

3 フェーズ定電流制御 SRC の使い方事例

東芝デバイス&ストレージ株式会社

これは参考資料です。本資料での最終機器設計はしないでください。

目次

目次	2
1. 本資料の意図と狙い	4
対象製品と機能	4
本資料で説明する内容	4
適用上の注意	4
2. 3Phase SRC の概要と基本的な考え方	5
2.1. 3Phase SRC の概要	5
2.2. 3Phase SRC の効果	6
3. 3Phase SRC のパラメーターの調整指針	7
3.1. 3Phase SRC の調整指針の概要	7
3.2. 3Phase SRC の評価方法	9
4. 3Phase SRC に関するパラメーターの調整例	10
4.1. 調整手順	10
4.2. (A)フェーズ 1 の調整の波形例 (Qg=76nC(TK100S04N1L))	11
4.3. (B)フェーズ 2 の調整の波形例 (Qg=76nC(TK100S04N1L))	12
4.4. Qg が小さい MOSFET の調整の波形例 (Qg=39nC(TK65S04N1L))	13
記載内容の留意点	14
使用上のご注意およびお願い事項	14
使用上の注意事項	14
使用上の留意点	14
製品取り扱い上のお願い	15

図目次

図 2.1 定電流駆動および 3Phase SRC 駆動のタイミングチャート 6

図 3.1 SRC 駆動回路..... 7

図 3.2 3Phase SRC におけるフェーズの概念..... 7

図 3.3 3Phase SRC の波形測定イメージ 9

図 4.1 3Phase SRC の調整フローチャート 10

図 4.2 フェーズ 1 のパラメーター調整例 11

図 4.3 フェーズ 2 のパラメーター調整例 12

図 4.4 Qg が小さい MOSFET におけるパラメーター調整例 13

表目次

表 3.1 本 IC の 3 フェーズ SRC の設定パラメーター一覧 8

1. 本資料の意図と狙い

対象製品と機能

マイコンとモータードライバを統合した SoC「SmartMCD™」のシリーズ製品である TB9M003FG および TB9M030FG(以降、本 IC)は、3 フェーズ定電流制御によるスルーレート制御(Slew Rate Control、以降、SRC)の機能を搭載しています。

SRC を使用することで、MOSFET のターンオン時におけるゲート電流(以降、 I_g)を制御し、ドレイン・ソース間電圧 (以降、 V_{ds}) のスルーレート(以降 SR : Slew Rate)を表す $d(V_{ds})/dt$ を調整できます。これにより、システム要求に応じて、電磁ノイズとスイッチング損失のバランスを調整できます。

本資料で説明する内容

SRC の基本的な考え方に加え、本 IC に搭載された 3 フェーズ定電流制御 SRC (以降、3Phase SRC) のパラメータの調整手順および実機波形を用いた調整例を説明します。

適用上の注意

本資料では、実機波形を確認しながら電磁ノイズとスイッチング損失のバランスを調整する方法の一例を示します。適切な $d(V_{ds}/dt)$ は、システム仕様、動作条件、使用する MOSFET などによって異なります。そのため、実機評価により最終的な設定値を決定してください。

本資料が、3Phase SRC を用いたシステム設計の一助となれば幸いです。

SmartMCD™ は東芝デバイス&ストレージ株式会社の商標です。

2. 3Phase SRC の概要と基本的な考え方

2.1. 3Phase SRC の概要

モーターを高精度に制御するためには、MOSFET を適切な速度でスイッチングする必要があります。一方、MOSFET のスイッチングを高速化すると、ターンオン時およびターンオフ時におけるドレイン・ソース間電圧およびドレイン電流(以降、 I_d)の変化が急峻となり、電磁ノイズの増大による周辺回路への干渉や誤動作が問題となる場合があります。この課題に対し、SRC を適用することで、電磁ノイズとスイッチング損失のバランスを調整できます。

電磁ノイズを直接評価することは容易ではありません。そこで、本資料では、電磁ノイズとの相関があり、波形観測が容易な $d(V_{ds})/dt$ を評価指標として使用します。

一般に、SRC には、開ループ SRC と閉ループ SRC の 2 種類があります。開ループ SRC では、目標とする $d(V_{ds})/dt$ が得られるようにゲート電流を設定する必要があります。一方、閉ループ SRC では、目標とする $d(V_{ds})/dt$ が得られるように I_g が自動的に調整されます。SRC は I_g を制御することで MOSFET のスイッチング速度を調整し、 $d(V_{ds})/dt$ を制御することで電磁ノイズとスイッチング損失のバランスを調整する機能です。また、副次的な効果として、 $d(V_{ds})/dt$ に起因するセルフターンオンや、逆回復電流に起因する電圧スパイクの抑制にも寄与します。

本 IC は、定電流駆動および開ループ SRC 方式の可変電流駆動に対応しています。本 IC の可変電流駆動は、スイッチング期間を 3 つの区間に分割し、各フェーズの I_g を個別に設定できる 3 フェーズ定電流制御の SRC です。各フェーズの定義は 3.1 節で説明します。

電磁ノイズへの寄与が小さいフェーズ 1 およびフェーズ 3 では I_g を大きく設定して MOSFET を高速にスイッチングし、スイッチング損失の低減を図ります。一方、 V_{ds} が大きく変化し、電磁ノイズへの寄与が大きいフェーズ 2 では I_g を小さく設定することで $d(V_{ds})/dt$ を低減し、電磁ノイズを抑制します。

本資料では、 V_{ds} の全変化量を基準として、 V_{ds} が 90% から 10% まで低下する期間の $|d(V_{ds})/dt|$ を SR と定義します。システム要求を満たす $d(V_{ds})/dt$ となるよう 3Phase SRC の各パラメーターを調整してください。

2.2. 3Phase SRC の効果

◆ $d(V_{ds})/dt$ 調整による電磁ノイズとスイッチング損失のバランス調整

代表例として、MOSFET のターンオン時における定電流駆動および 3Phase SRC のタイミングチャートを図 2.1 に示します。図の下部には、スイッチング時の瞬時損失の概念図を示します。

定電流駆動では、スイッチング期間中の I_g は一定です。一方、3Phase SRC では、スイッチングの進行に応じて I_g を段階的に切り替えることができます。これにより、 V_{ds} が大きく変化する区間(フェーズ 2)では I_g を小さく設定して $d(V_{ds})/dt$ を低減し、 $d(V_{ds})/dt$ に起因する電磁ノイズの抑制を図ります。一方、 V_{ds} の変化が小さく電磁ノイズへの寄与が比較的小さい区間(フェーズ 1 およびフェーズ 3)では I_g を大きく設定することで、各フェーズの所用時間を短縮し、スイッチング損失の増加を抑制します。

なお、実際の電磁ノイズおよびスイッチング損失は、 $d(V_{ds})/dt$ のみで決まるのではなく、 $d(I_d)/dt$ 、MOSFET 特性、基板レイアウトなどの影響を受けます。図 2.1 に示す瞬時損失波形は、3Phase SRC によるスイッチング損失の変化傾向を説明するための概念図です

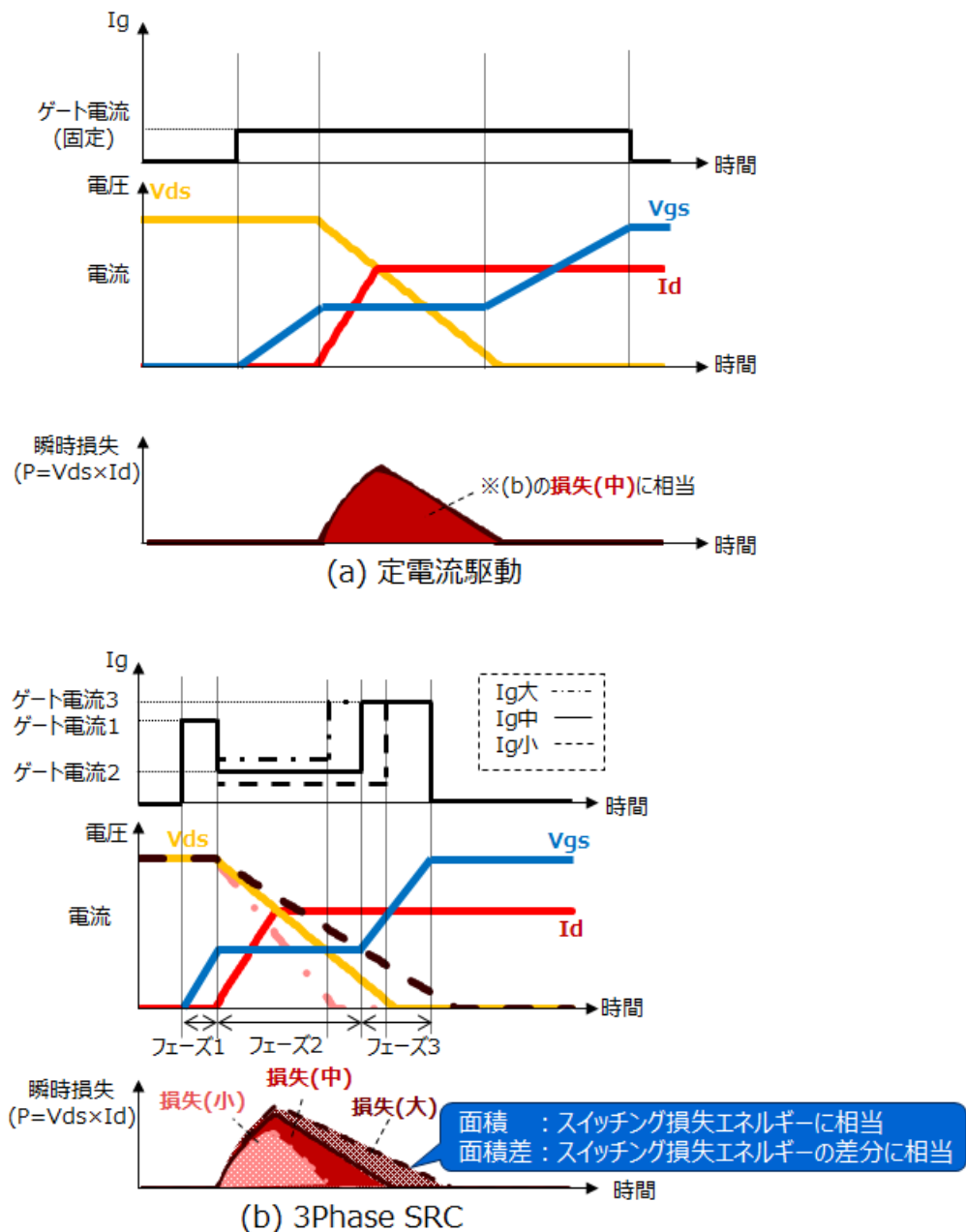


図 2.1 定電流駆動および 3Phase SRC 駆動のタイミングチャート

3. 3Phase SRC のパラメーターの調整指針

3.1. 3Phase SRC の調整指針の概要

3Phase SRC の調整指針について説明します。

SRC の駆動回路を図 3.1 に、各フェーズの概念を図 3.2 に示します。本 IC の 3Phase SRC の設定パラメーター一覧を表 3.1 に示します。各フェーズの定義については、図 3.2 および表 3.1 を参照してください。

本 IC の 3Phase SRC は、2 章で説明したとおり、フェーズ 1～3 の各フェーズに対して I_g を個別に設定できます。目標とする $d(V_{ds})/dt$ が得られるように、波形を確認しながら各パラメーターを調整してください。

実際の $d(V_{ds})/dt$ は、SRC の設定が同一であっても、バッテリー電圧 (V_{bat}) や温度などの動作条件、および MOSFET 特性によって変動します。そのため、動作条件による変動や MOSFET 特性のバラツキを考慮し、電磁ノイズとスイッチング損失が要求仕様を満たすように、十分な設計マージンを確保して各パラメーターを設定してください。

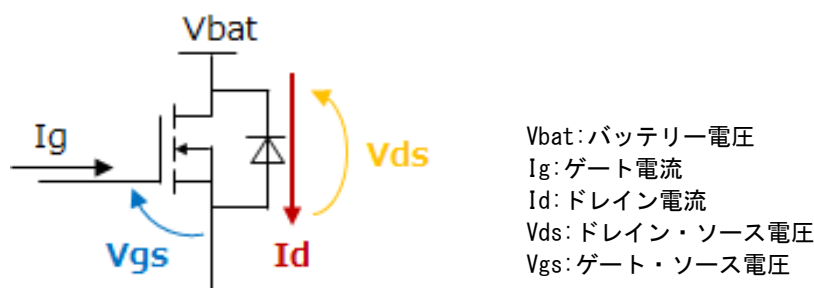


図 3.1 SRC 駆動回路

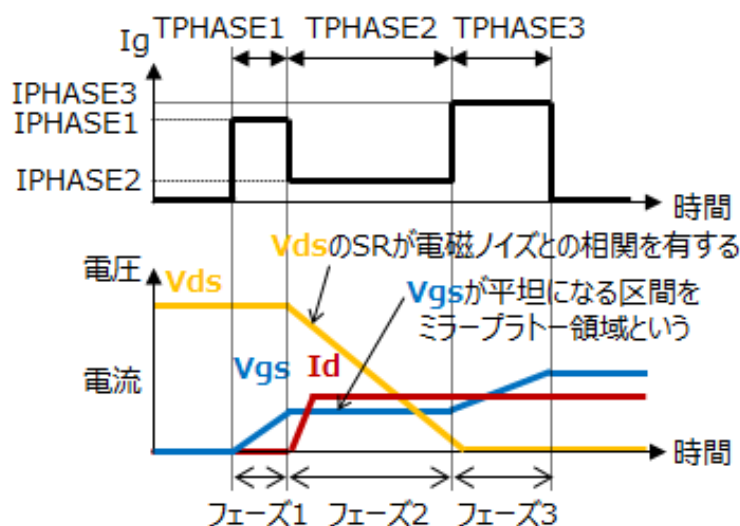


図 3.2 3Phase SRC におけるフェーズの概念

表 3.1 本 IC の 3 フェーズ SRC の設定パラメーター一覧

SRC のフェーズ	説明	パラメーター	備考
フェーズ 1 (プリチャージ)	MOSFET の Vgs が 上昇し、しきい値電 圧(Vth)付近に到達 するまでの領域 (ノイズへの寄与小)	TPHASE1	フェーズ 1 の継続時間を設定 MOSFET がミラープラトー領域に到達する時間となるよう設定 設定時間が短い場合、設定した Ig に十分到達する前にフェーズ 2 に移行する可能性あり ハイサイド/ローサイドで共通
		IPHASE1	フェーズ 1 の Ig を設定 スイッチング時間およびスイッチング損失を抑制するため、電 磁ノイズへの影響を確認したうえで、大きな値を設定。この資 料では最大値の 120mA を設定 ハイサイド/ローサイドで共通
フェーズ 2 (チャージ)	Vds が主に変化する 領域 (ノイズへの寄与大)	TPHASE2	フェーズ 2 の継続時間を設定 目標とする d(Vds/dt)および Vbat などの動作条件を考慮して設 定 設定時間が短い場合、Vds の変化が完了する前にフェーズ 3 に 移行する可能性あり。 ハイサイド/ローサイドで共通
		IPHASE2H	フェーズ 2 のハイサイドの Ig を設定 Ig を小さくすると d(Vds)/dt が低下し、ノイズを抑制できる。 本パラメーターは電磁ノイズとスイッチング損失のバランスを 調整する主要パラメーター。
		IPHASE2L	フェーズ 2 のローサイドの Ig を設定 Ig を小さく設定すること d(Vds)/dt が低下し、電磁ノイズを抑 制できるが、スイッチング損失が増加する傾向にある
フェーズ 3 (ポストチャー ジ)	Vds の変化が完了し た後、Vgs を最終駆 動電圧まで上昇させ る領域 (ノイズへの寄与小)	—	フェーズ 3 の Ig は、フェーズ 1 とフェーズ 2 の設定 Ig の和と して自動的に決定 Ig を大きくすることにより MOSFET を速やかにオン状態へ移 行させ、スイッチング損失の増加を抑制する

(注) レジスタ [MCSSDRVPTSR] で、時間 TPHASE1 および TPHASE2 を、
レジスタ [PREDRVSRGR] で、電流値 IPHASE1、IPHASE2H、IPHASE2L を設定します。

3.2. 3Phase SRC の評価方法

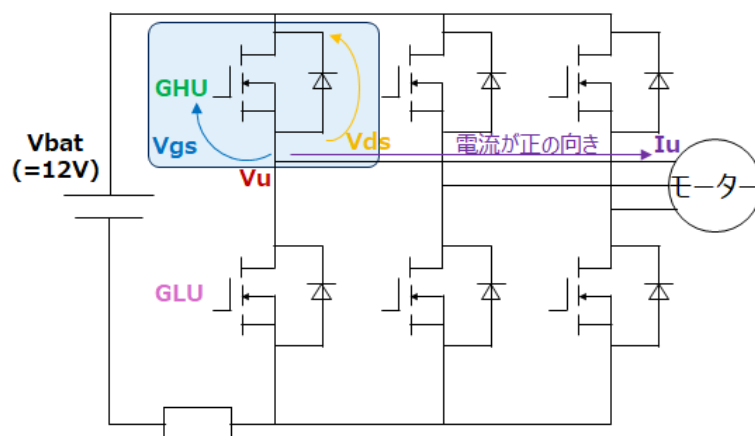
図 3.3 に、3Phase SRC の波形測定構成を示します。

測定環境の制約上、図 3.3 に示すようにハイサイド側およびローサイド側の波形は、それぞれ個別に観測します。本評価では、U 相に関連する各波形を観測対象とします。

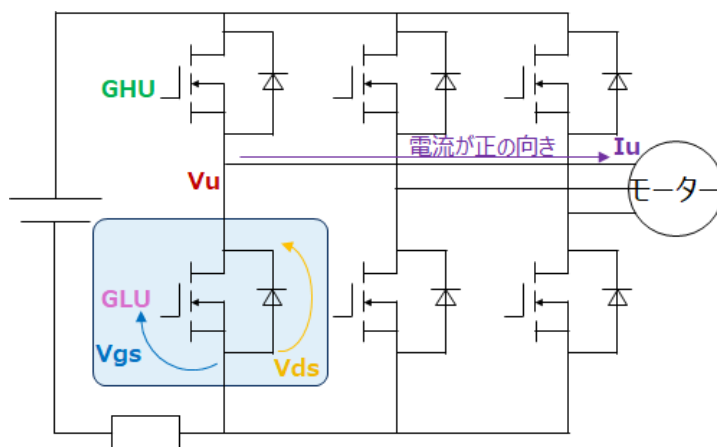
また、MOSFET のゲート電荷量 (Q_g) の違いによって 3Phase SRC の設定パラメーターが異なることを確認するために、 Q_g の異なる 2 種類の MOSFET を用いて評価を実施します。各 MOSFET を用いた調整例の波形について 4 章で説明します。

(1) $Q_g=76\text{nC}$ (TK100S04N1L)

(2) $Q_g=39\text{nC}$ (TK65S04N1L)



(a) ハイサイド側の測定



(b) ローサイド側の測定

図 3.3 3Phase SRC の波形測定イメージ

4. 3Phase SRC に関するパラメーターの調整例

4.1. 調整手順

3Phase SRC のパラメーター調整のフローチャートを図 4.1 に示します。 $d(V_{ds})/dt$ は、主にフェーズ 2 のパラメーター設定の影響を受けるため、フェーズ 2 を中心に説明します。3 章で説明した MOSFET 特性を考慮し、目標とする $d(V_{ds})/dt$ が得られるように各パラメーターを設定してください。

4 章では、3Phase SRC が有効に機能するためのフェーズ切り替えタイミングとその調整方法について説明します。TPHASE1 は V_{ds} 波形を確認しながら調整します。IPHASE1 は、最大設定値である 120mA と設定します。

フェーズ 1 調整の目安

- ・ TPHASE1 : MOSFET がミラープラトー領域に到達する直前に、フェーズ 2 へ切替わるように設定する
- ・ IPHASE1 : MOSFET が安定してターンオンできる範囲内で、できるだけ大きな値に設定する (本資料では最大設定値の 120mA に設定)

フェーズ 2 調整の目安

- ・ TPHASE2 : V_{ds} の変化期間全体を十分に含むように設定する
- ・ IPHASE2H : ハイサイド MOSFET の V_{ds} 波形のオーバーシュートおよびリンギングを確認しながら調整する
- ・ IPHASE2L : ローサイド MOSFET の V_{ds} 波形のオーバーシュートおよびリンギングを確認しながら調整する

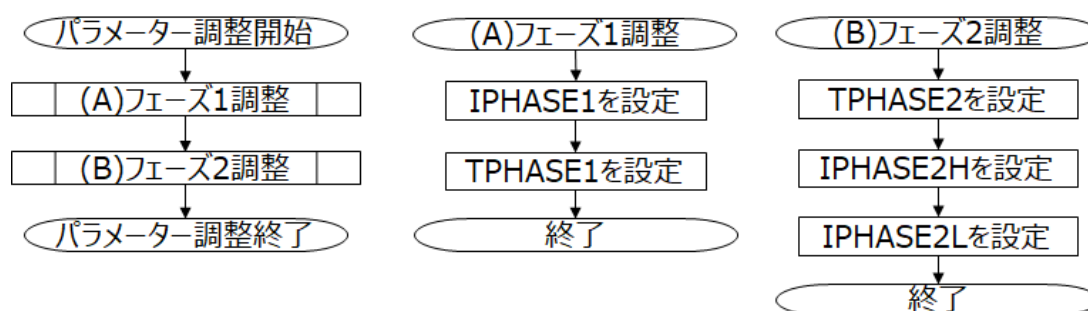
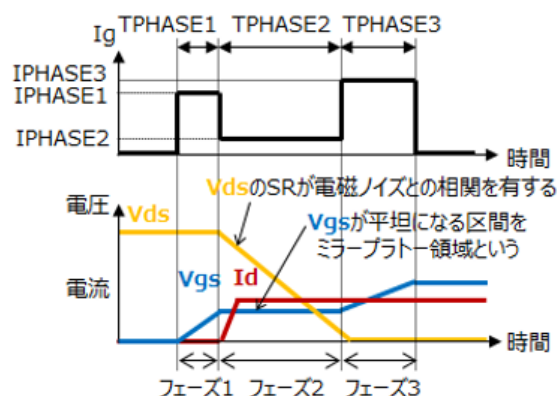


図 4.1 3Phase SRC の調整フローチャート



3 章にて掲示 (図 3.2 3Phase SRC におけるフェーズの概念)

4.2. (A)フェーズ 1 の調整の波形例 (Qg=76nC(TK100S04N1L))

まず(A)では、フェーズ 1 のパラメーターである TPHASE1 を設定します。このとき、フェーズ 2 のパラメーターも暫定的に設定しておきます。なお、TPHASE2 の設定によって、ゲート出力のオン時間が変化する場合がありますため、注意してください。

図 4.2 にフェーズ 1 のパラメーター調整例を示します。

TPHASE1 が大きい場合、Vds が変化し始めた後もフェーズ 1 が継続し、フェーズ 2 で制御すべき期間を十分に確保できない場合があります。一方、TPHASE1 が小さい場合、Vds が変化し始める前にフェーズ 2 へ遷移し、フェーズ 2 の設定が十分に反映されない場合があります。Vds 波形を確認しながら、Vds の変化開始直前でフェーズ 1 が終了するよう TPHASE1 を調整してください。

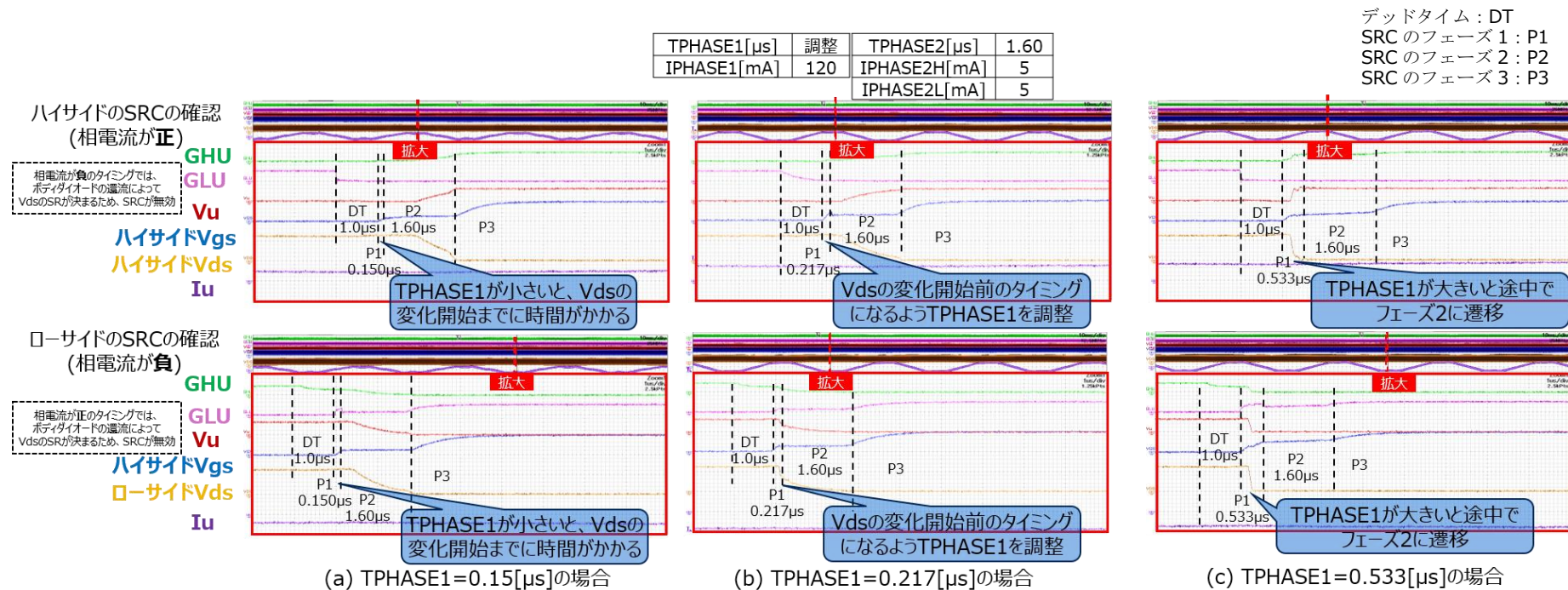


図 4.2 フェーズ 1 のパラメーター調整例

4.3. (B)フェーズ 2 の調整の波形例 (Qg=76nC(TK100S04N1L))

次に(B)では、フェーズ 2 におけるパラメーターである TPHASE2、IPHASE2H および IPHASE2L を設定します。TPHASE2 は、Vds の変化期間全体を十分に含むように設定してください。初期設定値の目安は、 $TPHASE2 \approx V_{bat} / |d(V_{ds})/dt|$ です。

ここでは、目標とする $d(V_{ds})/dt$ が異なる 3 つの条件について、フェーズ 2 のパラメーター調整例を図 4.3 に示します。IPHASE2H は主にハイサイド MOSFET の $d(V_{ds})/dt$ に影響し、IPHASE2L は主にローサイド MOSFET の $d(V_{ds})/dt$ に影響します。それぞれの Vds 波形を確認しながら、目標の $d(V_{ds})/dt$ が得られるように調整してください。

注意：この章に示す設定値は、MOSFET 個体差や動作条件によるばらつきは考慮せず、評価に使用した MOSFET および評価条件に対して調整した値です。

デッドタイム : DT
SRC のフェーズ 1 : P1
SRC のフェーズ 2 : P2
SRC のフェーズ 3 : P3

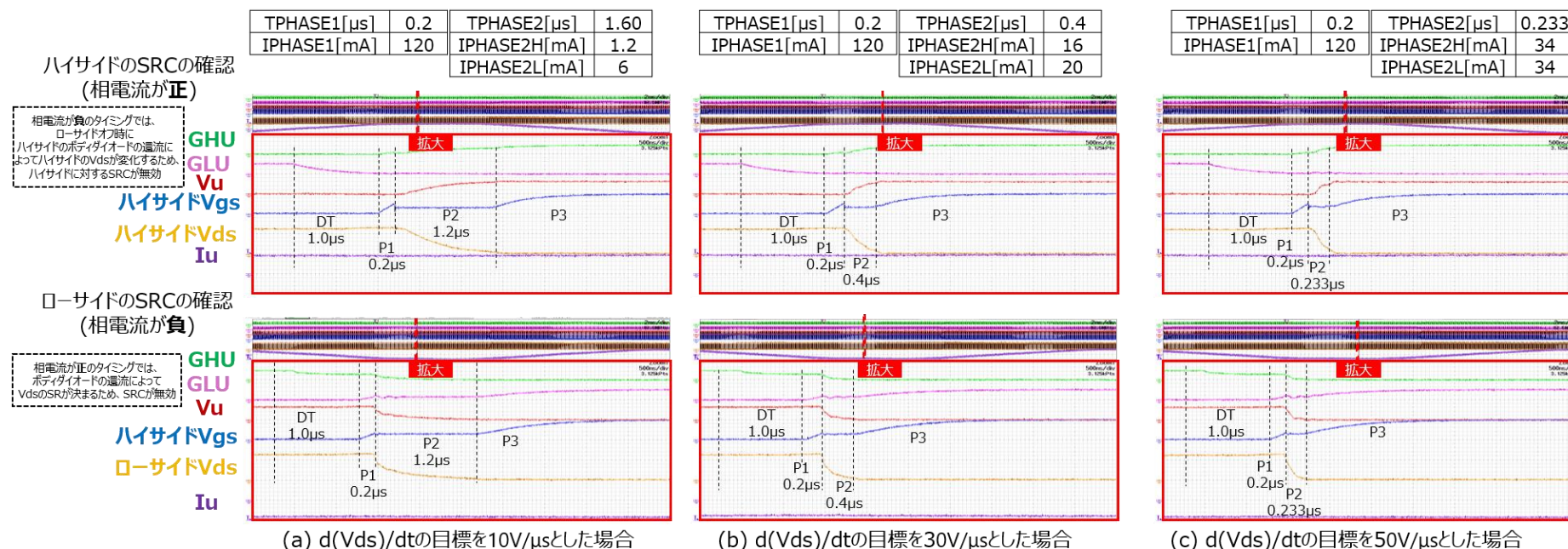


図 4.3 フェーズ 2 のパラメーター調整例

4.4. Q_g が小さい MOSFET の調整の波形例 ($Q_g=39\text{nC}$ (TK65S04N1L))

4.3 節で使用した MOSFET よりも Q_g が小さい MOSFET を用いた調整例を示します。

なお、目標とする $d(V_{ds})/dt$ は 4.3 節と同じ値に設定しています。図 4.4 に調整結果を示します。

注意：本調整例では、ハイサイド MOSFET とローサイド MOSFET の $d(V_{ds})/dt$ を同等にすることを優先しています。そのため、ローサイド MOSFET の V_{ds} は、フェーズ 2 への切り替えタイミング付近から変化し始めています。

デッドタイム : DT

SRC のフェーズ 1 : P1

SRC のフェーズ 2 : P2

SRC のフェーズ 3 : P3

ハイサイドのSRCの確認
(相電流が正)

相電流が負のタイミングでは、
ローサイドオフ時に
ハイサイドのボディダイオードの電流によって
ハイサイドの V_{ds} が変化するため、
ハイサイドに対する SRC が無効

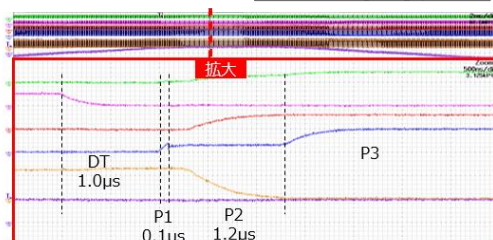
GHU
GLU
Vu
ハイサイド V_{gs}
ハイサイド V_{ds}
Iu

ローサイドのSRCの確認
(相電流が負)

相電流が正のタイミングでは、
ボディダイオードの電流によって
 V_{ds} の SRC が決まるため、SRC が無効

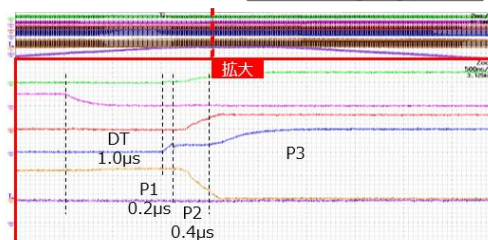
GHU
GLU
Vu
ハイサイド V_{gs}
ローサイド V_{ds}
Iu

TPHASE1[μs]	0.1	TPHASE2[μs]	1.2
IPHASE1[mA]	120	IPHASE2H[mA]	5
		IPHASE2L[mA]	3



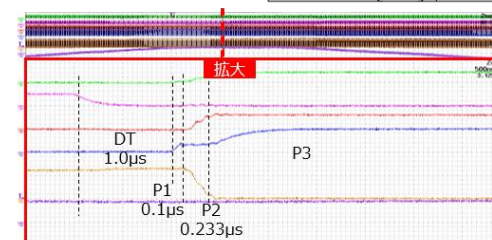
(a) $d(V_{ds})/dt$ の目標を $10\text{V}/\mu\text{s}$ とした場合

TPHASE1[μs]	0.1	TPHASE2[μs]	0.4
IPHASE1[mA]	120	IPHASE2H[mA]	9
		IPHASE2L[mA]	8



(b) $d(V_{ds})/dt$ の目標を $30\text{V}/\mu\text{s}$ とした場合

TPHASE1[μs]	0.1	TPHASE2[μs]	0.233
IPHASE1[mA]	120	IPHASE2H[mA]	14
		IPHASE2L[mA]	13



(c) $d(V_{ds})/dt$ の目標を $50\text{V}/\mu\text{s}$ とした場合

図 4.4 Q_g が小さい MOSFET におけるパラメーター調整例

記載内容の留意点

1. ブロック図
ブロック図内の機能ブロック/回路/定数などは、機能を説明するため、一部省略・簡略化している場合があります。
2. 等価回路
等価回路は、回路を説明するため、一部省略・簡略化している場合があります。

使用上のご注意およびお願い事項

使用上の注意事項

- (1) 絶対最大定格は複数の定格の、どの1つの値も瞬時たりとも超えてはならない規格です。複数の定格のいずれに対しても超えることができません。絶対最大定格を超えると破壊、損傷および劣化の原因となり、破裂・燃焼による傷害を負うことがあります。
- (2) 過電流の発生や IC の故障の場合に大電流が流れ続けないように、適切な電源ヒューズを使用してください。IC は絶対最大定格を超えた使い方、誤った配線、および配線や負荷から誘起される異常パルスノイズなどが原因で破壊することがあり、この結果、IC に大電流が流れ続けることで、発煙・発火に至ることがあります。破壊における大電流の流入出を想定し、影響を最小限にするため、ヒューズの容量や溶断時間、挿入回路位置などの適切な設定が必要となります。

使用上の留意点

- (1) 過電流検出回路
過電流検出回路はどのような場合でも IC を保護するわけではありません。動作後は、速やかに過電流状態を解除するようお願いします。
絶対最大定格を超えた場合など、ご使用方法や状況により、過電流制限回路が正常に動作しなかったり、動作する前に IC が破壊したりすることがあります。また、動作後、長時間過電流が流れ続けた場合、ご使用方法や状況によっては、IC が発熱などにより破壊することがあります。
- (2) 熱遮断回路
熱遮断回路 (通常: サーマルシャットダウン回路) は、どのような場合でも IC を保護するわけではありません。動作後は、速やかに発熱状態を解除するようお願いします。
絶対最大定格を超えて使用した場合など、ご使用法や状況により、熱遮断回路が正常に動作しなかったり、動作する前に IC が破壊したりすることがあります。

製品取り扱い上のお願い

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（生命直結機器）、車載・輸送機器、防衛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、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームから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。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>