

リニア・パワーMOSFETの基礎とアプリケーション
Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov (IXYS Corporation)
IXAN0068

電子負荷、リニア・レギュレータ、A級アンプなどのアプリケーションは、パワーMOSFETの線形領域で動作するため、高いワット損能力や広い順方向バイアス安全動作領域 (FBSOA) などの特性が必要です。このような動作モードは、スイッチモード・アプリケーションで「オンオフ・スイッチ」として動作する通常のパワーMOSFETの使い方とは異なります。リニアモードの場合、パワーMOSFETは、高いドレイン電圧と電流が同時に発生するために生ずる大きなワット損により、強い熱ストレスにさらされます。このような熱電気ストレスがある許容限界を超えると、シリコン内に熱ホット・スポットが発生し、デバイスが故障します [1]。

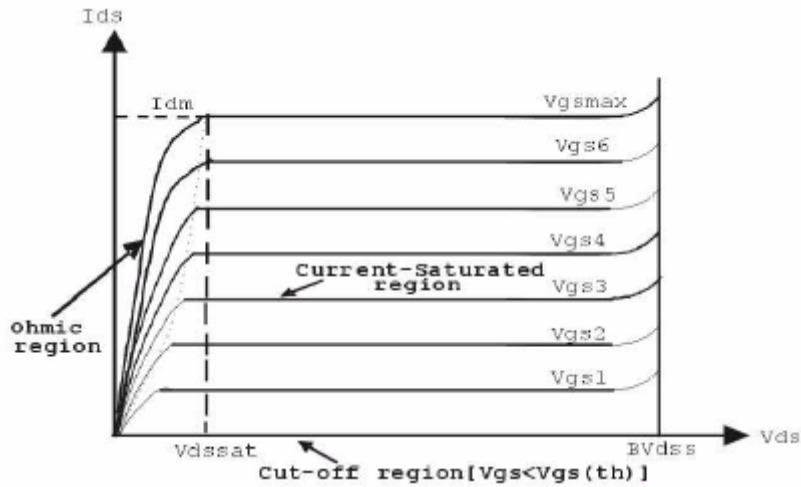


図1：Nチャンネル・パワーMOSFETの出力特性

図1は、Nチャンネル・パワーMOSFETの典型的な出力特性を示しています。図には、複数の動作モードが描かれています。カットオフ領域では、ゲート・ソース間電圧 (V_{gs}) がゲートしきい値電圧 ($V_{gs(th)}$) より低く、デバイスは開放、すなわちオフ状態にあります。オーミック領域では、デバイスは、ほとんど一定なオン抵抗 $R_{DS(on)}$ を持つ抵抗器として動作し、 V_{ds} / I_{ds} と等しくなります。リニアモードの場合、デバイスは、「電流飽和」領域で動作します。この領域では、ドレイン電流 (I_{ds}) は、ゲート・ソース間電圧 (V_{gs}) の関数となり、次のように定義されます。

$$I_{ds} = K \cdot (V_{gs} - V_{gs(th)})^2 = g_{fs} \cdot (V_{gs} - V_{gs(th)}) \quad \text{式 (1)}$$

ただし、 K は、温度と形状に依存するパラメータ、 g_{fs} は、電流増幅率または相互コンダクタンスです。ドレイン電圧 (V_{ds}) が増加すると、正のドレイン・ポテンシャルがゲート電圧バイアスに対抗し、チャンネルの表面ポテンシャルを減らします。チャンネル反転層の電荷は、 V_{ds} の増加とともに減少し、最終的にドレイン電圧が ($V_{gs} - V_{gs(th)}$) と等しくなるとゼロになります。この点は、「チャンネル・ピンチオフ点」と呼ばれ、ここでドレイン電流が飽和します [2]。

リニア・パワーMOSFETの基礎とアプリケーション
 Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov (IXYS Corporation)
 IXAN0068

FBSOAは、最大許容動作点を定義するデータシート示性値です。図2は、Nチャンネル・パワーMOSFETの典型的なFBSOA特性を示しています。この値は、最大ドレインソース間電圧 V_{DS} 、最大伝導電流 I_{DM} 、そしてパルス長に対して一定のワット損直線によって限界が定められます。この図で、複数の曲線は、DCラインと、10 ms、1 ms、100 μ s and 25 μ sの4つのシングル・パルス動作ラインを示しています。各ラインの頂点は、最大ドレイン電流を制限するために切り捨てられ、デバイスの $R_{ds(on)}$ によって定義される正のスロープ（斜線）によって限界が定められています。それぞれのラインの右側は、定格ドレインソース間電圧限界 (V_{dss}) の位置で終わっています。各ラインは、負のスロープで、その傾きは、デバイスの最大許容ワット損 P_d によって決まります。

$$P_d = [T_{J(max)} - T_C] / Z_{thJC} = V_{DS} I_D \quad \text{式 (2)}$$

ただし、 Z_{thJC} は、MOSFETの接合ケース間過渡熱インピーダンス、 $T_{J(max)}$ は、最大許容接合部温度です。

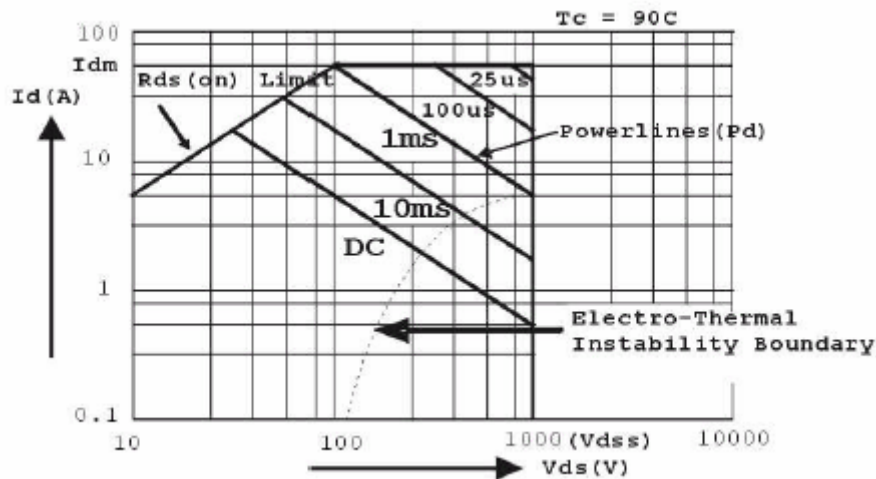


図2：Nチャンネル・パワーMOSFETの典型的なFBSOAグラフ

これらの理論的定電力曲線は、パワーMOSFETの接合部温度がダイに沿って基本的に均一であると仮定した計算により導かれています。この仮定は、特に大型ダイのMOSFETの場合、常に有効とは限りません。まず、パワー・パッケージの取り付けタブに半田付けされたMOSFETダイの縁（エッジ）は、横方向の熱流により、一般にダイの中央より温度が低くなります。第二に材料の欠陥（ダイの取り付け隙間、サーマル（熱）グリスの空隙、その他）により、熱伝導率の局所的な低下、すなわち局所的な温度上昇が起こります。第三にドーパント濃度、ゲート酸化膜の厚さ、固定電荷により、MOSFETセルの局所的しきい値電圧と電流増幅率 (g_{fs}) の変動が起こり、それがダイの局部温度に影響を与えます。ダイ温度のばらつきは、スイッチモード動作ではほとんど無害ですが、パルス長が接合からヒートシンクまでの熱伝導に必要な時間より長いようになりニアモード動作では、致命的故障を引き起こすことがあります。スイッチモード・アプリケーション用に最適化された最新のパワーMOSFETは、FBSOAグラフの右下コーナー、すなわち図2の電気熱的不安定境界の右側の領域における動作では、能力が制限されることがわかっています。

リニア・パワーMOSFETの基礎とアプリケーション
 Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov (IXYS Corporation)
 IXAN0068

電気熱的不安定 (ETI) は、リニアモード動作を強要されているパワーMOSFETの表面における次のようなポジティブ・フィードバック (正帰還) メカニズムによるものと考えられます。

- 接合部温度が局所的に上昇します。
 - これにより、 $V_{gs(th)}$ の局所的低下が起こります (MOSFETのしきい値電圧は負の温度係数を持っています)。
 - これにより、電流密度の局所的増加、 $J_{ds} \sim (V_{gs} - V_{gs(th)})^2$ が起こります。
 - 電流密度の局所的増加により、ワット損が局所的に上昇し、局所的温度がさらに上がります。
- 電力パルスの長さ、MOSFETセルの設計上の熱伝達条件および特徴によっては、ETIにより、すべてのMOSFET電流が電流フィラメントに集中し、「ホット・スポット」が形成されることがあります。通常、これにより、所定の領域のMOSFETセルのゲート制御が失われ、寄生バイポーラ接合トランジスタ (BJT) がオンになり、結果としてデバイスが破壊されます。

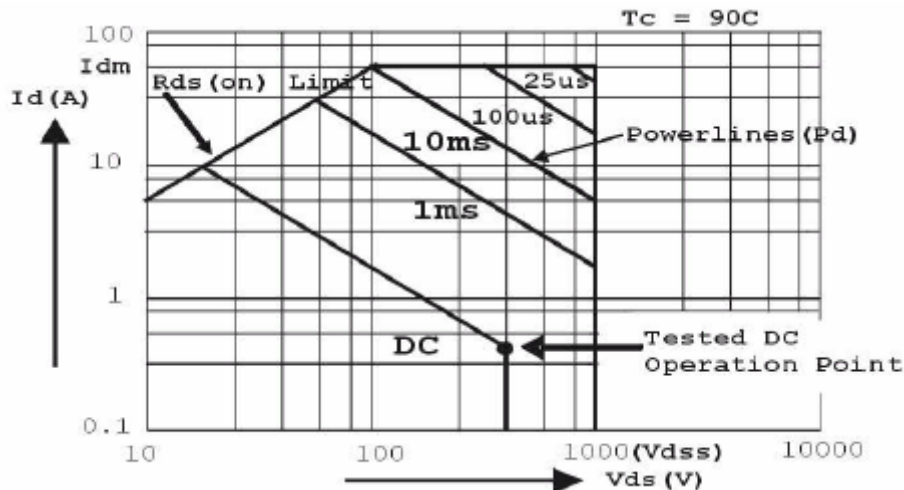


図3 : IXYSのリニア・パワーMOSFET IXTK 22N100LのFBSOAグラフ

IXYS社は、電気熱的不安定 (ETI) のポジティブ・フィードバックを抑制することにより、FBSOAを拡大したパワーMOSFET構造およびプロセスを開発しました。これらの新しいMOSFETの設計では、トランジスタ・セルの分布が不均一になっているとともに、各セルのしきい値電圧が異なります [3]。個々のトランジスタ・セルには、ソースに電流を制限するための安定抵抗が接続されています [4]。

リニア・パワーMOSFETの基礎とアプリケーション
 Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov (IXYS Corporation)
IXAN0068

各セルの寄生BJTは、嚴重にバイパスされているため、極端な電氣的ストレス条件の下でもオンになりません。また、半田空隙がないことを確認するため、それぞれのパワーMOSFETについて、熱応答がテストされます。このようにして、IXYSは、リニアモードにおける信頼性の高い動作に適した拡張FBSOAのパワーMOSFETファミリを現在提供しています。これらのMOSFETのデータシートは、保証済みのFBSOAグラフを含んでいます。たとえば、図3は、テスト済みの直流動作点が表示されたIXYSリニア・パワーMOSFET IXTK22N100LのFBSOAグラフを示しています。現在入手可能な拡張FBSOAを持つパワーMOSFETの一覧を表1に示します。

表1：IXYS製の拡張FBSOAのNチャンネル・パワーMOSFET

Part No	V _{ds} (V)	I _d (A)	R _{thJC} °C/W	The SOA Specification Power (W), T _c = 90 °C	Package Type
IXTH24N50L	500	24	0.31	200 @ V _{ds} = 400V, I _d = 0.5A	TO-247
ICTX46N50L	500	46	0.18	240 @ V _{ds} = 400V, I _d = 0.6A	PLUS247
IXTN46N50L	500	46	0.18	240 @ V _{ds} = 400V, I _d = 0.6A	SOT-227B
IXTK46N50L	500	46	0.18	240 @ V _{ds} = 400V, I _d = 0.6A	TO-264
IXTN62N50L	500	62	0.156	300 @ V _{ds} = 400V, I _d = 0.75A	SOT-227B
IXTB62N50L	500	62	0.156	300 @ V _{ds} = 400V, I _d = 0.75A	PLUS264
IXTH12N100L	1000	12	0.31	200 @ V _{ds} = 600V, I _d = 0.25A	TO-247
ICTX22N100L	1000	24	0.18	240 @ V _{ds} = 800V, I _d = 0.3A	PLUS247
IXTN22N100L	1000	24	0.18	240 @ V _{ds} = 800V, I _d = 0.3A	SOT-227B
IXTK22N100L	1000	24	0.18	240 @ V _{ds} = 800V, I _d = 0.3A	TO-264
IXTN30N100L	1000	30	0.156	300 @ V _{ds} = 600V, I _d = 0.5A	SOT-227B
IXTB30N100L	1000	30	0.156	300 @ V _{ds} = 600V, I _d = 0.5A	PLUS264

式(2)に基づき、電圧定格が1000VのIXTK22N100LなどのようなパワーMOSFETは、単一で700Wの定格を持っています。通常、この電力定格は、リニア・アプリケーションではなく、スイッチモード動作の回路設計で使用されます。IXYSでは、リニア動作のために、安全動作領域 (SOA) 定格を用意しています。これは、たとえば、IXTK22N100Lの場合、V_{DS} = 800V、I_D = 0.3A、TC = 90°Cのときに240Wというように、厳密な直流動作条件の下で与えられます。

アプリケーション例

能動負荷

並列動作する複数のパワーMOSFETからなる能動負荷（アクティブ・ロード）を使ってテストを行う必要がある2A/600V安定化電源について考えてみます。このアプリケーションでは、パワーMOSFETの定格は、 BV_{DSS} が1000Vで、最大出力電力に過電流保護も含む安全マージンを加えたワット損に耐えられる必要があります。

IXTK22N100LパワーMOSFETは、電圧定格が1000Vで、スイッチモード動作で使用した場合のワット損は700Wです。しかし、リニア・アプリケーションにおける熱限界を計算する際、この電力定格は使用できません。その場合、 $V_{DS} = 800V$ 、 $I_D = 0.3A$ 、 $TC = 90^{\circ}C$ において240WのSOA定格を使用しなければなりません。20%の安全マージンを仮定すると、許容ワット損は192Wまで下がります。

電源の最大出力電力は1200Wです。過電流保護を考慮して、電力にさらに20%の安全マージンを仮定すると、複数のMOSFETで1440Wを消費しなければなりません。したがって、すでにわかるように、単一のMOSFETでは全電力を消費することはできません。全電力に対応するには、複数のパワーMOSFETを並列に接続した負荷バンクが必要です。このアプリケーションで並列接続に必要なMOSFETの数は、 $1440/192 = 8$ 個です。負荷回路の典型的な仕組みを図4に示します。

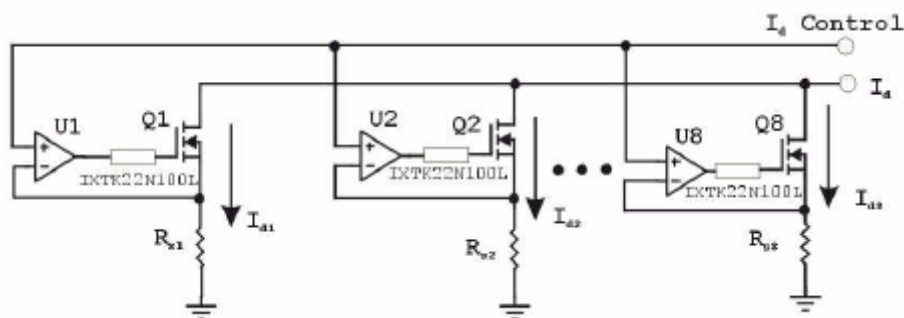


図4：2A/600V安定化電源テスト用の能動負荷

ソースまたはセンス抵抗器 (R_{s1} - R_{s8}) は、各MOSFETのドレイン電流を監視します。抵抗の許容差により、パワーMOSFET間の相対的マッチングが決まります。センス抵抗両端の電圧は、MOSFETを駆動する各オペアンプの反転入力に印加されます。非反転入力、制御ドレイン電流と接続されています [1]。

リニア・パワーMOSFETの基礎とアプリケーション
Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov (IXYS Corporation)
IXAN0068

モーター制御

図5は、同じヒートシンク上で並列接続された2つのパワーMOSFETと直列につながれたモーターを電池で駆動するモーター制御回路を示しています。

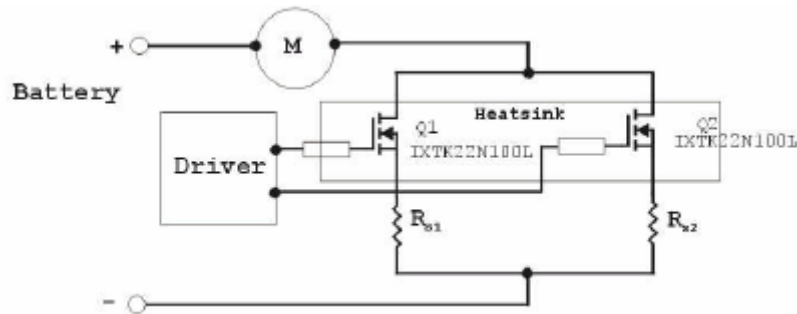


図5：リニア・モーター制御回路

リニアモードで動作するパワーMOSFETのドレイン電流は、ゲート ソース間電圧によって決まります。モーター端子両端の電圧は、バッテリーとドレイン ソース間電圧との差です。このような制御は、MOSFET内を流れる電流をチェックし、正しいゲート ソース間電圧を確立するゲート・ドライバによって実現されます。

リニア・レギュレータ

図6は、パス・トランジスタを通じた電圧降下を制御することによって出力を安定化している基本的リニア・レギュレータを示しています。パス・トランジスタは、リニア領域にバイアスされており、可変抵抗として動作します。このトランジスタは、大きなワット損と広いIFBSOAを必要とします。表1に示すNチャンネル・パワーMOSFETは、高ワット損要件を満足するパス・トランジスタとして選択できます。

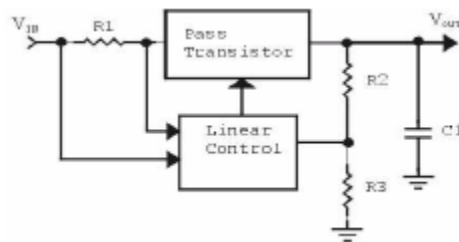


図6：リニア・レギュレータの基本回路要素