

IGBTアクティブクランプ アプリケーションにおける 高電圧TVSダイオードの使用

絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) は、その使いやすさや電流駆動能力から、パワーインバータ、産業用ドライブ、電気自動車用充電スタンド、モータ制御、IH 調理器などに広く使用されています。今日、パワー半導体製造業者は、より高い電力密度を持った IGBT モジュールを提供しています。電力密度限界は、消費され得る最大電力損失によって決定されます。その最適化基準は、パッケージング技術、並びに半導体チップの伝導損失とスイッチング損失です。モジュールの高い電流密度は、高いスイッチング速度と共に、通常のスイッチング動作及び過負荷条件下の両方において、駆動回路により大きな要求を課します。アクティブクランプスイッチング技術は、特に高速鉄道及び自動車のトラクション用途において、現代の高出力 IGBT を高い信頼性をもってどのように使用することができるかを示すソリューションを提供しています。

IGBT ターンオフ時の過電圧解析

IGBT モジュールおよびコンバータ回路は、完全に除去することができない寄生インダクタンスを有しています。システム挙動への影響も無視することができません。図 1 は、整流回路に含まれる寄生インダクタンスを示します。IGBT をオフにすることによって生じる電流変化は、図 2 に示すように、そのコレクタ端子にオーバーシュート電圧を発生させます。

IGBT における転流速度（即ち、ターンオフ過電圧）は、原理的に、ターンオフゲート抵抗 $R_g(\text{off})$ によって影響を受ける可能性があります。この技術は特に、より低い電力レベルで使用されています。しかしその場合、 $R_g(\text{off})$ は、2 倍定格のターンオフ電流、短絡、一時的に増加した周辺回路起因の電圧などの過負荷状態に対して整合されなければなりません。通常の動作では、この結果、スイッチング損失及びターンオフ遅延が増大し、モジュールの有用性や効率が低下します。結果として、このシンプルな技術は、現代の高電力モジュールに適していないと言えます。

図 1. 寄生インダクタンス

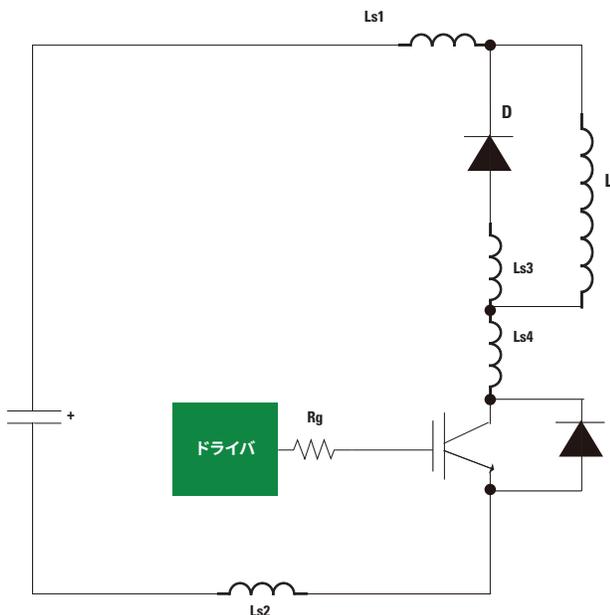
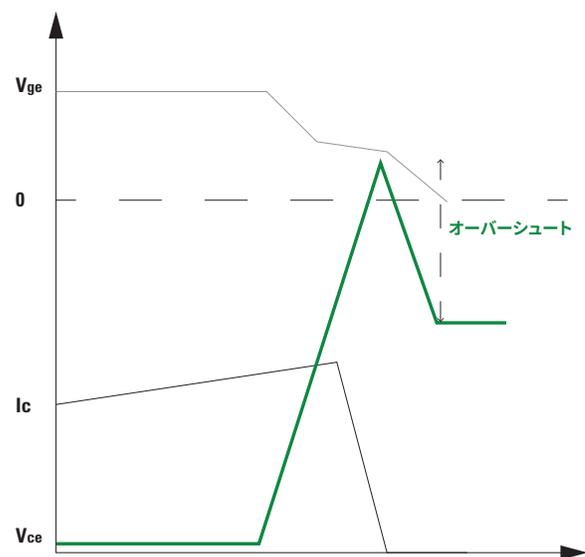


図 2. IGBT 遮断オーバーシュート



ソフトターンオフ

前節に記載した課題は、可逆ゲート抵抗で動作する2段ターンオフ、ソフトスイッチオフ、及び低速ターンオフドライバ回路の開発に繋がりました。通常の動作では、スイッチング損失を最小限に抑えるために、IGBTをオフにする際には低オームゲート抵抗器が使用されます。短絡またはサージ電流が検出されたときには、高オームゲート抵抗器が使用されます(図3参照)。しかしながら、問題は、これらの状態を確実に検出することです。非飽和モニタリングは、応答時間として知られる、障害が検出されるまでの遅延(一般的には4~10 μ s)を常に伴います。IGBTが短絡時の応答時間よりも短いパルスで駆動される場合、故障は検出されず、ドライバはあまりに素早くオフになってしまいます。結果として生じる過電圧は、IGBTを破壊します。さらに、リミットケース(過電流/非過電流の間)のカバー範囲にも課題があります。例えば、短絡ターンオフ時よりも、2倍の定格電流でオフになるとき、より高い過電圧が十分に発生し得るということです。

これらの種類のドライバ回路は危険であると認識されなければなりません。より高電力の機器や高い信頼性が期待されるシステムにおいて使用しないように、ユーザーへの指摘を行うべきです。

アクティブクランプ

アクティブクランプは、以前より、過渡的な過負荷の発生に際して、半導体を保護するためにのみ使用されています。したがって、クランプ素子は、決して繰り返しのパルス動作の影響を受けません。反復動作の問題は、IGBT及びドライバ電力によって制限されることです。アクティブクランプの間、IGBT及びドライバの両方がエネルギーを吸収します。アクティブクランプとは、アバランシェ特性を有する素子を介してコレクタ電位をゲートに直接フィードバックすることを意味します。図4は、IGBTスイッチを用いたこの原理を示しています。

図 3. ソフトターンオフ

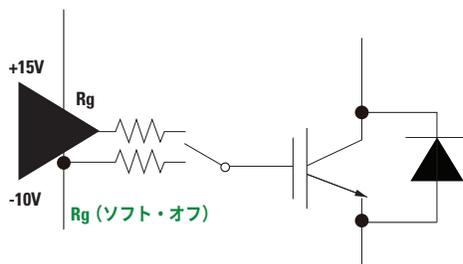
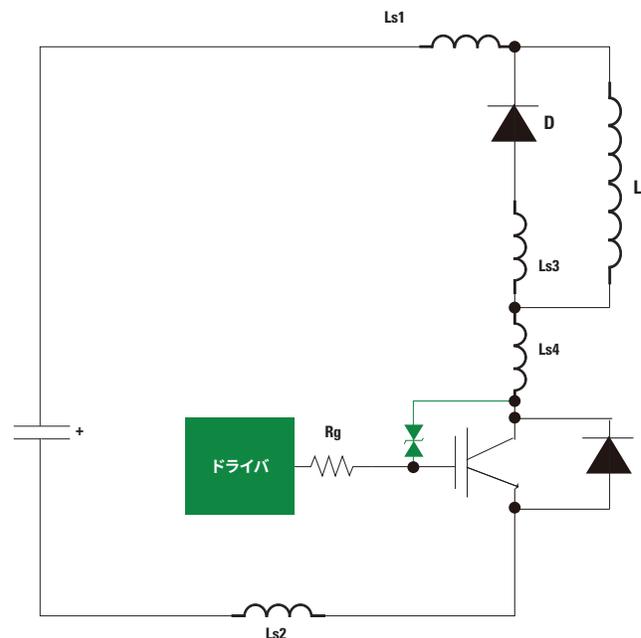


図 4. アクティブクランプトポロジー



フィードバック分岐はクランプ素子から成り、クランプ素子は一般に、一連の過渡電圧抑制 (TVS) ダイオードから構成されます。コレクタ・エミッタ間電圧がクランプ素子のおおよそのブレークダウン電圧を超えた場合、フィードバックを介してIGBTのゲートに電流が流れ、IGBTの電位が上昇し、それによりコレクタ電流の変化率が小さくなり、安定した状態となります。その時のIGBTの両端間の電圧は、クランプ素子の設計によって決まります。IGBTは、その出力特性のアクティブ範囲で動作し、浮遊インダクタンスに蓄積されたエネルギーをIGBT熱に変換します。クランププロセスは、浮遊インダクタンスが消磁されるまで続きます。典型的な曲線に基づいてここに含まれる基本的な関係は、図5の下部に示されています。

単一の高電圧 TVS ダイオード、または結果として生じる高電圧と直列接続されたいくつかの低電圧 TVS ダイオードを使用して、DC 電力線電圧または IGBT Vce 電圧に基づいてアクティブクランプを提供することができます。

図 5. アクティブクランプ波形

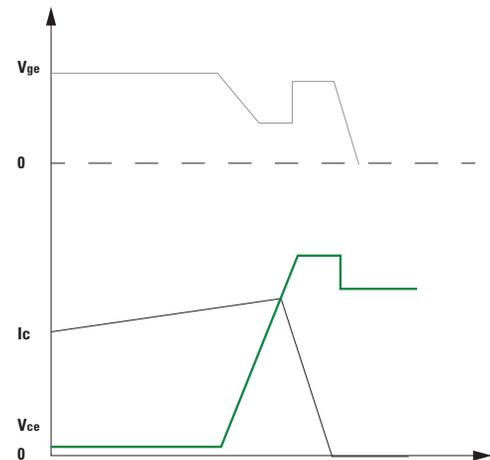


表 1 は、150V から 650V までのスタンドオフ電圧を持つ TVS ダイオード TPSMB シリーズを示しています。あらゆる電圧と IGBT 電力で動作するための広範囲の電圧オプションを網羅しています。保護要件に応じて、2、3 個の TVS ダイオードを直列に接続して、より高い電圧の TVS を形成することもできます。この一続きの TVS ダイオードは、それぞれの TVS 電圧を共有して、電気沿面と電力処理の改善に役立ちます。詳細は、以下のデモンストレーション表と試験データをご参照ください。

表 1: IGBT アクティブクランプ保護に使用可能な Littelfuse TVS ダイオード品番

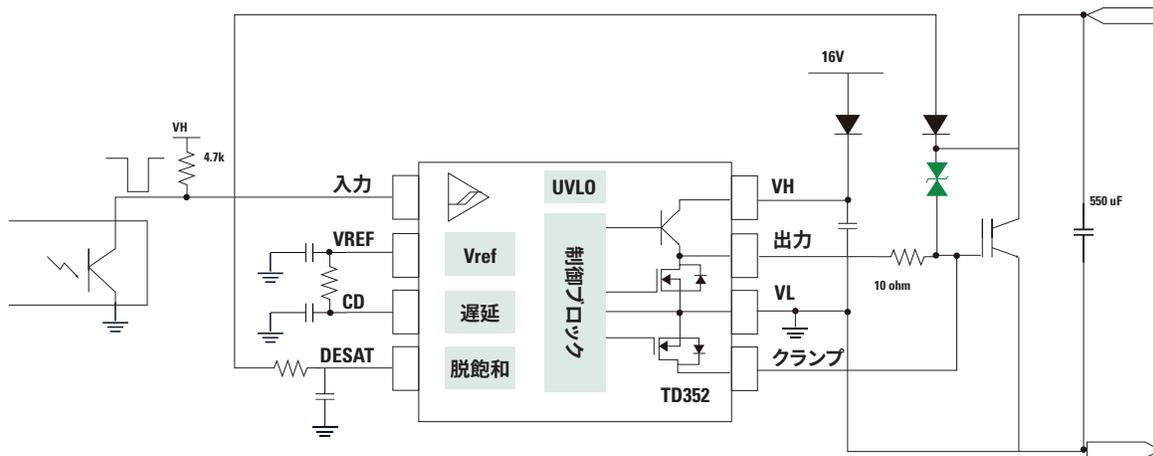
品番 (一方向)	品番 (双方向)	標準 IR @ 150°C (μA)	逆スタンドオフ 電圧 VR (ボルト)	ブレークダウン 電圧 VBR (ボルト) @ IT		試験電流 IT (mA)	最大 クランプ電圧 VC @ Ipp (V)	最大 ピーク パルス 電流 Ipp (A)	最大 逆リーク 電流 IR @ VR (μA)	VBR の 最大温度 係数 (%/C)	UL 機関 認証
				最大	最小						
TPSMB150A	TPSMB150CA	8	128.00	143.00	158.00	1	207.0	2.9	1	0.108	X
TPSMB160A	TPSMB160CA	8	136.00	152.00	168.00	1	219.0	2.8	1	0.108	X
TPSMB170A	TPSMB170CA	8	145.00	162.00	179.00	1	234.0	2.6	1	0.108	X
TPSMB180A	TPSMB180CA	8	154.00	171.00	189.00	1	246.0	2.5	1	0.108	X
TPSMB200A	TPSMB200CA	8	171.00	190.00	210.00	1	274.0	2.2	1	0.108	X
TPSMB210A	TPSMB210CA	8	179.60	199.50	220.50	1	288.0	2.1	1	0.110	-
TPSMB220A	TPSMB220CA	8	185.00	209.00	231.00	1	328.0	1.9	1	0.110	X
TPSMB250A	TPSMB250CA	8	214.00	237.00	263.00	1	344.0	1.8	1	0.110	X
TPSMB300A-A	TPSMB300CA-A	8	256.00	285.00	315.00	1	414.0	1.5	1	0.110	X
TPSMB350A-A	TPSMB350CA-A	8	300.00	332.00	368.00	1	482.0	1.3	1	0.112	-
TPSMB400A-A	TPSMB400CA-A	8	342.00	380.00	420.00	1	548.0	1.1	1	0.112	-
TPSMB440A-A	TPSMB440CA-A	8	376.00	418.00	462.00	1	602.0	1.0	1	0.112	-
TPSMB480A-A	TPSMB480CA-A	8	408.00	456.00	504.00	1	658.0	0.9	1	0.112	-
TPSMB510A-A	TPSMB510CA-A	8	434.00	485.00	535.00	1	698.0	0.9	1	0.112	-
TPSMB520A-A	TPSMB520CA-A	8	443.00	494.50	545.50	1	718.0	0.9	1	0.112	-
TPSMB530A-A	TPSMB530CA-A	8	451.00	503.50	556.50	1	725.0	0.8	1	0.112	-
TPSMB540A-A	TPSMB540CA-A	8	460.00	513.00	567.00	1	740.0	0.8	1	0.112	-
TPSMB550A-A	TPSMB550CA-A	8	468.00	522.50	577.50	1	760.0	0.8	1	0.112	-
-	TPSMB600CA-A	8	511.00	570.00	630.00	1	828.0	0.8	1	0.112	-
-	TPSMB650CA-A	8	553.00	617.50	682.50	1	897.0	0.8	1	0.112	-

アクティブクランプの詳細試験

Littelfuse は、アクティブクランプがどのように動作するかについて、ユーザーにより良く理解していただくために、アクティブクランプ試験評価ボードを作成しました。

図 6 に示す TD352 は、IGBT ゲートドライバ IC であり、Littelfuse IGBT モジュールの MG12100S-BN2MM IGBT に駆動信号を送ります。TPSMB600CA - A は、600W のピークパルス電力 (@10/1000) 及び 600V のブレイクダウン電圧を有する自動車グレードの TVS ダイオードです。この評価ボードは、TO - 247 のようなディスクリート・パッケージ内の IGBT や、Q2 銅トレースからの接続を有するモジュールタイプの IGBT を試験する柔軟性をユーザーに提供できます。

図 6. アクティブクランプ評価ボード回路トポロジー



部品	仕様	Vbr@1mA	Vc@アクティブクランプ
IGBT	1200 V 140 A, MG12100S-BN2MM	/	/
TVS	TPSMB600CA-A	606 V	656 V

図 7. アクティブクランプデモレイアウト及び機能

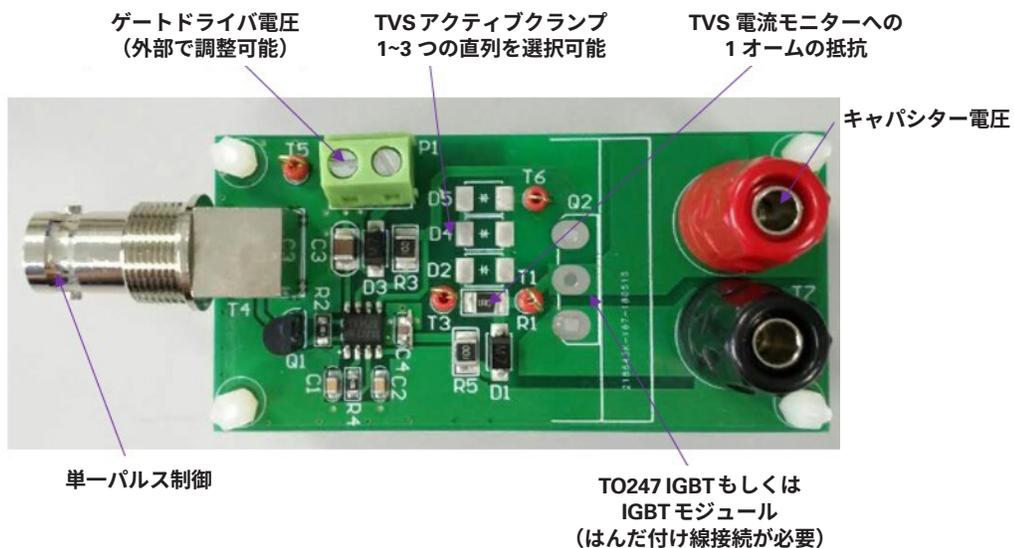


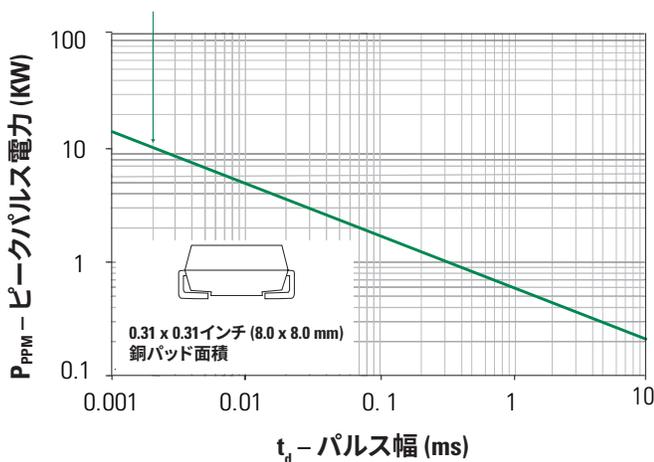
図 8. TPSMB600CA-A、DC 電圧 500V のときの実際のアクティブクランプ



青：TVS 電圧
緑：Vge 電圧
ピンク：TVS 電流
黄色：短絡 I_{sc}

- アクティブクランプ時間 (t) は、回路寄生インダクタンス (L) 及びピーク短絡電流 (i) によって変化し、式は $V_{\text{overshoot}} = L \cdot di/dt$ です。V_{ce} の両端間のオーバーシュート電圧がより高い場合、アクティブクランプ時間はより長くなります（より長い減衰時間のため）。したがって、回路寄生インダクタンスまたはピーク短絡電流がより高い場合、オーバーシュート電圧はより高くなり、逆もまた同様です。
- オンボードデカップリング設計は、寄生インダクタンスを低減することができ、ひいては、オーバーシュート電圧またはアクティブクランプ時間を低減することができます。
- アクティブクランプ中の TVS ダイオードを流れる電流は小さいです。この場合、サージまたはパルス持続時間は、通常、マイクロ秒レベルです。TVS ダイオードを通過するエネルギーは、TVS ダイオードが問題なく耐えることができるレベルにあることを示す必要があります。図 9 は、TPSMB TVS ダイオードのデータシートに記載されている、ピークパルス電力対パルス幅時間グラフです。アクティブクランプの間、短い持続時間のパルスで 500V より高い TVS ダイオードの両端のサージ電圧に対して、ピーク電力（図 9 の矢印によって示されている点）は、2 マイクロ秒で $656 \text{ V} \cdot 0.5 \text{ A} = 328 \text{ W}$ を示しています。これは、TPSMB TVS ダイオードのパルス幅ピーク電力定格（図 9 に示されるように、2 マイクロ秒で約 10kW）よりはるかに低いです。これは、TVS ダイオードがアクティブクランプ中に、この短い持続時間のサージに耐えることを意味します。

図 9. TPSMB シリーズ TVS ダイオード ピークパルス電力対パルス時間



注：IGBT または IGBT モジュールは、IGBT ドライバ回路またはドライバ IC によって駆動されています。異なるドライバ IC またはドライバ回路は、駆動性能に影響を及ぼします。通常、R_g 値は、IGBT への駆動電流を制御するために重要であり、ドライバラインにおけるより低い R_g は、少し高い TVS アクティブクランプ電流を生成する場合がございます。本アプリケーションノートは、アクティブクランプ保護についての解説を意図しています。また、アクティブクランプ保護中に TVS ダイオードを通過する低レベルの（TVS ダイオード自体に無害の）エネルギーに関する解説を意図しています。

まとめ：高電圧 TVS ダイオードは、IGBT ターンオフ事象中の IGBT アクティブクランプにとって重要な構成要素であり、IGBT を安全かつアクティブモードで動作させるのに役立ちます。Littelfuse は、3.3V から 650V までの幅広い高電圧ダイオードを提供しています。

詳しくは、<http://www.littelfuse.com/products/tvs-diodes/automotive-and-high-reliability-tvs/tpsmb.aspx> をご覧ください。