

IGBT のデッドタイムの計算と最小化

本書について

適用範囲と目的

このアプリケーションノートは、IGBT の遅延時間を測定し、その測定値に基づいて制御デッドタイムを正確に計算する方法を説明します。

対象者

本書は、さまざまなアプリケーションでインフィニオンのパワーモジュールを使用するすべての技術者を対象とします。

目次

	本書について	1
	目次	1
1	はじめに	2
1.1	IGBT 上下短絡の理由	2
1.2	インバータ動作に対するデッドタイムの影響	2
2	デッドタイムの計算	4
2.1	デッドタイム計算の基本	4
2.2	スイッチングおよび遅延時間の定義	5
2.3	ゲート抵抗/ドライバの出カインピーダンスの影響	6
2.4	遅延時間に対するその他のパラメータの影響	7
2.4.1	ターンオン遅延時間	7
2.4.2	ターンオフ遅延時間	8
2.4.3	計算されたデッドタイムの検証	11
3	デッドタイムの短縮	12
4	結論	14
	参考文献	15
	改訂履歴	16
	免責事項	17

1 はじめに

1 はじめに

現代の産業において、IGBT 搭載の電圧型インバータが頻繁に使用されています。効果的な動作を確保するためには、ブリッジの上下短絡を防止する必要があります。これは損失の増大や熱暴走の原因にもなり、結果として IGBT デバイスが故障し、インバータ全体の故障につながる恐れがあるためです。

1.1 IGBT 上下短絡の理由

図 1 に、IGBT による三相インバータセットアップの一般的な構成を示します。通常の動作では 2 つの IGBT のオンとオフが選択的に切り替わります。2 つのデバイスが同時に導通すると、主に DC リンクの浮遊インダクタンスによって制限された電流の上昇が起こります。

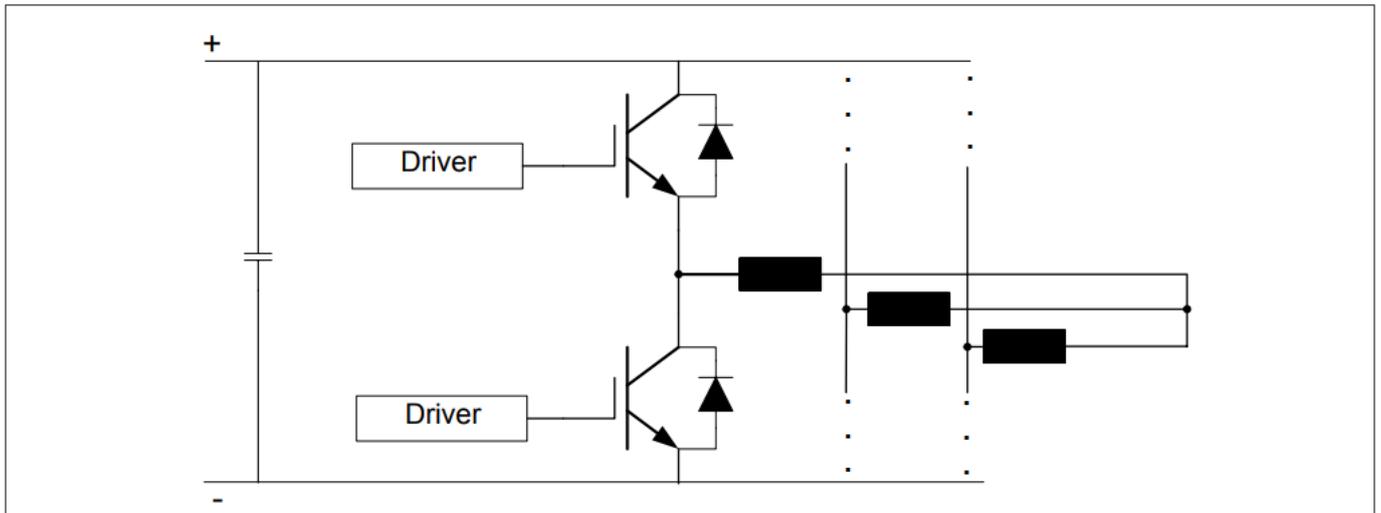


図 1 電圧型インバータの一般的な構成

意図的に 2 つの IGBT を同時にオンにすることはなくても、IGBT は「理想的な」スイッチではないため、オンにするとオフにするときは、厳密には一致しません。ブリッジの短絡電流の発生を防ぐために、いわゆる「インターロック遅延時間」や、より一般的な「デッドタイム」を制御方式に加えることが推奨されます。このように追加の時間を設けることで、2 つの IGBT のうち一方の IGBT が必ず先にオフとなり、デッドタイムが経過した後でももう一方の IGBT がオンになるため、IGBT のオンオフ時間が非対称となることに起因するブリッジの上下短絡が防止されます。

1.2 インバータ動作に対するデッドタイムの影響

デッドタイムには一般的に、制御デッドタイムと有効デッドタイムの 2 種類があります。制御デッドタイムとは、デバイス上で望ましい有効デッドタイムを実現するために、制御アルゴリズムに実装された時間を指します。制御デッドタイムを設定する目的は、有効デッドタイムをプラスの値にするためです。制御デッドタイムはワーストケース分析に基づいて計算されるため、制御デッドタイムのかなりの部分を有効デッドタイムが占めます。

デッドタイムを設けることによってブリッジの上下短絡を防げますが、弊害もあります。デッドタイムの影響を説明するために、図 2 に示すよう、電圧型インバータの分岐について考えてみましょう。まず出力電流が図示されている方向に流れると想定した場合、IGBT T1 はオンからオフに切り替わり、IGBT T2 は短いデッドタイムを経てオフからオンに切り替わります。有効デッドタイムの間、両方のデバイスがオフとなり、フリーホイールダイオード D2 が出力電流を伝導します。ここでは、出力に負の DC リンク電圧をかけるのが望ましい状態です。次に、T1 がオフからオンに切り替わり、T2 がオンからオフに切り替わる場合を考えてみましょう。出力電流は同じ方向に流れているため、D2 はデッドタイムの間も電流を伝導し続けます。そのため出力電圧も負の DC リンク電圧となり、ここでは望ましくない状態となります。まとめると、有効デッドタイム中は、出力電圧が制御信号ではなく出力電流の方向によって決定されます。

1 はじめに

出力電流が図 2 と逆方向に流れると考えると、T1 がオンからオフに切り替わり、T2 がオフからオンに切り替わる時に電圧が得られます。一般的に、デッドタイムを設けると、出力電圧やその結果得られる出力電流に歪みが生じます。誘導モーターの場合、不必要に長いデッドタイムを選択すると、システムが不安定になり、重大な影響が及ぶ恐れがあります [1]。このため、デッドタイムを選択するプロセスは省略不可であり、慎重に実行する必要があります。

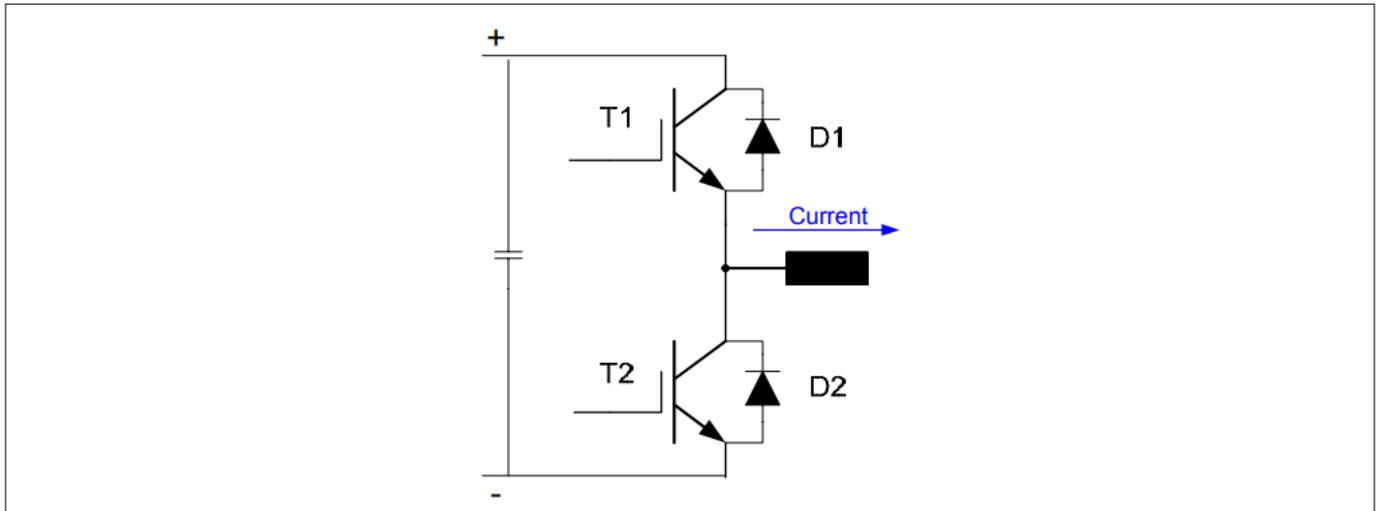


図 2 電圧型インバータの一相

2 デッドタイムの計算

2 デッドタイムの計算

前述のように、ブリッジの上下短絡を防ぐためにデッドタイムを選択しなければならない一方で、電圧型インバータの正常な動作を確保するためには、それをできるだけ短時間とする必要があります。したがって、専用の IGBT デバイスならびにドライバに対して正確なデッドタイムを計算することが課題です。

2.1 デッドタイム計算の基本

制御デッドタイムを計算するには、以下の等式を使用します。

$$t_{\text{dead}} = [(t_{d_off_max} - t_{d_on_min}) + (t_{pdd_max} - t_{pdd_min})] \times 1.2 \quad (1)$$

上記式の内容を示します。

- $t_{d_off_max}$: 最大ターンオフ遅延時間
- $t_{d_on_min}$: 最小ターンオン遅延時間
- t_{pdd_max} : ドライバの最大伝搬遅延
- t_{pdd_min} : ドライバの最小伝搬遅延
- 1.2: 乗算する安全マージン値

この等式では、初項 $t_{d_off_max} - t_{d_on_min}$ が最大ターンオフ遅延時間と最小ターンオン遅延時間の差です。これは、ゲートドライバとゲート抵抗回路で制御される IGBT デバイスの特性を説明しています。立ち下り時間と立ち上り時間は、通常、遅延時間よりもかなり短いため、ここでは考慮しません。第 2 項 $t_{pdd_max} - t_{pdd_min}$ は、ドライバによって決まる伝搬遅延の差 (遅延時間の不一致) です。このパラメータは通常、ドライバメーカーによるドライバのデータシートに記載されています。

場合によっては、一般的なデータシートの値に現場での経験から得られた安全係数を乗じるだけでデッドタイムを計算することがあります。この方法が有効なケースもありますが、一般的には精度が不十分です。ここで紹介する測定は、より精度の高いアプローチを目的としています。

IGBT のデータシートには標準的な動作条件での代表値のみが記載されているため、実際の動作条件での最大値を求める必要があります。そのために、一連の測定を実行して正しい遅延時間値を求め、デッドタイムを計算します。

2 デッドタイムの計算

2.2 スイッチングおよび遅延時間の定義

スイッチング時間と遅延時間については、以降の章でより詳しく説明しますが、まずこれらの用語を明確に定義しておくことが重要です。IGBT のスイッチング時間は次のように定義されます。

$t_{d(on)}$: V_{GE} の 10% から I_C の 90% までの時間

t_r : I_C の 10% から I_C の 90% までの時間

$t_{d(off)}$: V_{GE} の 90% から I_C の 90% までの時間

t_f : I_C の 90% から I_C の 10% までの時間

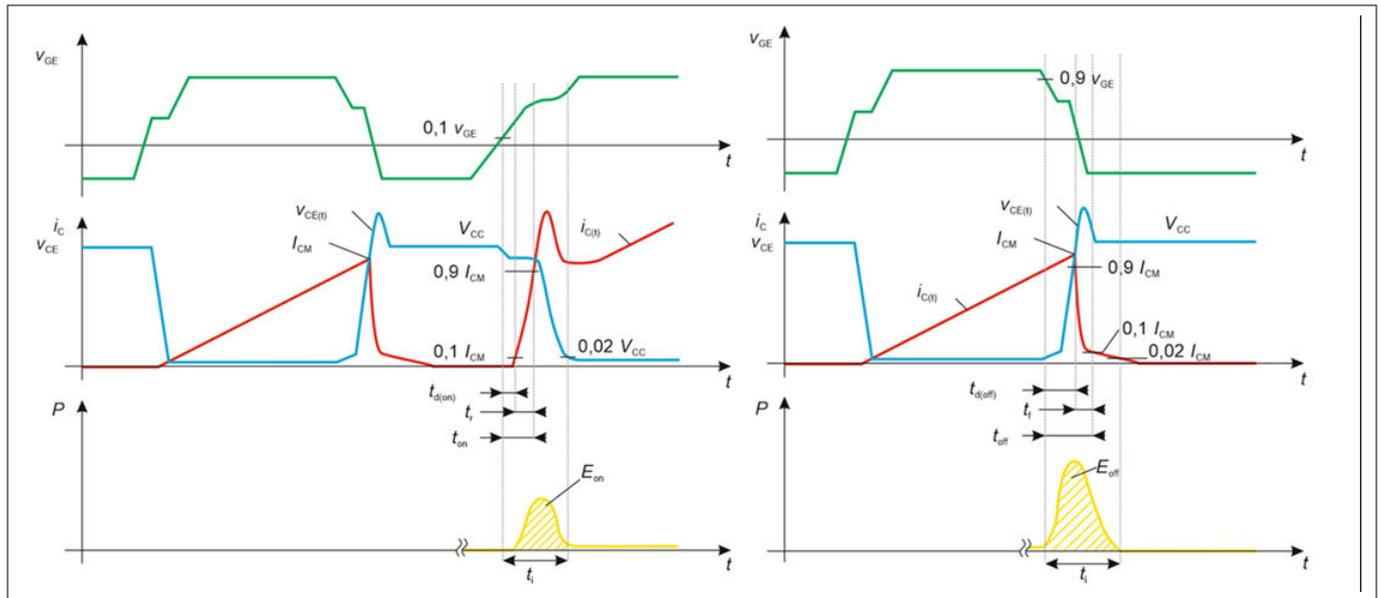


図 3 スイッチング時間の定義

2 デッドタイムの計算

2.3 ゲート抵抗/ドライバの出カインピーダンスの影響

ゲート抵抗の選択は、スイッチング遅延時間に大きな影響をおよぼします。一般的に抵抗値が大きくなればなるほど、遅延時間が長くなります。このアプリケーションでは、専用のゲート抵抗を用いて遅延時間を測定することが推奨されます。図 4 および図 5 は、スイッチング時間とゲート抵抗の関係を示す一般的なグラフです。

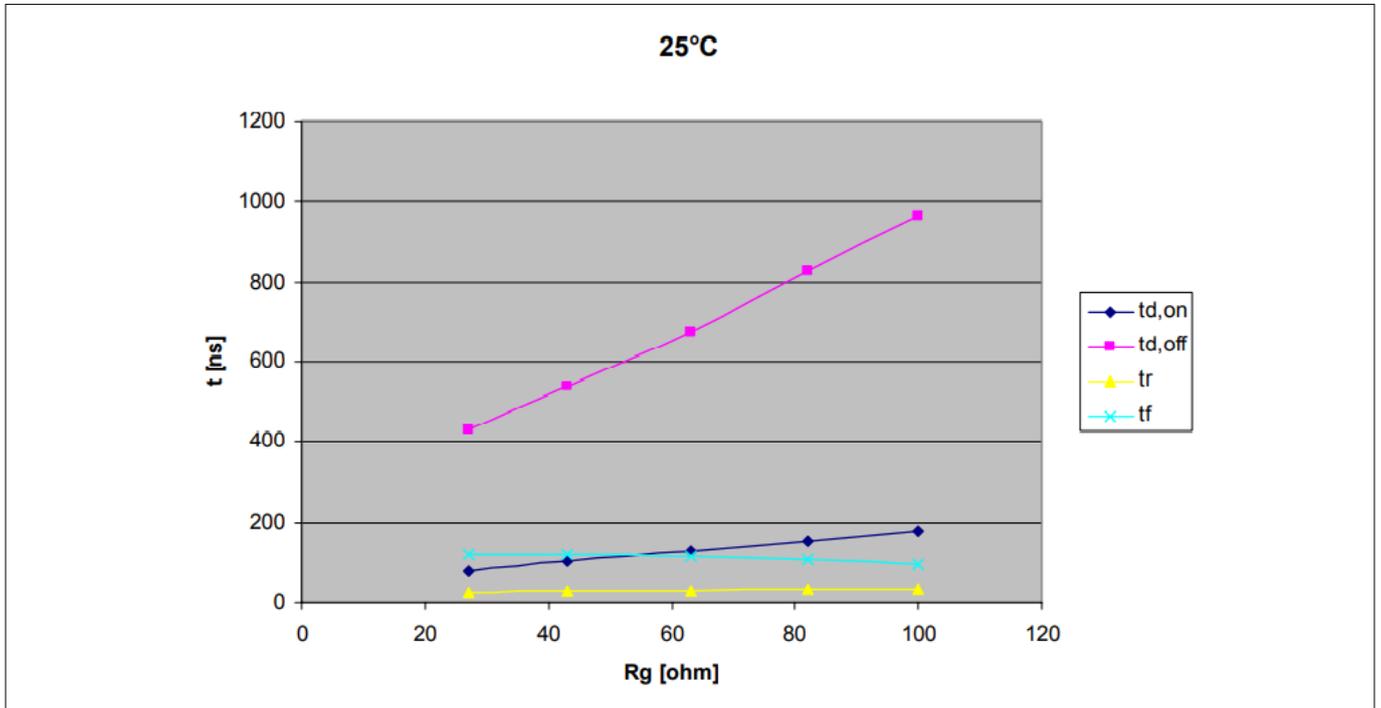


図 4 スwitching時間と R_g (25°C)

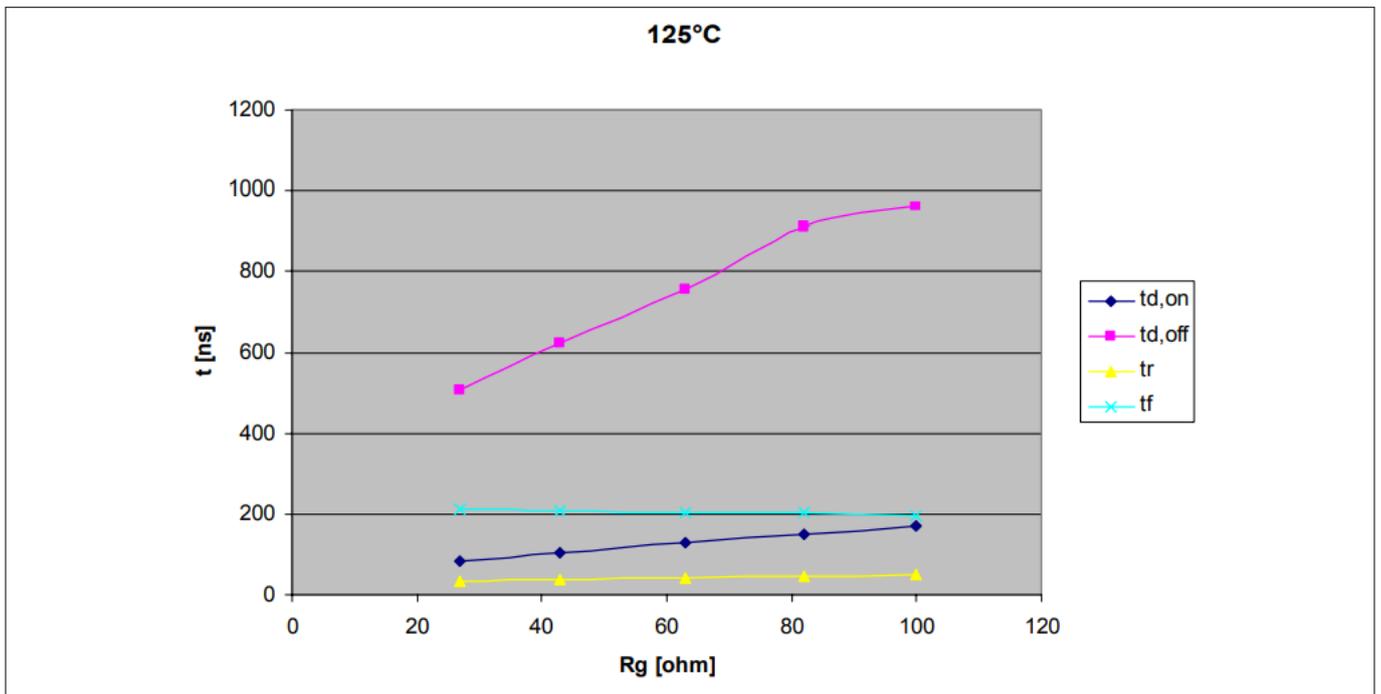


図 5 スwitching時間と R_g (125°C)

注: すべてのテストは、FP40R12KT3 モジュールを用い、ゲート電圧を-15 V/+15 V、DC リンク電圧を 600 V、スイッチング電流を定格電流 40 A として実行しました。

2 デッドタイムの計算

2.4 遅延時間に対するその他のパラメータの影響

遅延時間には、ゲート抵抗の値以外に以下のパラメータが大きな影響を与えます。

- コレクタ電流
- ゲートドライバの供給電圧

2.4.1 ターンオン遅延時間

一連の測定を実行し、遅延時間と電流の関係を評価します。まず、ターンオン遅延時間と電流の依存性について調べます。図 6 に結果を示します。

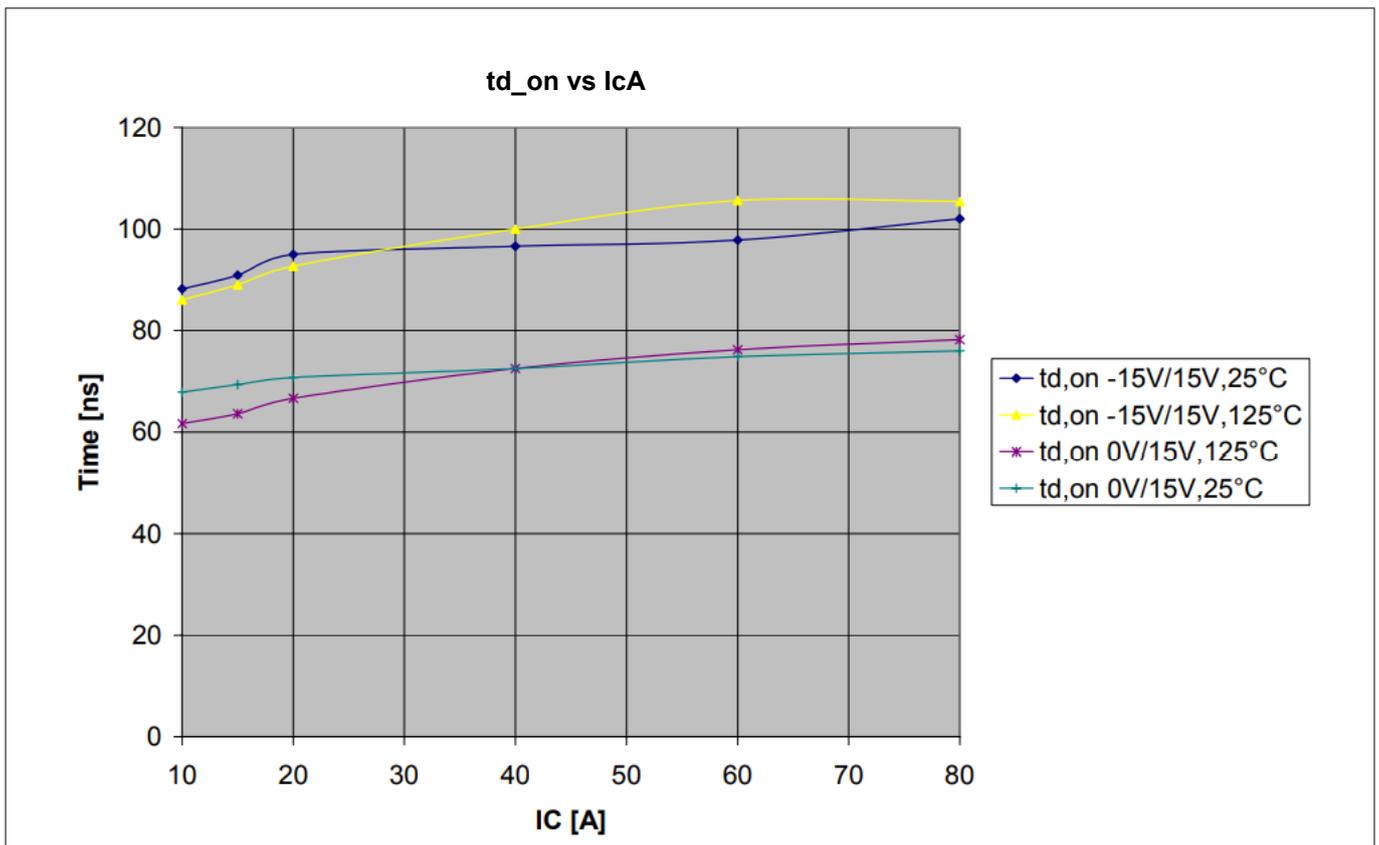


図 6 ターンオン遅延時間とスイッチング電流 I_c

注: すべてのテストは、FP40R12KT3 モジュールを用い、DC リンク電圧を 600 V として実行しました。ゲート抵抗は、データシートの値に基づいて選択しました。

上記の結果では、ターンオン遅延時間がコレクタ電流 I_c の変化に対して、ほぼ一定であることに注意してください。ゲート電圧が -15 V/+15 V の場合、ゲート電圧が 0 V/+15 V の場合に比べて、ターンオン遅延が長くなります [2]。この変化はごくわずかであり、さらなる制御デッドタイムの計算の追加マージンを提供します。

2 デッドタイムの計算

2.4.2 ターンオフ遅延時間

デッドタイムの計算で最も重要な因数は、最大ターンオフ遅延時間です。最終的に計算されるデッドタイム全体の長さは、この値によって決まります。この遅延時間の調査について、以下に詳述します。

最大ターンオフ遅延時間は、以下の条件を考慮する必要があります。

手順

1. IGBT デバイスそのものに起因するターンオン遅延時間はどのくらいか？
このテストは、実験室の特性測定用ドライバボードに基づいて実行しました。特性測定用ドライバボードは最適なドライバと考えることができるため、遅延の原因とはなりません(ほぼオーバーサイズのドライバ用)。したがって、全体の遅延時間は IGBT デバイスそのものに起因します。図 7 に、テストセットアップのブロック図を示します。

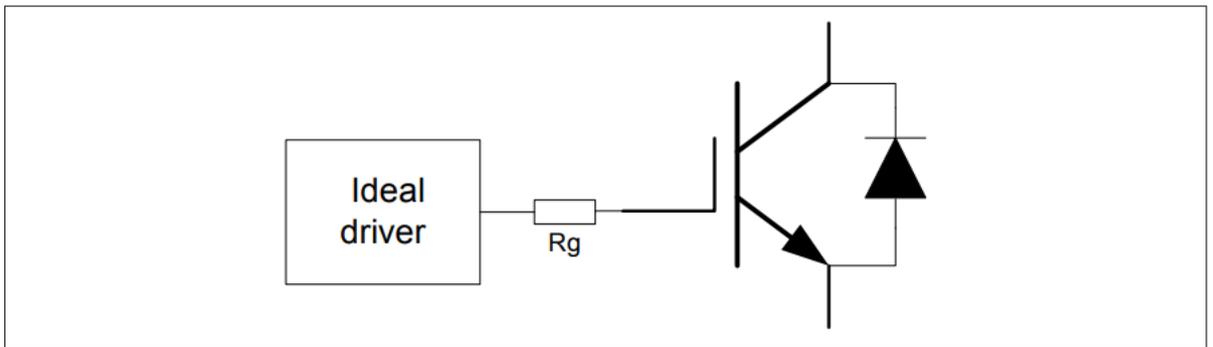


図 7 理想的なドライバによるテストのブロック図

2. IGBT のしきい値電圧がデータシートに記載されている最小値のときの最大ターンオフ遅延時間はどのくらいか？(これにはモジュール間の V_{th} の許容誤差が反映されます。)
追加のダイオードを接続して V_{th} 電圧降下をシミュレートします。ダイオードの電圧降下は約 0.7~0.8V であり、これは FP40R12KT3 モジュールの V_{th} ばらつきと非常に類似しています。図 8 に、原則的なテストセットアップのブロック図を示します。

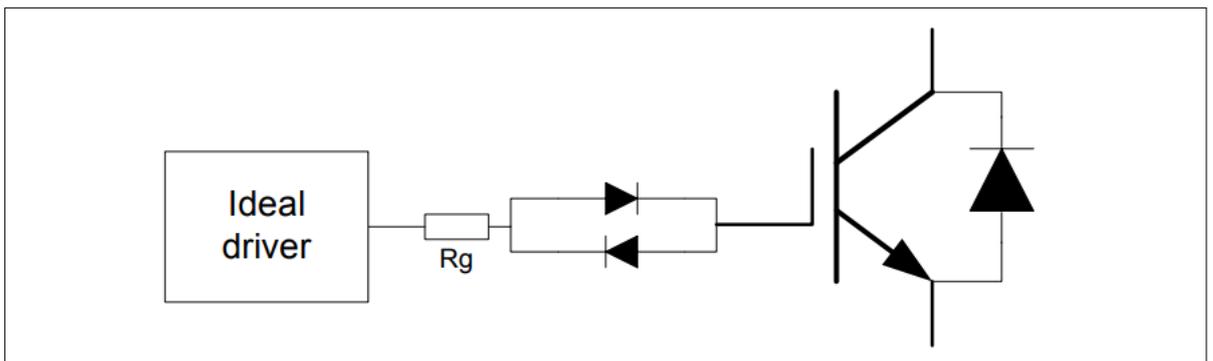


図 8 V_{th} ばらつきをシミュレートするワーストケーステストのブロック図

3. ドライバの出力段がスイッチング時間にどのように影響しているか？
市販のドライバは、MOSFET トランジスタ出力段とバイポーラトランジスタ出力段の 2 つのカテゴリに分類されます。それぞれのカテゴリで別個の測定が行われます。MOSFET 出力段のドライバをシミュレートするために、追加の抵抗を接続します。この抵抗は MOSFET トランジスタのオン抵抗 $R_{ds(on)}$ とみなされます。 V_{th} の変化をシミュレートするためのダイオードはそのままです。図 9 に、原則的なテストセットアップのブロック図を示します。

2 デッドタイムの計算

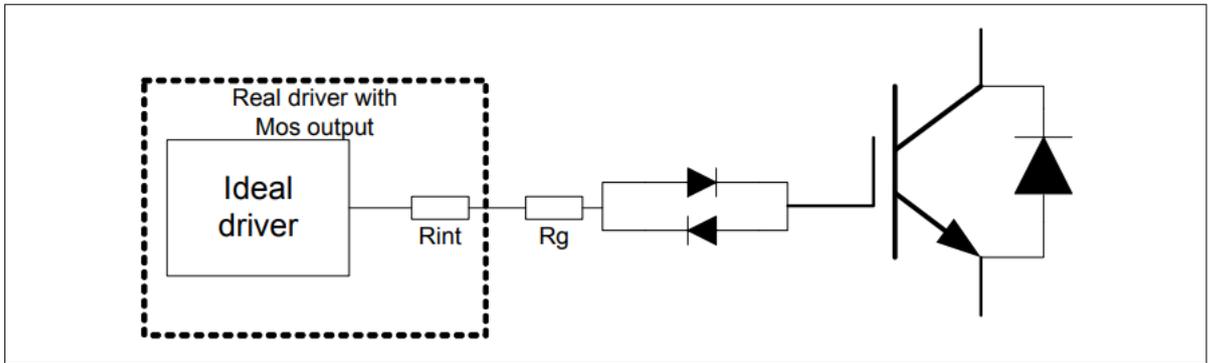


図 9 Vth ばらつきと MOSFET 出力のドライバをシミュレートするテストのブロック図

4. バイポーラトランジスタ出力段のドライバの影響はどのようなものか？
出力段でのバイポーラトランジスタ全体の電圧降下をシミュレートするために、追加のダイオードを接続します。図 10 に、原則的なテストセットアップのブロック図を示します。

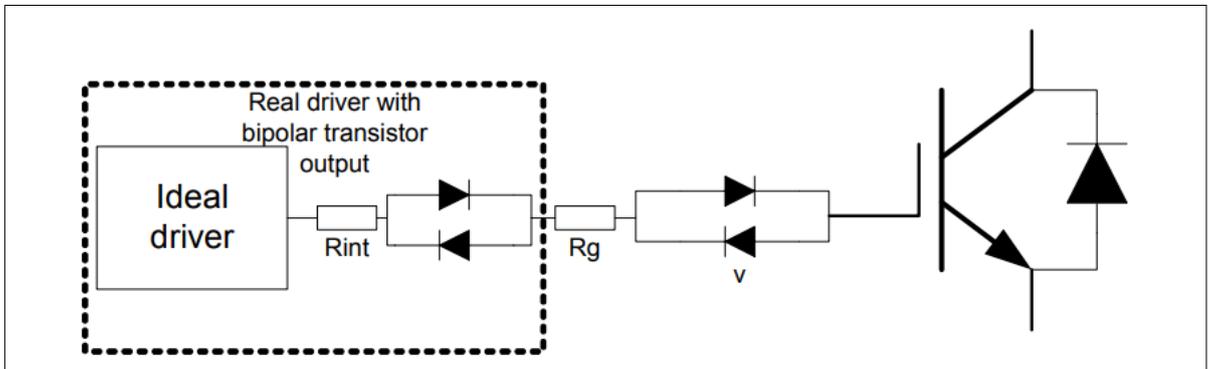


図 10 Vth ばらつきとバイポーラトランジスタ出力のドライバをシミュレートするテストのブロック図

以上の構成により、FP40R12KT3 モジュールと最適と考えられるドライバボードを使用し、当社実験室でターンオフ遅延時間を測定しました。テスト条件は次のとおりです: $V_{dc} = 600\text{ V}$ および $R_g = 27$ 。図 11 および図 12 に結果を示します。

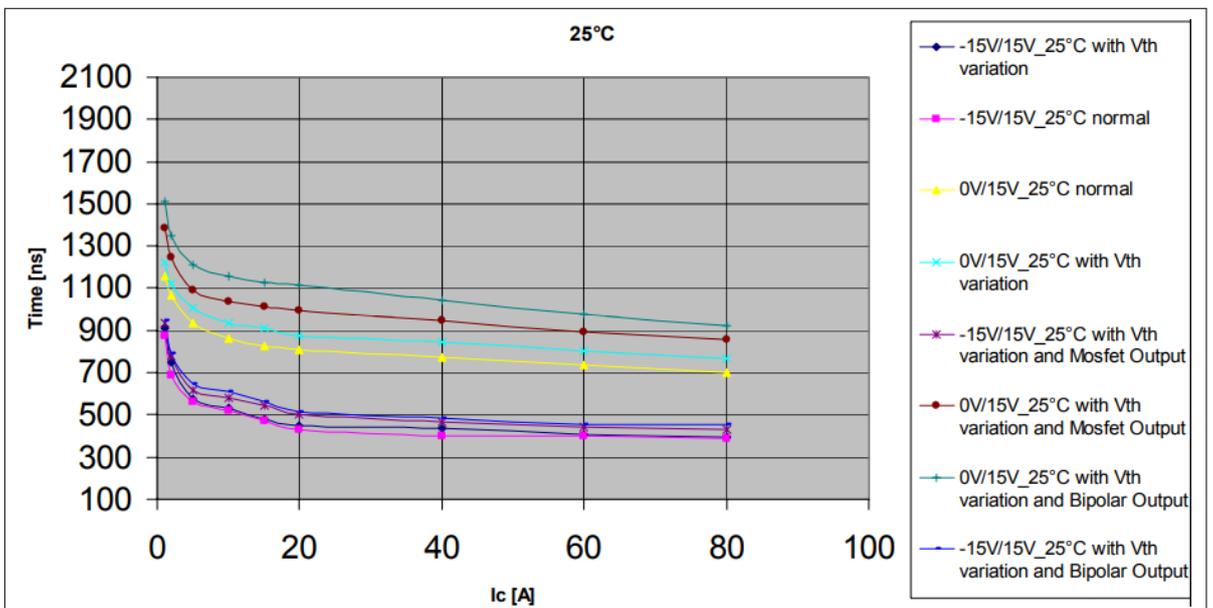


図 11 ターンオフ遅延時間と I_c (25°C)

2 デッドタイムの計算

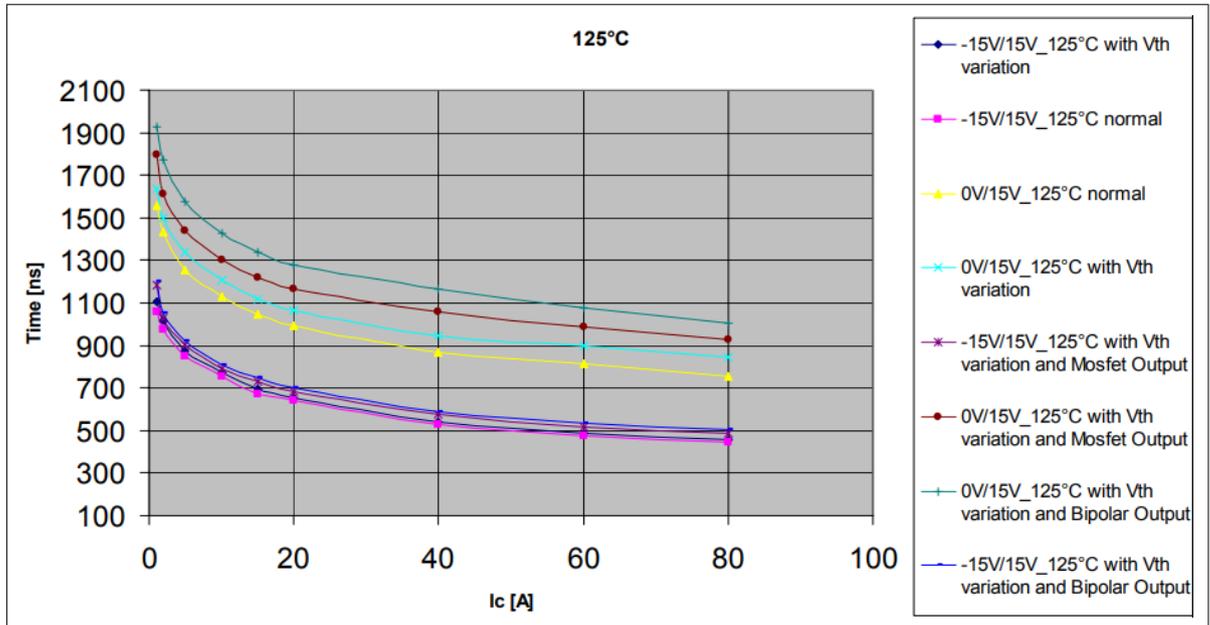


図 12 ターンオフ遅延時間と I_C (125°C)

この結果、スイッチ電流 I_C の減少に伴い、ターンオフ遅延時間が大幅に増加することが分かります。選択したゲート抵抗に依存する単純なデッドタイムの計算では、精度が不十分です。これらの値に基づいてデッドタイムを計算するよりも、実際の稼働条件で遅延時間を測定する方が、より適切かつ正確です。必要なデッドタイムを計算するために十分な概要を提供するためには、定格電流の 1%まで測定すれば十分です。

また、0 V/+15 V のゲートドライバではターンオフ遅延時間が長くなり、0 V/+15 V のスイッチングでは出力段がスイッチング時間におよぼす影響が大きくなるという点も考慮します。つまり、スイッチング電圧が 0 V/+15 V の場合、ドライバの選択には特に注意すべきということです。また、スイッチング時のコレクタ電流 I_C が低い場合に t_{d_off} が大きくなることも考慮する必要があります。

例

スイッチオフに関し、MOSFET 出力段を備えた HCPL-3120 ドライバ IC を例にとって考えてみましょう。上記の数値より、0 V/+15 V のスイッチング条件の t_{d_off} の値は約 1500 ns です。この場合、 t_{d_on} は約 100 ns です。データシートに従い、このドライバ IC の $t_{pdd_max} - t_{pdd_min}$ は 700 ns となります。これらの値を等式 (1) に代入すると、デッドタイムは約 2.5 μ s です。

2 デッドタイムの計算

2.4.3 計算されたデッドタイムの検証

第 2.4 章に記載されている測定と第 2.1 章の等式 (1) に基づき、必要なデッドタイムを計算できます。このように計算されたデッドタイムを使用してワーストケースの測定を実行し、選択したデッドタイムが十分かどうかを検証できます。

測定結果を見ると、ターンオフ遅延時間は温度とともに長くなっていることが分かります。つまり、低温と高温の両方の条件下で実行することが望ましいテストです。図 13 に、テストの配線図を示します。

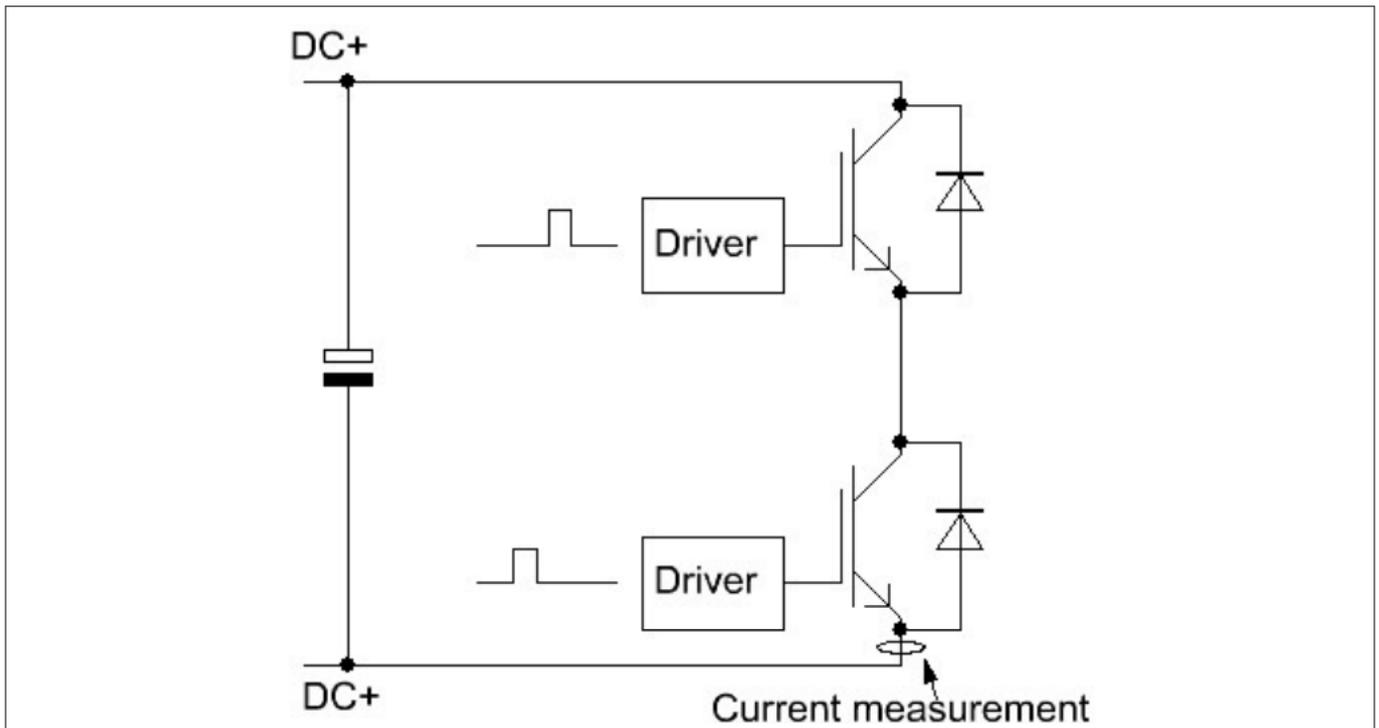


図 13 計算されたデッドタイム値を検証するためのテストの配線図

下側の IGBT をオン/オフした後、上側の IGBT を同じ手順でオン/オフする必要があります。2 つのパルス間の時間は、専用の駆動条件で計算されたデッドタイムの値に合わせて調整する必要があります。これにより負の DC リンク電流を測定できます。結果としてデッドタイムが十分であれば、短絡電流は観測されません。

ここに示すテストは、両方の IGBT に電流が流れていないため、デッドタイム計算にはワーストケースの条件です。ターンオフ遅延時間に関する記載から、コレクタ電流の減少に伴いデッドタイムが増加することが分かります。したがって、電流が流れていない状態でのターンオフ遅延時間を最大にする必要がありますが、それには最大限のデッドタイムが必要です。コレクタ電流がゼロのときに短絡電流がなければ、選択されたデッドタイムは、専用の駆動条件として十分ということです。

3 デッドタイムの短縮

3 デッドタイムの短縮

制御デッドタイムを正確に計算するには、以下の稼働条件を考慮する必要があります。

- IGBT にかけているゲート電圧は何 V か？
- 選択したゲート抵抗の値は何 Ω か？
- ドライバの出力段はどのタイプか？

これらの条件に基づき、テストを実行し、そのテスト結果から等式 (1) を用いて制御デッドタイムを計算します。デッドタイムはインバータの性能に影響するため、最小限に抑える必要があります。それには複数の方法がありますが、そのうちのいくつかを以下に紹介します。

- IGBT のゲート電流のピーク値を下げる、またはそれを発生させるのに十分なパワーを持つドライバを選択する
- 負の電源を使用してターンオフを加速させる
- 従来のオプトカプラ技術に基づくドライバよりも、コアレストランス技術などの高速信号伝送技術を用いたドライバを選ぶ
- 以下に示すように、0 V/15 V のゲートドライバに別個の R_{gon}/R_{goff} 抵抗を使用する

第 2.3 章に示す測定より、 $T_{d,off}$ ならびにゲート抵抗の値に対する非常に強い依存性が観測されます。 R_{goff} が減少すると、 $t_{d,off}$ とデッドタイムの両方が減少します。0 V/15 V のゲート電圧を使用する場合は、 R_{goff} の値を R_{gon} の値の 3 分の 1 にまで減らすことが推奨されます。図 14 に、別々の R_{gon} と R_{goff} の値に関して考えられる回路を示します。

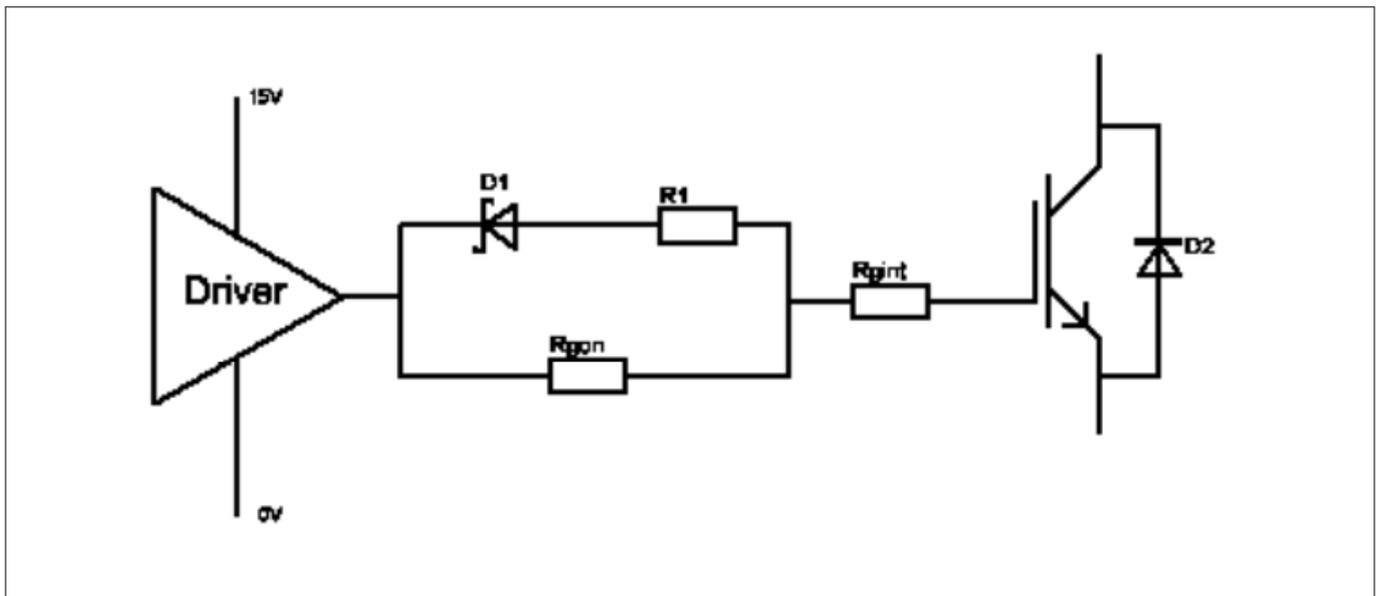


図 14 0 V/15 V のゲート電圧での回路案

以下の関係を満たすために、抵抗 R_1 を選択:

$$\frac{R_1 \cdot R_{gon}}{R_1 + R_{gon}} + R_{gint} = \frac{1}{3} \cdot (R_{gon} + R_{gint}) \tag{2}$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{1}{2} \cdot R_{gon} \cdot \frac{R_{gon} - 2R_{gint}}{R_{gon} + R_{gint}} \tag{3}$$

3 デッドタイムの短縮

等式 (3) より、 R_1 の正の値を求めるには $R_{gon} > 2R_{gint}$ という条件を満たす必要があります。ただし、一部この要件を満たさないモジュールもあるため、その場合は R_1 を完全に省略できます。

重要: *ダイオードはショットキーダイオードとしてください。*

また、ゲート電圧が 0 V/15 V の場合、寄生ターンオン効果も大きな問題です。この問題も、この回路案を使用することで解消できます。

注: *寄生ターンオン効果に関する詳細については、AN2006-01 [2] を参照してください。*

4 結論

4 結論

本書では、IGBT のスイッチング時間を測定し、制御デッドタイムを計算するためのアプローチを紹介しました。また、ゲート抵抗値に対するスイッチング時間の依存性、ゲートドライバとコレクタ電流がスイッチング時間に及ぼす影響、ならびにデッドタイムを短縮するために考えられる方法についても説明しました。

参考文献

参考文献

- [1] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo: *Pulse width modulation for power converters: principles and practice* (電源コンバータのためのパルス幅変調: 原理と実践)、IEEE Press、2003 年。ISBN 0-471-20814-0
- [2] Infineon Technologies AG : *Driving IGBTs with unipolar gate voltage* (ユニポーラゲート電圧による IGBT の駆動)、http://www.infineon.com/dgdl/an-2006-01_Driving_IGBTs_with_unipolar_gate_voltage.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b40ed1711291

改訂履歴

改訂履歴

版数	発行日	変更内容
V1.0	2007 年 4 月	本版は英語版のみの発行です。
V1.10	2021 年 12 月	このドキュメントは AN2007-04 Calculate and minimize the dead time for IGBTs, V1.10 の翻訳版です。

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2022-02-17

Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2022 Infineon Technologies AG
All Rights Reserved.

Do you have a question about any aspect of this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference
IFX-rje1635282217771

重要事項

本手引書に記載された情報は、本製品の使用に関する手引きとして提供されるものであり、いかなる場合も、本製品における特定の機能性能や品質について保証するものではありません。本製品の使用の前に、当該手引書の受領者は実際の使用環境の下であらゆる本製品の機能及びその他本手引書に記された一切の技術的情報について確認する義務が有ります。インフィニオンテクノロジーズはここに当該手引書内で記される情報につき、第三者の知的 所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。

インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。