

MOSFET セルフターンオン現象について

概要

MOSFET のドレイン - ソース間に急激に上昇する電圧が印加されると、MOSFET が誤動作してオンする場合があります。このドキュメントでは、そのメカニズムとその対策について説明します。

目次

概要.....	1
目次.....	2
1. セルフターンオン.....	3
1.1. セルフターンオンとは.....	3
1.2. セルフターンオンメカニズム.....	4
2. セルフターンオンシミュレーション.....	5
2.1. 非絶縁型 DC-DC コンバータ回路.....	5
2.1.1. MOSFET セルフターンオン確認方法.....	5
2.1.2. セルフターンオン ゲート・ソース間外付けコンデンサ効果.....	6
2.1.3. セルフターンオン 電圧変化(dv/dt)効果.....	8
2.1.4. セルフターンオン ゲート抵抗依存.....	10
2.2. ブリッジ回路で構成されるインバータ回路.....	12
2.2.1. MOSFET セルフターンオン確認方法.....	12
2.2.2. セルフターンオン ゲート抵抗依存.....	13
2.2.3. セルフターンオン 電圧変化率(dv/dt)影響.....	15
3. セルフターンオン対策.....	17
3.1. 非絶縁型 DC-DC コンバータ回路における対策.....	17
3.2. ブリッジ回路で構成されるインバータ回路における対策.....	18
製品取り扱い上のお願い.....	19

1. セルフターンオン

1.1. セルフターンオンとは

ブリッジ回路で構成されるインバータ回路や非絶縁型同期整流コンバータ回路など、MOSFET を高速スイッチング動作で使用する場合、オフしている MOSFET のドレイン・ソース間に急峻に立ち上がる電圧が掛かります。電圧の時間に対する変化 dv/dt によって MOSFET のゲート・ドレイン間容量 C_{gd} とゲート・ソース間容量 C_{gs} の比でゲートに電圧が発生します。また、 C_{gd} を通してゲート抵抗 R_G に電流が流れることで、ゲートに異常な電圧が発生します。

この誘起されたゲート電圧が MOSFET をオンさせる電圧 V_{th} を超えると誤って MOSFET がターンオンしてしまいます。これをセルフターンオンといいます。

非絶縁型同期整流コンバータ回路、図 1.1 においては、MOSFET Q_2 がオフ状態の時、MOSFET Q_1 がオンするタイミングで MOSFET Q_2 に同様に急峻な電圧 dv/dt が発生します。

またブリッジ回路で構成されるインバータ応用、図 1.2 において上下アームの MOSFET (Q_1, Q_2) の一方がオフ状態の時、他方がターンオンするとオフ状態の MOSFET のドレイン・ソース間に急峻な電圧変化 (dv/dt) が発生します。

セルフターンオンが起こった場合、MOSFET Q_1, Q_2 で短絡を起こし損失を増大させるだけでなく破壊につながる可能性があります。

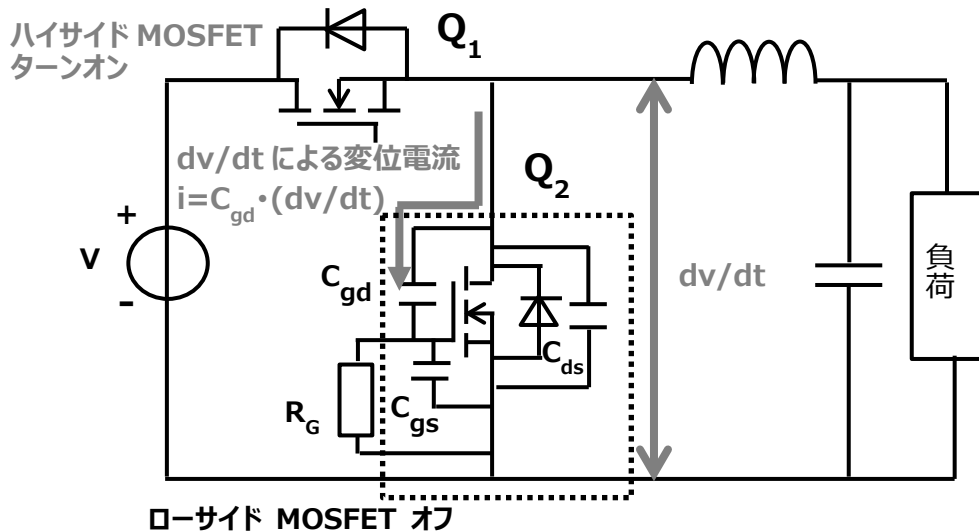


図 1.1 非絶縁型同期整流コンバータ回路

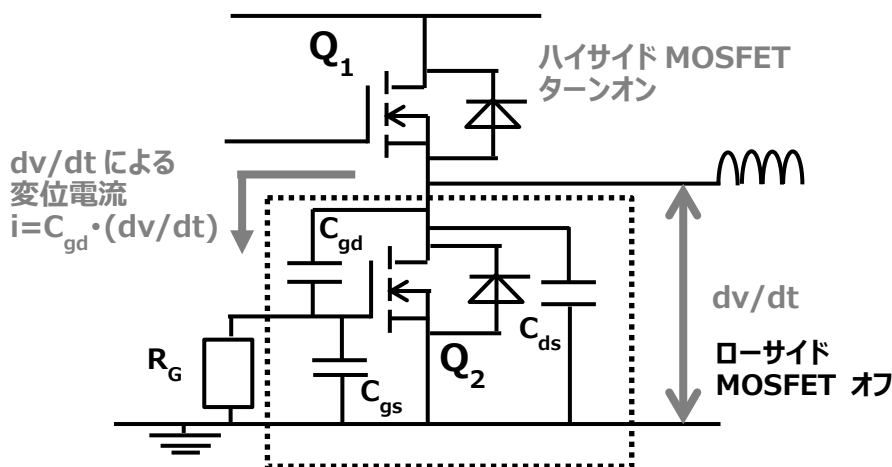


図 1.2 ブリッジ回路で構成されるインバータ回路

1.2. セルフターンオンメカニズム

MOSFET に dv/dt が与えられると MOSFET のゲート・ドレイン間容量 C_{gd} を通して電流が流れます。

$$i = C_{gd} \frac{dv}{dt}$$

この電流 i によって MOSFET のゲート・ソース間には下記電圧が発生します。

$$v_{GS} = R_G C_{gd} \frac{dv}{dt} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{(C_{gs} + C_{gd})R_G}\right) \right\} \dots\dots (1)$$

(ゲート電圧 v_{GS} の計算式においては MOSFET の容量、 C_{gs} 、 C_{gd} は電圧による変化が無いものと仮定しております。)

セルフターンオンの原因は、ドレイン・ソース間に急峻な印加電圧の時間により、2つの現象に分類されます。

現象 a. dv/dt 状態が $(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ より短時間で終了する場合 ($t \ll (C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ の場合)

式 (1) の $\exp\{-t/[(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G]\}$ を $1 - t/[(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G]$ で近似すると
($\exp x$ においてマクローリン展開 1次近似使用 $\exp x = 1 + x$)

$$v_{GS} \approx \frac{C_{gd}}{(C_{gs} + C_{gd})} v(t) \dots\dots (2)$$

非絶縁型同期整流コンバータ回路のように高速スイッチング用途で MOSFET のスイッチング時間を非常に早くしている場合におけるゲート電圧の上昇は式(2)で表されます。

現象 b. dv/dt 状態が $(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ より長引く場合 ($t \gg (C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ の場合)

$-\exp\{-t/[(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G]\}$ は $\ll 1$ となるから近似式は

$$v_{GS} \approx R_G C_{gd} \frac{dv}{dt} \dots\dots (3)$$

となります。

上記、式(2)、式(3)において v_{GS} が MOSFET の V_{th} を超える場合またはゲートドライブされていたゲート・ソース間電圧の残留分との総計が MOSFET の V_{th} を超える場合にセルフターンオン現象が起こります。

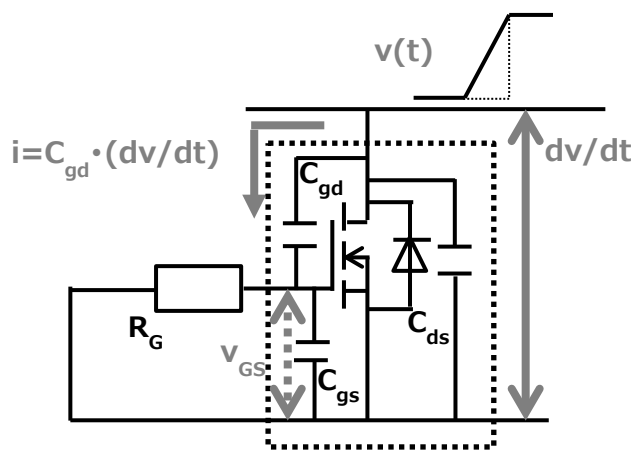


図 1.3 MOSFET 接続回路

2. セルフターンオンシミュレーション

2.1. 非絶縁型 DC-DC コンバータ回路

2.1.1. MOSFET セルフターンオン確認方法

図 2.1 において MOSFET Q_2 が同期整流モード（オン状態②）からオフシットタイム後、オフ状態の MOSFET Q_2 に、MOSFET Q_1 がオンすることで急峻な電圧変化 dv/dt が加わるタイミングでセルフターンオン現象が発生する可能性があります。これが DC-DC コンバータにおけるセルフターンオン現象です。

DC-DC コンバータにおけるセルフターンオン現象の確認回路、動作につき下記に示します。

- ① MOSFET Q_1 がオンし L に電流が流れます。
- ② MOSFET Q_1 がオフすると L のエネルギーは MOSFET Q_2 のソースからドレインを通して環流されます。環流する期間、ローサイド MOSFET は同期整流回路としてオンしています。
- ③ 次に MOSFET Q_2 がオフし、あるデットタイム期間を経て MOSFET Q_1 がオンします。

この時、MOSFET Q_2 に急峻な電圧変化 dv/dt が加わります。

この時の MOSFET Q_2 のゲートおよびドレイン・ソース間の電圧、電流を確認します。

(電圧変化 dv/dt によりゲートに流れる電流を $i_g \approx C_{gd} \cdot (dv/dt)$ とします。)

(MOSFET Q_2 オフから MOSFET Q_1 がオンまでのデットタイム期間は MOSFET Q_2 のボディダイオードに電流が流れます。またモータアプリケーションにおいてもボディダイオード環流モード時、同期整流にて駆動する場合は DC-DC コンバータ回路と同等の動作となります。)

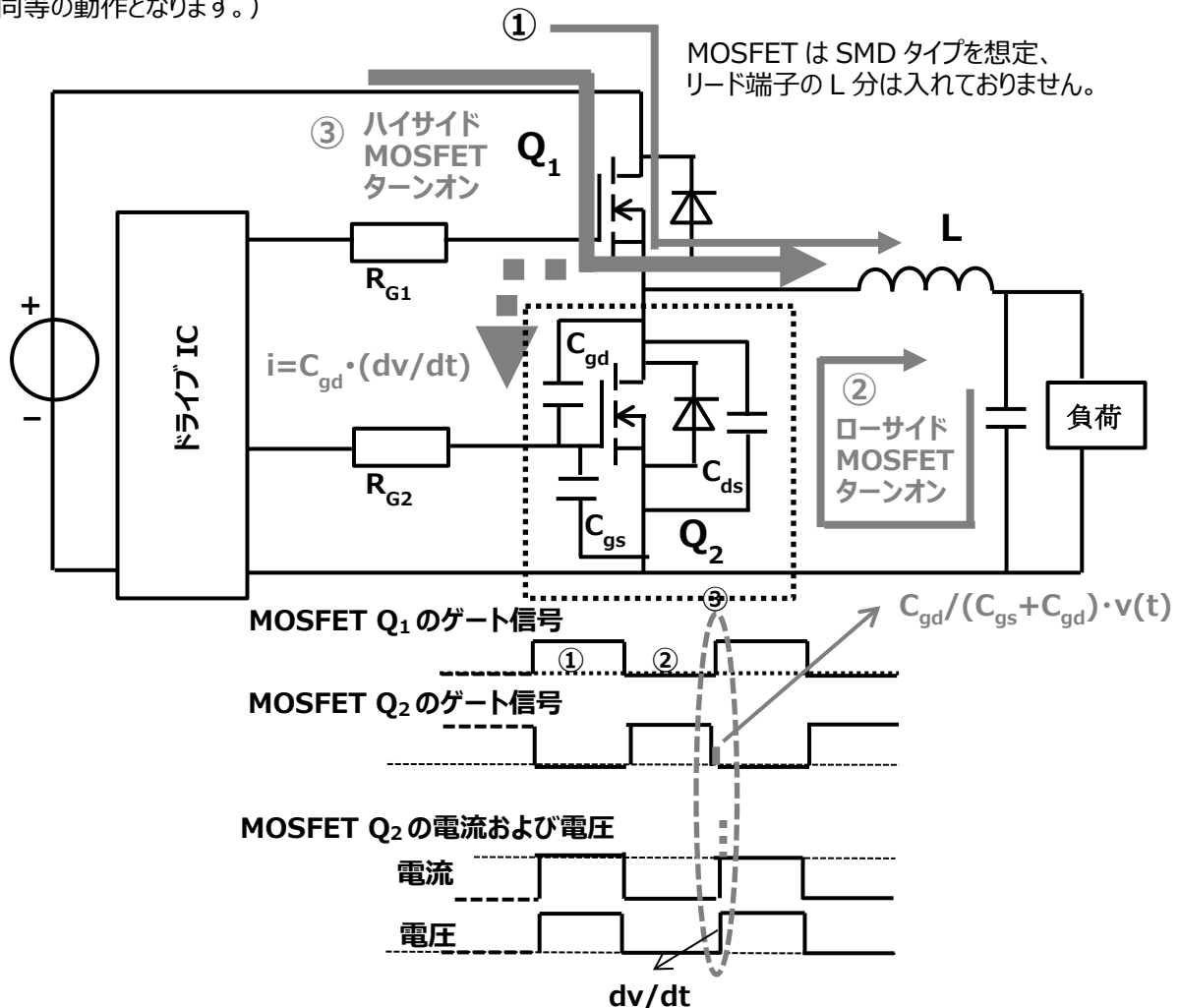


図 2.1 シミュレーション回路と波形概略

2.1.2. セルフターンオン ゲート・ソース間外付けコンデンサ効果

MOSFET を速いスピードでスイッチングさせる場合、MOSFET のゲート・ドレインとゲート・ソースの容量の分圧比で MOSFET のゲートに電圧が加わりセルフターンオンを起こす可能性があります。今回使用の MOSFET では通常条件でセルフターンオンが確認できず、無理やり Q_2 のみに大きいゲート抵抗 ($R_{G2}=20\Omega$) を入れ、セルフターンオンさせ、ゲート・ソース間の外付け C の効果をシミュレーションしました。DC-DC コンバータにおいては非常に高い周波数 (300~500kHz) での駆動であるため MOSFET Q_2 がオフしてから MOSFET Q_1 がオンするまでのデットタイムを非常に短くしております。

ゲート・ソース間に外付け容量 C 挿入によるゲート・ソース間の容量比から発生するゲート電圧 $C_{gd}/(C_{gs}+C_{gd})\cdot v(t)$ の低減効果は見えましたが、今回の確認では MOSFET Q_2 に大きい抵抗を挿入したため $R_{G2}\cdot C_{gd}\cdot (dv/dt)$ によるゲート電圧上昇の影響も受けてしまいました。また、デットタイムが短い条件下では C を挿入することで MOSFET Q_2 のオフ時のゲート電荷引き抜き時間が長くなり、MOSFET Q_1 がオンする時点で MOSFET Q_2 のゲートに引き抜き電流が残っている状態になり、逆にセルフターンオンをし易い状況になってしまいました。セルフターンオン抑制目的でゲート・ソース間に容量 C を挿入する場合は MOSFET のゲート引き抜き時間とデットタイムを十分考えたうえでの検討が重要になります。

正確にシミュレーション試験するには適した素子及び条件の選択が重要となります。

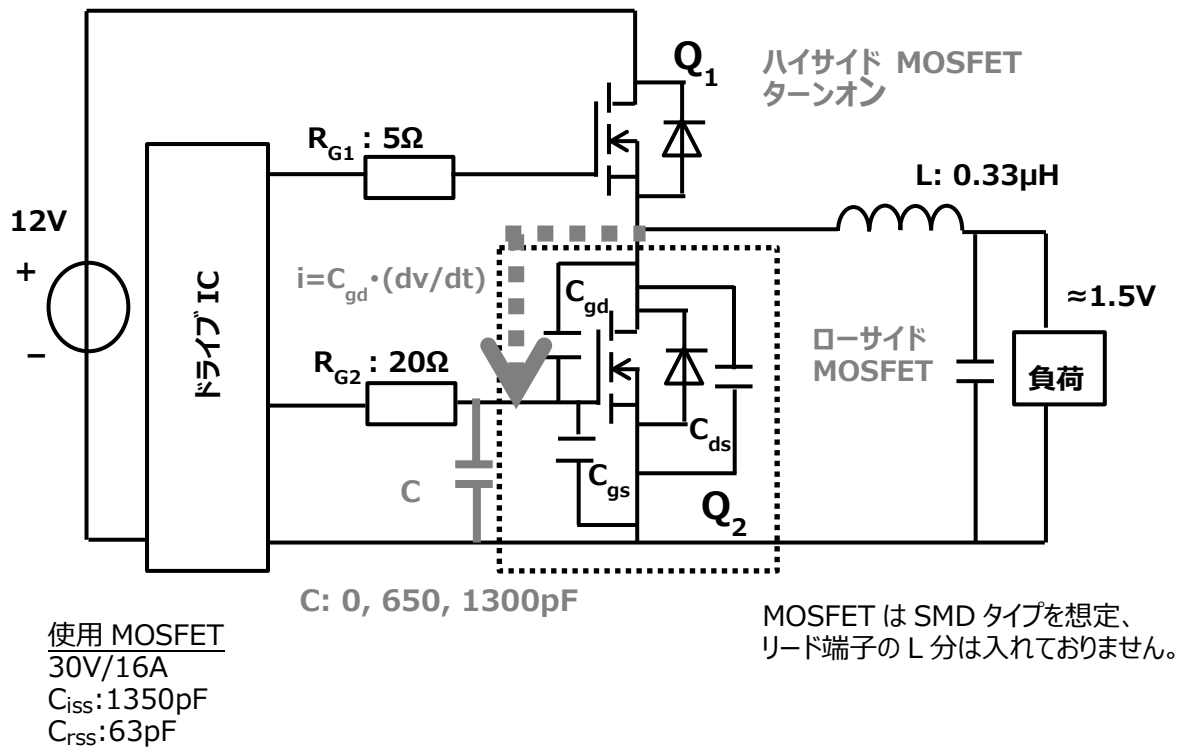
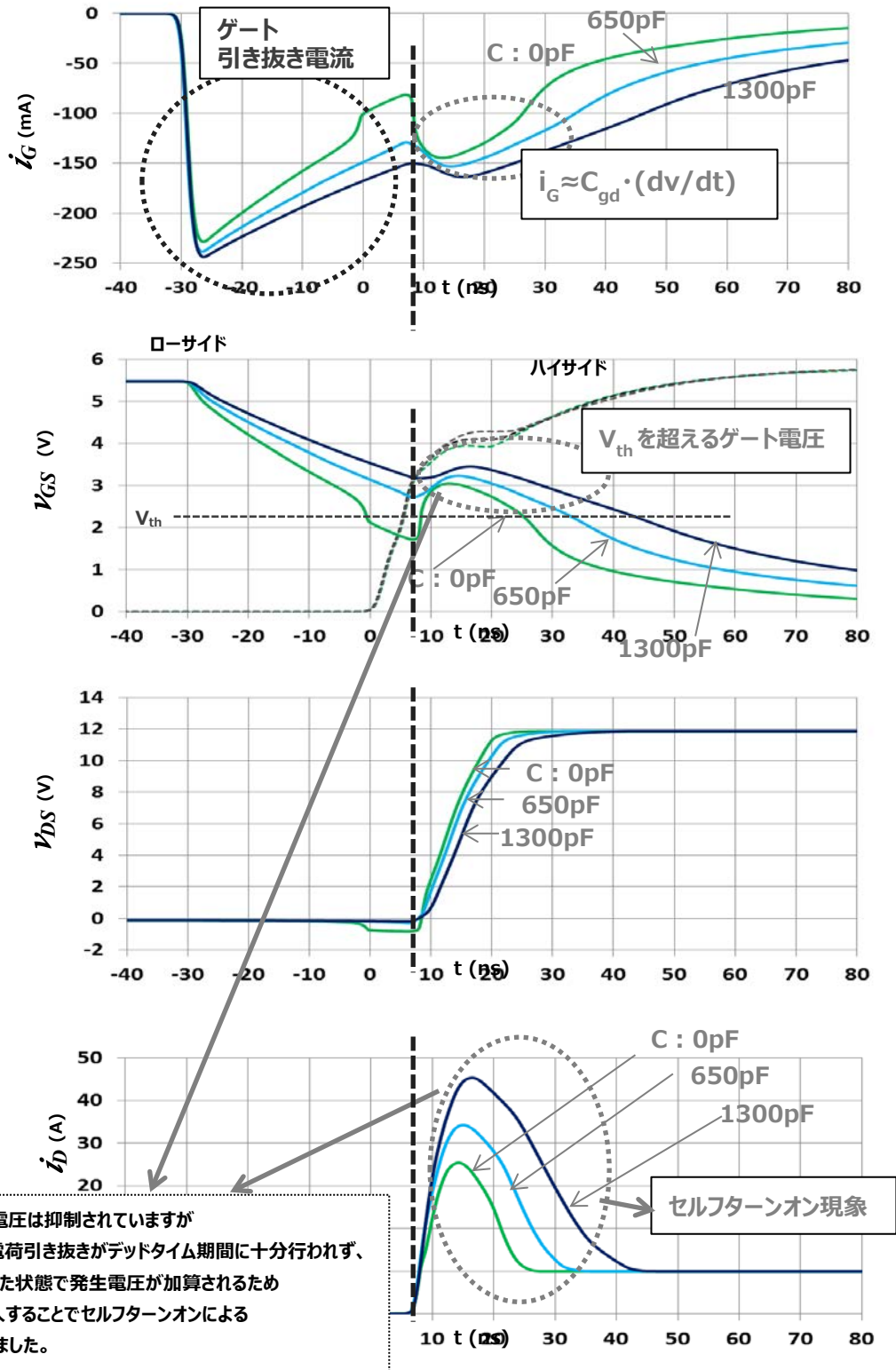


図 2.2a シミュレーション回路



C 挿入による発生電圧は抑制されていますが
C 挿入でゲートの電荷引き抜きがデッドタイム期間に十分行われず、
ゲートに電荷が残った状態で発生電圧が加算されるため
結果として C を挿入することでセルフターンオンによる
短絡電流は悪化しました。

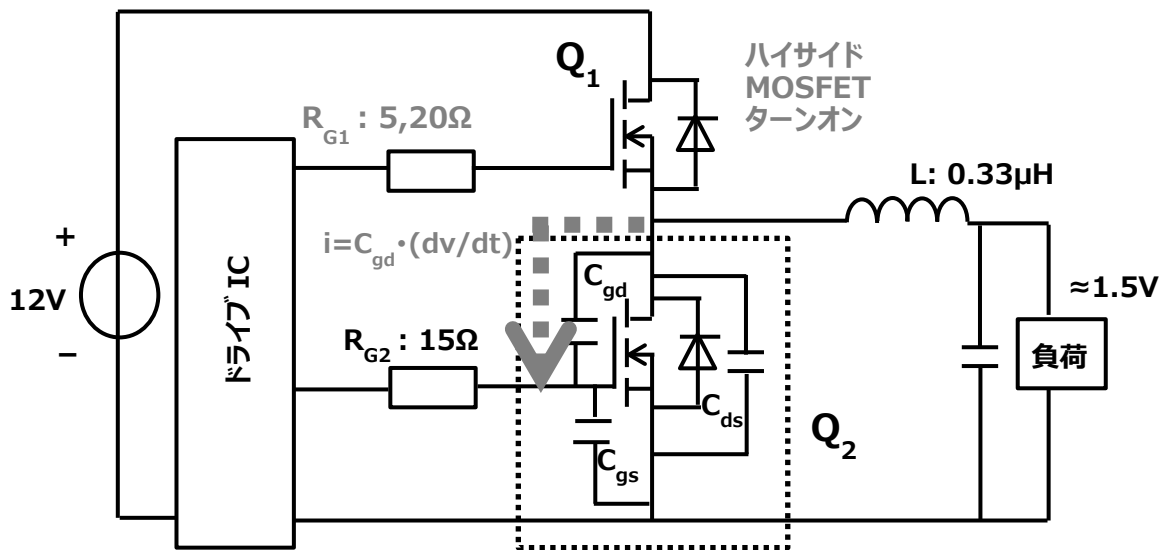
図 2.2b 回路(図 2.2a)における波形

2.1.3. セルフターンオン 電圧変化(dv/dt)効果

次にドレイン・ソース間の急峻な電圧変動(dv/dt)の影響をシミュレーションします。(意図的にセルフターンオンする条件で確認しております。)

ハイサイド MOSFET Q_1 のゲート抵抗(R_{G1})を変えることで、ローサイド MOSFET Q_2 に掛かるドレイン・ソース間の急峻な電圧変化(dv/dt)を変えてセルフターンオン現象の有無を確認しました。

急峻な電圧変化(dv/dt) を小さくすることでセルフターンオン現象は抑えることはできましたが、これはゲートに加えられる電圧 $C_{gd}/(C_{gs}+C_{gd}) \cdot v(t)$ 式において dv/dt が小さくなることで(dv/dt が長引く場合)、この式が成り立つ $v(t)$ の時間外の領域に入り $v(t)$ が小さくなったと考えられます。



使用 MOSFET
30V/16A
 C_{iss} :1350pF
 C_{rss} :63pF

MOSFET は SMD タイプを想定、
リード端子の L 分は入れておりません。

図 2.3a シミュレーション回路

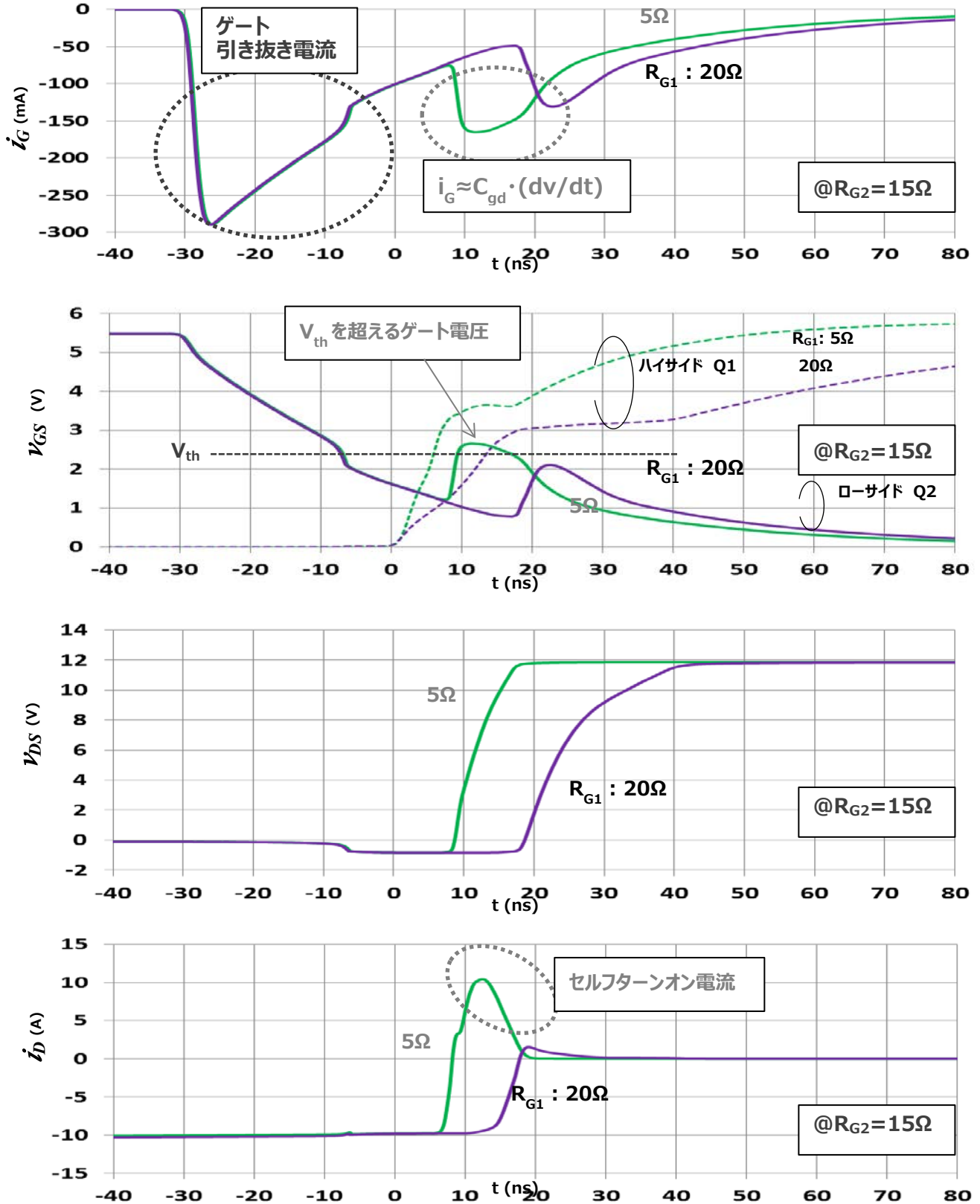


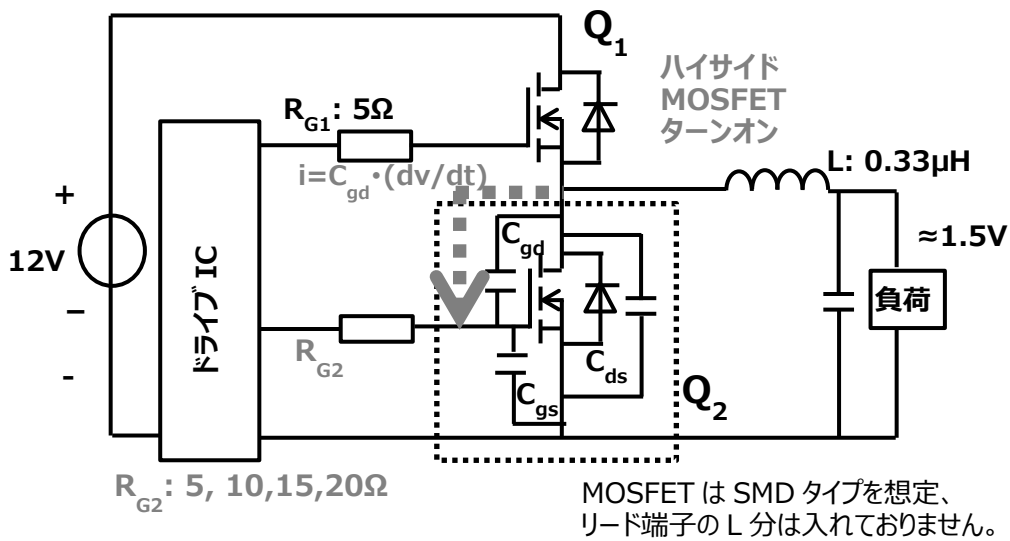
図 2.3b 回路(図 2.3a)における波形

2.1.4. セルフターンオン ゲート抵抗依存

下記回路においてローサイド MOSFET Q_2 のゲート抵抗 R_{G2} を変えてセルフターンオン現象をシミュレーションしました。
(意図的にセルフターンオンする条件で確認しております。)

セルフターンオンはゲート抵抗が大きいほど起こり易い結果になりましたが、これは dv/dt による MOSFET のゲート電圧変化の影響よりはゲート抵抗 R_{G2} を大きくすることによる MOSFET のゲート電荷の引き抜き電流及び電圧の残留が大きく効いたものと考えます。実際に MOSFET のゲート抵抗を大きくしても dv/dt 変化時に MOSFET Q_2 のゲートに流れる電流は大きく変わっておりません。

実際の DC-DC コンバータ回路は高速スイッチング (300~500kHz) なので MOSFET のスイッチングスピードを速くするためにゲート抵抗も小さくデットタイムも非常に短くとられます。実際の回路では今回セルフターンオンを起こさせるために使用したような大きいゲート抵抗を使うことは考えづらく、実使用ではセルフターンオンが起こった場合外部ゲート抵抗での対策は難しいと予測されます。



使用 MOSFET

30V/16A, C_{iss} :1350pF, C_{rss} :63pF

図 2.4a シミュレーション回路

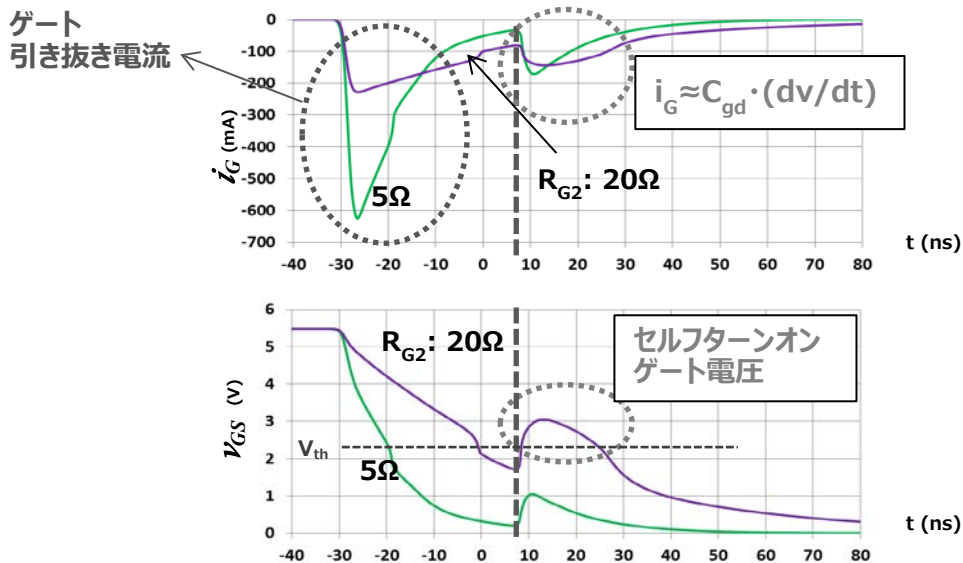


図 2.4b ローサイド MOSFET Q_2 ゲート電流・電圧

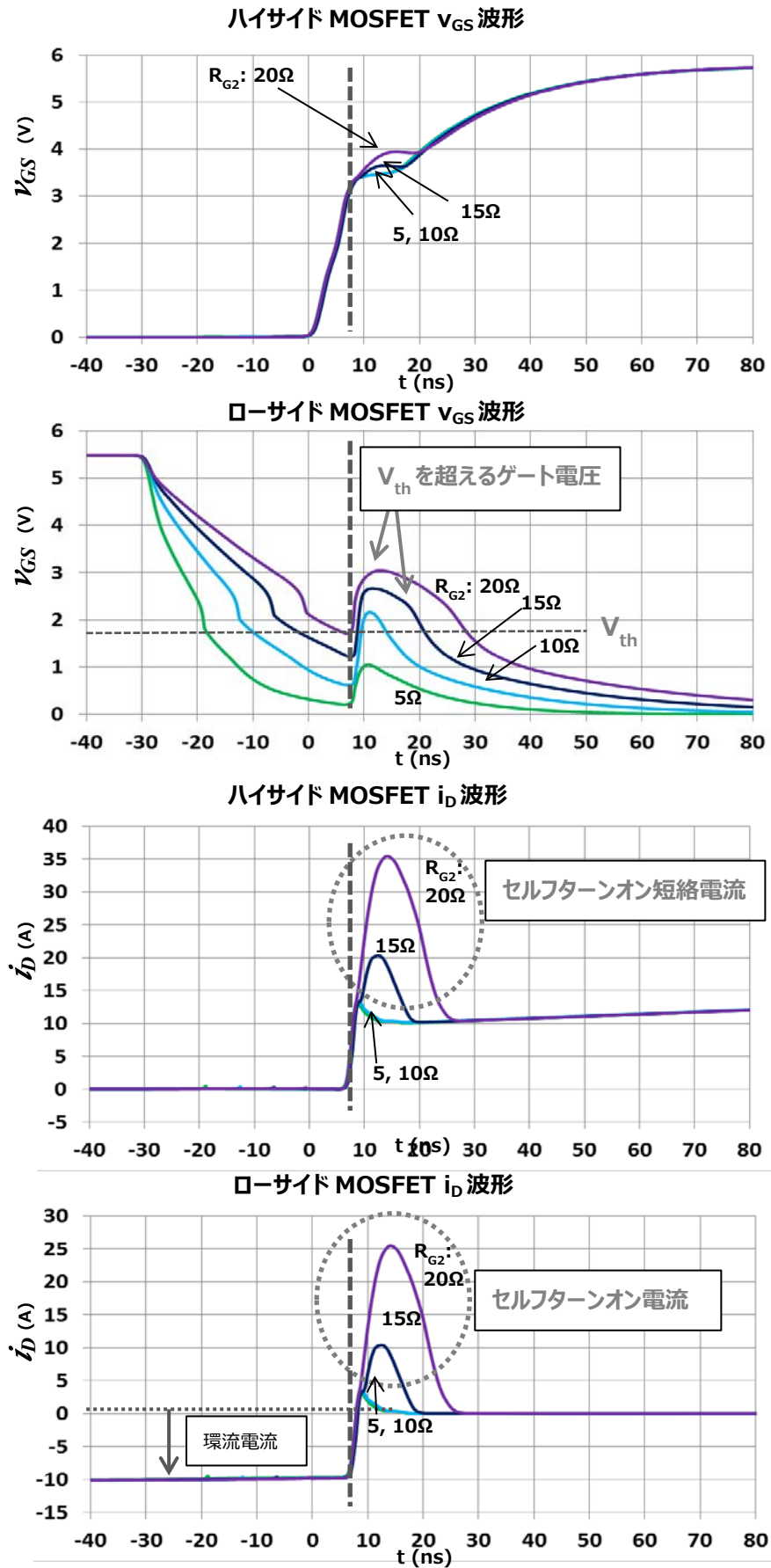


図 2.4c 両サイド v_{GS} , i_D 波形

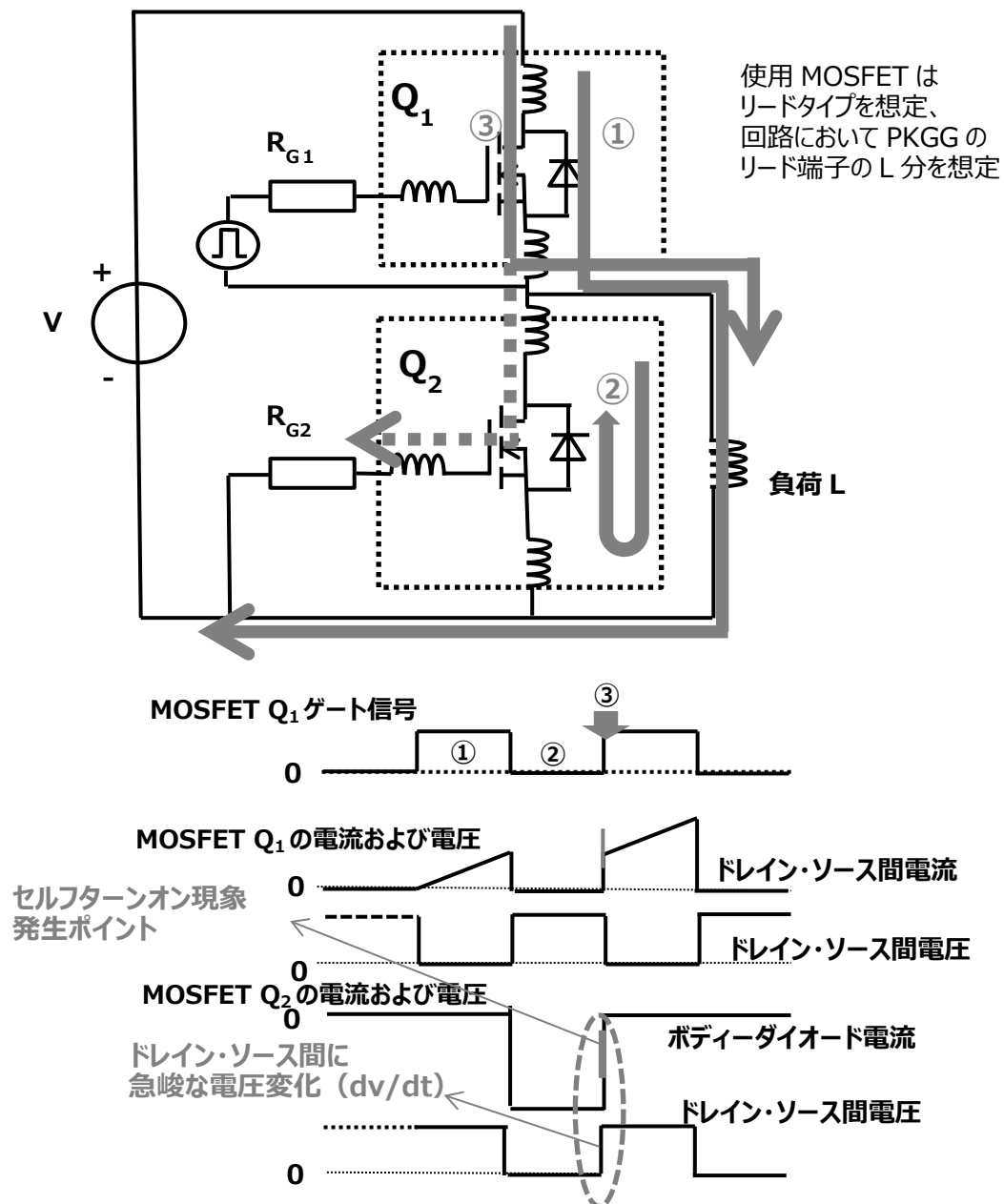
2.2. ブリッジ回路で構成されるインバータ回路

2.2.1. MOSFET セルフターンオン確認方法

ブリッジ回路で構成されるインバータ回路において、図 2.5 において MOSFET Q_1 がターンオンすると MOSFET Q_2 のドレイン・ソース間に急峻な電圧変化 dv/dt が加わり、MOSFET のドレイン・ゲート間容量 C_{gd} を介してゲート抵抗に電流が流れゲート電圧を持ち上げ、本来オフしている MOSFET をオンさせてしまうことがあります。

基本的動作を表現した図 2.5 で MOSFET Q_1 のゲートに 2 発パルスを入れ、下記手順で MOSFET Q_2 のセルフターンオン現象を確認しました。

- ① MOSFET Q_1 の 1 発目のゲートパルスで、負荷 L に電流が流れます。
- ② MOSFET Q_1 をオフさせると電流は MOSFET Q_2 のダイオードに環流されます。
- ③ MOSFET Q_1 の 2 発目のゲートパルスで MOSFET Q_2 のボディードiodeは t_{rr} モードに入り、その後、ドレイン・ソース間に急峻な電圧変化 dv/dt が与えられます。この時、MOSFET Q_2 のゲート抵抗 R_{G2} にゲート電流が流れ、ゲート電圧が上昇します。



2.2.2. セルフトーンオン ゲート抵抗依存

ゲート抵抗の影響を確認するために、下記回路において MOSFET Q₂(オフ状態)のゲート抵抗 R_{G2} を 50Ω~200Ω へ変化させてシミュレーションを行いました。セルフトーンオンはゲート抵抗 R_{G2} が大きいほど起こり易くなります。

$$(V_{GS} = R_G \cdot C_{gd} \cdot (dv/dt))$$

ゲートに流れる電流はゲート抵抗の制限を受けるため、ゲート抵抗が大きいほどゲート電流は小さくなりますが、発生するゲート電圧はゲート抵抗との積で生じるためゲート抵抗が大きくなることでゲート電圧は大きくなっています。この電圧が V_{th} を超えるとセルフトーンオンを起こしています。(意図的にセルフトーンオンする条件で確認しております。)

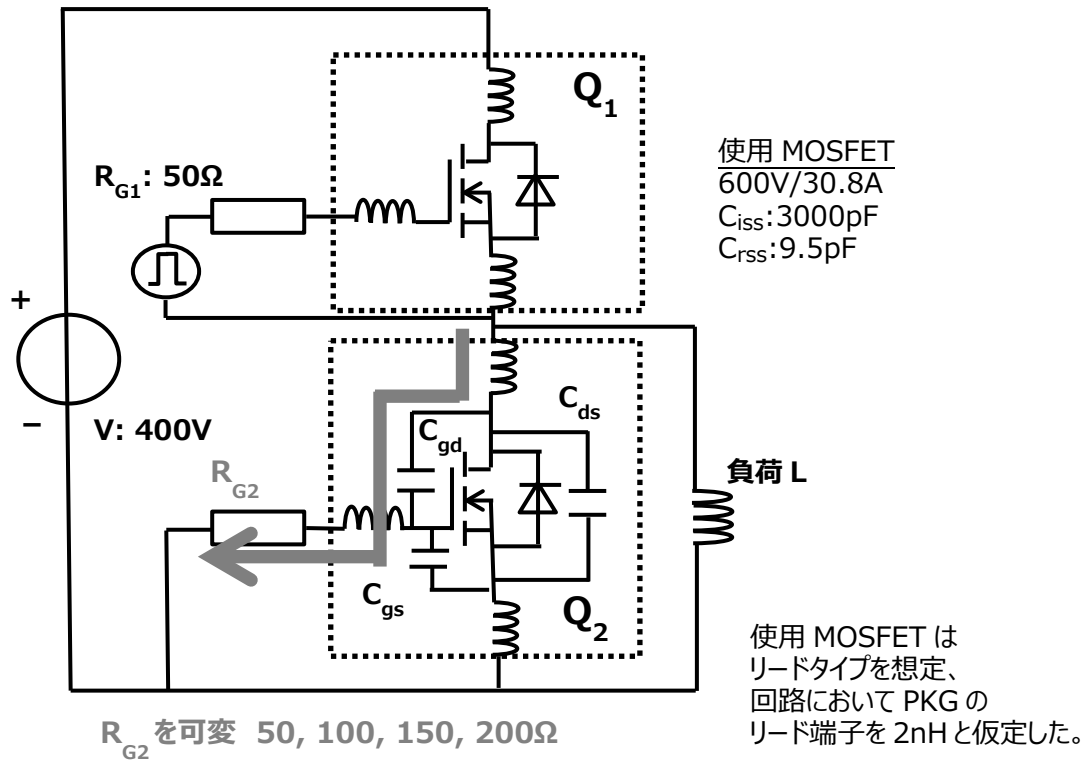


図 2.6a シミュレーション回路

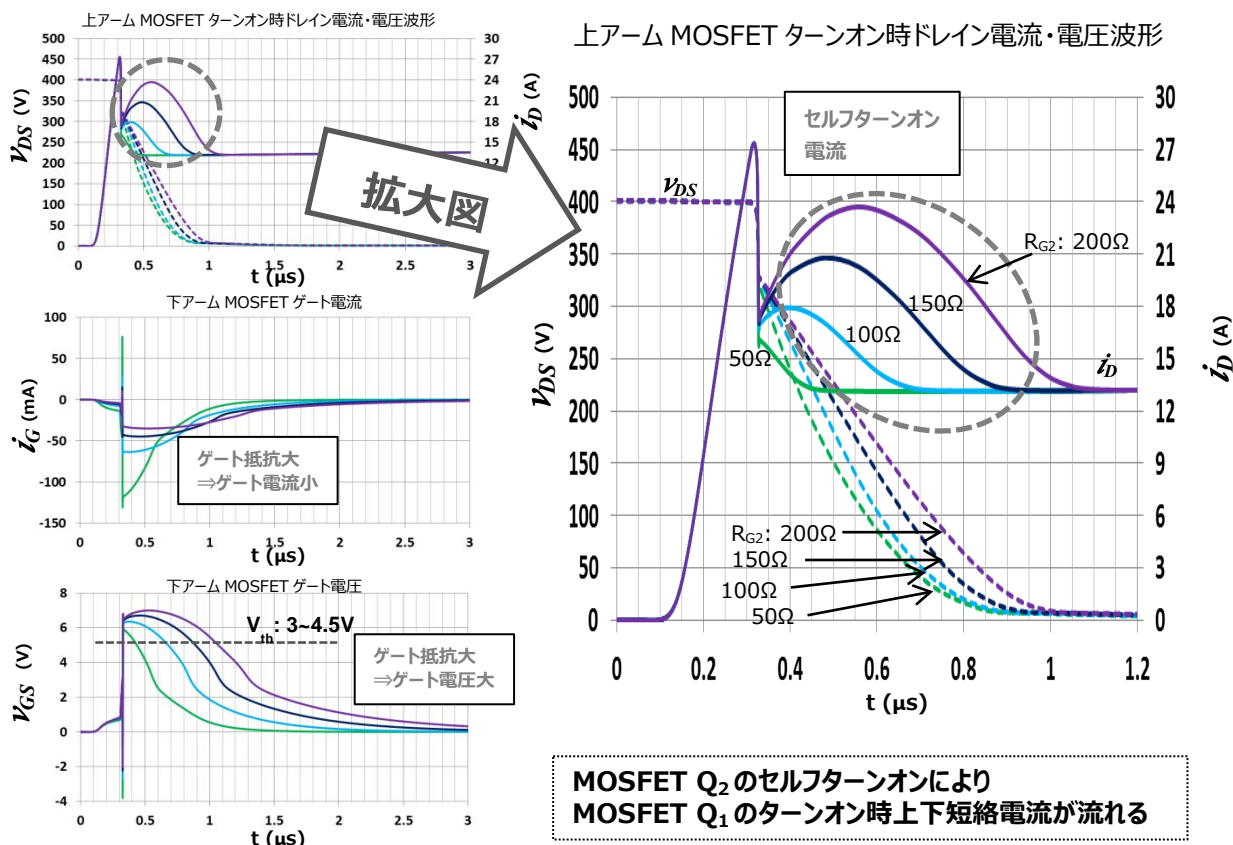


図 2.6b ターンオン波形

2.2.3. セルフターンオン 電圧変化率(dv/dt)影響

ここでは、ドレイン・ソース間の急峻な電圧変化 dv/dt の違いによる影響を確認します。 $v_{GS} = R_G \cdot C_{gd} \cdot (dv/dt)$ よりゲート電圧上昇は dv/dt を小さくすることで抑制できます。

dv/dt による影響を確認するために、下記回路において、意図的にセルフターンオンが起きる条件下(MOSFET Q_2 のゲート抵抗: 200Ω)でドライブ側 MOSFET Q_1 のゲート抵抗(R_{G1})を変え、MOSFET Q_2 の t_{rr} モード時に掛かる dv/dt を調整することでシミュレーションを実施しました。 R_{G1} を大きくして dv/dt を抑えることで、セルフターンオンは発生しにくくなります。(意図的にセルフターンオンする条件で確認しております。)

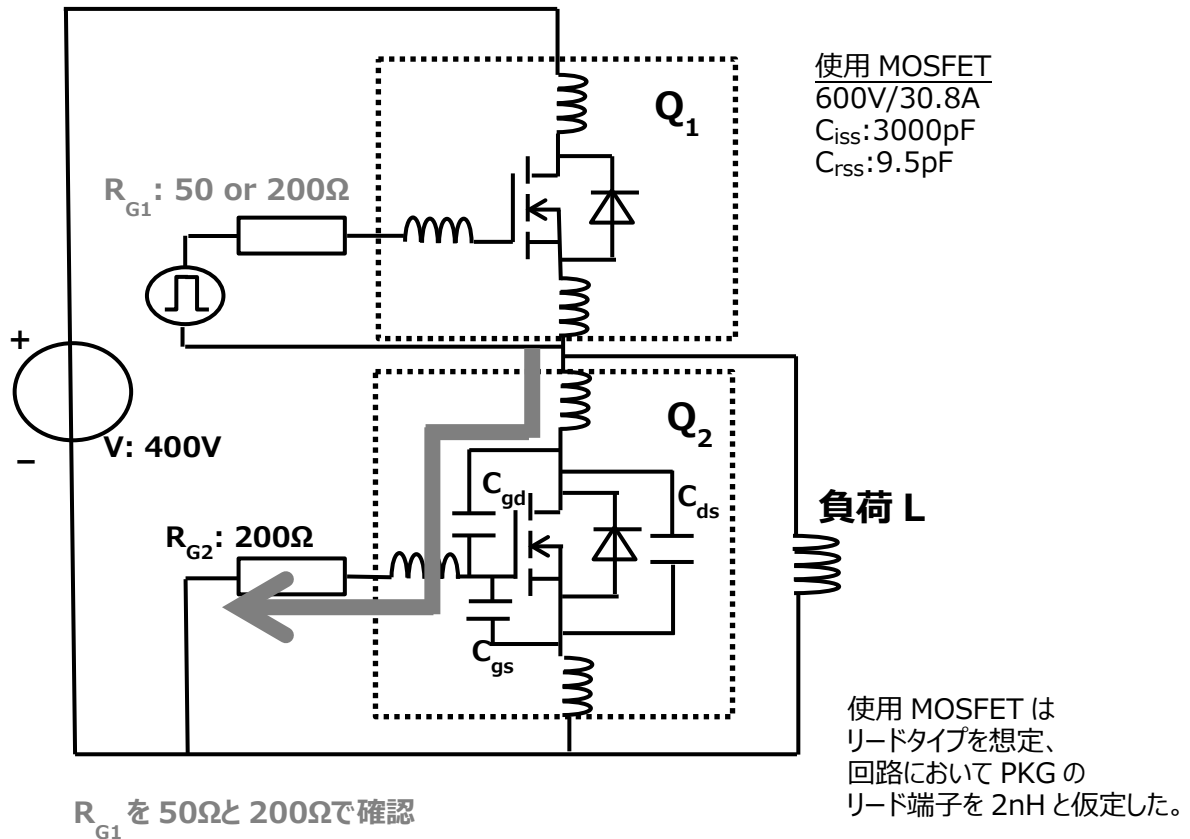


図 2.7a シミュレーション回路

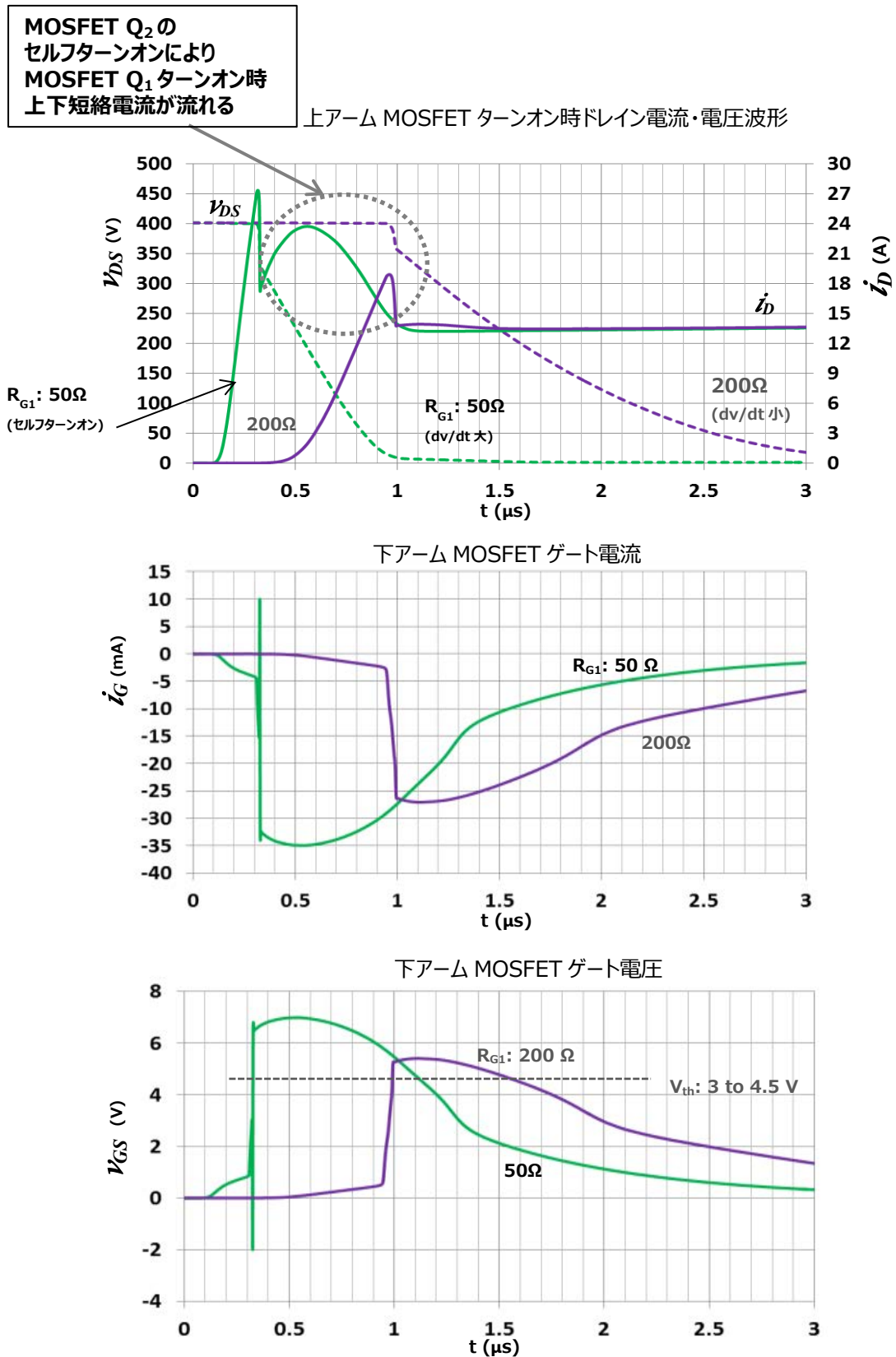


図 2.7b ターンオン波形

3. セルフターンオン対策

3.1. 非絶縁型 DC-DC コンバータ回路における対策

MOSFET に dv/dt が与えられると一般的には MOSFET のゲート・ドレイン間容量 C_{gd} を通して電流が流れ ($i = C_{gd} \frac{dv}{dt}$)

この電流 i によって MOSFET のゲート・ソース間には下記電圧が発生します。

$$v_{GS} = R_G C_{gd} \frac{dv}{dt} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{(C_{gs} + C_{gd})R_G}\right) \right\}$$

(ゲート電圧 v_{GS} の計算式においては MOSFET の容量、 C_{gs} 、 C_{gd} は電圧変化が無いものと仮定しております。)

非絶縁型 DC-DC コンバータ回路の場合スイッチング周波数が非常に高く (300~500kHz)、MOSFET のスイッチングスピードも非常に速い状態で使用される場合は、下記式で表される v_{GS} が MOSFET の V_{th} を超える場合にセルフターンオン現象が起こります。

dv/dt 状態が $(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ より短時間で終了する場合

($t \ll (C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ の場合)

$$v_{GS} \approx \frac{C_{gd}}{(C_{gs} + C_{gd})} v(t)$$

(t が短期間の場合は $v(t)$ は電源電圧 V と見なすことができます。)

セルフターンオン対策としては

MOSFET そのものにおいて V_{th} の高い製品、 C_{gd}/C_{gs} 比の小さい製品を選ぶことですが、回路における対策としては

・ C_{gd}/C_{gs} 比を小さくするために MOSFET のゲート・ソース間に容量を挿入することが考えられます。(図 3.1)
但し、ゲート・ソース間に容量を挿入することでスイッチング時間に影響を及ぼすので注意が必要です。

ハイサイド素子のターンオン時間のみを遅くして dv/dt を抑えることも可能ですが、これは多くの DC-DC コンバータ応用が、周波数を高く設計されておりスイッチング損失の視点より有効な対策とならない場合が多いようです。

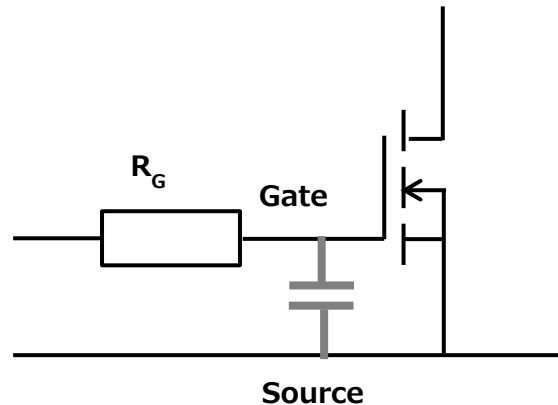


図 3.1 ゲート・ソース間 C 挿入

3.2. ブリッジ回路で構成されるインバータ回路における対策

MOSFET に dv/dt が与えられると一般的には MOSFET のゲート・ドレイン間容量 C_{gd} を通して電流が流れ ($i = C_{gd} \frac{dv}{dt}$)

この電流 i によって MOSFET のゲート・ソース間には下記電圧が発生します。

$$v_{GS} = R_G C_{gd} \frac{dv}{dt} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-t}{(C_{gs} + C_{gd})R_G}\right) \right\}$$

(ゲート電圧 v_{GS} の計算式においては MOSFET の容量、 C_{gs} 、 C_{gd} は電圧変化が無いものと仮定しております。)

インバータ回路ではスイッチング周波数は 20kHz 程度で非絶縁型 DC-DC コンバータ回路ほどの MOSFET のスイッチングスピードは要求されていません。 dv/dt 状態における時間 t の初期はゲート・ドレイン、ゲート・ソース間容量比による v_{GS} 変化はありますが、下記式で示した内容がセルフターンオンに最も影響します。下記式で表される v_{GS} が MOSFET の V_{th} を超える場合にセルフターンオン現象が起こります。

dv/dt 状態が $(C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ より長引く場合 ($t \gg (C_{gs} + C_{gd}) \cdot R_G$ の場合)

$$v_{GS} \approx R_G C_{gd} \frac{dv}{dt}$$

セルフターンオン対策としては

MOSFET そのものにおいて V_{th} の高い製品、 C_{gd} の小さい製品を選ぶことですが、回路における対策としては

- ターンオン時の dv/dt を下げます。(ターンオン抵抗を大きくします。)(図 3.2)
- ターンオフ時の R_G を小さくします。(ターンオフ抵抗を小さくします。)(図 3.2)
- ゲートに負電圧を使用します。(図 3.3)
- ゲートにシャント回路を使用します。(図 3.4)
- などが挙げられます。

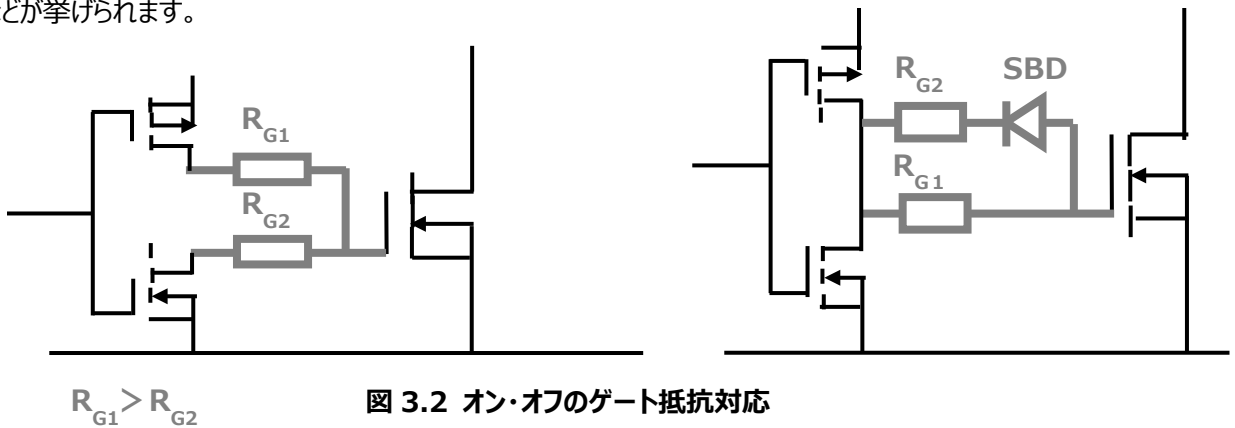


図 3.2 オン・オフのゲート抵抗対応

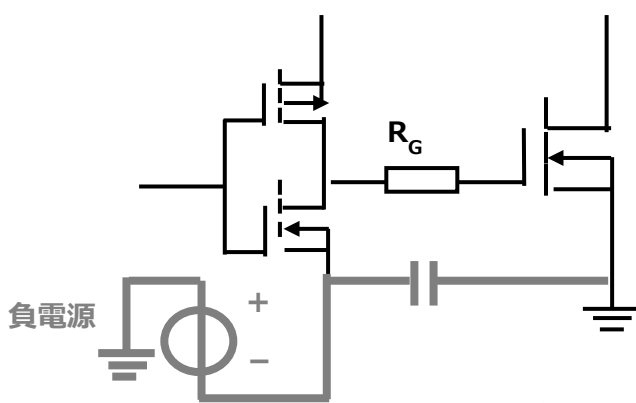


図 3.3 ゲート負電源使用

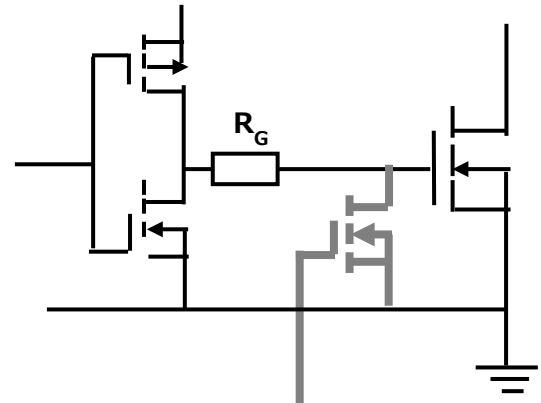


図 3.4 シャント回路追加

製品取り扱い上のお願ひ

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、電力機器、金融関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口までお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。