高電圧でのリニアモード動作スーパージャンクション MOSFET

リニアモードのCoolMOS™第7世代デバイスの課題

本書について

適用範囲と目的

このドキュメントは、高電圧 (HV) スーパージャンクション (SJ) MOSFET (Infineon の CoolMOS™など) のリニアモード動作がデバイス破壊の固有のリスクをもたらすという認識を高めることを目的とします。

したがって、このドキュメントではリニアモードという用語を定義し、HV SJ MOSFET のリスクに焦点を当てています。

最後に、リニアモードで動作する傾向のある特定のアプリケーションで SJ MOSFET デバイスを正しく使用する方法を示します。

対象者

このドキュメントは、電源設計者およびパワーエレクトロニクスエンジニアを対象とします。

目次

本書について **1**
目次 **1**
1 はじめに **2**
2 スイッチ動作モードの定義 **3**
3 リニアモード動作の定義 **5**
3.1 安全動作領域 6
3.2 伝達特性と温度安定点 8
4 CoolMOS™ソリューションの設計ガイドライン **10**
4.1 電気自動車のアクティブ DC リンク放電アプリケーションでの CoolMOS™ CFD7A の使用 10
5 結論 **13**
6 参考文献 **14**
改訂履歴 **15**
免責事項 **16**

1 はじめに

最新の HV パワーMOSFET の開発により、超高速スイッチングと超低オン抵抗デバイスが生み出されました。

最新のインフィニオン CoolMOS™第 7 世代テクノロジーは、600 V から 950 V までの電圧クラスで、誰もが認めるクラス最高の $R_{DS(on)}$を提供します。インフィニオンのテクノロジーは新しく小さなパッケージ (**ThinPAK 5x6** や **SOT-223**) を可能にするだけでなく、既存のパッケージにおいて $R_{DS(on)}$値がはるかに小さい CoolMOS™製品もあります。

わずか 10 年前に製造された同様のパワー半導体は、同じ性能を達成するために少なくとも 3 倍のチップ面積を必要としました。言い換えると、前世代のパワーMOSFET は、最新の CoolMOS™第 7 世代チップ (同じチップ面積) の少なくとも 3 倍の $R_{DS(on)}$に悩まされていました。

ただし、超高速スイッチングに向けた SJ MOSFET 技術の進歩には、いくつかの欠点があります。最新の HV SJ MOSFET は、スイッチングモード (SM) 動作で高く評価されていますが、一部のアプリケーションには望ましくない制限があります。

2 つの特性に着目します。

まず、最新の HV SJ MOSFET は、安全動作領域 (SOA) が狭くなっています。安全動作領域が減少する理由は、今日の最先端のパワーMOSFET が、特定のオンチャネル抵抗 ($R_{DS(on)}$) に対してはるかに小さいシリコンダイ面積になっているためです。残念ながら、これは、特定の $R_{DS(on)}$の許容損失 (P_{tot}) が低下することも意味します。これは、チップ面積が小さくなると熱抵抗値 (R_{th} および Z_{th}) が増加するためです。これは、次の式で説明されます。

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$$

ここで、lは材料本体の長さ、λは材料の熱伝導率、およびA熱伝達の接触面積 (チップサイズ) です。

その結果、SOA ダイアグラムの使用可能領域は、最新のパワー半導体ではますます小さくなっています (同じ $R_{DS(on)}$値を持つ、前の SJ MOSFET 世代と比較して)。

第二に、最新の SJ MOSFET は、きわめて急峻な伝達特性を提供します。ゲート-ソース間電圧のわずかな変化がドレイン-ソース間電流のはるかに大きな変化をもたらすため、この特性により、はるかに高速なスイッチングが可能になります。この機能により、スイッチング電源 (SMPS) の電力損失が大幅に削減されます。それにもかかわらず、高い相互コンダクタンスは、リニアモードで動作するアプリケーションにとって逆効果です。リニアモードで動作する傾向のある一般的なアプリケーションは、ホットスワップ、突入電流リミッター、リニア電圧レギュレータ、アクティブ DC リンク放電回路などです。

Note: *新しいパワーMOSFET 世代の継続的な開発により、単位面積当たりのオン抵抗 ($R_{DS(on)}$* A) は継続的に減少しています。*

2 スイッチ動作モードの定義

優れたスイッチング性能と超低電力損失により、SJMOSFET は SMPS のスイッチングデバイスとして最も一般的に使用されています。それらの主な役割は、負荷電流をオンおよびオフにすることです。したがって、主に 2 つの動作点で動作します。完全にオン (オン状態またはオーミック領域) または完全にオフ (オフモードまたはブロッキングモード) です。

Table 1 に、これら 2 つの動作点の概要と、SM 動作におけるそれぞれの電圧および電流条件を示します。次の項目が重要です。MOSFET を流れる電流または MOSFET の両端の電圧は高いですが、これらの動作状態では、消費電力 (電圧と電流の積) は低から中程度のままです。

Table 1 SM 動作における定常動作点の概要

状態	V_{GS} の状態	デバイスに流れる電流	デバイス両端の電圧	MOSFET デバイスの消費電力
オン	V_{GS} 電圧は V_{th} よりはるかに高い	大	低	中
オフ	V_{GS} 電圧は V_{th} をはるかに下回る	非常に小さいリーク電流	高	非常に低い

MOSFET をオンまたはオフにするには、**Figure 1** の図を、それぞれ動作点オフからオンまたはオンからオフに移動する必要があります。

このスイッチング動作中、MOSFET は、再び定常状態に達するまで、比較的大きい電流と比較的高い電圧にさらされます。これらの状態間で変化するのに必要な時間は、スイッチング時間として定義されます。このスイッチング時間中に、トランジスタの電力は非常に高い値に達する可能性があります。これは、スイッチの両端の HV とスイッチを流れる大電流によるものです。

Table 2 は、これらの遷移中の量をまとめたものです。

Note: この瞬時電力が非常に高い場合 (つまり、数キロワット) でも、スイッチング時間は適度に短いままであるため (結果として生じるエネルギーは小さいため)、MOSFET に害はありません。

適切に設計された電源装置では、この移行中に「失われる」エネルギーは比較的低いです。それにもかかわらず、サーバーやテレコム用の電源、および自動車の車載充電器などの最新の電力アプリケーションは、これらのスイッチング損失を可能な限り削減する傾向があります。したがって、1 つのアプローチは、デバイスをできるだけ速く切り替えることです。これは、ハードスイッチングアプリケーションでのスイッチング損失を減らすために、電圧と電流の重なりを減らすのに役立ちます。より洗練されたアプローチは、ソフトスイッチングと呼ばれる手法を展開することです。この動作モードでは、寄生出力容量に蓄積されたエネルギーが負荷に転流した後、コントローラはゼロ電圧状態で MOSFET をオンします。

Table 2 SM 動作における遷移の概要

状態	ゲート-ソース間電圧条件	デバイスに流れる電流	デバイス両端の電圧	MOSFET デバイスの消費電力
オンからオフへ遷移	高から低へ	中	中	大
オフからオンへ遷移	低から高へ	中	中	大

スイッチ動作モードの定義

Figure 1 は、MOSFET の出力特性をグラフで表したもので、SM 動作の最も重要な動作点が示されています

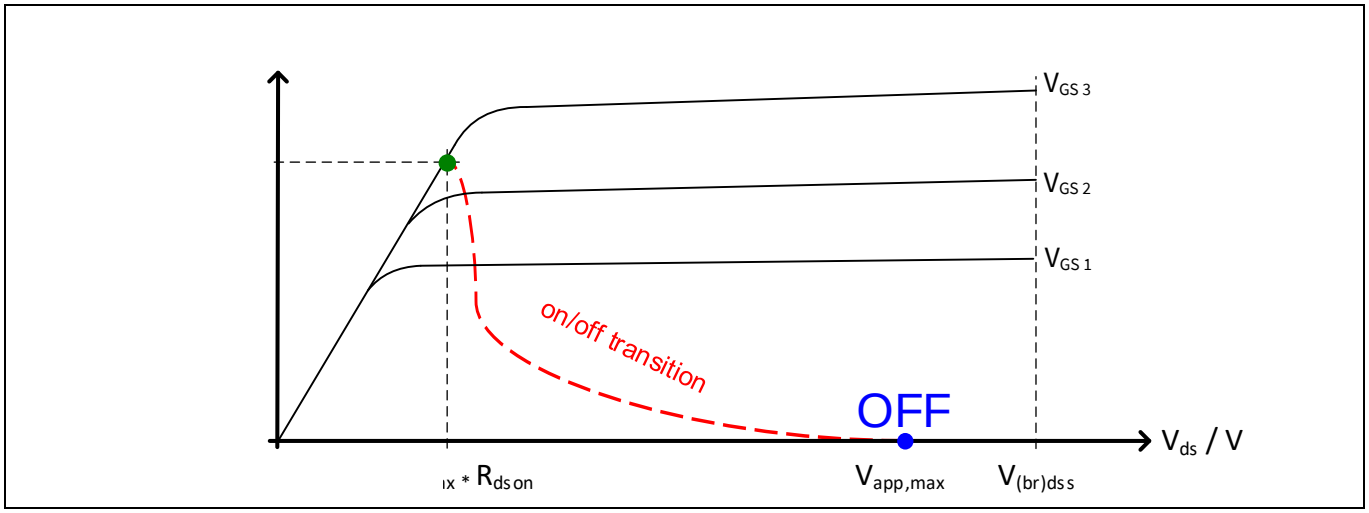


Figure 1 **SM 動作の 2 つの動作点とそれらの間の遷移の例を示すパワーMOSFET の出力特性 (赤い線)**

3 リニアモード動作の定義

第 2 章で SM 動作を定義した後、この章ではリニアモード動作を定義することを目的とします。

その前に、MOSFET の特性、特に HV SJ MOSFET の出力特性を詳しく調べる必要があります。**Figure 2** に、CoolMOS™製品 **IPB60R180P7** の出力特性を示します。プロットは、オーミック領域 (灰色でマーク) と飽和領域 (黄色で強調表示) の 2 つの部分に分けられます。

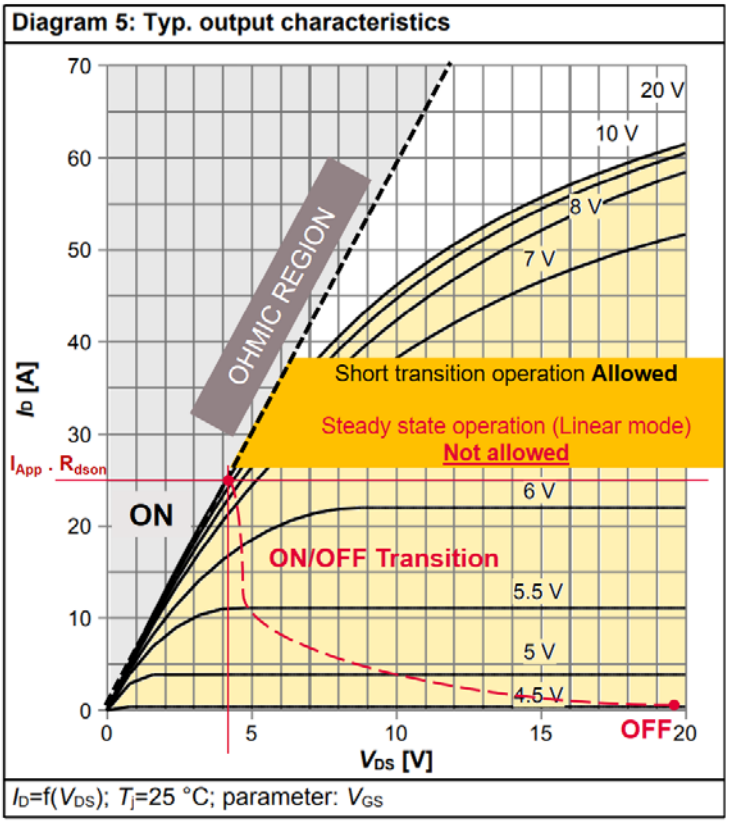


Figure 2 CoolMOS™ IPB60R180P7 の一般的な出力特性: オーミック領域 (灰色) と飽和領域 (黄色) [1]

オーミック領域では、MOSFET を流れる電流 (I_D) は、MOSFET (V_{DS}) の両端のドレイン-ソース間電圧に正比例します。MOSFET は、電流と電圧の間に線形関係を持つ定抵抗 ($R_{DS(on)}$) のように動作します。この「リニア」動作のために、オーミック領域での動作を「MOSFET のリニア動作」と呼ぶ人もいます。しかしながら、このドキュメントでは、この動作モードを純粋にオーミック領域での動作と呼んでいます。このドキュメントのリニアモードは、飽和モードで発生します。

MOSFET のチャネルが電子で飽和しているため、いわゆる飽和領域です。その結果、MOSFET の両端の電圧が増加しても、MOSFET を流れる電流は増加しません。したがって、FET にどれだけバイアスをかけても、FET にはほぼ同じ量の電流が流れます。代わりに、ゲート-ソース間電圧を変調することにより、その電流を制御できます。言い換えると、MOSFET は定電流源または制御可能な抵抗のように機能します。この動作モードでは、ゲートオーバードライブ電圧 (V_{GS}) が制御量として機能します。定義上、制御電圧 (V_{GS}) はしきい値電圧 (V_{th}) よりも大きくなりますが、完全なオーバードライブがオーミック領域に到達するために必要な V_{GS} 電圧よりも小さくなります (したがって、$R_{DS(on)}$が低くなります)。

この動作モードは、一般にリニアモードとして知られています。この動作点は、MOSFET の消費電力が大きいという特長があります。MOSFET は、長期間にわたる高電圧および大電流によって損傷を受けます。

さらに、リニアモードという用語は、ここで定義されているように使用されます (明示的に MOSFET の飽和領域で使用され、オーミック領域では使用されません)。

前述のように、エネルギーが比較的低い限り、MOSFET に害はありません (オン状態とオフ状態の間の移動は十分に速く行われます)。遷移が非常にゆっくりと発生する (または動作点間で完全に停止する) と仮定すると、リニアモードで動作しています。

Note: *リニアモード動作は、「通常の」SM 動作中にも発生しますが、非常に短時間であるため、MOSFET に害を及ぼすことはありません。*

リニアモードは、電圧を調整するために低電圧 (LV) MOSFET によって適用される一般的な手法です。この手法はよく知られており、LV アプリケーションで適切なデバイスが使用され、それに応じてゲート電圧が制御されている場合 (「温度安定点」を参照)、業界全体で数十年にわたって使用されています。

それにもかかわらず、HV SJ MOSFET の場合、デバイスの物理的特性に固有の違いがあるため、リニアモードの動作が重要になる可能性があります。

第一に、HV MOSFET ははるかに高い電界に耐える必要があるため、その物理的構造は LV MOSFET とは大きく異なります。

さらに、SJ MOSFET の相互コンダクタンスは、通常、LV の相互コンダクタンスよりも高くなります。したがって、HV MOSFET の潜在的なリニアモード動作は、すべての動作点とコーナー条件にわたってゲート電圧の適切な制御を非常に困難にします。当然の結果として、SJ HVMOSFET 内の電流の集中や補償電荷バランスの違いなどの致命的な破壊メカニズムを完全には回避できません。リニアモードでの HV SJ MOSFET の信頼性の高い動作は、意図したライフタイム以上を保証できません。

前述のように、MOSFET のオン状態とオフ状態の間の短い遷移は、SM 動作で正しく使用される MOSFET に固有のものです。この移行中、消費される電力は通常非常に高くなります。SM 動作における MOSFET の限界を理解するために、データシートのいわゆる SOA 図を使用できます。次の章では、SOA 図について詳しく説明し、使用の制限に焦点を当てます。

3.1 安全動作領域

CoolMOS™のデータシートに示されている SOA 図は、MOSFET の動作限界を定義しています。また、MOSFET が飽和領域で動作しているときに MOSFET が処理できる消費電力に関する情報も提供します。

Figure 3 に、CoolMOS™ **IPB60R180P7** の SOA を示します。すべての制限と境界に注意してください。この範囲内で、個々のパルス幅ごとにさらに多くの制限があります。内側の線が示すように、それらは計算または測定できます。

SOA ダイアグラムは、MOSFET が大量の電力を消費しているアプリケーションに役立ちます。お客様は、さまざまなデータシートの SOA を比較して、どの部分がより多くの電力を処理できるかを確認することにより、デバイスの堅牢性の指標として SOA を使用する傾向があります。

インフィニオンは、SJ MOSFET 分野の技術リーダーとして、長年にわたって、より大きな SOA 制限を備え、リニアモード動作を起こしやすい何世代にもわたる MOSFET を開発してきました。最新の CoolMOS™第 7 世代では、より高度な SOA 図が実装されています。お客様への追加情報として、SOA 図に熱不安定限界線を導入しました。

注意: 一部の古い MOSFET テクノロジーには、SOA にこの情報がありません。また、ほとんどの競合他社のデータシートでは考慮されていません。

SOA は、5 つの別個の境界に分割できます。詳細については、以下で説明します。

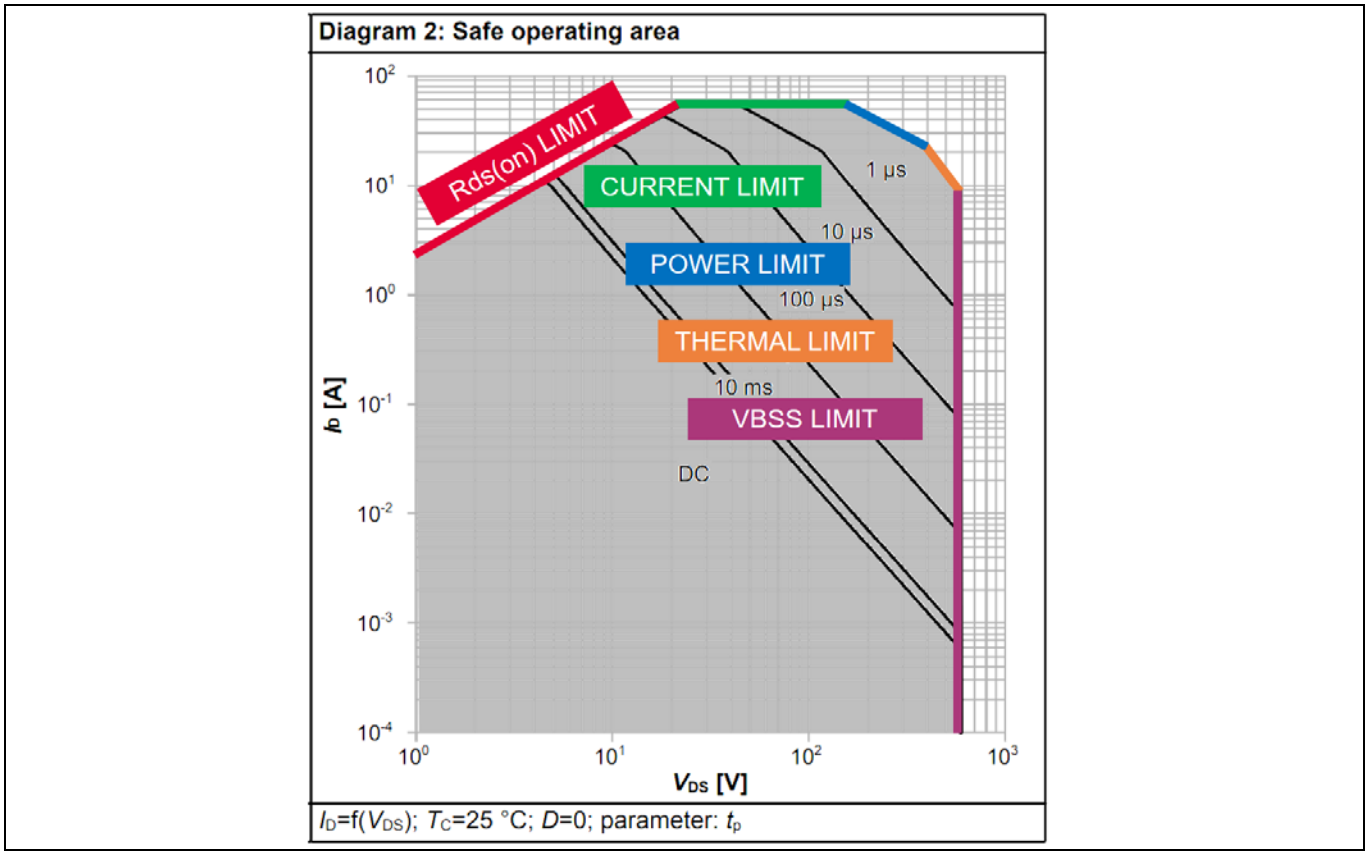


Figure 3　それぞれの制限がある CoolMOS™ IPB60R180P7 の SOA 図[1]

最初の重要な境界は、$R_{DS(on)}$の制限を定義する赤い線です。これは、デバイスに流れる電流の量が、デバイスの最大ジャンクション温度でのオン抵抗によって制限される領域です。この線は正の一定の傾きを持っています。線上のすべての点は、オームの法則に従って定義された同じ抵抗を表します。

次の制限線は電流による制限で、緑色で示されています。電流制限ラインは通常、MOSFET 製品の最も弱い部分が処理できる最大電流によって定義されます。したがって、この電流の量はパッケージに強く依存します。また、ダイサイズは、ボンディングスキーム (ボンドワイヤの数、ボンドワイヤの直径) を決定するため、パッケージの電流許容能力に影響を与えます。

青色の 3 番目の制限は、最大電力制限線です。この線上のすべての点が同じ一定の電力を表すため、この線は一定の負の傾きを持ちます。したがって、対数曲線では、これは負の勾配になります。

ここで、4 番目の制限である熱不安定性の制限は、デバイスの機能を実際に測定することが非常に重要になる場所です。生成された電力が消費された電力の過熱よりも速く上昇する場合、MOSFET は熱的に不安定であると見なされます。この熱不安定性の概念を調べるには、3.2 章「伝達特性と温度安定点」を参照してください。

紫色で強調表示されている 5 番目の領域は、ブレークダウン電圧の制限です。これは、単純に MOSFET のブレークダウン電圧です。**Figure 3** の SOA の基礎として例示されているデバイスは、600 V のブレークダウン BVDSS を提供します。これが、このラインが 600 V でのみ課されている理由です。

3.2 伝達特性と温度安定点

MOSFET 動作の非常に重要なポイントは、異なる温度での伝達曲線の交点です。この点は、温度安定点 (TSP) またはゼロ温度係数 (ZTC) と呼ばれます。**Figure 4** に、例として SJ CoolMOS™第 7 世代 MOSFET (**IPB60R180P7**) の伝達特性を示します。

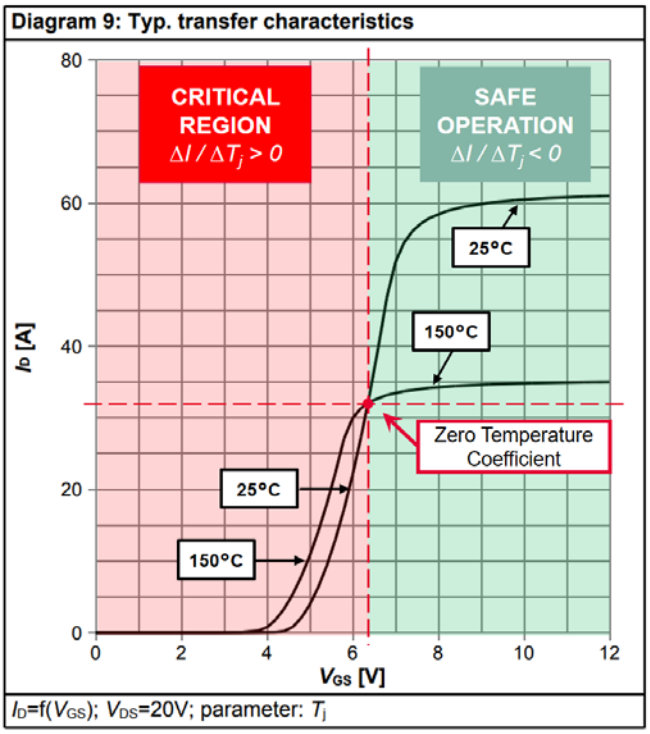


Figure 4 CoolMOS™ IPB60R180P7 の転送特性: 安全動作領域 (緑の領域) と危険領域 (赤の領域) [1]

ゲインが温度 (ZTC) に依存しなくなるポイントが示されます。名前が示すように、このポイントは、パワーMOSFET のゲインが MOSFET の温度に依存しないゲート電圧レベルを示します。

ゲート電圧がこのポイントより高い場合、MOSFET の相互コンダクタンスは減少します。その結果、デバイスの電流も温度の上昇に伴って制限されます。これにより、導通損失が減少し、続いてデバイス温度が減少します (負帰還ループ)。これは、MOSFET の安全な動作のための好ましい動作点です。

一方、ゲート電圧が温度安定点を下回る場合、効果は逆になります。デバイスの温度が上昇すると、MOSFET のゲインが増加します。これは正のフィードバックであり、定常状態では回避する必要があります。相互コンダクタンスが高くなると、ドレインからソースへのデバイス電流がさらに増加し、MOSFET を流れる電流が増加し、導通損失、さらにはデバイス温度がさらに増加するためです。デバイスの熱暴走が発生する可能性があり、デバイスの致命的な破壊につながります。

この制限の原因を理解するには、熱的不安定性の基準を考慮する必要があります。

生成された電力が消費された過熱よりも速く上昇する場合、MOSFET は熱的に不安定であると見なされます[2]。結果として、システムの温度は安定せず、システムは最大電力制限線とは異なり、熱平衡状態にありません[3]。

$$V_{DS} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta T_J} > \frac{1}{Z_{thJC}(t_{pulse})}$$

リニアモード動作の定義

上記の式は、MOSFET が熱不安定性に遭遇する可能性のある範囲を定義しています。用語($\frac{\Delta I}{\Delta T_J}$) は温度係数です。$V_{DS}$は 0 より大きく、$\frac{1}{Z_{thJC}(t_{pulse})}$ は 0 より大きいため熱不安定性は、ドレイン-ソース間電流の温度係数が正の場合にのみ発生する可能性があります。

CoolMOS™の熱不安定性のこの概念を調査するには、温度係数を定義する必要があります。これは、デバイスのジャンクション温度の変化に対する電流の変化として与えられます。したがって、**Figure 4** の伝達特性曲線 (通常は CoolMOS™データシートの図 9) を見ると、2 つの異なる温度での FET のドレイン-ソース間電流と FET のゲート-ソース間電圧の増加がわかります (通常 25°C および 150°C）。ZTC を参照してください。ここで、デバイスのジャンクション温度が上昇しても、デバイスを流れる電流は変化しません。

ZTC より上のポイントで、ジャンクション温度が 25°C から 150°C に上昇すると、電流が減少することがわかります。そのため、デバイスが熱くなると、デバイスを介して消費される電力が減少します。不安定になるという根本的なリスクはありません。デバイスを過熱させることはできますが (例えば、過電流が原因で)、熱暴走のリスクはありません。

ZTC 未満の電流を考慮すると、温度係数がゼロより大きいため、ジャンクション温度が再び 25°C から 150°C に上昇し、デバイスを流れる電流が増加するという現象が見られます。そして、その電流の増加は、$R_{DS(on)}$の増加と温度のさらなる上昇につながる可能性があり、それにより、さらに多くの電流が発生し、正のフィードバックループが不安定につながります。

4 CoolMOS™ソリューションの設計ガイドライン

リニアモードで動作する傾向のある一般的なアプリケーションは、ホットスワップ, 突入電流リミッター, リニア電圧レギュレータ, アクティブ DC リンク放電回路などです。

4.1 電気自動車のアクティブ DC リンク放電アプリケーションでの CoolMOS™ CFD7A の使用

自動車用途でリニアモードでの Automotive CoolMOS™の使用は推奨しません[4] [5]。

エネルギーのアクティブな消費が必要なアプリケーション (アクティブな DC リンク放電など) の場合、CoolMOS™ CFD7A を使用して、電力抵抗などのパッシブ負荷の制御スイッチとして機能させることを推奨します。そうすることにより、MOSFET のリニアモード動作を回避できます。その結果、MOSFET の電力は大幅に削減されます。これは、放電抵抗が電力損失を処理している間、MOSFET は制御スイッチのようにしか機能しないためです。

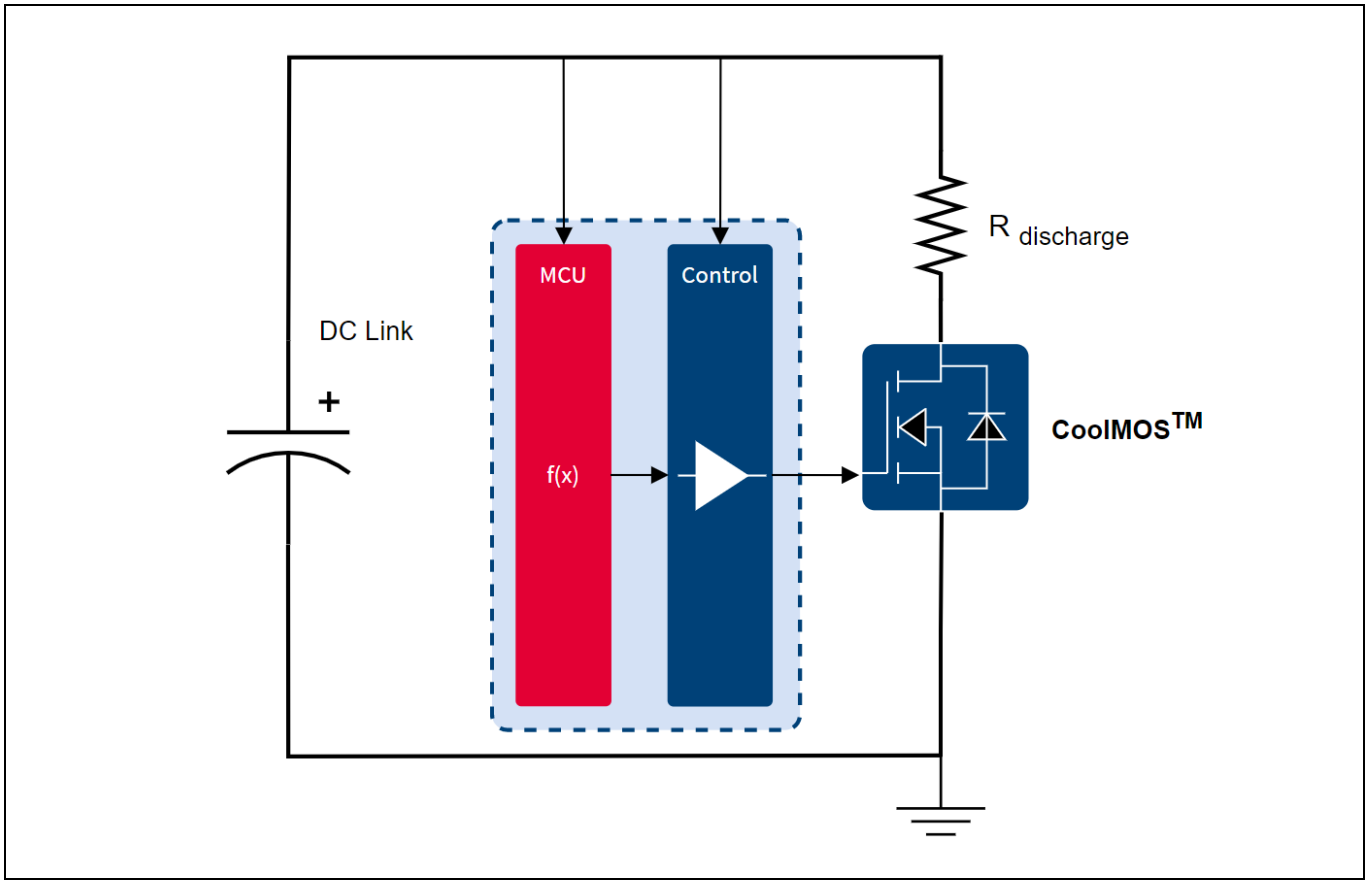


Figure 5 CoolMOS™を制御スイッチおよびエネルギー散逸用のパッシブ抵抗として使用するアクティブ DC リンク放電回路の原理

さらに、このコンセプトには PWM 制御によって放電電流を形成するという利点があります。デューティサイクルは、放電時間と抵抗の平均電力を直接制御します。したがって、さまざまな放電シナリオをソフトウェアで実装できます。Figure 6 および Figure 7 に、シミュレーションで実装されたこのコンセプトを示します。

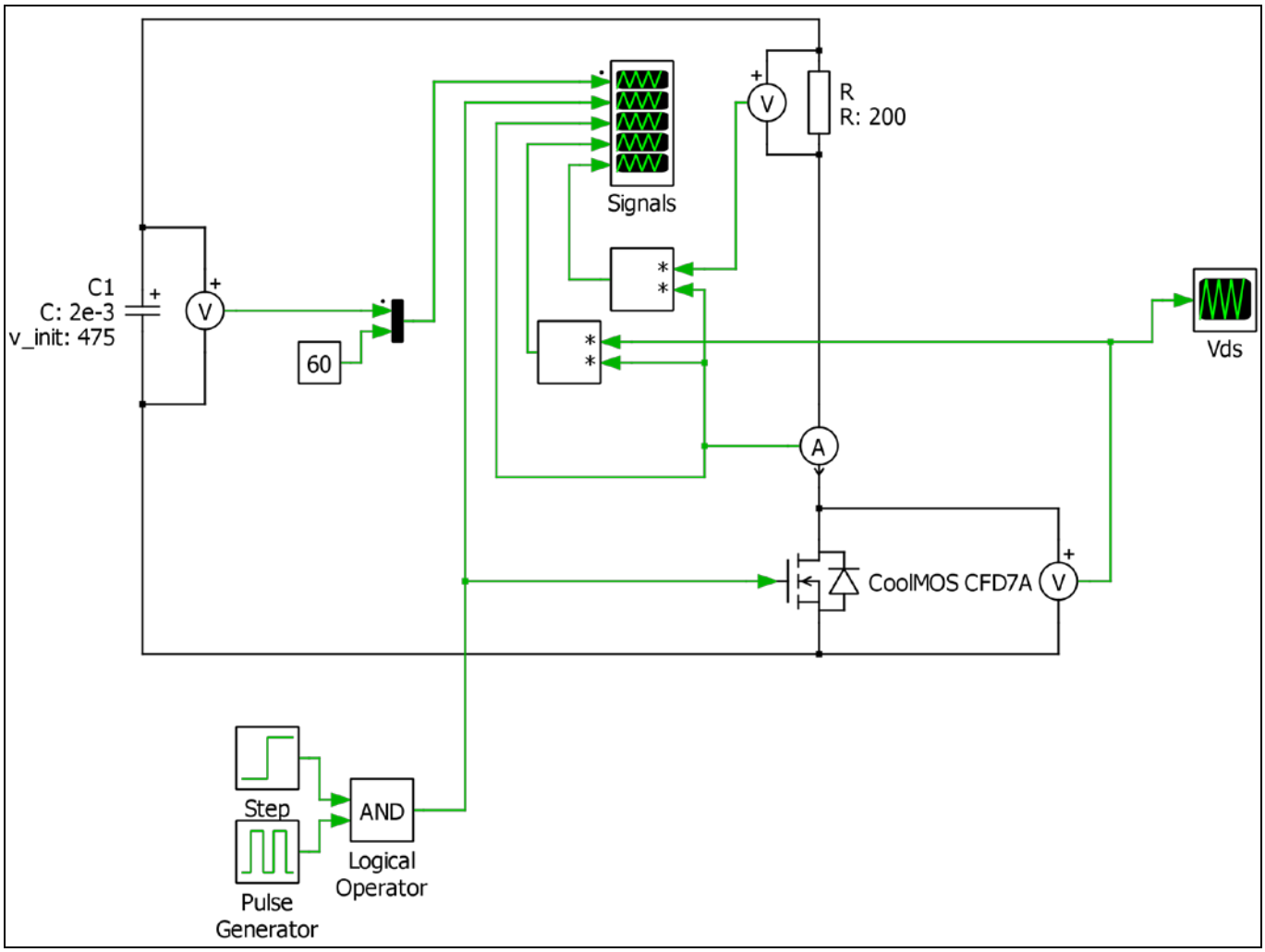


Figure 6　　PWM を使用して放電動作を制御する原理

このシナリオでは、ゲート信号のオン/オフレベルが適用されている間、スイッチングデバイスの実際の遷移が進行します。しきい値を超えるゲート駆動信号を受信すると、デバイスのインピーダンスは、オフ状態では最大値になり、オン状態では最小値になります。この方法では、スイッチングデバイスは遷移状態 (リニアモード) を短時間通過します。これにより、MOSFET での電力損失が大幅に低くなり、デバイスは DC リンクコンデンサから完全な電荷を消費できるようになります。この動作を十分な時間維持することにより、DC リンクコンデンサを非常に効果的に放電できます。

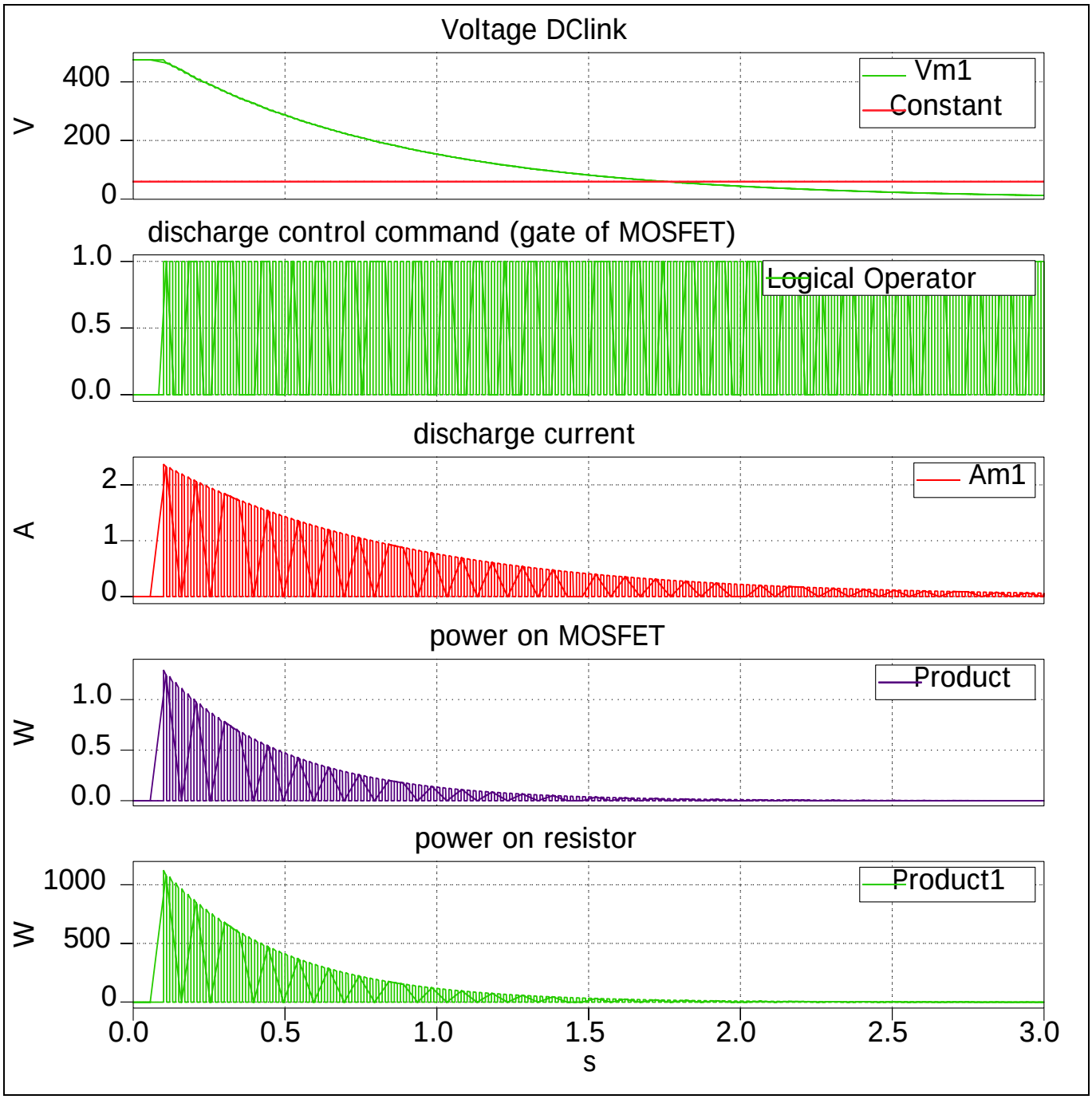


Figure 7 **PWM (D = 50 パーセント) によるアクティブ DC リンク放電は、抵抗器の平均電力に役立ちます**

5 結論

インフィニオンの最新の CoolMOS™第 7 世代は、最高効率が目標である SM 動作で使用した場合に、卓越したパフォーマンスと長期的な信頼性を提供します。この動作状態でのデバイスの限界を判断するには、個々のデータシートに記載されている SOA 図を参照してください。

自動車用アプリケーションの場合、リニアモードで自動車用 HV SJ MOSFET を使用することは推奨しません。ただし、ほとんどのリニアモードアプリケーションは、SJ MOSFET の使用方法を変更し、信頼性と安全性を高められます。4.1 章に、アクティブ DC リンク放電アプリケーションの例を示します。

6 参考文献

[1] CoolMOS™ IPB60R180P7 datasheet: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB60R180P7-DS-v02_01-EN.pdf?fileId=5546d4625ee5d4cd015f2a6b8e590481

[2] Infineon application note “Linear Mode Operation and Safe Operating Diagram of Power MOSFETs”: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_Linear_Mode_Operation_Safe_Operation_Diagram_MOSFETs-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e30e4bf013e3646e9381200

[3] P. Spirito et al., “Thermal Instabilities in High Current Power MOS Devices: Experimental Evidence, Electro-Thermal Simulations and Analytical Modelling”, MIEL 2002, 23rd International Conference on Microelectronics, Vol. 1, May 12–15, 2002, pp. 23–30.

[4] CoolMOS™ CFD7A series overview: https://www.infineon.com/cfd7a

[5] Infineon application note “Automotive MOSFETs in Linear Applications: Thermal Instability”: https://www.infineon.com/dgdl/AutomotiveMOSFETsinLinearApplication-ThermalInstability.pdf?fileId=db3a304412b407950112b4188af12622

改訂履歴

版数	発行日	変更内容
V 1.0	2023-02-07	本版は英語版 AN_2002_PL52_2005_172726 V1.0 について、インフィニオン DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

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

Edition 2023-02-07
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2023 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?
Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN_2002_PL52_2005_172726_JA

重要事項

本文書に記載された情報は、いかなる場合も、条件または特性の保証とみなされるものではありません（「品質の保証」）。本文に記された一切の事例、手引き、もしくは一般的価値、および／または本製品の用途に関する一切の情報に関し、インフィニオンテクノロジーズ（以下、「インフィニオン」）はここに、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。

さらに、本文書に記載された一切の情報は、お客様の用途におけるお客様の製品およびインフィニオン製品の一切の使用に関し、本文書に記載された義務ならびに一切の関連する法的要件、規範、および基準をお客様が遵守することを条件としています。

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。