된 시점에서 소멸되며, L_{TRACE} 가 Figure 5 와 같이 기전됩니다. 이것이 현상(III)입니다. I_{CGD2} 는 R_{G_EXT} 등의 스위칭 조건에 의해 수 암페어에 이를 수 있으며 기전이 커질 수 있습니다.

결과적으로 게이트 전압의 움직임은 Figure 6 과 같이 됩니다. 그림 중 Figure 5 와 같은 현상을 나타내고 있습니다. 덧붙여 그림 중 V_{GS} 의 점선은 이상적인 전압파형을 나타내고 있습니다.

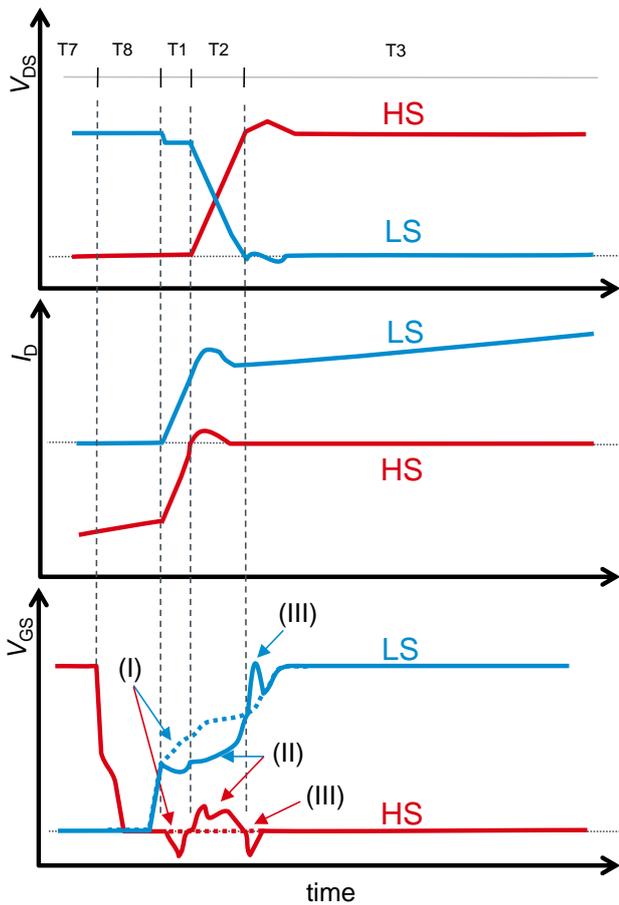


Figure 6. 게이트-소스 전압의 움직임(LS 측 턴온시)

Figure 7 은 ROHM 의 MOSFET 을 브릿지 구성으로 하여 LS 측을 턴온 했을 때의 더블 펄스 시험결과입니다. 외부 게이트 저항은 0Ω(Figure 7(a))와 10Ω(Figure 7(b))입니다.

R_{G_EXT} 가 작을 때 Figure 7(a)에 있듯이 현상(I)에 의한 V_{GS} 의 감소가 크다는 것을 알 수 있습니다. 또한 매우 빠른 스위칭 속도 때문에 현상(III)이 현저하게 발생하고 있지만 R_{G_EXT} 가 0Ω 이기 때문에 현상(II)의 파형은 거의 관측되지 않습니다. 한편 Figure 7(b)에서는 현상(II)-2, R_{G_EXT} 에 의한 V_{GS} 의 상승이 현저하게 나타나고 있습니다.

이 결과로부터도 명백한 것처럼, LS 측 on 시의 HS 측 셀프 턴온을 유발하는 현상(II)-2의 V_{GS} 상승을 작게 하기 위해서는, HS 측 턴오프시의 외부 게이트 저항 R_{G_EXT} 를 작게 합니다. 그러나, 일반적으로 HS 측과 LS 측의 R_{G_EXT} 는 같게 하는 경우가 많아 이 때문에 R_{G_EXT} 를 작게 하면 LS 측의 dV_{DS}/dt 가 증대해 식 (1)에 나타내듯이 HS 측의 I_{CGD} 가 증가합니다. 결과적으로 식 (4)에서 알 수 있듯이 HS 측 surge 의 증대를 초래해 버립니다. 그러므로 턴온시와 턴오프시의 R_{G_EXT} 설정을 각각 하고 턴오프시에만 R_{G_EXT} 를 작게 할 필요가 있으며 그 수단으로서는 Figure 8 에 나타내는 다이오드 등을 추가하는 방법이 일반적입니다. 턴온시에 동작하는 저항은

R_{G_ON} 뿐이며 턴오프시 R_{G_ON} 과 R_{G_OFF} 의 병렬저항으로 턴온시가 커진다는 것을 알 수 있습니다.

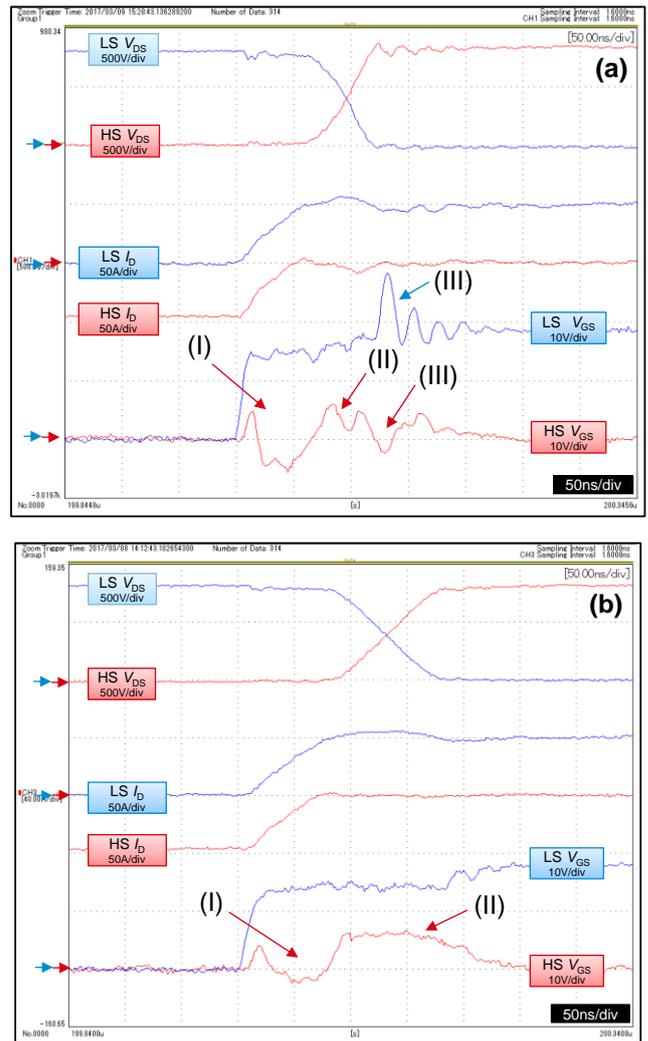


Figure 7. 턴온 파형
(a) $R_{G_EXT}=0\Omega$, (b) $R_{G_EXT}=10\Omega$

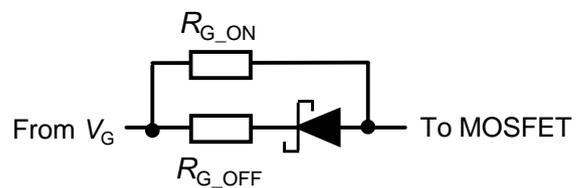


Figure 8. 게이트 저항 조정회로(턴오프를 빨리할 경우)

또한, Figure7 에서 HS 측 게이트 파형이 현상 (I) 동작 직전에 일단 플러스 측으로 흔들린 것은 현상 (1)의 전류가 흐르기 시작한 순간의 L_{SOURCE} 에 의한 기전이 C_{GS} 를 통해 기전 직후에 관측되고 있기 때문입니다.

Turn-Off 시의 Gate 신호 작용

다음으로 LS 턴오프시의 동작에 대해 설명하겠습니다.

Figure 9 에 LS 측 MOSFET 가 턴오프할 때의 전류 동작을 나타냈습니다. 턴온시와 같이 각 현상에 (IV)、(V)、(VI)를 붙였습니다. 턴온시와 비교해 V_{bs} 와 I_b 변화 순서가 달라질 뿐 기본 동작은 같으며

턴오프	턴온
현상(IV) →	현상(II)
현상(V) →	현상(III)
현상(VI) →	현상(I)

로 대응됩니다. dV_{bs}/dt 에 의한 LS 측의 V_{GS} 의 상승과 HS 측의 V_{GS} 의 마이너스 surge(Figure 3-T4)가 현상 (IV)가 됩니다. T4 기간 종료 시에 식 (1)에 나타내는 I_{CGD1} 이 소멸하면서 발생하는 서지가 현상 (V)입니다. 그 후 드레인 전류가 변화(Figure 3-T6)하여 I_{SOURCE} 에 의한 기전(식 (2))이 발생하고 figure 9의 현상 (VI)와 같이 전류가 흐릅니다. 이 전류는 MOSFET의 C_{GS} 를, 소스측을 마이너스로 충전하기 때문에 HS 측에서는 V_{GS} 를 상승시키고, LS 측은 V_{GS} 를 플러스측으로 끌어올려 V_{GS} 가 강하하는 것을 막는 움직임으로 보입니다. 상기로 인해 Figure 10과 같은 V_{GS} 움직임이 됩니다. 그림 중 V_{GS} 의 점선은 Figure 6과 마찬가지로 이상적인 전압파형을 나타내고 있습니다.

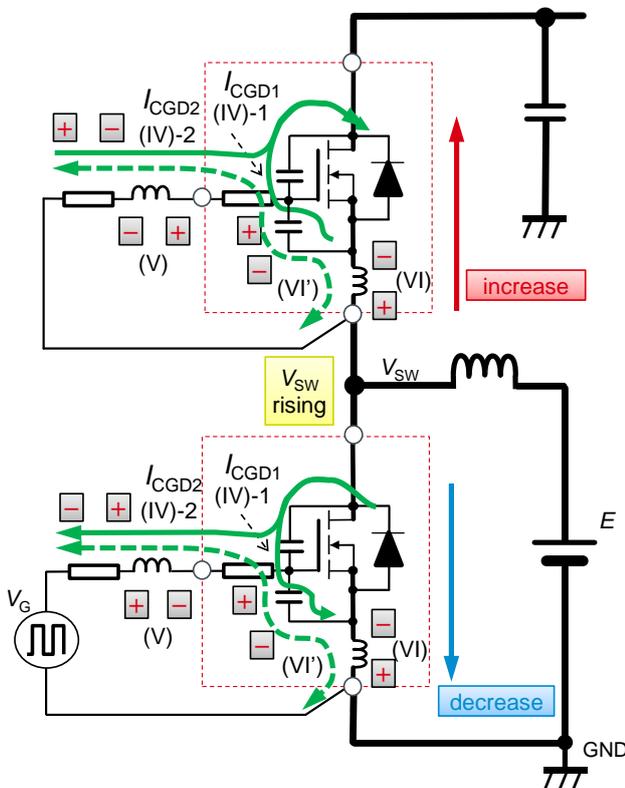


Figure 9. LS 턴오프시의 게이트 신호 전류 동작

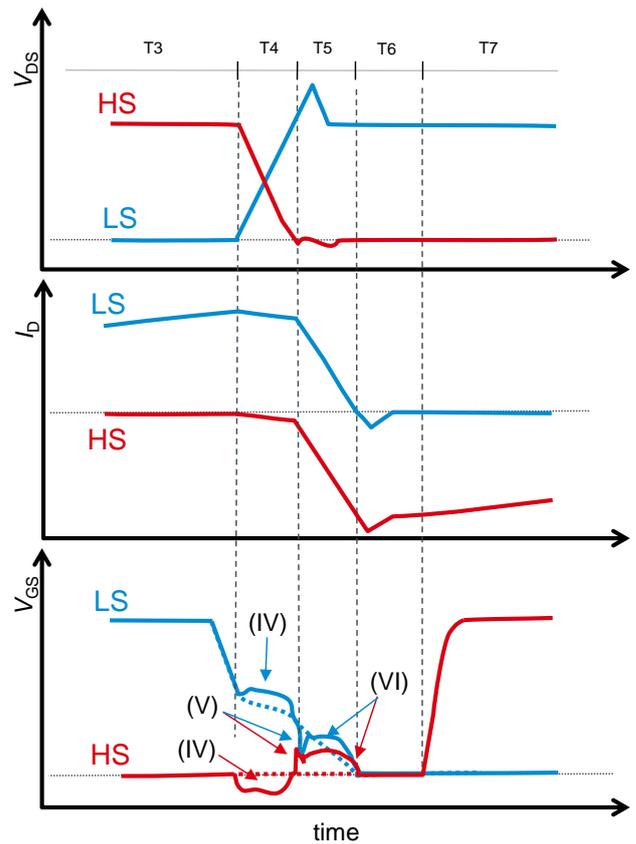


Figure 10. 게이트-소스 전압 동작(LS 측 턴오프시)

Figure 11 에 Rohm의 MOSFET의 턴오프시의 더블 펄스 측정 파형을 나타냅니다. 외부 게이트 저항은 턴온 시와 같은 0Ω (Figure 11(a))과 10Ω (Figure 11(b))입니다.

여기에서 현상 (V)의 surge가 현저하게 나타나고 있는 것을 알 수 있습니다. 또 V_{bs} 의 변화에 의한 현상 (IV)의 영향은 작으나 HS 측에서의 현상 (IV)에 의한 마이너스 surge는 종종 정격을 넘는 경우가 있어 그런 경우에는 회로적인 대책이 필요합니다. 이 턴오프시의 HS 측 마이너스 surge를 줄이기 위해서는 HS 측 게이트저항 R_{G_EXT} 를 작게 할 수 있지만, Figure 8에서 설명한 바와 같이 일반적으로 사용되는 게이트저항 조정회로에서는 저항값이 높은 R_{G_ON} 측에서 현상 (IV)이 현저하게 나타나기 때문에 주의가 필요합니다.(구동회로에서의 대책에 대해서는 별도의 어플리케이션 노트(*1)로 설명합니다.)

또한 현상 (VI)에 의한 V_{GS} 의 상승에 대해서는 이미 턴오프 종료 직전이며, HS 측이 턴온 동작에 들어갔다고 해도 LS 측은 턴오프하고 있어 거의 문제가 되지 않습니다.

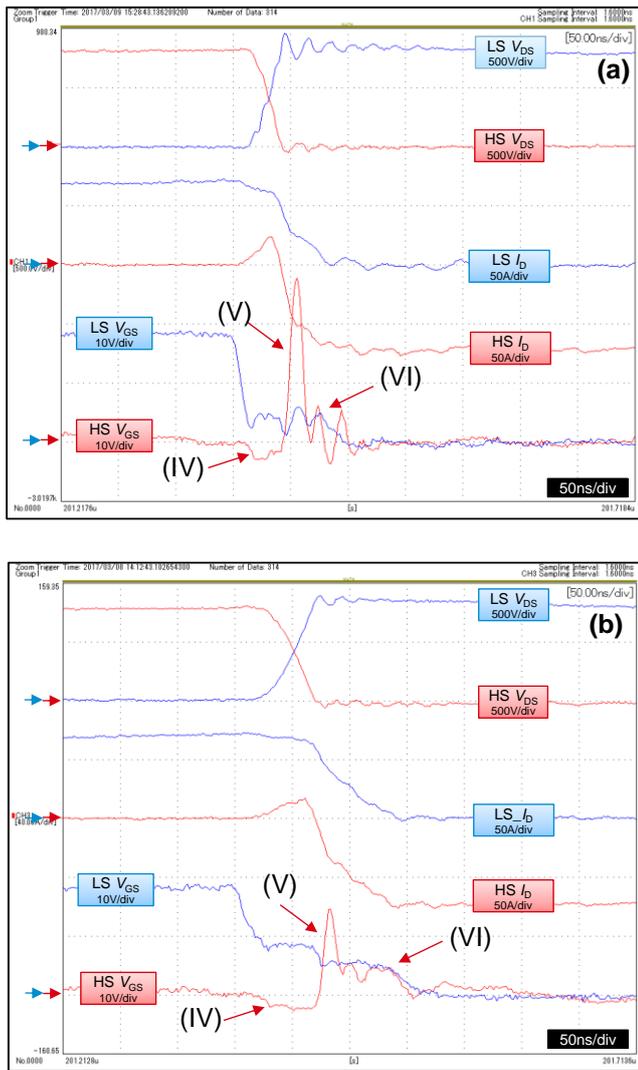


Figure 11. 턴오프 파형

(a) $R_{G_EXT}=0\Omega$, (b) $R_{G_EXT}=10\Omega$

정리

이상 설명한대로 브릿지 구성에 의한 MOSFET의 게이트 신호의 동작은 MOSFET끼리 서로 연관되어 동작하기 때문에 매우 복잡할 뿐만 아니라 게이트 구동 회로의 조건에 따라서도 달라집니다. 그 때문에 회로 방식은 같다고 해도 기판이 달라진다면 전혀 다른 동작을 보일 수 있습니다. 여기에 설명한 기본 동작을 염두에 두고 파형을 해석하고 문제 발생 시의 대응 방법을 생각할 필요가 있습니다. 또한 이번에 제시한 회로는 LS 측 MOSFET을 스위칭하는 boost 회로이었지만, HS 측을 스위칭하는 buck 회로에서는 LS와 HS를 바꿔도 똑같은 동작이 됩니다. 따라서, 하드 스위칭을 하는 다양한 회로 토폴로지에서 기본적인 사고방식으로 응용할 수 있습니다.

이상

참고자료 :

- *1 「Gate-Source 전압의 Surge 억제 방법」
Application Note (No. 63AN049K Rev.001)
로옴 주식회사, 2020년 9월

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/>