

パワースイッチングデバイス

ブリッジ構成におけるゲート-ソース電圧の振る舞い

MOSFET や IGBT などのパワースイッチングデバイスは、様々な電源アプリケーションや電カラインのスイッチング素子として使用されています。また、使用されている回路方式も多岐に渡り、単独使用はもちろんのこと、直列接続や並列接続での使用方法も多数あります。特に、デバイスを上下に直列接続するブリッジ構成では、それぞれのデバイスを交互にオンオフすることが一般的であり、各デバイスに流れる電流や変化する電圧によりお互いに複雑に影響を与えています。そこで、このアプリケーションノートでは、MOSFET ブリッジ構成における各 MOSFET のゲート-ソース間電圧に着目し、最も簡単な同期方式 boost 回路を例にして、スイッチング動作を詳細に理解することを目的とします。

MOSFET のブリッジ構成

MOSFET をブリッジ構成で使用する最も簡単な同期方式 boost 回路を示します (Figure 1)。

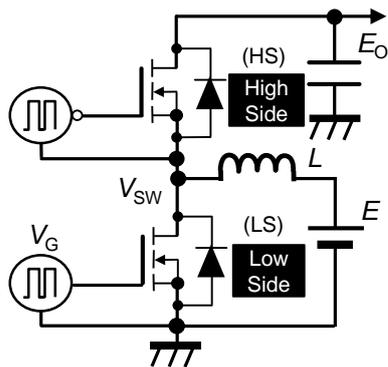


Figure 1. 同期方式 Boost 回路

この回路に使用されている MOSFET の上側 (HS) と下側 (LS) は交互にオンしており、同時オンを防止するために両 MOSFET がオフしているデッドタイムが設定されています (Figure 2)。

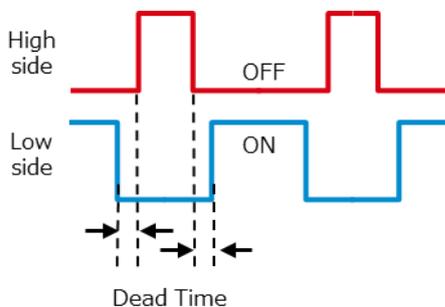


Figure 2. ゲート信号 (V_G) タイミング

この動作の場合の、HS と LS 各 MOSFET のドレイン-ソース電圧

(V_{DS})、ドレイン電流 (I_D) の波形の概形を Figure 3 に示します。この波形はインダクタ L の電流が連続動作となる、いわゆるハードスイッチング状態について考えています。

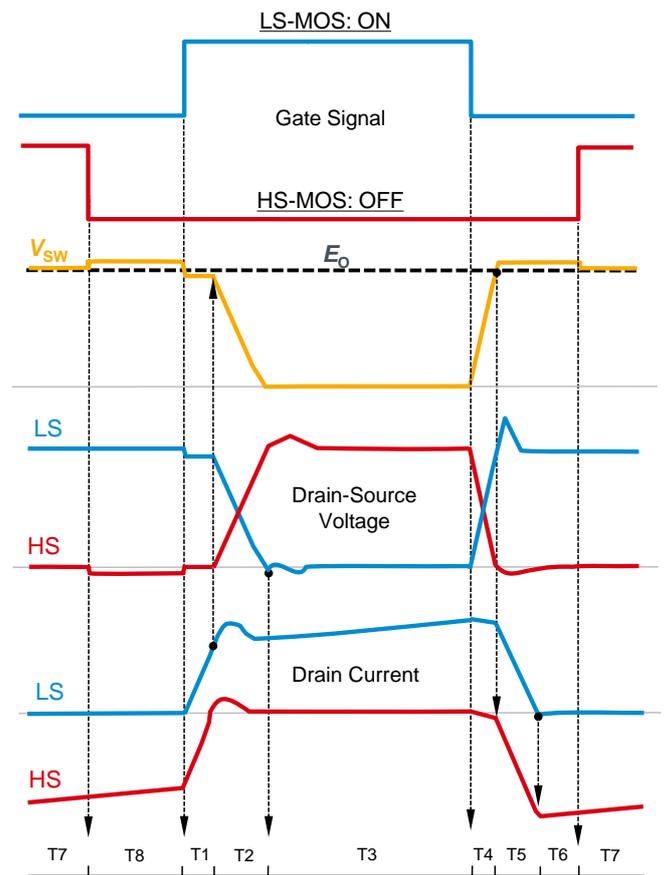


Figure 3. 各 MOSFET の電圧・電流波形。

横軸は時間を表し、時間領域 $T_k(k=1\sim 8)$ の定義は各々以下の通りです。

T1: LS が ON し MOSFET の電流が変化している期間

T2: LS が ON し MOSFET の電圧が変化している期間

- T3:LS が ON している期間
- T4:LS が OFF し MOSFET の電圧が変化している期間
- T5:LS が OFF し MOSFET の電流が変化している期間
- T4-T6:HS が ON するまでのデッドタイム期間
- T7:HS が ON している期間（同期整流期間）
- T8:HS が OFF し LS が ON するまでのデッドタイム期間

ゲート駆動回路

LS 側のターンオン時とターンオフ時における V_{DS} および I_D の変化の仕方が異なることは周知ですが、それらが変化することによるゲートソース電圧 (V_{GS}) への影響について考える場合には、ゲート駆動回路の等価回路が重要となってきます。

Figure 4 に基本となる等価回路を示します。

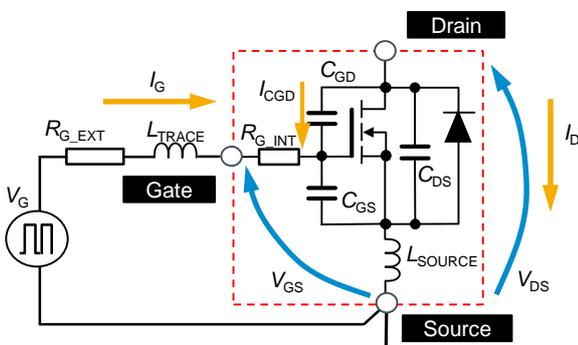


Figure 4. ゲート駆動回路と MOSFET 等価回路

ゲート駆動回路には、ゲート信号 (V_G)、デバイス内部のゲート配線による抵抗 (R_{G_INT})、およびデバイスパッケージのソースインダクタンス (L_{SOURCE}) と、ゲート回路パターンインダクタンス (L_{TRACE}) と外付けゲート抵抗 (R_{G_EXT}) が存在します。Figure 3 にも示したとおり、各電圧電流の極性は、ゲート電流 (I_G) および I_D が Figure 4 に示す方向を正とし、ソース端子を基準として V_{GS} および V_{DS} を定義しました。なお、デバイス内部のゲート配線インダクタンスも存在しますが、 L_{TRACE} に比べ小さいため、ここでは省略しています。

ターンオン・ターンオフ動作

Figure 3 の波形の詳細を以下で説明します。

LS 側を ON するため、LS 側ゲート信号に正の V_G が印加されると、ゲートソース間容量 (C_{GS}) への充電が開始され、 V_{GS} が上昇、デバイスのゲートしきい電圧 ($V_{GS(th)}$) 以上になると LS で I_D が流れ始め、同時にソース→ドレインの向きに流れている HS 側の I_D が減少を開始します (Figure 3-T1)。次に HS 側の I_D がゼロになり寄生ダイオードがターンオフすると中間点の電圧 (V_{SW}) が降下し始めると同時に HS 側のドレイン-ソース間容量 (C_{DS}) およびドレイン-ゲート間容量 (C_{GD}) への充電が行われます (Figure 3-T2)。この HS 側での $C_{DS} + C_{GS}$ への充電 (LS 側は放電) が完了後、LS 側の V_{GS}

が所定の電圧まで達した時、LS 側のターンオン動作が完了します。

一方、ターンオフ動作は LS 側 V_G がオフすることにより開始され、LS 側の C_{GS} の蓄積電荷が放電を開始し MOSFET のプラトー電圧に達する (ミラー効果領域に入る) と、LS 側の V_{DS} が上昇を始め、同時に V_{SW} が上昇します。この時点ではほとんどの負荷電流はまだ LS 側に流れている状態 (Figure 3-T4) であり、HS 側の寄生ダイオードにはまだ転流電流は流れていません。LS 側の $C_{DS} + C_{GS}$ への充電 (HS 側は放電) が完了すると、 V_{SW} が入力電圧 (E) を超え、HS 側の寄生ダイオードがターンオンし、LS 側の I_D が HS 側に転流し始めます (Figure 3-T5)。LS 側の I_D はやがてゼロとなり、デッドタイム期間 (Figure 3-T6) に入り、HS 側 MOSFET のゲート信号に正の V_G が印加されるとターンオンし、同期動作期間となります (Figure 3-T7)。

この一連のスイッチング動作において、HS 側および LS 側の MOSFET の V_{DS} および I_D の変化に起因して様々なゲート電流が流れ、それが印加信号 V_G とは違う V_{GS} 変化となって現れます。この様々なゲート電流を Figure 5 に示します。図中の (I)、(I')、(II)、(III) は V_{GS} が変化する個別の事象に付番したものであり、以下、詳述します。

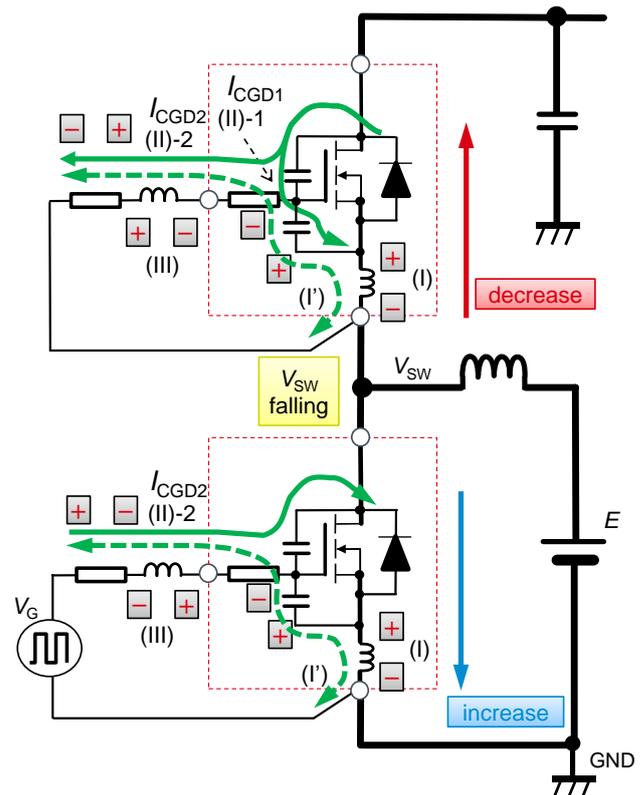


Figure 5. LS ターンオン時のゲート信号電流挙動

dV_{DS}/dt により発生する電流

Figure 4 に示したように、 V_{DS} が変化すると、 C_{GD} に電流 (I_{CGD}) が流れます。この電流は、Figure 5 に示すように、 C_{GS} 側に流れる電流 (I_{CGD1} : (II)-1) とゲート回路側に流れる電流 (I_{CGD2} : (II)-2) に分かれます。変化開始時はゲート回路側のインピーダンスが大きく、

ブリッジ構成におけるゲートソース電圧の振る舞い

I_{CGD} はほとんど C_{GS} 側に流れ、このとき I_{CGD1} は式 (1) のようになります。

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

これより、 C_{GD} が大きい場合や、 C_{GD}/C_{GS} 比が小さくなる場合は、 I_{CGD1} が大きくなることが分かります。

d I_D /dt により発生する電圧

I_D の変化 dI_D/dt により発生する電圧は、

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

となります。これが事象(I)です。この電圧により電流(I')が流れます。

dV_{DS}/dt や dI_D/dt には正にも負にもなるため、それによって発生する電流や電圧の極性はターンオンとターンオフ時で異なってきます。

ターンオン時のゲート信号の振る舞い

LS ターンオン時はまず I_D が変化します (Figure 3-T1)。LS の I_D は増加方向、HS の I_D は減少方向となるため、事象(I)により、Figure 5 に示す極性で起電 (式(2)) が発生します。この起電による電流は C_{GS} をソース側を正として充電するため、LS では V_{GS} を押し下げ一方、HS では V_{GS} がマイナス側に引っ張られ、負サージとして見えます。

I_D の変化が終了すると LS 側の V_{DS} の電位が減少します (Figure 3-T2)。よって式 (1) による電流が、Figure 5 中の(II)-1、(II)-2 のように流れ、それぞれ以下の式で表される電圧上昇が V_{GS} で起きます。これが事象(II)になります。

$$\begin{aligned} V_{SURGE2-1} &= \frac{1}{C_{GS}} \int (I_{CGD1}) dt \\ &= \frac{1}{1+C_{GS}/C_{GD}} \cdot \Delta V_{DS} \end{aligned} \quad (3)$$

$$V_{SURGE2-2} = I_{CGD2} \cdot R_{G_EXT} + L_{TRACE} \cdot \frac{dI_{CGD2}}{dt} \quad (4)$$

V_{DS} が変化を開始した直後は式 (3) による V_{GS} 上昇が主ですが、時間とともに式 (4) による V_{GS} 上昇も見えるようになります。つまり、MOSFET の C_{GD}/C_{GS} 比や、駆動回路の R_{G_EXT} やゲート駆動信号パターンのインダクタンス L_{TRACE} が大きく影響してくることがわかります。

Figure 5 に示した通り、HS 側における(II)-2 の電流 I_{CGD2} は V_{GS} を持ち上げる方向になっています。そのため、本来オフしているはずの HS 側は V_{GS} の持ち上がりの程度次第ではターンオン動作を始めてしまい(セルフターンオン)、LS 側のオン動作と重なり上下 MOSFET の同時オンが発生し、貫通電流が流れます。

I_{CGD2} はターンオン動作が完了するまで流れ続け、 L_{TRACE} に蓄えられますが、 V_{SW} 変化が完了した時点で消滅し、 L_{TRACE} が Figure 5 のように起電します。これが事象(III)です。 I_{CGD2} は R_{G_EXT} などのスイッチ

ング条件によっては数アンペアに達することがあり、この起電が大きくなる可能性があります。

結果としてゲート電圧の挙動は Figure 6 のようになります。図中の番号は Figure 5 の番号と同じ事象を表しています。なお、図中 V_{GS} の点線は理想的な電圧波形を示しています。

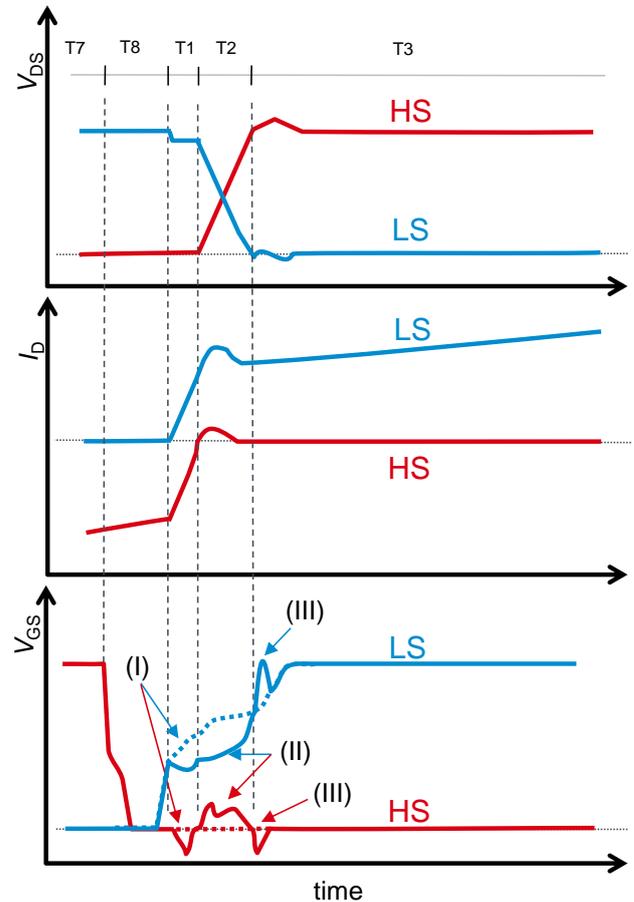


Figure 6. ゲートソース電圧の挙動 (LS 側ターンオン時)

Figure 7 は、ローム製 MOSFET をブリッジ構成とし、LS 側をターンオンした時のダブルパルス試験結果です。外付けゲート抵抗 R_{G_EXT} は 0Ω (Figure 7(a)) と 10Ω (Figure 7(b)) です。

R_{G_EXT} が小さい時、Figure 7(a)にあるように、事象(I)による V_{GS} の減少が大きいことが分かります。また、非常に速いスイッチング速度のため、事象(III)が顕著に発生していますが、 R_{G_EXT} が 0Ω のため事象(II)の波形はほとんど観測されません。一方、Figure 7(b)においては、事象(II)-2、 R_{G_EXT} による V_{GS} の持ち上がりが顕著に現れています。

この結果からも明白なように、LS 側オン時の HS 側セルフターンオンを誘発する事象(II)-2 の V_{GS} 持ち上がりを小さくするためには、HS 側ターンオフ時の外付けゲート抵抗 R_{G_EXT} を小さくします。しかし、一般的に HS 側と LS 側の R_{G_EXT} は同じにすることが多く、このため、 R_{G_EXT} を小さくすると LS 側の dV_{DS}/dt が増大し、式 (1) に示すように HS 側の I_{CGD} が増加します。結果として式 (4) からわかるように、HS 側サージの増大を招いてしまいます。そのため、ターンオン時とターンオフ時の R_{G_EXT} 設定を別々とし、ターンオフ時のみの R_{G_EXT} を小さく

する必要があり、その手法としては、Figure 8 に示すダイオード等を付加する方法が一般的です。ターンオン時に動作する抵抗は R_{G_ON} のみであり、ターンオフ時は R_{G_ON} と R_{G_OFF} の並列抵抗となっており、ターンオン時が大きくなるのが分かります。

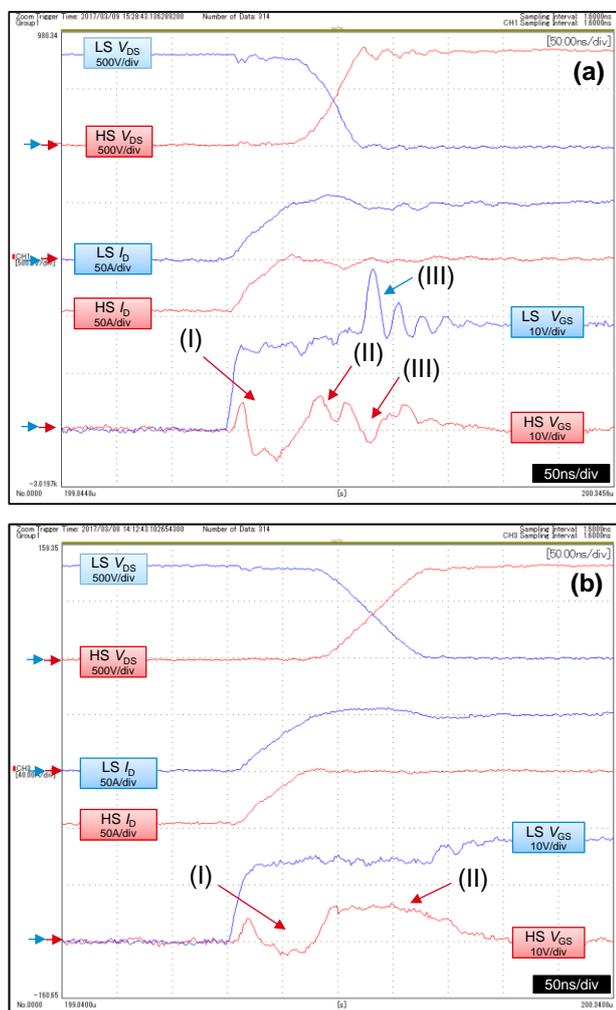


Figure 7. ターンオン波形
(a) $R_{G_EXT}=0\Omega$, (b) $R_{G_EXT}=10\Omega$

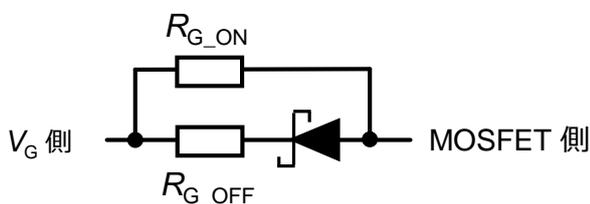


Figure 8. ゲート抵抗調整回路 (ターンオフを早くる場合)

なお、Figure 7 において、HS 側ゲート波形が事象(I)動作の直前に一旦プラス側に振れているのは、事象(I)の電流が流れ始めた瞬間の L_{SOURCE} による起電が C_{GS} を通じて起電直後に観測されているためです。

ターンオフ時のゲート信号の振る舞い

次に LS ターンオフ時の動作について説明します。

Figure 9 に LS 側 MOSFET がターンオフする時の電流挙動を示します。ターンオン時と同じく、各象事に (IV)、(V)、(VI) の付番をしています。ターンオン時と比べ、 V_{DS} と I_D の変化順序が変わってくるのみで基本的な動作は同じとなり、

ターンオフ	ターンオン
事象(IV) →	事象(II)
事象(V) →	事象(III)
事象(VI) →	事象(I)

という対応になります。 dV_{DS}/dt による LS 側の V_{GS} の盛り上がりと HS 側の V_{GS} のマイナスサージ (Figure 3-T4) が事象(IV)となります。T4 期間終了時に式 (1) に示す I_{CGD1} が消滅すると発生するサージが事象(V)です。その後ドレイン電流が変化 (Figure 3-T6) し、 L_{SOURCE} による起電 (式 (2)) が発生し、figure 9 の事象(VI)のように電流が流れます。この電流は MOSFET の C_{GS} を、ソース側を負として充電するため、HS 側では V_{GS} を押し上げ、LS 側は V_{GS} をプラス側に引き上げ V_{GS} が降下するのを妨げる動きとして見えます。以上より、Figure 10 のような V_{GS} 挙動となります。図中 V_{GS} の点線は Figure 6 と同様に理想的な電圧波形を示しています。

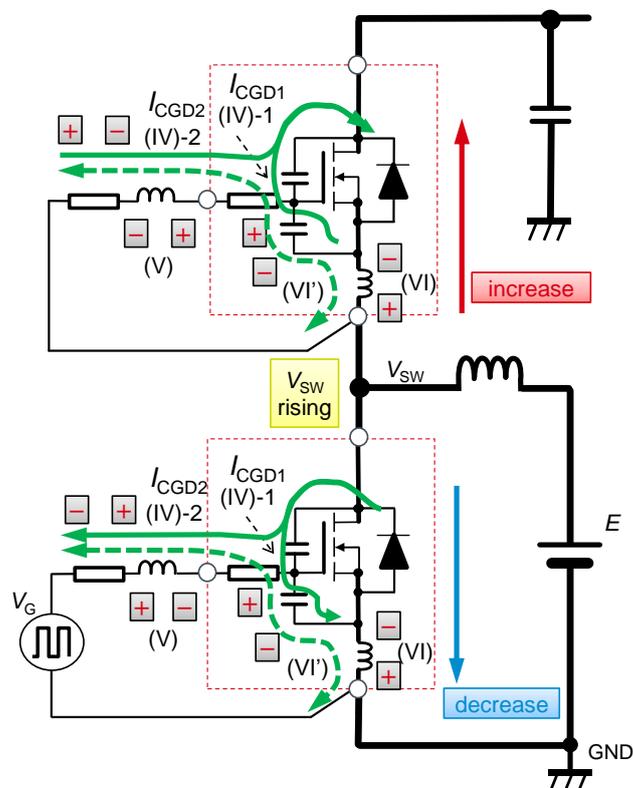


Figure 9. LS ターンオフ時のゲート信号電流挙動

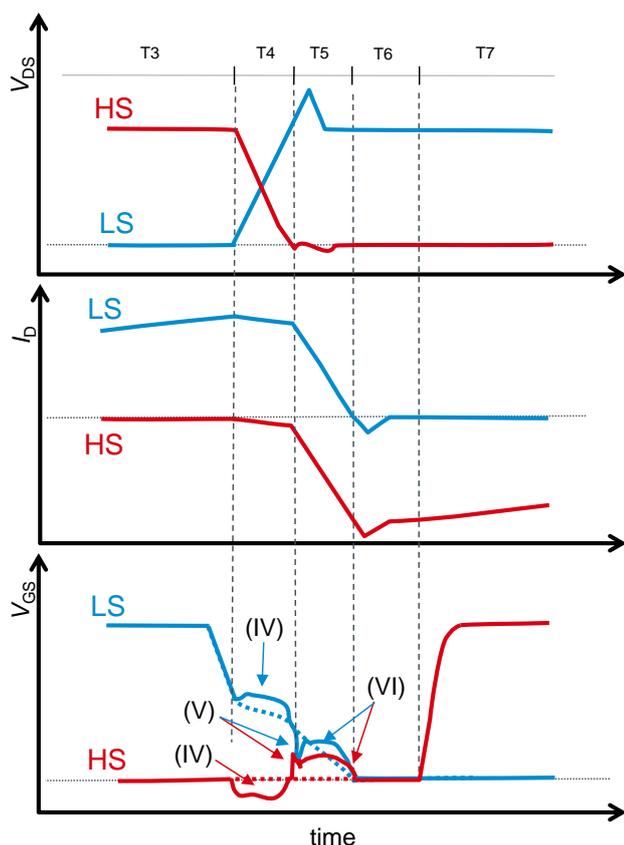
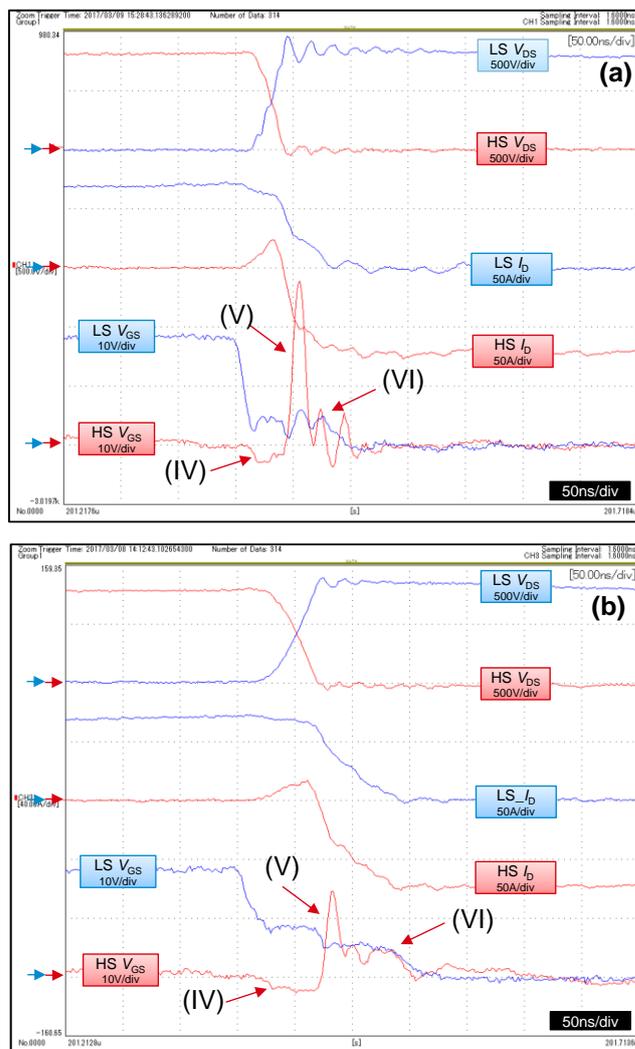


Figure 10. ゲートソース電圧の挙動 (LS 側ターンオフ時)

Figure 11 にローム製 MOSFET のターンオフ時のダブルパルス測定波形を示します。外付けゲート抵抗 R_{G_EXT} はターンオン時と同じ 0Ω (Figure 11(a)) と 10Ω (Figure 11(b)) です。

ここにおいて事象(V)のサージが顕著に現れていることが分かります。また、 V_{ds} の変化による事象(IV)の影響は小さいですが、HS 側における事象(IV)によるマイナスサージはしばしば定格を超えることがあり、その場合は、回路的な対策が必要となります。このターンオフ時の HS 側マイナスサージを小さくするためには、HS 側ゲート抵抗 R_{G_EXT} を小さくしますが、Figure 8 で説明したような一般的に用いられているゲート抵抗調整回路では、抵抗値の高い R_{G_ON} 側で、事象(IV)が顕著になるため注意が必要です。(駆動回路での対策例については、アプリケーションノート「ゲートソース電圧のサージ抑制方法」(*1)を参照して下さい。)

なお、事象(VI)による V_{GS} の持ち上がりについてはすでにターンオフ終了直前であり、HS 側がターンオン動作に入ったとしても LS 側はターンオフしておりほとんど問題になりません。

Figure 11. ターンオフ波形
(a) $R_{G_EXT}=0\Omega$, (b) $R_{G_EXT}=10\Omega$

まとめ

以上説明したとおり、ブリッジ構成による MOSFET のゲート信号の振る舞いは、MOSFET 同士がお互いに関連しながら動作するため、非常に複雑であるばかりでなく、ゲート駆動回路の条件によっても変わってきます。そのため、回路方式は同じとしても基板が変わるだけで全く異なった挙動を示しても何ら不思議ではありません。ここに説明した基本動作を念頭に波形解析を進め、問題発生時の対応方法を考えていくことが大切です。なお、今回示した回路は LS 側 MOSFET をスイッチングする BOOST 回路でしたが、HS 側をスイッチングする BUCK 回路においては、LS と HS を置き換えることで全く同じ動作となります。よって、ハードスイッチングを有する様々な回路ポロジで基本的な考え方を応用できます。

参考資料：

*1 「ゲートソース電圧のサージ抑制方法」

アプリケーションノート (No.62AN009JRev.2)

ローム株式会社, 2020 年 4 月

ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものです。万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>