

Application Note AN-7006

Revision:	00
Issue Date:	2008-03-17
Prepared by:	Joachim Lamp

Key Words: IGBT module, snubber capacitor, peak voltage

IGBT のピーク電圧の測定とスナバコンデンサの仕様

概要.....	1
コンデンサパラメーター	2
DC 電圧クラス.....	2
容量と直列インダクタンス	2
パルスの取扱い	3
実効電圧と実効電流	3
寿命.....	3
測定と検証.....	3
IGBT の電圧ストレス (V_{CEpeak}).....	3
コンデンサの実効電流測定	5
動作における温度及び自己発熱.....	7
使用されている記号と用語	8

このアプリケーションノートは、大電力用途向け IGBT 用のスナバコンデンサの選択と試験、及び効果の試験方法について記述しています。電氣的又は熱的オーバーストレスによる、IGBT モジュール及びスナバコンデ

ンサの破壊の防止に役立ちます。又、考慮すべきコンデンサのパラメータ、及び必要な試験方法に関するヒントがあります。

概要

大電流を高速でスイッチオフするとオーバーシュート電圧が発生し、パワー半導体が破壊します。オーバーシュート電圧は、電流経路(例: DCリンク接続)の磁界に蓄積したエネルギーによって生じます。これは寄生インダクタンスや浮遊インダクタンス L_S ($E=0.5 \cdot L_S \cdot i^2$) に関連します。電圧 ($V=L_S \cdot di/dt$) は DCリンク電圧に足されるので、パワー半導体の最大阻止電圧 (V_{CES} 、 V_{RRM}) を超える可能性があります。

対策は、まず第一に低誘導の DC リンクを設計して半導体の電圧を低く維持する事です。これは、ラミネート加工したバスバーシステム (+DC、-DC の金属シート間に絶縁層をサンドイッチ) の使用、及び電圧源 (DC リンクコンデンサー) とパワー半導体間の短い接続によって達成されます。さらに、各 IGBT モジュールの DC リンク端子に直接スナバコンデンサを組付けて下さい。このスナバは低域フィルターとして働き、オーバーシュ

ート電圧を吸収します。Fig. 1 に標準的な構造を示します。Fig. 2 に IGBT のターンオフ時における、スナバコンデンサ有無の電圧波形の比較を示します。スパイク電圧の低減効果は明らかです。Fig. 3 に寄生インダクタンスの等価回路を示します。

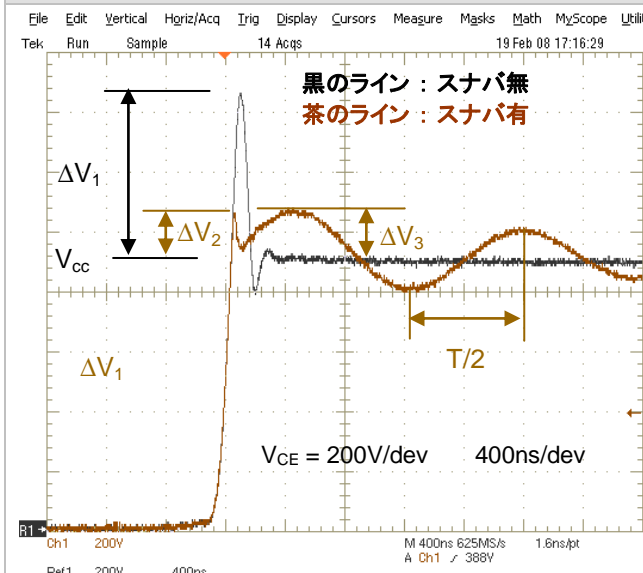
Fig. 1 IGBT モジュールに組付ける低インダクタンススナバコンデンサ



スナバコンデンサが必要かどうかを判断するには、いかなる動作条件下においても V_{CES} を超えない様に、最悪の条件下の IGBT の最大コレクタ・エミッタ間電圧 (V_{CEpeak}) を確認する必要があります。アプリケーションに適切なスナバコンデンサを選択する場合、必要に応じていくつかの側面で検討する必要があります。

1. コンデンサの DC 電圧クラス
2. 容量と直列インダクタンス
3. パルス耐量
4. 実効電圧と実効電流
5. 寿命

Fig. 2 IGBT スイッチオフ時の標準 V_{CE} 波形



$$\Delta V_1 = \Sigma L \cdot di_c / dt$$

$$\Delta V_2 = (L_C + L_E + L_{Snubber}) \cdot di_c / dt$$

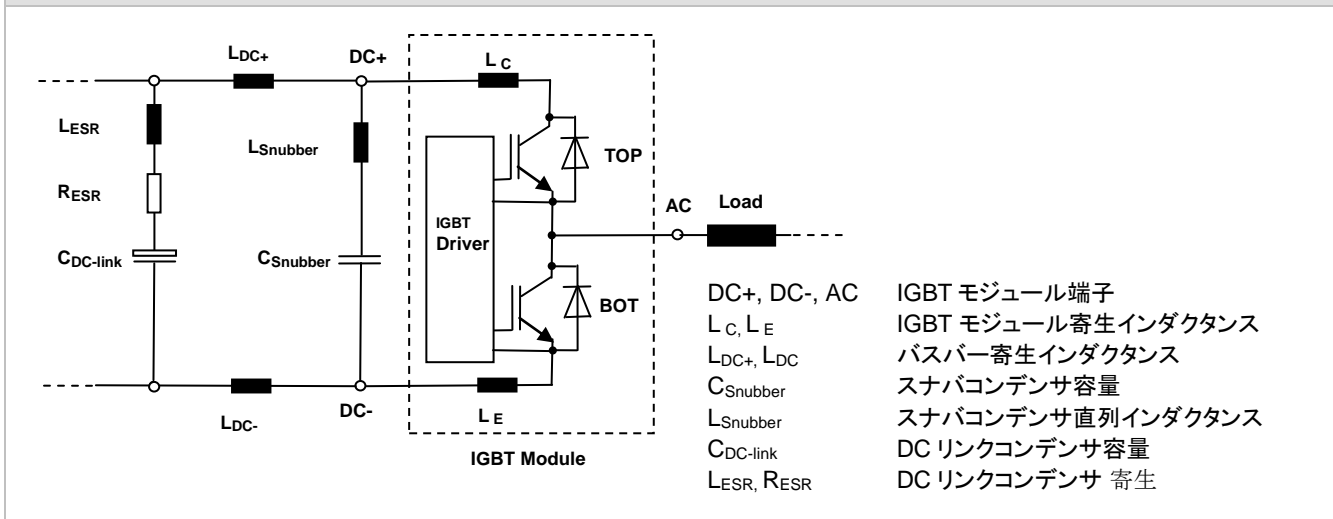
$$\Delta V_3 \leq \sqrt{\frac{L_{DC-Link} \cdot i_c^2}{C_{Snubber}}}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{DC-Link} \cdot C_{Snubber}}}$$

$$\Sigma L = L_C + L_E + L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

$$L_{DC-Link} = L_{DC+} + L_{DC-} + L_{ESR}$$

Fig. 3 DC リンク及びスナバコンデンサに接続された IGBT モジュールの等価回路



コンデンサパラメーター

DC 電圧クラス

最大連続印加 DC 電圧はデータシートの定格 DC 電圧で、平均寿命まで使用可能です。阻止電圧 1200V の半導体は DC リンク電圧 900V まで使用されます。このアプリケーションでは定格電圧 1000V のコンデンサを推奨します。1700V の半導体には、DC リンク電圧により 1250V 又は 1600V のコンデンサを推奨します。

プラスチックフィルムが損傷する為、ピーク電圧も許容値以内でなければなりません。許容ピーク電圧はデータシートに記載されていますが、ない場合は問合せが必要です。又、印加 DC 電圧はコンデンサが定格温度以上の高温で動作する場合、デレーティングが必要です。

容量と直列インダクタンス

容量はスイッチオフ時のスパイク電圧が十分に抑制される様に、十分大きくなければなりません。このコンデンサの標準的な値は0.1 μ F～1.0 μ Fです。

容量のみではなく、コンデンサの低インダクタンス構造も重要です。コンデンサの端子と内部接続間のループによって生じる残留インダクタンスは、Fig. 2 の最初のスパイク電圧 V_2 の要因です。容量が大で自己インダクタンスが残存していると、低スパイク電圧は保証されません。

低自己インダクタンスは、IGBTモジュールの端子に直接ネジ止めする幅広の平らな端子を有するコンデンサの使用により、実現出来ます。コンデンサは端子が可能な限り小さい領域を囲む様な、又、内部配線がないコンデンサのコイルに直接接続される様な構造にしなければなりません(Fig. 1参照)。

正しいスナバは測定によって決定されなければなりません。又、金属化ポリプロピレンフィルムコンデンサは、UL94V-0 に準じたプラスチックケースの製品が使用されなければなりません。

パルスの取扱い

コンデンサ内部の配線が、各スイッチング時に耐えられるエネルギーの量は限られています。メーカーのデータシートでは、パルス動作の制限を i^2t 又は v^2t の値で規定しています。この値はコンデンサの振動電流又は電圧波形から、計算する事が出来ます。この計算はモデムデジタルオシロスコープを使用して簡単に実行出来ます。

コンデンサは印加電圧が規定値より低くても、ピーク電流が非常に高いというだけで破壊する可能性があります。この場合、印加されたエネルギーが重要で、通常、金属溶射と金属化フィルム間の接続による損失が生じます。エネルギーが非常に高い為、金属化フィルムは金属溶射との接続面で蒸発します。これは、コンデンサの高い損失係数又は容量損失にさえ繋がります。

dv/dt の最大値は減衰正弦波形の為、あまり重要ではありません。

実効電圧と実効電流

減衰振動はスナバコンデンサとバスバー容量間で、各スイッチング時に発生します(オン又はオフ:IGBT のスイッチング周波数の 2 倍)。非減衰振動及び周波数に対する最大の大きさ、 V_3 は Fig. 2 に示す式を使用して計算出来ます。この実効電流はコンデンサの自己発熱に繋がります。コンデンサは周囲温度及び組付け条件(例:モジュール主端子の温度)に依存するある温度で安定します。

データシートに、周波数に依存する許容実効電流及び実効電圧が記載されています。振動周波数は DC リンクの浮遊インダクタンス及びスナバコンデンサの値に依存します。標準値は 100kHz～1MHz の範囲です。許容実効電流は周波数が上がると損失が増加する為、減少します。コンデンサの電流を実測する際のヒントが、

「コンデンサの実効電流の測定」に記載されているので参照して下さい。

寿命

コンデンサの寿命及び故障率は、主に動作温度及び動作電圧の影響を受けます。故障基準はユーザーにより異なります。データシート、及び寿命と故障率データに関するアプリケーションノートを確認して下さい。

自己回復

フィルムコンデンサの最も重要な信頼性の特長は、誘電体の欠陥を除去する自己回復特性です。以後、コンデンサは制限なく使用可能です。この欠陥は誘電体のブレークダウン電界強度が、フォイルの弱い部分で越えた時に生じます。

測定と検証

IGBT の電圧ストレス(V_{CEpeak})

V_{CES} の最大値を超えてはなりません。従って、アプリケーションで生じる V_{CE} の最大値(V_{CEpeak})を決定する為に、測定を実施する必要があります。それにより、モジュール自身、ドライバーボード(ゲート抵抗)、DCリンク及びスナバコンデンサが、 V_{CEpeak} に対して適切に機能しているかどうか明らかになります。以下に示す4つの動作条件について調査する必要があります。

- 装置の最大ピーク動作電流
- アプリケーションで規定された過電流トリップ時の最大、最小短絡(SC)インダクタンス
注:アプリケーションにより短絡は異なります。例: 負荷、負荷への又は装置の内側の IGBT モジュールに近いケーブル。標準的な短絡インダクタンス値は、負荷短絡で $L > 10\mu H$ 、装置の端子短絡で $L < 1\mu H$ です。これは短いケーブル又は強固な接続の場合です。試験は大きいインダクタンスより始め、最小インダクタンス迄実施して下さい。一般的に最も高い過電圧は、IGBT が非飽和の直前にターンオフした時に生じます。これは過電流検出により、IGBT が非飽和直前にターンオフする短絡インダクタンスが低い時です。試験は接合温度が常温及び高温において実施して下さい。
- 相短絡(SKIP モジュール及びインターロック機能を有するドライバーには適用されない)
注:トップ側及びボトム側 IGBT が同時にターンオン。この場合、非飽和状態が生じ、IGBT のデータシートに記載されている時間内にドライバーボードによって検出し、取除く必要があります。
 - トップ側及びボトム側スイッチが同時にオン
 - トップ側は既にターンオン状態で、ボトム側がターンオンした時、電流が流れる(逆の場合も同じ)。

- ダイオードターンオフ
注:ダイオードがターンオフ時生じるスパイク電圧は、ダイオード及び並列接続 IGBT にかかる高い阻止電圧になります。大抵、最悪のケースは定電流 (<math><10\% \cdot I_C</math>)、低温時です。並列接続 IGBT がターンオフ又はターンオンする、ダイオードの電圧を測定する必要があります。IGBT のターンオフに対するよりも、ダイオードのターンオフに対しスナバコンデンサが必要な場合があります。ダイオードのオン時間が短く、チップ全体にキャリアが充満していない場合でもスパイク電圧が生じます。

阻止電圧は出来るだけ IGBT のチップ近くで測定します。SKiiP モジュールでは、モジュールの主端子が最も近い点になります。SEMiX 及び SEMITRANS モジュールでは、補助エミッタ端子が電氣的にチップに近い点として使用出来ます。測定点と IGBT チップ間のモジュール内部の浮遊インダクタンスによる電圧を測定値に加えて、IGBT チップレベルの実際の阻止電圧を得る必要があります。

ほとんどのアプリケーションに対する実際のやり方は、ダブルパルス試験として知られている方法です (Fig. 6 参照)。負荷インダクタンス及びパルス幅を変え、低負荷より過負荷に至る各負荷条件を調整します。パルス幅が限定された単パルス試験を短絡回路に使用します。この試験では、制御基板の代わりに、パルス発生器の信号をドライバー基板の入力に印加します。

測定手順

- DC リンクは出力電流が限定された絶縁 DC 電源より給電されます。通常、数 100mA で十分です。アプリケーション上、可能な限り DC リンク電圧を高く設定します。通常、これは過電圧保護の値です。
- ボトム側スイッチの測定には DC+ と AC を、又、トップ側スイッチの測定には DC- と AC を太いケーブルで接続して短絡回路を実現します。インダクタンスはワイヤーの長さで決まり約 1m に対し $1\mu\text{H}$ です。又、短絡回路は、インバータ回路の 2 つの異なる相の 2 つの AC 端子間をワイヤーで接続する事によっても実現します。1 個の IGBT (例、L1 相トップ側) は、他の IGBT (例、L2 相ボトム側) にパルスが印加されている間、ずっとオン状態にする必要があります。
- パルス幅調整可能なパルス発生器を、ドライバー入力に接続します。パルス発生器はシングル及びダブルパルスの設定が可能です。
- 過電流保護 (OCP) がドライバーではなく、制御基板によって動作する場合、入力信号がオフになっ

た点を見つける為に、制御基板のエラー信号をモニターする必要があります。SKiiP モジュールの場合、OCP はドライバー基板に組入れられている為、これは不要です。

- 最大のインダクタンスで始め、シングルパルスで OCP がスイッチオフする迄パルス幅を長くし、 V_{CE} の最大値を測定。
- インダクタンスを低くし、アプリケーションで規定されている最小短絡インダクタンスまで試験を繰り返して、 V_{CEpeak} の最大値を測定。
- ドライバーにインターロック機能がない場合、相短絡を実行。
- IGBT ターンオン、ダイオードターンオフ動作を行う為、ダブルパルスを印加。ダイオード (例: ボトム側) が通電中、コンプリメンタリ IGBT (例: トップ側) がターンオンすると、ターンオフします。これは 2 番目のパルスが印加された時です。
- 各 IGBT モジュールを測定。DC リンクコンデンサから最も遠いモジュールに、最も高い値が発生します。
- 試験は常温及び高温で実施。高温は例えば加熱板を使用し、ヒートシンクを加熱して得られます。接合温度は、1 回のスイッチングによる温度上昇は無視出来るので、ほぼヒートシンク温度になります。

接地と電圧プローブ接続

- オシロスコープの接地は、安全及び正確な測定を行う為に必要です。従って、DC 電源は短絡防止の為、絶縁しなければなりません。
- トップ側 IGBT の V_{CE} を測定時、電位は変わらない為、電圧プローブの一端子を DC+ に接続して下さい。これにより、測定信号のコモンモードノイズが減少します。トップ側 IGBT のゲート電圧を測定する場合、AC を接地し (Fig. 5)、電圧プローブの一端子をこの AC に接続します。
- (絶縁された) デファレンシャル電圧プローブが、十分な帯域を有していれば、測定に使用出来ます。測定開始時、デファレンシャル電圧プローブの動作試験を推奨します。例えば、パッシブ電圧プローブを使用して V_{CE} 測定時、信号を比較します。
- 測定信号のコモンモードノイズは、適切なフェライトをプローブ、及びオシロスコープの電源ケーブルに挿入する事によっても減少します。

Fig. 4 ボトム側 IGBT の V_{CEpeak} 測定.

トップ側スイッチはケーブル又はインダクタにより短絡、ボトム側 IGBT にダブルパルスを印加、DC-を接地

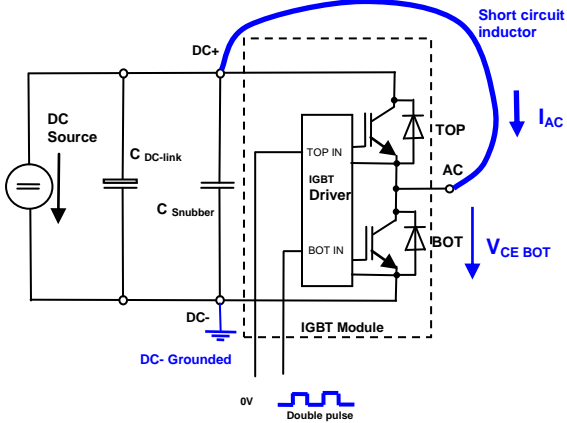


Fig. 5 トップ側 IGBT の V_{CEpeak} 測定.

ボトム側スイッチはケーブル又はインダクタにより短絡、トップ側 IGBT にダブルパルスを印加、ACを接地

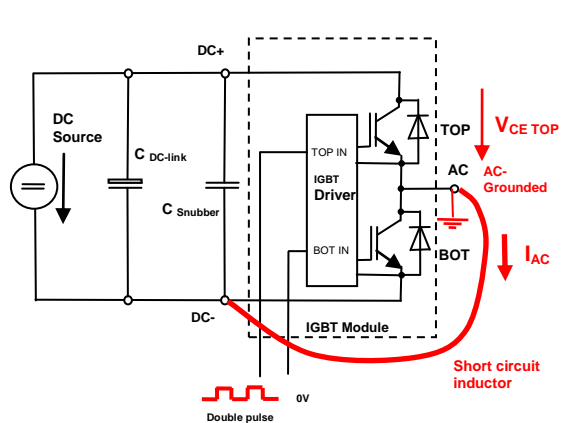
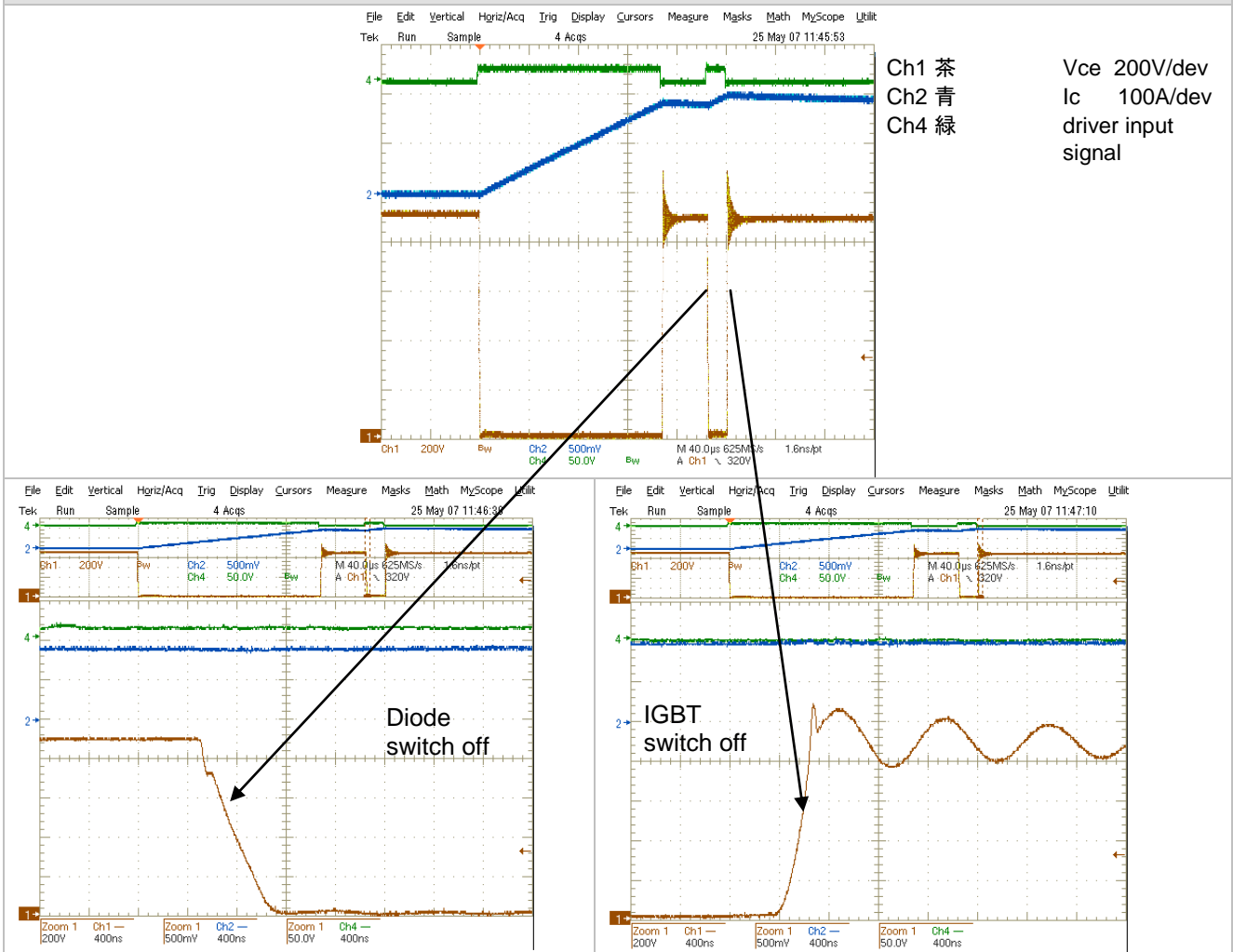


Fig. 1 標準ダブルパルス波形



コンデンサの実効電流測定

IGBT及びダイオードがターンオフした後、コンデンサに AC電流が流れます。

IGBTがターンオフすると、バスバーの電流はスナバコンデンサに転流します。スイッチング時、これにより正のピーク電流が生じ、スナバコンデンサとDCリンクコンデンサ間の減衰振動が続きます (Fig. 7)。

ダイオードがターンオフ時、逆回復電流はスナバコンデンサからの引き抜きになります。スイッチング時、これにより負方向のピーク電流が生じます。IGBTのターンオフ時と同様に、このターンオフ時よりも大きな減衰振動が続きます (Fig. 8)。

両ケースの減衰振動の周波数は、バスバーの寄生インダクタンスとスナバコンデンサの値で決まります。一般的に周波数は100kHz～数MHzの範囲です。

$$f_{osc} = \frac{1}{T} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_{DC-Link} * C_{Snubber}}}$$

振動はコンデンサの損失を生じ、それにより自己発熱につながります。コンデンサメーカーのデータシートには、実効電圧又は実効電流でコンデンサの許容負荷が示されています。動作システムでコンデンサに過負荷がかからないかチェックする為、測定及び計算を実行しなければなりません。

測定手順

例えば、ロゴスキー電流変換器をコンデンサーの周囲に取付ける事によって、電流を正確に測定出来ます。AC 電圧の測定精度は低くなります。高い DC 電圧に比べその値が低い為です。

デジタルオシロスコープモデムの”RMS 測定”機能を使用して、インバータ出力周波数の全期間にわたり実効値を単純に計算出来ない事が多くあります。低い全体の実効値に比べ、プローブのオフセットは非常に高い為、正確な数値を得る事は出来ません。

実際は、ボトム側ダイオード (t1) 及びトップ側 IGBT (t2) のターンオフ時、オシロスコープの時間内の実効値を測定します (Fig. 9)。この 2 つの部分は、スイッチング期間に対する全体の実効値を計算する為に、スイッチング期間 (T=1/fsw) に従って設定されます。これは、周波数変換器の正弦波全体に対し、測定しなければなりません。最悪の場合、I_{RMS}(t1) 及び I_{RMS}(t2) の最大値において一度測定されます。

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{RMS}^2(t1) * \frac{t1}{T} + I_{RMS}^2(t2) * \frac{t2}{T}}$$

I_{RMS}(t1) = 期間 1 の実効値

I_{RMS}(t2) = 期間 2 の実効値

T = コンバータのスイッチング時間

ω = 角振動周波数

実効電圧は以下の様に計算出来ます。

$$V_{RMS} = \frac{I_{RMS}}{2 * \pi * f_{osc} * C}$$

Fig. 2 IGBT のターンオフ

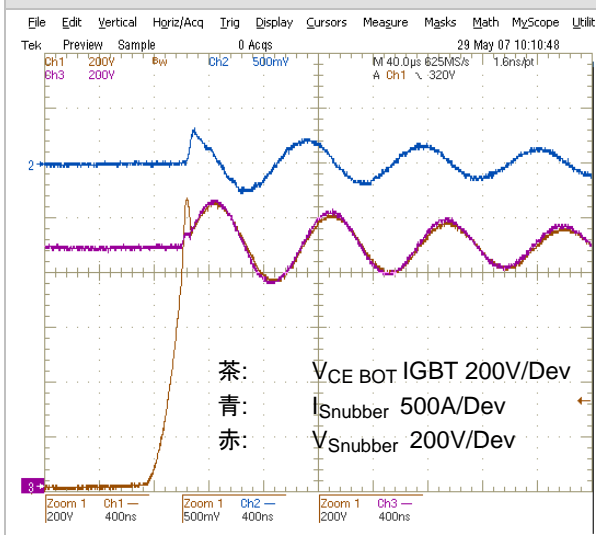


Fig. 3 ダイオードのターンオフ

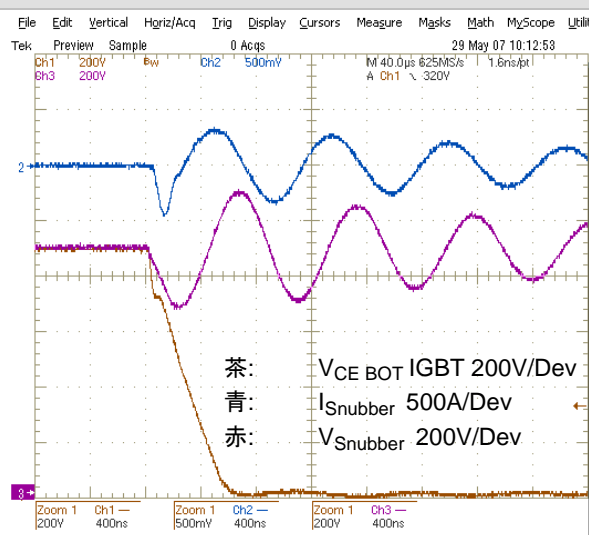
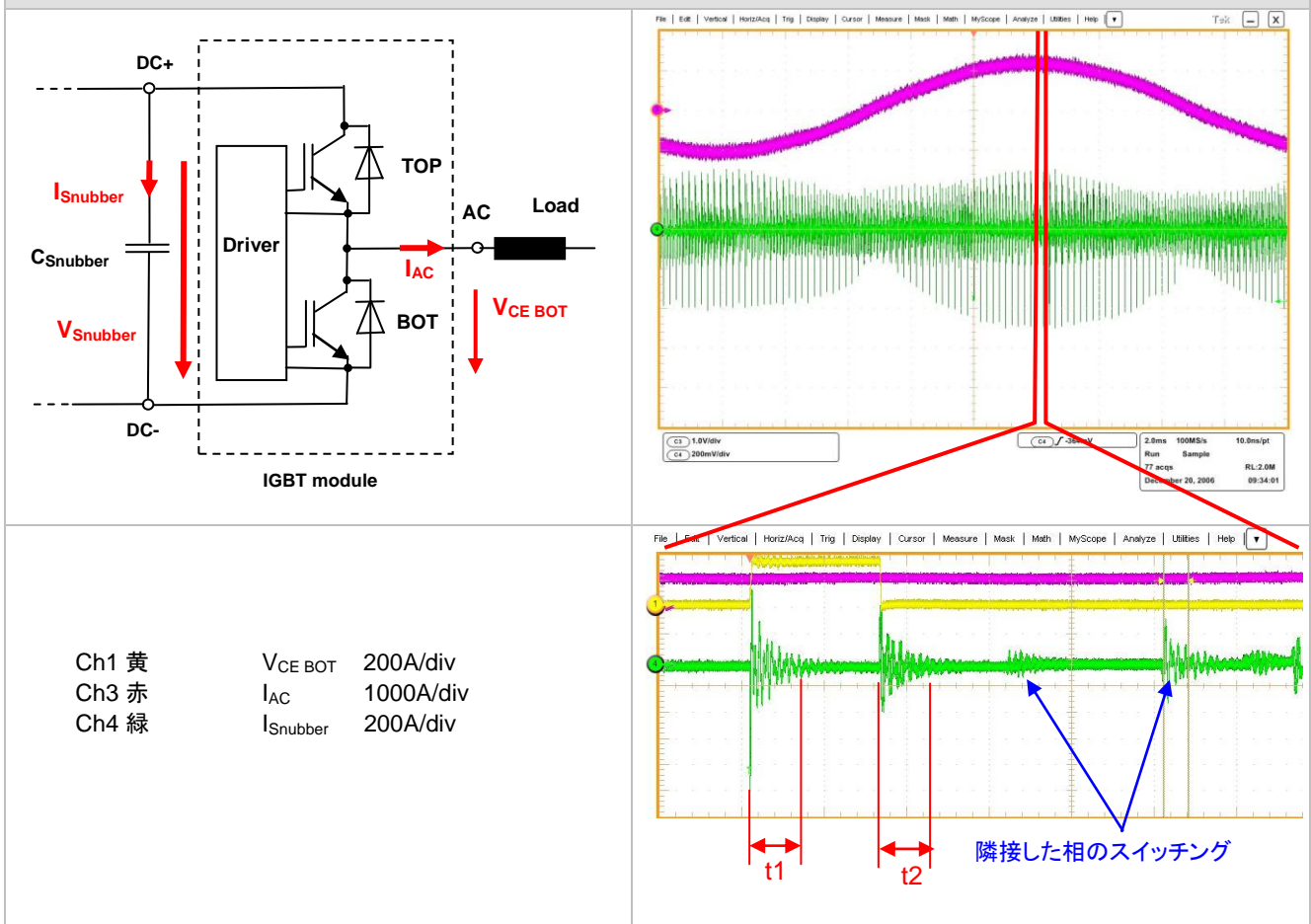


Fig. 4 スナバコンデンサの電流の測定



測定は熱的 maximum 動作条件で行わなければなりません。これに対応するダイオードの最大接合温度において、逆回復電流は最大になります。熱的 maximum 動作条件は、最も高い温度になるコンバータ出力値、スイッチング周波数、周囲及びヒートシンク温度です。2 番目の領域の短時間過負荷は通常、無視出来ます。許容実効電圧、電流は振動周波数に依存する事を考慮しなければなりません。これはコンデンサのデータシートに示されています。

スナバコンデンサは、同じ DC リンクの他の相の隣接した IGBT モジュールによっても、ストレスを受けます。しかし、この負荷は IGBT モジュール間のバスバーのインピーダンスで、多くの場合極めて低くなります。

動作における温度及び自己発熱

コンデンサメーカーは、コンデンサの動作中の許容温度を制限しています。コンデンサはこの温度を超えると直ちに破壊します。自己発熱温度にも制限があり、コンデンサ負荷に対する基準です。厳しいアプリケーションでは、熱的 maximum 動作条件において温度が超えないかどうか確認しなければなりません。

コンデンサは以下によって加熱されます。

- 内部の損失 (tan δ / ESR) によって部品を加熱する AC 電流
- 周囲温度
- 高温のバスバーによって加熱

動作温度は周囲温度 + 自己発熱効果による温度差で決まります。

$$T_{Operation} = T_a + dT_{self-heating}$$

コンデンサの温度は動作しないで、本来の位置に組付けられている時は周囲温度 T_a になります。この温度は試験中のコンデンサと類似の、接続されていないダミーコンデンサで測定出来ます。この温度は接続されたバスバーの熱によって加熱される為、キャビンの温度より高くなります。

動作温度は、コンデンサ内のホットスポットに近い箇所に設置された熱電対によって測定出来ます。しかし、これには特別仕様のコンデンサが必要です。胴体の温度の測定は、ホットスポットから胴体までの温度勾配 (R_{th}) で十分です。

$$T_{Operation} = T_{body} + R_{th} \cdot I^2 \cdot R_{ESR}$$

使用されている記号と用語

記号	用語
AC	パワーモジュールの AC 端子
BOT	ブリッジ回路の相のローサイド IGBT
$C_{DC-Link}$	DC リンクコンデンサの容量
$C_{Snubber}$	スナバコンデンサの容量
-DC	DC 電源の負電位 (端子)
+DC	DC 電源の負電位 (端子)
di/dt	電流上昇及び下降率
dv/dt	電圧上昇及び下降率
E	エネルギー
f_{osc}	共振回路の周波数
f_{sw}	スイッチング周波数
IGBT	絶縁ゲート型バイポーラートランジスタ
I_{AC}	AC 端子電流
I_C, i_C	IGBT のコレクタ電流
L_C	コレクタ端子の内部寄生インダクタンス
$L_{DC+/DC-}$	バスバーの寄生インダクタンス
L_E	エミッタ端子の内部寄生インダクタンス
L_{ESR}	DC リンクコンデンサの内部等価直列インダクタンス
L_S	寄生インダクタンス / 浮遊インダクタンス
$L_{Snubber}$	コンデンサの内部寄生インダクタンス
OCP	過電流保護
R_{ESR}	DC リンクコンデンサの内部等価直列抵抗
R_{th}	コンデンサコイル-胴体間の熱抵抗
SC	短絡回路
SKiiP	セмикロンインテグレートドインテリジェントパワーモジュール
T	期間
T_a	周囲温度
T_{body}	コンデンサの胴体温度
TOP	ブリッジ回路の相のハイサイド IGBT
$T_{Operation}$	動作温度
V_{CC}	コレクタ・エミッタ間供給電圧
V_{CE}	IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧
V_{CES}	IGBT の最大コレクタ・エミッタ間電圧、ゲート・エミッタ間短絡
V_{CEpeak}	アプリケーションにおけるコレクタ・エミッタ間電圧ピーク値
V_{RRM}	ダイオードの最大繰り返し逆電圧

免責事項

セмикロンは信頼性、機能や設計改善の為、予告なしに本資料を変更する権利を有します。本資料で提供される情報は正確で信頼出来るものです。しかしながら、保証するものではなく、情報の正確さや使用に関し責任を負いません。セмикロンはアプリケーション、又は本資料中の製品や回路から生じる責任を負いません。さらに、この技術資料は素子の特性を保証するものではありません。納入、性能や適合性について保証、又は意味するものではありません。本資料は以前に提供された情報の全てに優先し、置換えます。又、予告なしに更新する事があります。

セмикロン製品の生命維持装置及びシステムへの使用は、セмикロンの承認文書なしでは認可されません。

SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH
P.O. Box 820251 • 90253 Nürnberg • Deutschland • Tel: +49 911-65 59-234 • Fax: +49 911-65 59-262
sales.skd@semikron.com • www.semikron.com