

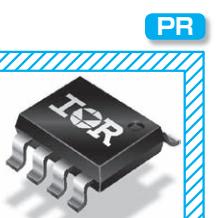
# こうして使おうパワーデバイス

## 目次

1. MOSFET の原理と使い方	page 2
2. MOSFET の賢い選び方	page 3
3. IGBT の原理と使い方	page 4
4. IGBT の賢い選び方	page 5
5. HVIC の選び方と使い方	page 6
6. POL 電源に最適な DC-DC ソリューション	page 7
7. AC-DC ソリューションを構成する三つのコントローラ	page 8
8. 高効率、低歪み、使いやすさの進化が進む D 級アンプ	page 9
9. 最新モータ向けに進化するモータ・アプリケーション	page 10
10. IPS と車載デバイス	page 11
11. IR の MOSFET 開発の変遷	page 12
12. エアコンとモータ制御	page 13
13. HVIC の構造と使い方の注意点	page 14
14. 高性能プロセッサ向け電源技術 デジタル・コントローラ	page 15
15. 高性能プロセッサ向け電源技術、マルチフェーズ	page 16
16. 時代とともに大きく変わってきたパッケージ技術	page 17
17. モータ駆動アプリケーションを簡単にする IPM	page 18
18. Buck コンバータのフィードバック技術	page 19
19. 高効率モータ制御をトータルに実現する iMOTION™	page 20

## こうして使おうパワー・デバイス

# 第1回 MOSFETの原理と使い方



PR

MOSFETは、ゲートに加える電圧でドレイン-ソース間の電流を制御するデバイスです。駆動用の定常電流が非常に低く、オフ漏れ電流が小さく、オン抵抗が低く、スイッチングも高速という点で、理想に近いスイッチと言えるでしょう。今回はこのMOSFETについて、原理や種類、選び方や使い方のポイントをご紹介します。

### MOSFETの原理と種類

MOSFETは、電流経路(チャネル)となる半導体と、絶縁されたゲート電極をもちます。ゲート電圧を加えない状態ではオフで、ゲート電圧を加えるとチャネル部分にキャリアを集めてオンになるデバイスです。このタイプをエンハンスマント型と呼びます。

逆に、ゲート電圧を加えない状態ではオンで、電圧を加えるとオフになるというディップリーション型もありますが、製品は少数です。

ゲート電極(Metal)、酸化物による絶縁層(Oxide)、チャネルとなる半導体(Semiconductor)の3層構造という特徴から、MOSという呼び名が生まれたことは有名です。ただし、昔はゲート電極にアルミなどの金属を使っていましたが、最近はポリシリコン電極が使われているので、語源通りの“MOS”とはちょっと構造が変わっています。

チャネル部分の半導体の極性によって、nチャネル(電子が多数キャリア)とpチャネル(正孔が多数キャリア)に分類されます。ただし、正孔は電子よりも移動度が低く、nチャネルと同等のpチャネルMOSFETを作ろうとするとチップサイズが大きく、コストが高くなってしまいます。そのため、pチャネルMOSFETの製品は少数です。

なお、エンハンスマント型の場合は、ゲート電圧を加えないときのチャネル部分は逆極性(nチャネルならばp型、pチャネルならばn型)の半導体で、電流が流れるのを阻止しています。ゲート電圧を加えることによってチャネル部分の極性が反転し、電流が流れようになります。

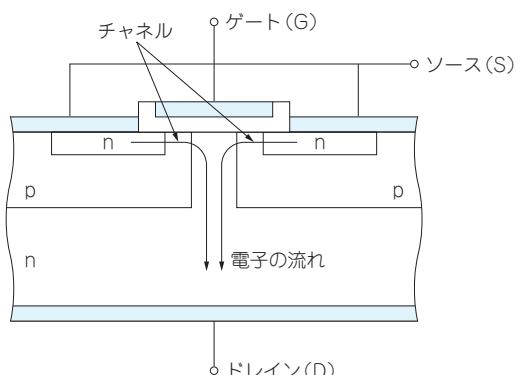


図1 縦型MOSFET

### 耐圧とオン抵抗、スイッチング速度のトレードオフ

MOSFETは、バイポーラ・トランジスタなど他のパワー素子に比べて低損失で高速という特徴をもちますが、そのかわり耐圧は数V～1200V程度とやや低くなっています。

これは、MOSFETでは耐圧を高めるほどオン抵抗が高くなる性質があるためです。それ以上の耐圧のものを作ろうとしても、他のデバイスに比べて利点が少なくなってしまいます。耐圧が数100V以上の用途では、MOSFETの他にIGBTなどのデバイスも広く用いられています。

また、スイッチング速度とオン抵抗の関係も同様で、高速にするほどオン抵抗が高くなってしまいます。

そのため、多くのMOSFET製品では、低耐圧で低オン抵抗を追及した製品、低耐圧で高速性を追及した製品、高耐圧でオン抵抗や速度はほどほどの製品というように作り分けられています。必要以上に耐圧が高い製品を選ぶと、損失が増えてしまったり、十分なスイッチング速度が得られない場合もあるので注意が必要です。

耐圧が数100Vになると、MOSFETと並んでIGBTが一般的になってきます。IGBTはMOSFETと同様に絶縁されたゲート電極をもち、ゲート電圧でオン、

オフを制御するデバイスです。MOSFETよりも高耐圧、大電流に適しています。スイッチングはMOSFETより低速ですが、バイポーラ・トランジスタよりは高速です。

### MOSFETとHVIC

MOSFETの中では、nチャネルかpチャネルかという選択もあります。原理的に、特性とコストではnチャネルの方が優れていますが、回路構成上はpチャネルが便利な場合もあります。

低電圧側のラインを断続するローサイド・スイッチには、nチャネルMOSFETのソースを接地して使用すれば簡単です。一方、高電圧側のラインを断続するハイサイド・スイッチでは、pチャネルMOSFETのソースを高電圧側に接続して、それより低い電圧でゲートを制御するのが最も簡単です。

ハイサイド・スイッチをnチャネルで構成すると、高電圧側よりも高いゲート電圧を供給するために、ゲート駆動回路が複雑になってしまいます。Hブリッジ回路をnチャネルだけで構成する場合も同様です。

このような用途では、安価で高性能なnチャネルMOSFETと必要なゲート駆動回路を統合して簡単に使えるHVICを活用すれば、コストと性能を満足できます(図2参照)。また、ゲート駆動回路だけのICもいろいろ製品化されています。

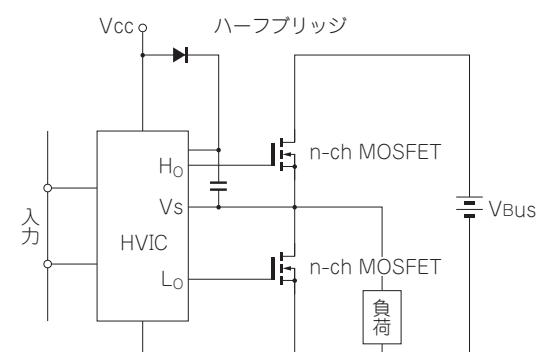


図2 HVICを使用してnチャネルMOSFETだけで構成した例

### MOSFETの高性能化と今後の展開

ロジック素子としてのMOSFETは、LSIプロセスの微細化とともに性能が進化してきました。パワーMOSFETの場合、微細化による進化に加えて、トレンチゲート、SJ(スーパージャンクション)などの新しい構造が登場して、低損失化、高速化などの進化が実現されてきました。

今後は、シリコンウェーハの薄型化、パッケージ構造の改良、GaNやSiCなど新しい半導体材料の採用によって、パワー素子としてのMOSFETはさらに進化を続けていくと考えられています。

▶この記事の詳細はIRジャパンホームページ  
<http://www.irf-japan.com>へ

### 超低オン抵抗のパワーMOSFET

#### 特徴

- 非常に低いオン抵抗
- 定格電流が大きい
- バッテリ・パック、インバータ、UPS、DCモータなど用途に合わせ多様なパッケージを用意

製品ラインナップは <http://www.irf-japan.com/Ad/StrongIRFET.html>へ



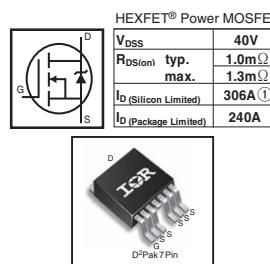
## こうして使おうパワー・デバイス

# 第2回 MOSFETの賢い選び方



PR

MOSFETを使用する場合は、用途に応じて適切な定格、特性をもつ品種を選択しなければなりません。通常はデータシートのデータを参照して選びますが、たくさんある項目のどこに注目すれば良いか最初は分かりにくいものです。今回は、特に重要な項目を中心として、MOSFETのデータの見方、賢い選び方をご紹介します。



重要なパラメータ値はデータシートの右上にまとめてあります。

Symbol	Parameter	Max.	Units
$I_D$ @ $T_c = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} = 10\text{V}$ (Silicon Limited)	306①	A
$I_D$ @ $T_c = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} = 10\text{V}$ (Silicon Limited)	216①	A
$I_D$ @ $T_c = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} = 10\text{V}$ (Package Limited)	240	A
$I_{DM}$	Pulse Drain Current ②	1040	A
$P_{DQ}$ @ $T_c = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	231	W
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$ (thermally limited)	Single Pulse Avalanche Energy ③	344	mJ
$E_{AS}$ (tested)	Single Pulse Avalanche Energy Tested Value ④	508	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current ⑤	See Fig. 14, 15, 24a, 24b	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy ⑥	$mJ$	
$T_J$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
$T_{STG}$	Soldering Temperature, for 10 seconds (1.6mm from case)	300	°C

絶対最大定格  
アバランシェ耐量の仕様

図1 データシートの一部分

### 耐圧とオン抵抗に注目する

MOSFETの選択で最も重要な項目は、ドレイン-ソース間耐圧  $V_{DSS}$  の絶対最大定格です。ここに定格以上の電圧が加わると、ブレークダウン領域に入ってMOSFETが故障する危険があります。

他の素子では、素子の耐圧は実際の使用電圧に対して十分な余裕をもたせて、高めに選ぶことが推奨されます。ところが、MOSFETは耐圧が高いほどオン抵抗  $R_{DS(on)}$  が高くなる傾向があるので、安易に高耐圧の

品種を選んではいけません。

ドレイン-ソース間に加わる電圧がほぼ一定の場合はそれに対する余裕をもたせて選べばよいのですが、大きなサージを生じる場合が問題です。サージのピーク値に合わせて耐圧を選ぶと、定常電圧の数倍かそれ以上の耐圧が必要で、その分オン抵抗も大きくなってしまうためです。

MOSFETに過電圧が加わったとき、素子内部を流れるリーク電流が、電界の影響で急激に増大して故障に至ります(アバランシェ電流)。同じ耐圧のMOSFETでもアバランシェ電流やアバランシェ・エネルギーに対する耐量には違いがあり、耐量保証製品も作られています。サージが大きい用途では、高アバランシェ耐量の品種を選べば、より低耐圧で低オン抵抗のMOSFETを選択できます。

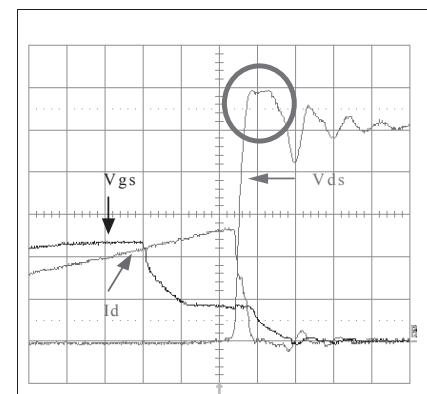


図2 フライバック・コンバータ回路でのアバランシェ波形

一方、ドレイン電流  $I_D$  の上限は一般にオン抵抗から決まります。MOSFETはオン時には単なる抵抗と見なせるので、 $I_D^2 \times R_{DS(on)}$  によって求めた損失が許容損失より小さく、かつ発熱による温度上昇が動作温度範囲を超えないように、オン抵抗の小さい品種を選びます。

ただし、一つ注意すべき点があります。最近のMOSFETはオン抵抗がきわめて小さくなり、シリコ

ン・チップに流せる電流は大きくなっています。そのため、デバイス全体でのオン抵抗がパッケージの配線抵抗で決まることが多くなっています。同じ型名でも、パッケージによるオン抵抗や電流容量の違いに注意が必要です。

なお、パッケージによる違いとしては、他に放熱性能(熱抵抗)や許容損失にも注意が必要です。最近は、これらの特性を改善した新しい高性能のパッケージが増えています。

### スレッシュホールド電圧にも注意が必要

一般的なMOSFET(エンハンスマント型nチャネルMOSFET)は、ゲート電圧  $V_{GS}$  がスレッシュホールド電圧(しきい値電圧)  $V_{GS(th)}$  より高ければオンになります。ただし、スレッシュホールド電圧付近ではオフからオンに徐々に遷移し、十分に低オン抵抗になりません。

オン抵抗を十分低くするにはゲート電圧をスレッシュホールド電圧に対して十分高くする必要があります。通常はオン抵抗の項目に動作条件としてゲート電圧の値が記載されています。

一般的のMOSFETでは、ゲート電圧は10Vが標準的です。この場合、ゲート-ソース間の耐圧の範囲であれば、10Vより高い電圧で駆動するのは問題ありません。

MOSFETをロジック電圧で直接駆動したい場合は、ロジック・レベル駆動タイプ(低スレッシュホールド電圧タイプ)の品種を選びます。5Vロジック向けの4V駆動、3~3.3Vロジック向けの2.7V駆動、さらに低電圧で駆動できる1.5V駆動などの品種があります。

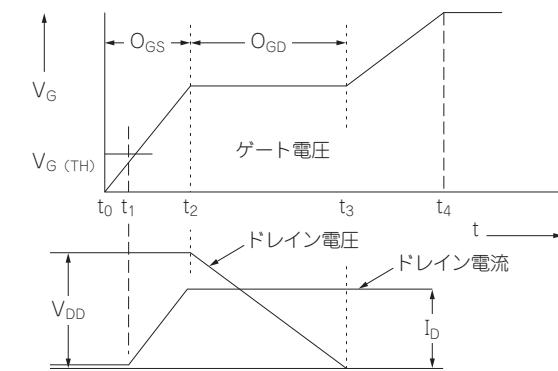


図3 ゲート電圧とドレイン電流/電圧の特性

### スイッチング速度はゲート電荷 $Q_G$ を見る

MOSFETは電圧制御型のデバイスで、ゲートを電流駆動する必要はありません。ただし、スイッチング時には過渡的にわずかな電荷  $Q_G$  が移動します。MOSFETのスイッチング速度は、このゲート電荷  $Q_G$  と、ゲート駆動回路の電流駆動能力で決まります。

ゲート電荷の移動は、ゲートの静電容量を充電、放電していると考えられます。以前はゲート容量  $C_{iss}$ (または  $C_{GD}$ ,  $C_{GS}$ )を用いてスイッチング速度を評価することも多かったのですが、ゲート電荷を用いる方が適切にスイッチング速度を見積もることができます。

ただし、MOSFETの速度とオン抵抗は一般にトレードオフの関係があり、高速になるほどオン抵抗が高くなる傾向があるので、安易に高速の品種を選ぶべきではありません。

▶この記事の詳細はIRジャパンホームページ  
<http://www.irf-japan.com>へ

### 同期整流DC-DCコンバータ向けパワーMOSFET

#### 特徴

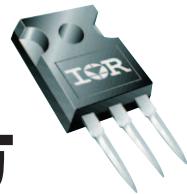
- 最新世代のシリコンを採用しベンチマークとなる電力密度を実現
- オン抵抗が低い(IRFH4201の場合  $0.7\text{m}\Omega$ )
- サーバー、パソコンなど同期整流バック型DC-DCコンバータ向け

製品詳細は <http://www.irf-japan.com/Ad/FastIRFET.html> へ



## こうして使おうパワー・デバイス

# 第3回 IGBTの原理と使い方



IGBTは、ゲートに加える電圧で制御するところはMOSFETと同じで、電流がp型半導体とn型半導体の両方向を流れるところはバイポーラ・トランジスタと同じです。そこから、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)という名称が付けられています。今回はこのIGBTについて、原理と使い方のポイントをご紹介します。

### IGBTの原理と構造

IGBTは、パワー・スイッチング素子として最も広く使われているエンハンスマント型nチャネルMOSFETのドレイン(n型)に、さらにp型層を追加した構造となっています。

MOS構造の絶縁ゲートをもつ点はMOSFETと共通で、一般的なMOSFETと同様の製造プロセスで容易に製造できます。使い方も基本的にMOSFETと同様ですが、特性に違いがあります。

MOSFETの場合、ドレインとソースの間に逆方向の寄生ダイオード(ボディ・ダイオード)ができます。IGBTはその逆方向ダイオードにp型層を追加してpnpトランジスタを形成したものと言えます。全体として見ると、IGBTはnチャネルMOSFETでpnpトランジスタを駆動するダーリントン接続の一型と考えられます。

IGBTでは、MOSFETのゲートをそのままゲートと呼び、ソースをエミッタ、追加したp型層をコレクタ

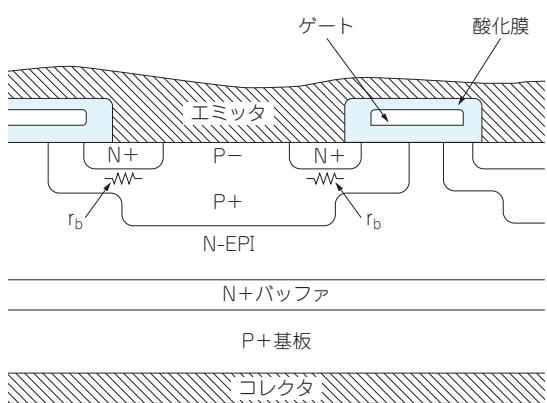


図1 IGBTの構造

タと呼んでいます。エミッタを接地してゲートに正電圧を加えれば、MOSFETが導通してpnpトランジスタを駆動し、コレクタ-エミッタ間に大きなオン電流(コレクタ電流)を流すことができます。

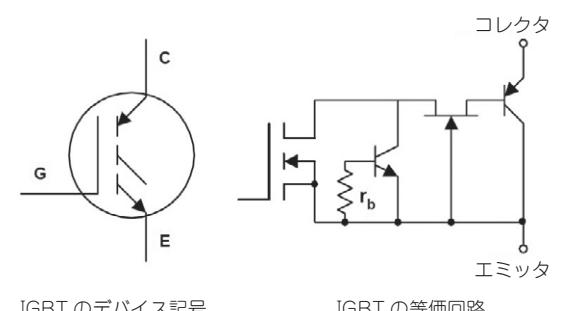


図2 IGBTのデバイス記号と等価回路

### IGBTの特長と、MOSFETとの使い分け

IGBTとMOSFETの特性の主な違いは、オン時の電圧降下とスイッチング速度です。

MOSFETは、多数キャリア(nチャネルなら自由電子)だけで動作するデバイスです。キャリアの蓄積がないのでスイッチング速度が速く、安全動作領域が広いなど優れた特長をもっています。オン時には抵抗とみなせるので、ドレイン電流に比例してドレイン-ソース間に電圧降下を生じ、それによって損失を生じます。このオン抵抗は、デバイスの耐圧に依存し、低耐圧なら低オン抵抗、低損失にできますが、高耐圧になるほどオン抵抗が高くなります。

IGBTは、バイポーラ・トランジスタと同様に少数キャリアが伝導に関与します。スイッチング速度は

MOSFETほど高速ではありませんが、バイポーラ・トランジスタより高速です。初期のスイッチング速度は1kHz程度でしたが、高速(1~8kHz)、超高速(8~30kHz)、ワープ速度(30~150kHz)などの製品が作られてきました。

伝導率変調によってオン抵抗が低く、電流密度を高くできます。コレクタ-エミッタ間にはほぼ一定の電圧降下が生じるので、大電流になるほどMOSFETよりも低損失にできます。

IGBTは電流密度を高くできることから、ダイ・サイズも一般に小型です。逆方向ダイオードが必要な用途ではIGBTと高速ダイオードを組み合わせて用いますが、ダイオードの分を合わせても十分に小型にできます。

また、高耐圧のデバイスはMOSFETより電圧降下が小さく、低損失にできます。一般に、耐圧300V程度を境にして、それより高耐圧側ではIGBTが有利、低耐圧側ではMOSFETが有利と言われています。

このような特長から、IGBTとMOSFETはパワー・デバイスとして競合というより補完関係にあり、高耐圧で低速の用途にはIGBT、低耐圧や高速の用途にはMOSFETというように使い分けられています。

### IGBTの用途と使い方

IGBTは600V、1200Vなどの高耐圧の製品が多く、家電機器や産業用機器のモータ制御、IH調理器、電子レンジ、ストロボ、スイッチング電源、UPS、EV/HEVなどに使用されています。

モータなどの誘導負荷の駆動では逆方向ダイオードが必要ですが、IGBTはMOSFETと違って寄生ダイオードをもたないため、外付けダイオードが必要になります。そのため、IGBTと高速ダイオードを1パッケージにしたモジュール製品が作られています。また、IGBTはブリッジ回路で使用することが多いため、2個入り(ハーフ・ブリッジ)や6個入り(三相ブリッジ)などのモジュール製品も作られています。この場合も、高速ダイオードを内蔵した製品があります。

▶この記事の詳細はIRジャパンホームページ <http://www.irf-japan.com>へ

ブリッジ回路の場合、ハイサイド側のエミッタ電圧はオフ時にはほぼ0V、オン時にはほぼ電源電圧V<sub>CC</sub>に変化します。IGBTをオンに保つにはゲート電圧をV<sub>CC</sub>より約15V高くすることが必要で、1チップで高耐圧のゲート・ドライバICが作られています。

さらに、特定用途向けに最適化したIGBTとゲート・ドライバIC、保護回路などを組み合せたIPM(インテリジェント・パワー・モジュール)製品がいろいろ作られています。家電機器をはじめとして、各種機器の小型化、低コスト化に便利です。

### IGBTの高性能化と今後の展開

IGBTは、基本原理は変わっていませんが、初期のパンチスルーパー(PT)型からノン・パンチスルーナ(PT)型、フィールド・ストップ型など構造の改良が続けられており、またゲート構造でもプレーナ型とトレンチ型の違いがあります。それによって、コスト、素子サイズ、各種の特性に大きな違いを生じています。スイッチング速度の改良も進んでおり、高耐圧かつ高速の用途でもMOSFETとも競合しています。

PTプレーナ型は現行のIGBT製品では最も基本的なもので、IR社では第4世代と呼んでいます。コスト効率が良く特性の自由度が高い利点をもち、さまざまな耐圧や特性の製品が作られています。

NPTプレーナ型は第5世代と呼ばれており、高耐圧で高速の製品に適しています。

フィールド・ストップ・トレンチ型はフィールド・ストップ層を設けてベースを薄型化し、埋め込み構造のトレンチ・ゲートを採用したもので、第6世代と呼ばれています。600V品で低損失と高速を両立した製品に適しています。

最新の第7と第8世代は1200V耐圧のフィールド・ストップ・トレンチ型の改良版を採用しています。

IGBTに要求される特性は、用途によってかなり異なるので、それぞれ必要な特性をおさえたうえで、最適なIGBTを選択することが必要でしょう。

## こうして使おうパワー・デバイス

# 第4回 IGBT の賢い選び方



IGBTはMOSFETと並ぶ代表的なパワー・デバイスとして用いられていますが、MOSFETとは動作原理が異なり、データシートの見方にも大きな違いがあります。今回は、IGBTの品種を選択するときにポイントとなる定格や特性を中心として、IGBTのデータの見方、賢い選び方を紹介します。

### IGBTの耐圧とブレークダウン

一般に、パワー・デバイスの選択では耐圧、負荷電流、スイッチング特性を見ていくことになりますが、そのいずれについてもIGBTはMOSFETと違いがあります。

耐圧については、高耐圧向きのIGBT、低耐圧向きのMOSFETという傾向があります。製品でも、IGBTは600V、1200Vなどの高耐圧品が主です。MOSFETにも高耐圧品はありますが、12～300Vぐらいの低耐圧品が数多く製品化されています。

MOSFETは耐圧を上げようするとオン抵抗が高くなり、損失が大きくなります。IGBTはコレクターエミッタ間耐圧 $V_{CES}$ を高くしても伝導率変調によってオン抵抗が下がるので、高耐圧で低損失にできます。そのかわり、コレクターエミッタ間飽和電圧 $V_{CE(on)}$ 分の損失があるため、低耐圧ではMOSFETほど低損失にできません。

耐圧を超える電圧を加えると、リーク電流が増加してブレークダウンを生じる危険があります。IGBTでは、電気的特性としてコレクターエミッタ間ブレークダウン電圧 $BV_{CES}$ が規定されています。MOSFETは短時間のサージでリーク電流が小さければブレークダウンしないアバランシェ耐量をもちますが、IGBTはアバランシェ耐量が低いので、短時間でも耐圧を超えないように注意が必要です。

また、IGBTの $BV_{CES}$ の値は25℃で定義されていて、正の温度係数をもちます。高温時には $BV_{CES}$ が高くな

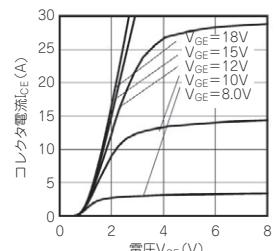


図1 IGBTの電流-電圧特性図 ( $T_j=25^\circ\text{C}$ ,  $t_p=80\ \mu\text{s}$ )

るので安全側ですが、低温時には $BV_{CES}$ が低くなります。

### IGBTの電流定格

IGBTでもMOSFETでも、オン電流が大きいほど損失が増加し、発熱が大きくなります。どれぐらいのオン電流を流せるかはデバイス内部の接合温度で決まりますが、同じデバイスでもオン電流を連続して流すか間欠的に流すかによって発生する損失は変わります。また、損失が同じでも、温度環境やパッケージの熱抵抗によって接合温度は変わります。

IGBTでは連続コレクタ電流 $I_C$ 、パルス・コレクタ電流 $I_{CM}$ の絶対最大定格が規定されていますが、これらは特定の条件における値であり、いつもそれだけの電流が流せるわけではありません。実際には、熱抵抗 $\theta_{j-c}$ と最大接合温度 $T_j$ 、動作時のケース温度 $T_c$ から許容される最大電流を計算します。

$T_c$ が高いほど最大電流は小さくなります。データシートに $I_C @ T_c = 25^\circ\text{C}$ と $I_C @ T_c = 100^\circ\text{C}$ の2種類の定格値が記載されている場合、 $T_c = 100^\circ\text{C}$ の方が実使用に近いと考えられます。

なお、連続コレクタ電流の許容値はIGBTのスイッチング損失や逆方向ダイオードの損失を考慮していないので、これらが大きくなるような用途では注意が必要です。

### IGBTのオン特性と短絡耐量

IGBTは、オン時にはバイポーラ・トランジスタと同様にコレクターエミッタ間飽和電圧 $V_{CE(on)}$ 分の電圧降下を生じるので、負荷電流(コレクタ電流 $I_C$ )が小さいときはMOSFETよりも損失が大きくなります。一方、オン抵抗が低く電流ドライブ能力が高いという特長をもち、負荷電流が大きくなても損失はそれほど増えません。IGBTは高耐圧向きであるとともに、大電流向きのデバイスと言えます。

ただし、最近では機器の省エネ化のために、通常時

はなるべく小電流で運転して、必要なときに短時間だけ大電流を流すアプリケーションも増えてきました。IGBTはピーク電流時の損失を低くできますが、省エネ運転時にはMOSFETより損失が高くなり、トータルでは不利になる場合もあります。

IGBTは短絡耐量にも注意が必要です。出力側で短絡事故が発生した場合、一般に負荷や電源を保護するための遮断回路が働きます。IGBTはオン抵抗が低いため、遮断が働くまでの短時間でも過大電流が流れでIGBTが壊れてしまう危険があります。そこで、IGBTでは短絡耐量時間 $t_{SC}$ を規定しているものがあります。短絡耐量を高くすると損失も増加するので、一般には $t_{SC}$ は最大でも $10\ \mu\text{s}$ 程度です。

産業用インバータなど汎用に使用される装置では高い短絡耐量が必要ですが、負荷回路を専用設計できる家電機器などでは $t_{SC}$ を短くできます。誘導負荷ではインダクタンスが短絡時の突入電流を抑えるので、短絡耐量なしのIGBTが使用できる場合もあります。

IGBTを駆動するゲート電圧 $V_{GE}$ は通常15V程度で、MOSFET(通常10V)より高めです。 $V_{GE}$ が低いと十分なオン電流が得られず、 $V_{CE(on)}$ も高くなってしまいます。

ただし、 $V_{GE}$ が高すぎると負荷短絡耐量が低下してしまいます。また、コレクターエミッタ間が高耐圧のデバイスでも、ゲート-エミッタ間の耐圧 $V_{GE}$ は±20V程度と低いので、過大な $V_{GE}$ が加わらないようにする必要があります。

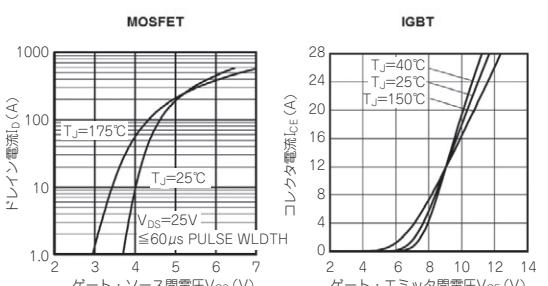


図2 IGBTとMOSFETのゲート電圧と電流の違い

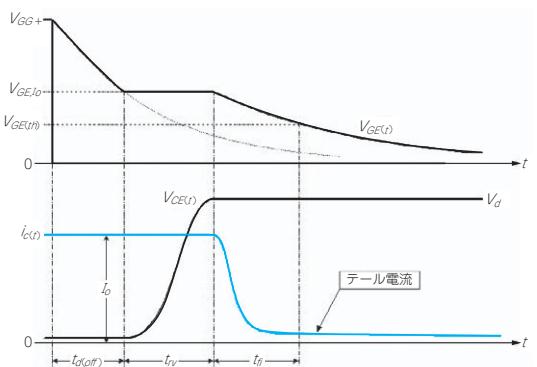
### スイッチング損失とテール電流

IGBTはスイッチング速度がMOSFETよりやや遅いことからスイッチング損失に注意が必要です。

MOSFETのスイッチング損失はオフ→オン、オン→オフの遷移時に生じるので、 $t_{ON}$ ,  $t_{OFF}$ から損失を計算できます。IGBTの場合、遷移時の損失の他に、スイッチがターン・オフした後のテール電流による損失があり、 $t_{ON}$ ,  $t_{OFF}$ からスイッチング損失を見積もることができます。

IGBTはバイポーラ・トランジスタのように蓄積時間によるターン・オフの遅れがなく、スイッチング速度は比較的高速です。ただし、ターン・オン時にp型層からn型層に注入された正孔(少数キャリア)がターン・オフ時に回収されるため、オフになった後もわずかなテール電流が流れ続けます。この期間はIGBTのコレクターエミッタ間電圧が最大になるので、電流は小さくとも損失は大きくなります。IGBTのスイッチング損失は、テール電流の影響を含めた全スイッチング損失 $E_{ts}$ の値で評価します。

キャリア回収を高速化すれば、テール電流の持続時間が短くなってスイッチング損失が減りますが、そのかわり $V_{CE(on)}$ が高くなつて伝導損失が増加します。IGBTでは、伝導損失とスイッチング損失がトレード・オフの関係です。



なお、逆方向ダイオード内蔵の品種では、ダイオードのスイッチング特性にも注意する必要があります。ただし、一般にはIGBTの特性に合わせて最適化した高速ダイオードを組み合わせているので、ダイオードの性能不足が問題になることはあまりないでしょう。

その点は、寄生ダイオードを逆方向ダイオードとして利用しているMOSFETよりも有利と考えられます。

## こうして使おうパワー・デバイス

# 第5回 HVICの選び方と使い方



MOSFETやIGBTは高速、低損失のパワー・デバイスとしてさまざまな負荷の駆動に用いられています。今回は、MOSFETやIGBTで高い電圧の負荷を駆動するときに、とても便利に活用できるHVIC(High Voltage MOS Gate Driver IC)について、選び方や活用法をご紹介します。

### ハイサイド駆動の問題点を解消するHVIC

MOSFETとIGBTは、どちらもゲート電圧を制御することによって容易に駆動できる特徴をもちます。ただし、2個のパワー・デバイスをハイサイド(高電圧側)とローサイド(低電圧側)に組み合わせたブリッジ回路では、ちょっと注意が必要です。

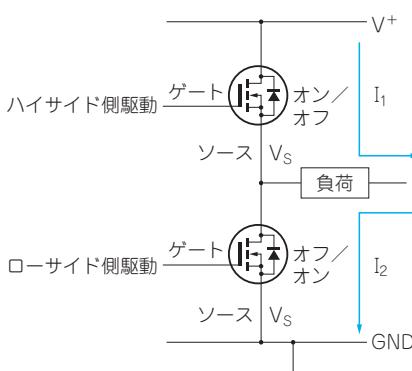


図1 n+nブリッジ回路

ハイサイド駆動時に $I_1$ が流れ、ローサイド駆動時に $I_2$ が流れます

ローサイドでは、MOSFETのソース(IGBTのエミッタ)が接地されているので、GND基準でゲートに10V(MOSFET)～15V(IGBT)の電圧を加えて駆動することができます。それに対して、ハイサイドでは一般にソース(エミッタ)がフローティングになるので、ハイサイドがONのときは負荷駆動電圧 $V_+$ を基準でゲート電圧を加えなければなりません。たとえばMOSFETやIGBTで600Vの負荷を駆動する回路であ

れば、ハイサイドのゲートには600Vよりも10～15V高い電圧を加える必要があります。

このようなブリッジ回路では、パルス・トランジスタやフォト・カプラで絶縁した信号でハイサイドを駆動する絶縁回路が用いられています。また、負荷駆動電圧 $V_+$ よりも高い電圧を生成するために、別電源を用いたり、ブートストラップ回路を用いて電圧を生成することが必要でした。

MOSFETやIGBT自体は理想に近い特性をもつ優れたパワー・デバイスでしたが、このような駆動方法の問題から、使いにくいものになっていました。

IRでは、1980年代中頃に接合分離を用いた独自の高耐圧モノリシックIC技術を開発し、小型で使いやすいHVIC(高耐圧MOSゲート・ドライバIC)を製品化しました。

これは、ロジック・レベルの入力パルス信号からローサイドとハイサイドのゲート駆動信号を生成するのに必要な、ブートストラップ回路やレベル変換回路を1個のICで実現したものです。さらに、入力パルス信号をラッチするRSフリップフロップなどを加えて、低消費電力化も実現しています。

最初に発売したIR2110は耐圧500V(ゲート駆動電圧525V)でしたが、続いで発売したIR2113は同じ機能とピン配置で耐圧600V(ゲート駆動電圧625V)を実現しました。それ以後は600V製品が標準になっており、さらに耐圧を高めた1200V製品も発売しています。DC12/24V電源の車載機器から、AC100/200V系の

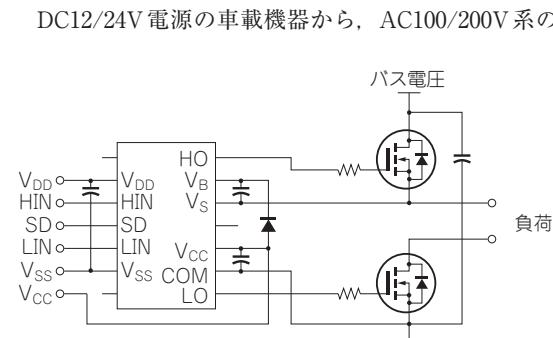


図2 HVICを使用した駆動回路

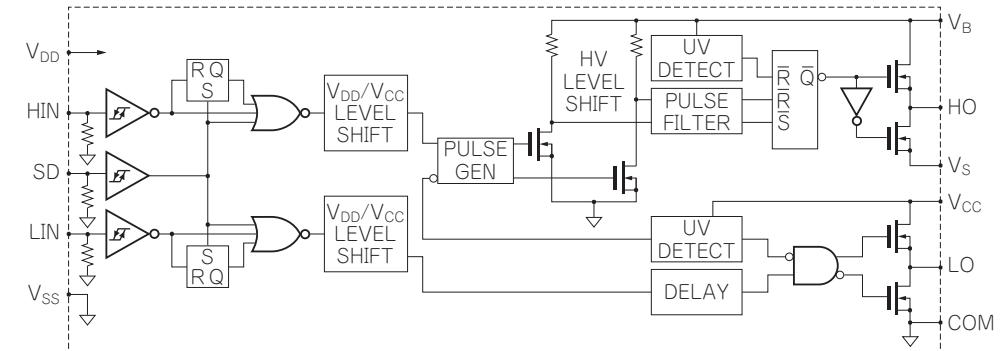


図3 HVICの機能ブロック図

日本や米国向け機器は、一般に600V製品で対応できます。AC400V系の欧州向け機器には1200Vが用いられます。

### HVICの選び方と使い方

HVICは汎用タイプから専用タイプまでさまざまな製品があります。汎用タイプの方が幅広い使い方に対応できることから、多く用いられています。

最も一般的なのは、ローサイド・ドライバとハイサイド・ドライバを組み合わせた、汎用のハーフ・ブリッジ製品です。IR2110、IR2113、IR2111などが定番製品となっています。これを2個使えばフル・ブリッジ(Hブリッジ)に、3個使えば3相ブリッジに対応できます。

また、IR2130など汎用の3相ブリッジ製品も定番です。これは3個のハーフ・ブリッジ・ドライバと保護回路を1個のICにまとめたもので、3相ブリッジのゲート駆動回路をコンパクトに実現できます。インバータ用途に幅広く用いられています。

専用タイプとしては、TV用、蛍光灯用、HIDランプ用、モータ・ドライブ用、D級アンプ用などさまざまなものがあります。用途に応じて電圧や電流を最適化とともに、発振回路などの用途で必要となる補助回路を内蔵しています。用途と特性がぴったりのものがあれば便利に使用できますが、そうでなければ汎用タイプでも十分です。

HVICの選択基準としては、入力が正のときパワー・デバイスがONになる同相出力か、負のときパワー・デバイスがONになる反転出力を選ぶ必要があります。

また、MOSFETやIGBTは電圧駆動デバイスなので、ゲート・ドライバは常時電流を供給する必要はありませんが、ON/OFFのスイッチング時にはごく短時間のパルス電流が流れます。駆動されるMOSFETやIGBTの特性や、使用したいスイッチング速度に応じてHVICを選択する必要があります。汎用タイプとしては、出力電流200mAクラスから、2Aクラスの製品がよく用いられています。

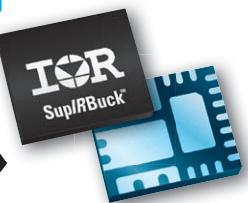
汎用タイプのHVICは、ゲート駆動電圧( $V_{CC}$ )を10～20Vで選択可能であり、MOSFETにもIGBTにも対応できます。ただし、低電圧ロックアウト(UVLO)などの保護回路については、MOSFETは電圧が低め、IGBTは電圧が高めが良いなどの違いがあり、用途に応じて選択する必要があります。

IGBTの場合は、ディスクリートのIGBT製品よりも、HVICとIGBTを組み合わせたモジュール製品が多く使われています。

今後の方向としては、モータ・ドライブ用やD級アンプ用など、専用タイプでより高機能、高性能の製品の開発を進めています。HVICの最大のポイントはMOSFETやIGBTを簡単、便利に駆動できるというところにあるので、定番の汎用製品の改良や、モジュール化など使いやすさを重視して製品化していきます。

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

### 第6回 POL電源に最適なDC-DCソリューション



高速スイッチング、低オン抵抗を特長とするMOSFETは、DC-DCコンバータに適したパワーデバイスです。とりわけ、低電圧、大電流、小型化が要求されるPOL電源は、MOSFETの特長を最大に発揮できる用途と言えるでしょう。今回は、POLに最適な電源の構成方法やデバイスを紹介します。

#### POL電源とBuckコンバータの基本構成

サーバ、セットトップボックス、グラフィックボード、基地局、通信機器、アミューズメント機器など各種の電子機器で、プロセッサ、FPGA、ASICなどの大規模なLSIが用いられています。このようなLSIでは、半導体プロセスの微細化による高速化と高集積化が進むとともに、動作電圧は低下し、動作電流は増大しています。電圧1V以下、電流100A以上で消費電力が100Wを超えるLSIも珍しくありません。

低電圧、大電流で高速動作するLSIに効率良く電源を供給するためには、LSIの直近に個別のDC-DCコンバータを置いて低電圧、大電流、高速応答の電源を生成することが必要です。これをPOL(Point of Load)と呼んでいます。システムの主電源からPOLまでは、比較的高い電圧(たとえば12V)の中間バスで電源を供給することによって、電流を抑え、配線抵抗による電圧降下や電力損失を防ぐことができます。典型的なPOLでは、例えば12Vの入力から、LSIコアの動作に必要な1.2V/10Aの出力を生成します。

POL電源はシステムの主要LSIの直近に配置するので、小型化や、高効率化による発熱の抑制も重要な課題となっています。

DC-DCコンバータにはBuck(降圧)型、Boost(昇圧)型、Buck-Boost(反転)型がありますが、POLは入力電圧が高く出力電圧が低いので、一般にBuck型になります。

基本的なBuck型のトポロジは、1個のMOSFET、

1個のダイオード、1個のインダクタで構成されます。MOSFETがオンの期間に入力側から出力側にエネルギーを伝送し、インダクタがエネルギーを蓄積します。このときダイオードはオフです。

MOSFETがオフの期間は、インダクタに蓄積したエネルギーを放出します。このときダイオードはオンになって、電流を流し続ける働きをします。

ただし、ダイオードはMOSFETより損失が大きく、スイッチングも低速なので、ダイオードをMOSFETで置き換えた同期整流コンバータが多くなっています。2個のMOSFETを区別するため、入力から出力にエネルギーを伝送する側をコントロールFET、ダイオードを置き換えた側をシンクロナスFETと呼びます。この2個のMOSFETによる構成は、見た目にはインバータなどに用いられるハーフブリッジと同じ形ですが、それぞれのMOSFETの動作や求められる特性に違いがあるので注意が必要です。

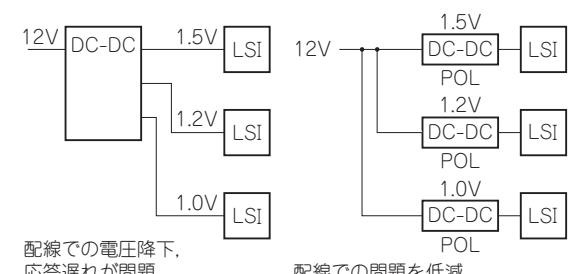


図1 集中電源とPOL

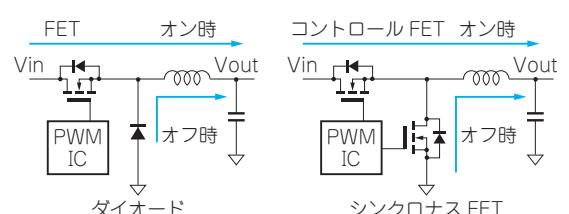


図2 Buckコンバータ

#### 三つの制御モードが使われている

Buckコンバータのコントローラは、入力電圧や負荷電流が変動しても出力電圧を一定に保つようにフィードバック制御を行います。

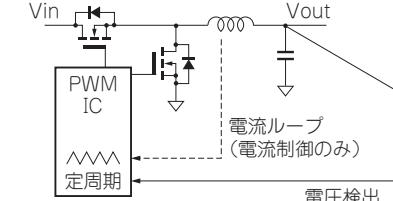
最も一般的なのは、周波数一定でデューティを変化させるPWM制御です。出力電圧と基準電圧の差をエラー・アンプで增幅してフィードバックする電圧モードと、電圧に加えてインダクタ電流をフィードバックする電流モードがあります。

電圧モードは応答が遅く、その分だけ位相補正が複雑になりますが、制御自体はシンプルです。電流モードは応答を高速化できますが、制御自体は複雑になります。

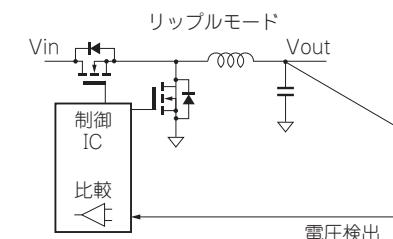
PWMとは異なる制御方法として、出力電圧の変動をコンパレータで検出し、即座にMOSFETを制御するリップルモードが使われています。応答は最も高速ですが、周波数変動が大きくなります。また、マルチフェーズ動作への対応が難しいという問題もあります。

リップルモードの中には、ヒステリシス・モード、オン時間固定モード、オフ時間固定モードがあります。

#### PWM (電圧モード、電流モード)



電圧検出



電圧検出

図3 制御方式

#### 出力電流35AまでのシンプルなBuckコンバータ

POL電源は、出力電流25～35Aあたりを境として、大电流側ではマルチフェーズ電源が、小电流側はシンプルなシングルフェーズ電源が主に用いられます。マルチフェーズでは、各相の位相を揃えられるPWM制御が有利です。一方、シングルフェーズではさまざまな制御方式が用いられていますが、それぞれに一長一短があります。

最もシンプルな電圧制御PWMを用いて、高効率化と小型化を徹底して追求したシングルフェーズ製品として、インターナショナル・レクティファイアー(IR)のSupIRBuck<sup>®</sup>があります。最新のPWMコントローラと最新のMOSFETを組み合わせることによって、3.5×3.5mmで最大3A出力、4×5mmで最大9A出力、5×6mmで最大25A出力、5×7mmで最大35A出力という小型、大電流を実現しています。フットプリントも共通化が進んでいて、品種の置き換えも容易です。

SupIRBuck<sup>®</sup>では、電圧制御モードのPWMコントローラを基本として、さまざまな新しい技術を投入しています。リップル制御モードの品種もあります。

例えば、1MHz以上の高速で効率良く動作する変調回路によって、小さい出力コンデンサーで負荷応答を改善しています。負荷電流に応じてゲート駆動電圧を変化させるスマートLDOによって、MOSFETの動作効率を最適化しています。PWMにフィードフォワード制御を組み合わせて、入力変動への応答を高速化しています。MOSFETが自社製品なので、実特性に合わせて過電流保護の温度補正を行うことによって、正確で安全な保護を実現しています。

また、低電圧出力のPOL電源では、一般にコントロールFETのオフ時間が長くなり、シンクロナスFETに長時間電流が流れます。そこで、SupIRBuck<sup>®</sup>ではコントロールFETはスイッチング損失が小さい高速の品種、シンクロナスFETはオン損失が少ない高効率の品種を組み合わせて、効率を最適化しています。

POL電源向けのBuckコンバータにはさまざまな製品があります。目的に応じて、最適な製品を見つけて活用することが重要でしょう。

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

# 第7回 AC-DCソリューションを構成する三つのコントローラ



高速スイッチング、低オン抵抗を特長とするMOSFETは、AC-DC電源の用途でも優れた特性が得られます。一般に絶縁が必要であるAC-DC電源では、トランスの1次側と2次側でそれぞれ制御を行い、また変換効率向上やノイズ、高調波の抑制のために複雑な制御も必要になります。今回は、AC-DC電源の構成方法やデバイスについて紹介します。

### AC-DC電源の基本構成

最近のAC-DC電源の基本構成を図に示します。まず、高調波を抑制し、AC電源から効率良く電力を取り出すためのPFC(力率コントローラ)が用いられます。特に、入力電力75W以上のOA機器/テレビ/ディスプレイなど(クラスD機器)、入力電力25W以上の照明機器(クラスC機器)では、国際規格IEC61000-3-2で高調波の規制が行われており、PFCは必須とされています。

なお、照明機器など小電力の用途では、PFCと1次側コントローラを一つにした1コンバータ方式のAC-DC電源も用いられています。

次に、トランスの1次側をスイッチング駆動して、絶縁しつつエネルギーを2次側に伝達する1次側コントローラが用いられます。1次側は高電圧なので、スイッチング・ノイズ抑制のために、電圧共振や電流共振を利用してソフト・スイッチングを行うLLCコントローラなどのレゾナント(共振型)コントローラが多く用いられます。

2次側では、1次側から伝達されるエネルギーを整流し、2次側コントローラで出力電圧の定電圧制御を行います。整流には、以前はダイオードを用いた簡単な整流回路が用いられてきましたが、出力電流が大きい場合には順電圧損失が大きくなるため、高効率の同期整流方式(SmartRectifier™と呼ばれる)が用いられるようになってきました。

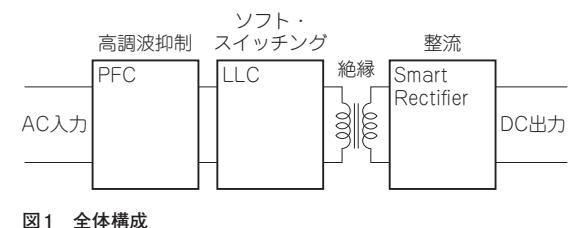


図1 全体構成

では、次にこの三つのコントローラについて、順に見ていきましょう。

### PFC(力率コントローラ)

高調波抑制にはいろいろな方式がありますが、AC-DC電源でよく用いられるのは、昇圧型DC-DCコンバータと同様の原理・構成の昇圧型プリ・レギュレータ方式です。

全波整流したACをスイッチングして昇圧し、高電圧のDCに変換します。昇圧型プリ・レギュレータはインダクタ入力で、入力電流は三角波状になり、平均電流は正弦波電流に近づきます。

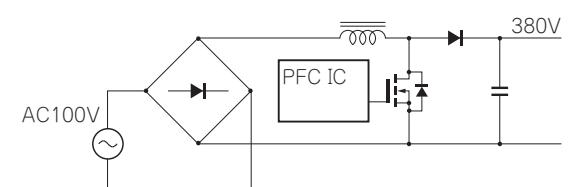


図2 PFC(力率コントローラ)

昇圧型コンバータ方式のPFCには、CCM(電流連続モード)、CRM(電流臨界モード)、DCM(電流不連続モード)の三つがあり、200～500W程度の大電力用途にはCCM、100～200W程度の中電力用途にはCRMやDCMが用いられます。CCMは電流波形が矩

形波でピーク電流を抑制でき、効率の良いPFCを実現できます。

IRでは、大電力用PFC ICとしてCCMのIR1155、中電力用PFC ICとしてCRMのIRS2500を用意しています。どちらもコンパクトな8ピンICです。

IR1155はAC波形を参照せずに動作するワンサイクル・コントロール方式を採用しており、簡単な回路でPFCを実現できます。また、整流ブリッジを用いないブリッジレス・ブースト型PFCにも使用できます。

IRS2500はCRMを用いた高効率、低ノイズのPFC ICです。フライバック・コンバータとしても動作可能で、1コンバータ方式に用いることもできます。

### SmartRectifier™

AC-DC電源では、1次側が高電圧、小電流なのに対して、2次側は低電圧、大電流となります。2次側の整流をダイオードで行うと順電圧損失が大きくなるため、これを低オン抵抗のMOSFETに置き換えたのがSmartRectifier™です。出力電流が5A以上だと、SmartRectifier™の効果が大きくなります。

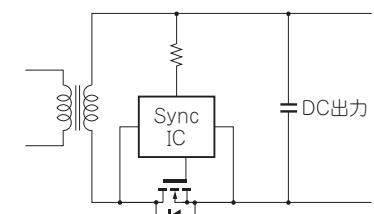


図4 SmartRectifier™

IRでは、SmartRectifier™ ICとしてIR11662、IR11672、IR11682、IR1169などを用意しています。ICの耐圧はいずれも200Vです。

このうち、IR11662、IR11672、IR11682は、1次側からの同期信号を使用せず、2次側だけで整流ができます。そのためMOSFETのボディ・ダイオードの順電圧を監視して、順電圧がしきい値を超えたMOSFETを導通させます。フライバック・コンバータ、LLCコンバータなどの1次側と組合せて使用できます。IR11662とIR11672は1チャネル、IR11682は2チャネルでセンタータップ構成で使用できます。

IR1169は外部同期タイプで、フォワード・コンバータと組合せて使用できます。

今回見てきたコントローラICは、いずれもMOSFETを外付けして使用します。IRの豊富なMOSFET製品の中から最適なものを見つけることができます。

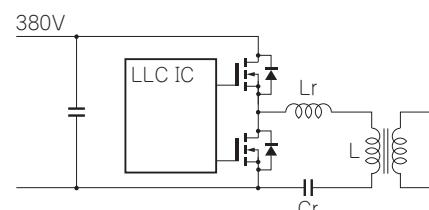


図3 LLCコントローラ

LLCコントローラは簡単な回路構成でソフト・スイッチングでき、スイッチング・ノイズが小さく、変換効率が高い方式です。IRでは、LLCコントローラICとして、IRS27951、IRS27952を用意しています。どちらもコンパクトな8ピンICです。この二つのICの違いは、MOSFETのオン抵抗を利用した過電流保護のしきい値がIRS27951は2V、IRS27952は3Vと異なります。

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

### 第8回 高効率、低歪み、使いやすさの進化が進むD級アンプ



トランジスタやFETは、リニアな増幅動作では電圧、電流をなめらかに連続制御できますが、低効率で発熱が大きくなります。そこで、高速のオン/オフを繰り返して平均の電圧、電流を高効率で連続制御するスイッチング制御が広く用いられています。今回は、MOSFETのもつ高速スイッチング、低オン抵抗という特長を生かして数十kHzの帯域幅のオーディオ出力をPWM制御するD級アンプと、それに最適なデバイスを紹介します。

#### オーディオ用パワー・アンプの基本構成

オーディオ信号は音(空気の振動)を電気信号に置き換えたもので、可聴周波数域で正負に振れる交流信号です。スピーカを駆動して音を出すには、数十Hz～数十kHzの帯域幅で4～8Ωの誘導負荷を駆動するパワー・アンプが用いられます。リニア方式が主流でしたが、最近では高効率で発熱の小さいD級アンプが広く用いられています。

リニア方式のアンプは、増幅素子の動作点の違いでA級、B級、AB級というように分類されています。

A級アンプは振幅全体を1個の素子で増幅するもので、素子の能動領域の中央付近が動作点になります(A級動作)。リニアな特性は優れていますが、効率が低いのが難点です。B級アンプは2個の増幅素子が正側と負側をそれぞれ分担するもので、能動領域の端が動作点になります(B級動作)。効率は優れていますが、動作が不連続で歪が大きくなります。

AB級アンプは2個の増幅素子をオーバラップ動作させることで高効率と低歪を両立したもので、実際のオーディオ用パワー・アンプでは最も広く普及しています。

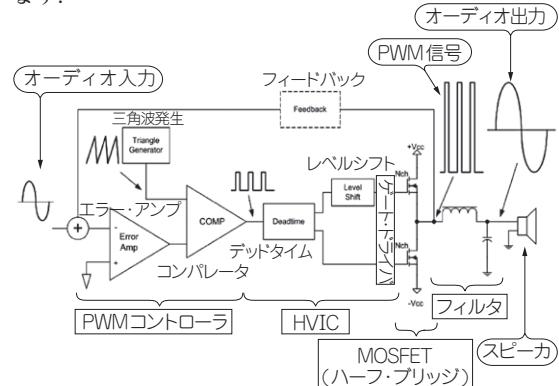


図1 D級アンプ

D級アンプはMOSFETを用いて高速スイッチングを行い、リニアな增幅は行いません。その点はデジタル的ですが、パルス信号のデューティ(オン時間の比率)を用いて平均の電圧、電流を連続的にPWM制御する点はアナログの制御です。

PWM制御の原理はDC-DCコンバータと同じですが、オーディオ周波数に対して少なくとも10倍以上、数百kHz～1MHz程度でスイッチングを行います。また、PWM信号の時間的な誤差が、アナログ的な信号歪みの原因になります。

D級アンプの最大の特徴は高効率であり、AB級アンプの効率が50%程度なのにに対して、D級アンプでは90%以上の効率が容易に得られます。

#### D級アンプ用のパワーデバイス

D級アンプ用のパワーデバイスには、MOSFETとHVIC(高耐圧ゲート・ドライバ)があります。通常は、2個のMOSFETをハーフブリッジにしてスピーカを駆動します。4個のMOSFETでフルブリッジを構成する場合もあります。

高音質が求められるオーディオ用途では低雑音、低歪みの特性が重要です。以前は、D級アンプは高効率だが歪みが大きいと考えられており、ハイエンドのオーディオ機器にはなかなか採用されませんでした。最近では、IRのパワーデバイスがもつ低歪みの特性が評価され、ローエンドからハイエンドまで幅広い用途で使用されています。

低歪みを実現するためには、PWM信号の時間精度を高めることが重要です。ブリッジ構成のドライバでは、ハイサイドMOSFETとローサイドMOSFETが同時にオンになると、過大な貫入電流が流れでデバイスを破壊する恐れがあります。それを防ぐために若干のデッド・タイムをもたせていますが、これが歪みの

要因になっています。

モータ駆動用のドライバでは数百nsのデッド・タイムをもたせるのが普通ですが、D級アンプでは、たとえばTHD(全高調波歪み)を0.1%に抑えるためには、デッド・タイムは最大でも±50ns程度に抑えることが必要です。

HVICではハイサイド側の遅延が大きくなる傾向があり、ローサイド側に遅延を付加して遅延時間のばらつきを抑える技術も用いられています。また、デッド・タイムの温度変動を抑えることも重要です。最近のオーディオ用HVICでは、デッド・タイムを±15nsに抑えた製品もあり、きわめて低歪みを実現できます。

なお、実際のアンプ回路では、適量の負帰還をかけてさらに歪みを低減することが多くなっています。

#### D級アンプ用MOSFETの選択

MOSFETの選択では、オン抵抗とQg(ゲート電荷)に注意が必要です。電源用やモータ駆動用では、主にオン抵抗から生じる定常損失が最大の問題になります。一方、高速スイッチングを行うD級アンプでは、主にQgで決まるスイッチング損失の影響が大きくなります。

全損失(W) 100W/6Ω出力時の損失比較

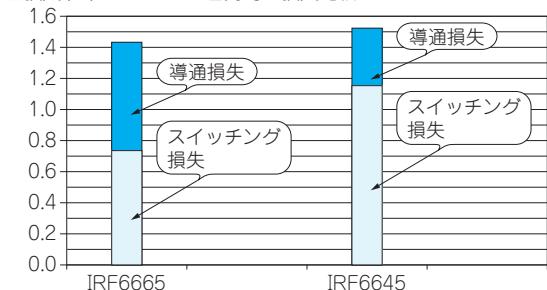


図2 IRF6665 vs IRF6645

同一のプロセス技術で比較すると、チップ・サイズを小型化するとQgが小さくなる代わりにオン抵抗は

大きくなり、大型化するとオン抵抗が小さくなる代わりにQgが大きくなるというトレード・オフの関係があります。IRでは低オン抵抗の製品だけでなく、オーディオ用として低QgのMOSFETを幅広く製品化しています。

さらに、同じオーディオ用でも、4Ω負荷の車載用オーディオには低オン抵抗のMOSFET、8Ω負荷の家庭用オーディオには低QgのMOSFETと、負荷条件の違いによってもきめ細かい使い分けが可能です。

#### オーディオ機器メーカーの設計の負担を減らすPowIRaudio™

IRではD級アンプ用として高効率、低歪みのパワー・デバイスを数多く供給してきました。個別のHVICとMOSFETを組み合わせることによって、幅広い要求仕様に合わせて柔軟にオーディオ機器を設計できます。

一方、D級アンプが広く普及するにつれて、もっと簡単に使えるD級アンプICへの要望も高くなっています。ただし、HVICとMOSFETをモノリシック化すると基本性能の低下が避けられません。そこでIRでは、別チップのHVICとMOSFETを組み合わせて小型パッケージに封入したパワー・モジュール製品PowIRaudio™を2012年に発売しました。

PowIRaudio™は、DC-DCコンバータのSupIRBuck®に相当する、高性能と簡単さを両立したパワー・モジュールです。ユーザはHVICとMOSFETを個別に選択する必要がないだけでなく、最適化した保護回路を内蔵していることから信頼性も高く、部品点数も大幅に削減できる製品です。

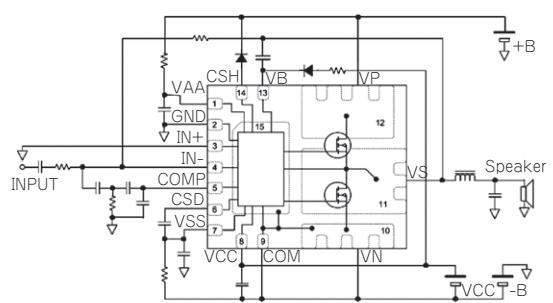
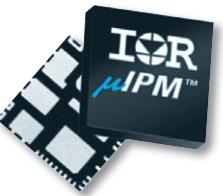


図3 PowIRaudio™

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

# 第9回 最新モータ向けに進化する モータ・アプリケーション



モータ駆動は、パワーデバイスの主要なアプリケーションの一つです。最近では、ブラシ付きDCモータやACインダクション・モータに代わって、より高効率で使いやすいBLDCモータ（ブラシレスDCモータ）やPMACモータ（永久磁石型ACモータ）が広く普及し、それに合わせてモータ駆動回路やパワーデバイスも進化しています。今回は、家庭用途で広く用いられるIGBTモジュールや、バッテリ動作や産業機器に最適なMOSFETを紹介します。

### モータと駆動回路の進化

以前はモータというと、DC電源で直接駆動するブラシ付きDCモータや、AC電源で直接駆動するインダクション・モータが主流でした。

ブラシ付きDCモータは、ブラシ接点の寿命が短く、放射ノイズも大きいなどの難点があります。一方、電源極性で回転方向を、電源電圧で回転数を容易に制御できるので、駆動回路は単純にできます。単方向回転なら1素子、双方向回転でも4素子（Hブリッジ）で簡単に実現できる手軽さが大きな利点で、チョッパ方式のPWM電圧制御が用いられます。

ACインダクション・モータは、モータ自身の構造が簡単でブラシもないため、広く用いられてきました。また、以前は回転数の制御が難しかったのですが、3相インバータ駆動の普及により容易に可変速制御ができるようになりました。ただし、最近では家庭用や小型の産業用モータでは、永久磁石を使用してより小型で高効率が得られるPMACモータやBLDCモータが主流になっています。

BLDCモータは、元々はブラシをもたない改良型のDCモータとして、DC電源で駆動するように作られたものです。しかし、3相インバータ駆動の普及により、構造も駆動方法もPMACモータとほとんど同じになっています。

3相インバータは、6素子のブリッジを使用して、

120°ごとに配置された3相のコイルを順次駆動することにより、回転方向と回転数を自由に制御できます。

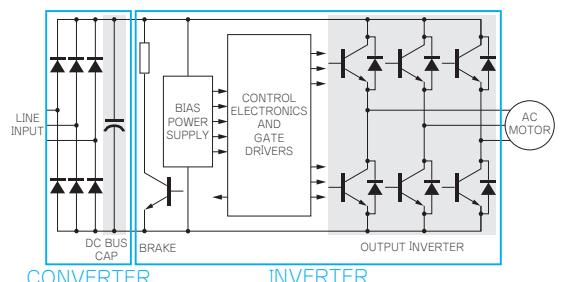


図1 3相インバータ  
ACインダクション、BLDC、PMACすべて同じトポロジを使用

### パワーデバイスの選択

3相インバータを構成するパワーデバイスは、耐圧によって使い分けられます。

家庭用機器や小型の産業用機器には、コンセントから給電する機器（AC100～200V電源）と、バッテリから給電する機器（DC12～48V電源）があります。3相インバータ駆動では、コンセント給電の場合はダイオード整流回路（図1のConverter）でDC化しますが、元の電圧が高いので、パワーデバイスにも高耐圧のものが必要になります。

代表的なパワーデバイスにはIGBTとMOSFETがありますが、飽和電圧の損失があるIGBTは高電圧・大電流の用途で効率が良く、低電圧・小電流の用途ではMOSFETが高効率です。スイッチング速度の点では、一般にIGBTでもMOSFETでもモータ駆動には十分です。

エアコン、冷蔵庫、洗濯機などコンセントから給電される家電機器では、150V以上の耐圧が必要なため、主にIGBTが用いられます。一方、電動工具、電動カートなどバッテリで動作する機器や、小型の産業用機器では150V以下の耐圧ですむため、主にMOSFETが用いられます。

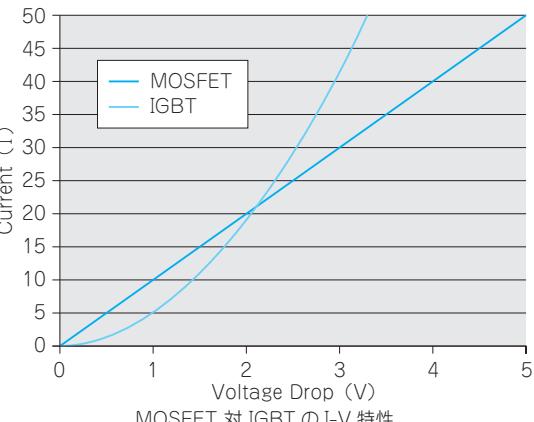


図2 MOSFETとIGBTの導通特性

### モータ駆動用IGBTモジュール

モータ駆動用のIGBTとしては、3相ゲートドライバと6個のIGBTを統合したIPM（インテリジェントパワーモジュール）が用いられています。

IRでは、家庭用機器などに最適な最新IGBTモジュールとして、IRAM（IR Appliance Module）を製品化しています。高効率で経済的な新世代のトレンドIGBTを薄型SIPパッケージに搭載し、部品点数の削減、設計の簡易化、製品開発の迅速化にも大きく役立ちます。

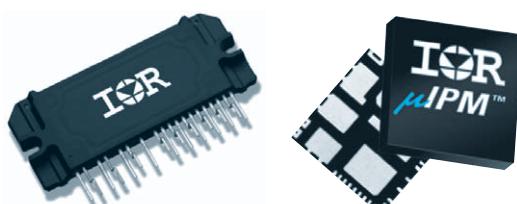


図3 IRAMとμIPM™のパッケージ

さらに、MOSFET搭載で、より小型のモジュールとして、IRSM（IR Small Module）もあります。

また、IRAMと組み合わせて使用できるモータ制御用デジタルIC、IRMCKシリーズを製品化しています。

ソフトウェア開発なしに各種の3相プラシレス・モータを可変速制御でき、高効率、静音、小型を簡単に実現できます。

IRでは、このIRAMとデジタルICのチップセットを中心として、デジタル、アナログ、パワーの技術を統合し、誰でも簡単に最適なモータ制御ができるプラットフォームとしてiMOTION™を開発しています。

### モータ駆動用MOSFET

電動工具、電動カートなどのバッテリ動作機器や、小型の産業用機器では、製品による仕様や要求の違いが大きく、限られたスペースに合わせた基板設計が必要になるため、設計自由度が高いディスクリートのMOSFETが主に用いられています。パッケージも小型で放熱性に優れたDirectFET®から、PQFN、伝統的な3端子パッケージまでさまざまなものが用いられます。

3相インバータの構成は、コンセント給電の場合とほぼ同じで、ゲートドライバと6個のMOSFETを使用します。バッテリ電圧12Vでは30～40V耐圧、24Vでは60～75V耐圧、48Vでは150V耐圧のMOSFETが用いられます。

MOSFETは、ハイサイド/ローサイドともに小型、高効率のnチャネルMOSFETを用いることが多いのですが、特に低電圧・小電流でローコストを重視する用途では、ハイサイドにpチャネルMOSFETを用いることもあります。低電圧でpチャネル/nチャネルのブリッジは、ゲートドライバを省略して、MCUから直接駆動することも可能です。

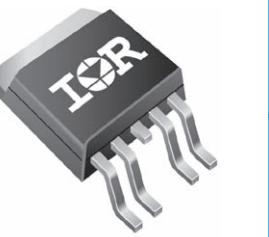
MOSFET製品は高効率化、高速化をめざして進化を続けており、IRでは第12世代（Gen12）に入っています。最新のGen12.7では、特にモータ駆動に適したStrongIRFET™、FastIRFET™が登場しています。

StrongIRFET™は、低R<sub>DSon</sub>と産業用途で要求される頑丈さを備え、かつ低成本を実現したもので、従来のプレーナMOSFETの置き換えに最適です。

FastIRFET™は、低Q<sub>g</sub>を追求した高速製品で、スイッチング損失を低減し、軽負荷で高効率が得られます。

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

### 第10回 IPSと車載デバイス



PR

実際のシステムにMOSFETやIGBTを使用する際には、過熱保護や過電流保護などの保護回路が不可欠です。保護回路の仕様はユーザーによる違いが大きく、汎用化は難しいのですが、特定のアプリケーションではMOSFETと保護回路を一体化したIPS(Intelligent Power Switch)製品を用意しています。今回は、IPSを中心に車載デバイスの選び方や活用法をご紹介します。

#### ユーザの要望に応えて生まれたIPS

1980年代から自動車のエレクトロニクス化が進み、燃料噴射などのエンジン制御、トランスマッisionなどのパワートレイン制御、パワーウィンドウなどのボディ制御に多くのマイコンやパワーデバイスが使われるようになりました。

初期にはパワーデバイスとしてバイポーラ・トランジスタが用いられましたが、二次降伏による故障が問題となり、安全動作領域が広いMOSFETに置き換えられていきました。

車載用途では、個々の部品レベルでも安全性の要求が厳しく、MOSFETにも保護回路を内蔵してほしいという要望が強かったため、カスタム品としてIPSを作りました。その中でも特に汎用性が高いものを、標準品として供給しています。

産業機器でも、MOSFETが普及するとともに、保護回路内蔵の要望に応えてIPSを作りました。産業機器の場合、ボードに搭載したMOSFETが故障した場合はボード交換で対応することが多く、機器が長時間停止するのを防ぐために機器ユーザ側で保守用ボードを常時在庫することも多くなっています。部品レベルでの信頼性が高いIPSを用いれば、ボード在庫のコストを削減できるメリットがあります。

IPSは、単体のMOSFETと加熱保護、過電流保護などの保護回路を1枚のシリコンチップに搭載したシングルチップの製品です。ただし、特に超低オン抵抗のデバイスでは、保護回路を別チップにしたものもあります。

IPSと似た名称の製品としてIPM(Intelligent Power Module)がありますが、IPMは複数のMOSFET/IGBTチップと制御チップを組み合わせてパッケージに封入したモジュール製品であり、その点がIPSとは異なっています。

#### IPSの種類と使い分け

自動車はボディがマイナス(接地)になっており、非動作時に負荷の電位がボディ側になるハイサイド・ドライバの方が、出力地絡の検出・保護が容易なことや、負荷の電食を防げるなどの利点があり、広く用いられています。

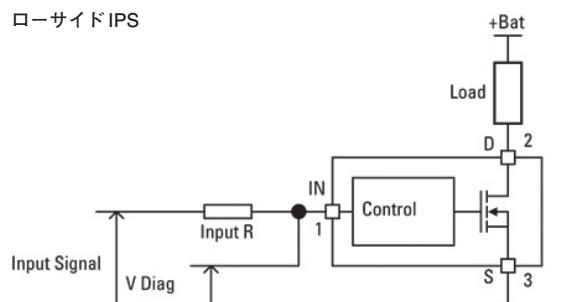
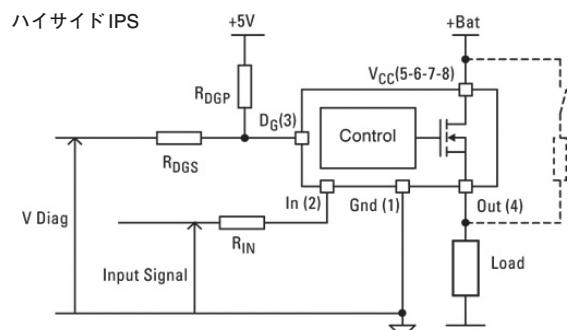


図1 IPSの使用例

MOSFETはpチャネルに比べてnチャネルの方が小さいチップ面積で低オン抵抗にできるので、一般にローサイド・ドライバ、ハイサイド・ドライバのどちら

にもnチャネルMOSFETが用いられます。単体のMOSFETは同じデバイスをローサイドにもハイサイドにも使用できますが、保護回路の構造がローサイドとハイサイドで異なるので、IPSは同じnチャネルでもローサイド用、ハイサイド用に分かれています。

ローサイド用の場合、MOSFETのソースを接地し、ゲートに駆動電圧を加えて動作させるので、これを保護回路の電源として利用できます。そのため、外から見ると単体のMOSFETと同じゲート・ドレイン・ソースの3端子で、内部に保護回路を内蔵します。

一方、ハイサイド用の場合、MOSFETのゲートには電源から絶縁された駆動電圧を与える必要があります。保護回路に加えて、チャージポンプを用いた絶縁電源やレベルシフタなどのゲート・ドライバを内蔵しており、ローサイド用に比べるとやや内部構造は複雑です。

保護回路の仕様では、どのような条件のときにどのような保護を行うか、という点に注意する必要があります。

加熱保護では、MOSFETの接合温度T<sub>j</sub>が上限のしきい値を超えたらデバイスが故障する危険があるので、即座に出力をオフにするシャットダウン保護を行います。

過電流保護の場合は、短絡事故のように即座にシャットダウンが必要なものと、一時的な過負荷状態のように電流値を抑えつつ動作を続けたいものがあります。後者を可能にするために、PWM回路を内蔵して電流値を制御するタイプのデバイスが作られています。

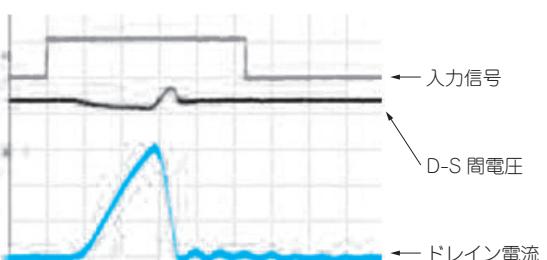


図2 過電流シャットダウンの例

人々、IPSは窓開閉用のモータ駆動やライトの点灯/消灯の制御のようにオン/オフ制御に用いることが多く、低速のものが多く用いられてきました。ただし、

最近ではPWM制御に対応したやや高速タイプのものも製品化しています。耐圧は、12V車用の40V耐圧の製品と、24V車用の75V耐圧の製品に分かれています。産業機器でも12V電源や24V電源に利用できます。

さらに高耐圧の用途には、IGBTと保護回路を一体化すれば対応できます。ただし、1チップで高耐圧化するのは技術的にもコスト的にも難しい面が多いので、現状ではIGBTのIPSは作っていません。

#### その他の車載デバイス

IRでは、自動車事業部において車載デバイスを専門に扱っています。自動車事業部の製品は、AUIRxxxxというように、型名の最初に「AU」を付けて区別しています。IPSの他に、IC、単体MOSFET、単体IGBTなどを製品化しています。

ICとしては、モータ・ドライバ、LEDドライバ、ハーフ・ブリッジ/ハイサイド/ローサイドなどの各種ドライバ、電源ICなどがあります。

たとえば、ISO適合の地絡検出回路を内蔵した3相ドライバのAUIR3235Qなど、車載向けに高機能と安全規格対応を合わせもつ製品があります。

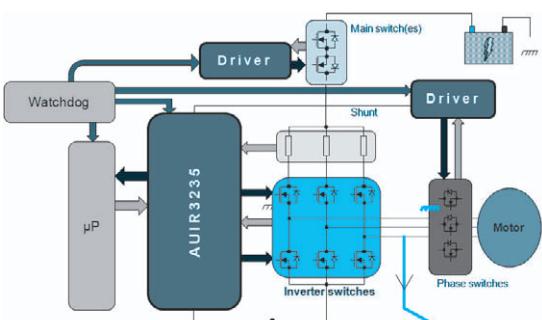


図3. 3相モータドライブ用駆動ICの例

車載デバイスでは、AEC-Q-100(集積回路)、Q-101(ディスクリート半導体)に準拠した認定試験や、最近ではISO26262(機能安全)などの安全規格が重要になっています。IRでも、これらの規格への対応をいち早く進めています。

## こうして使おうパワーデバイス

### 第11回 IR の MOSFET 開発の変遷

IRではさまざまなパワーデバイスを作っていますが、その中で代表的なデバイスはパワーMOSFETです。半導体内部を流れる電流を、絶縁された制御電極に電圧を加えて制御しようというパワーMOSFETのアイディアは古くからありました。実際に作るのは難しく、1960年代の後半から少しづつ製品化が始まりました。今回は、IRのこれまでのパワーMOSFET開発の流れを中心に、パワーMOSFETの発展についてご紹介します。

#### HEXFET®の登場

1970年代にはMOSFETはメモリなどのLSIに広く用いられるようになりました。微細化が急速に進展とともに、微細化技術を活用したパワーデバイスの研究も盛んになりました。IRでは1979年に、オン抵抗などの特性を大きく改善した画期的なパワーデバイスとしてHEXFET®を製品化し、パワーMOSFETの代表的なメーカーになりました。さらに、当時の年間売上げとほぼ同等の金額を投資して最新の工場を建設し、製造の効率を大きく向上させることによって、良い製品を低コストで安定供給できるようになりました。MOSFETのメーカーとして不動の位置を確立しました。

最初のHEXFET®は、ゲート電極とチャネル領域を半導体の表面に沿って形成したプレーナ型で、六角形(hexagonal)の微細なMOSFETセルを敷き詰めた構造を特徴としていました。この構造からIRではHEXFETと名付けました。IRではその後も微細化や構造の改良によるオン抵抗の低減を進め、極細の帯状にしたストライプ型の構造も採用しています。

しかし、プレーナ型では次第に性能の限界に近づいてきました。特に、MOSFETではオン抵抗 $R_{DS(on)}$ とドレインソース間電圧 $V_{DSS}$ はトレードオフの関係にあって、低オン抵抗と高耐圧の両立は困難です。また、オン抵抗 $R_{DS(on)}$ とゲート電荷 $Q_G$ もトレードオフの関係にあって、低オン抵抗と高速化の両立も困難です。オン抵抗をさらに低減するためには、新しい構造の採用が必要になってきます。

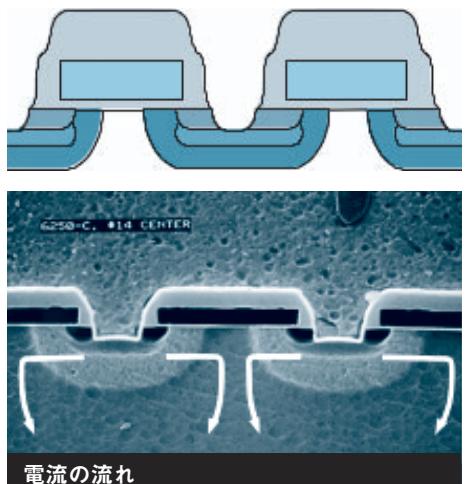
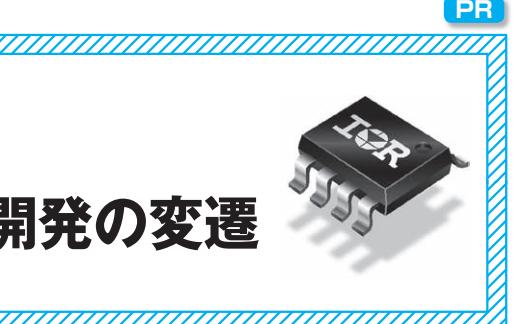


図1.プレーナ型MOSFET

#### トレンチ構造の採用

これまで、MOSFETが最も多く用いられてきたアプリケーションは電源です。1990年代にはDC-DCコンバータなど低耐圧の用途が増加するとともに、低オン抵抗の要求もさらに強くなってきました。そこで、プレーナ型よりも微細化が可能で低オン抵抗にできるトレンチ型のMOSFETをIRでも製品化するようになりました。

トレンチ型はゲート電極とチャネル領域を半導体基板の溝に埋め込むことで、低オン抵抗にできるかわりに、高耐圧や高速の用途には不利だと言われていました。IRでは、ゲート電荷を徹底して低減する構造の系列や、オン抵抗を徹底して低減しチップサイズを小型にする系列を、耐圧が24Vから300Vまで用途に応じて作り分けています。

IRでは、アプリケーションの要求に応じて特性を改良し、製品の開発を進めてきました。現在、一般向け製品の代表的なものは、プレーナ型がセル型とプレーナ・ストライプ型、トレンチ型が低ゲート電荷のトレンチ・ストライプ型となっています。

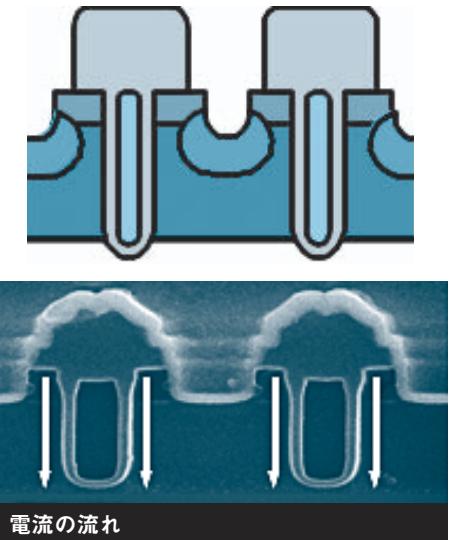


図2.トレンチ型MOSFET

#### アプリケーションの拡大

IRが製品化した低耐圧、超低オン抵抗、低ゲート電荷のトレンチ型MOSFETは、車載アプリケーションの要求にほぼ合致するものでした。ただし、オン抵抗についてはさらに厳しい要求がありました。

そこで、IRでは車載アプリケーションに特化した専用のMOSFETとして、耐圧40Vでさらに低オン抵抗を追及したシリーズをトレンチストライプ型で製品化しました。

$R_{DS(on)}$ 重視の設計なのでゲート電荷は大きくなるはずですが、チップサイズを小型化できたことからゲート電荷も小さく抑えられました。

さらに、車載とは別のアプリケーションとして、これまで他のメーカーが手掛けていない耐圧100～200Vクラスで低オン抵抗を重視したシリーズの開発を進めています。これはトレンチ型の新しい構造のもので、2014年からサンプルが出ています。

#### 信頼性の追求

IRのMOSFET製品は、Si半導体として低オン抵抗

の限界を追求して発展してきましたが、それと同時に頑丈さも重要な特性であると言う考えがMOSFETの開発当初から一貫しています。もちろん、ドレン・ソース間のスパック電圧による破壊は耐圧を高くすれば壊れなくなりますが、オン抵抗も高くなってしまいます。

壊れない頑丈さと低オン抵抗を両立するために、IRでは内蔵ダイオード逆回復時のdV/dtと、アバランシェ耐量に注目しています。MOSFETが故障する最大の原因是、オンからオフにスイッチングする時に過渡的に発生する高電圧です。これに耐えられるだけの耐圧をもたせると、オン抵抗も大きくなってしまいます。

アバランシェ耐量を保証したMOSFETでは、スイッチング時の過渡的な高電圧に対しては、データシートに記載された繰り返しスイッチング時のアバランシェ・エネルギーEARや、単発スイッチング時のアバランシェ・エネルギーEASを用いて設計ができます。耐圧は通常時の電源電圧から決めることが能够るので、十分に低オン抵抗のデバイスを選択できます。

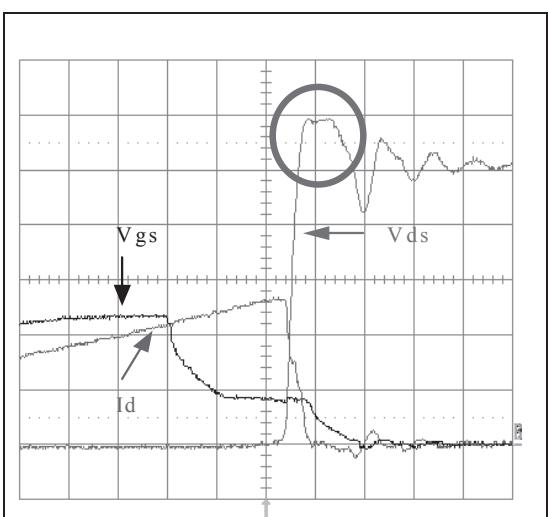


図3.フライバックコンバータ回路でのアバランシェ波形

IRでは、これからも低オン抵抗と壊れにくさの両立を追求してMOSFET製品を作り続けていきます。同時に、MOSFETの特性を十分に生かして使いこなせるように、デバイスの性能を実用的で分かりやすい指標で示すようにしていきたいと考えています。

## こうして使おうパワーデバイス

# 第12回 エアコンとモータ制御



家電製品には洗濯機、冷蔵庫、掃除機などモータを使用するものがたくさんあります。その中で、エアコンは1台の中でも室外機のコンプレッサとファン、室内機のファンと複数のモータを使用すること、一つの家庭で複数台を設置することが多いこと、夏季や冬季には長時間連続運転することなどの特徴をもっています。今回は、最近のエアコン製品の動向や、エアコン向けのパワーデバイス、コントローラICについてご紹介します。

### 最近のエアコン製品の動向

エアコン製品は、省エネ・高効率を追求したものと、低価格を追求したのに2極化する傾向があります。

その中で、国内メーカーの製品は一般に省エネ・高効率指向で、100%がインバータ化されています。また、最新の技術をいち早く開発・採用する傾向が強く、世界でも最先端を進んでいると言えます。モータ制御に関しては、各メーカーがそれぞれ豊富なノウハウを蓄積しています。

一方、中国などの海外メーカーではこれまで低価格の大量販売製品が多かったのですが、最近は省エネ・高効率を追及する製品も増えてきました。

その背景には、日本では元々ユーザーの節電意識が高いこと、夏の暑さと冬の寒さの両方が厳しくエアコンの運転期間が長いことに加えて、家電製品に省エネ性能を表示するなど、政策的にも省エネ・高効率を促進してきたことがあります。

エアコンのエネルギー効率の指標として、以前は定格負荷時の効率を示すCOP(成績係数)を用いていましたが、2006年からは年間を通してのさまざまな負荷パターンをモデル化したAPF(通年エネルギー消費効率)に変わりました。APFでは低負荷時から高負荷時まで広い範囲での効率が評価されるので、パワーデバイスの選定にも影響を与えています。

### 室外機に用いられるパワーデバイスの選択

エアコンでは、室外機のコンプレッサ・モータとファン・モータ、室内機のファン・モータという3個のモータが使われ、それぞれにパワーデバイスが使われています。また、室内機ではその他に風向制御用のステッピング・モータなど、さらに多くのモータを使用

している製品もあります。

このうち、コンプレッサ・モータが最も大容量で、その分トータルの効率への影響が大きいため、早くから省エネ・高効率化技術が進化してきました。最近では、コンプレッサの高効率化だけでは差別化が難しくなってきたことや、APFの導入により低負荷時の効率も問題になってきたことから、室外機や室内機のファン・モータでも省エネ・高効率化が進められています。

図1に、室外機の回路構成例を示します。

この例では、コンプレッサはIGBTのIPM(インターフェント・パワー・モジュール)で駆動し、ファンはMOSFET駆動のコントローラ一体型ファンを使用しています。どちらも3相インバータ駆動で、32ビットRISCコントローラで制御を行っています。

家電製品のモータ駆動では一般にIGBTを用いることが多いですが、ファン・モータにはMOSFETも多く用いられています。IGBTの場合はIPMを用いることも多く、簡単に使えるだけでなく、小型化やコストダウンのメリットも得られます。エアコン向けとしても各種のIPMが供給されており、特に低価格指向の製品ではIPMが多く用いられています。同様に、ファンの場合は速度指令を与えて簡単に回せるコントローラ一体型ファンも広く用いられています。

一方、省エネ・高効率を追求した製品では、各メーカーがモータを高効率で駆動するノウハウを豊富に蓄積しており、ディスクリートのIGBTを用いて専用設計することが多くなっています。最近では、低負荷時の効率を重視して、コンプレッサもMOSFETで駆動する場合があります。

コンプレッサの場合、単に熱媒体を圧縮すれば良いわけではなく、圧縮した熱媒体を効率良く循環させるために、モータの制御、駆動について高度な技術が必要です。

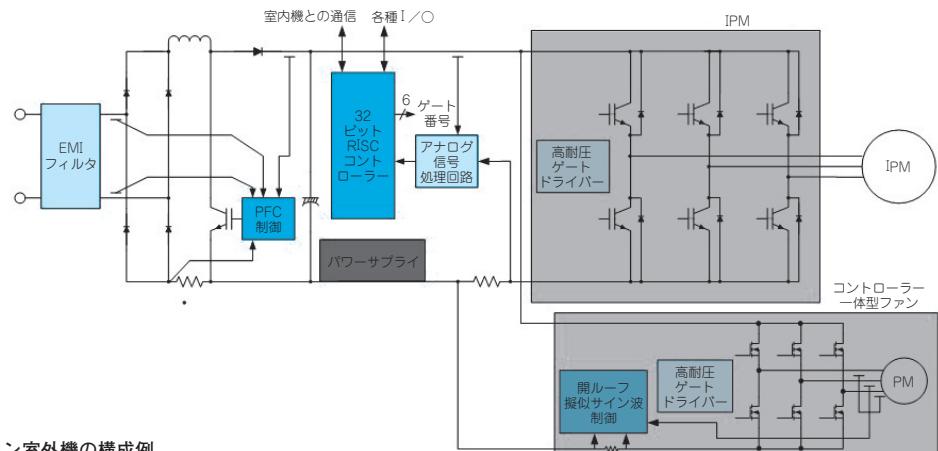


図1.エアコン室外機の構成例

### 室内機に用いられるパワーデバイスの選択

省エネ・高効率を追求した製品では、室内機のファンにも工夫が進められています。

エアコンの室内機は、ユーザーの快適性や利便性に直接影響する部分であり、風量や風向の可変制御は早くから行われてきましたが、最近では室内の状況をセンサで検出して最適な運転を行うなど、きめ細かい制御をアピールする製品も登場しています。

一方で、室内機の効率を高める重要なポイントは、熱交換器のフィンにいかに効率よく風を通すかであり、外からは見えにくい部分で大きな改良が進んでいます。限られた室内機のサイズの中でフィンの有効面積を広げるため、室内機には横長の円筒形のシロッコ・ファンが用いられています。従来は室内機の前面から上面にかけてフィンを配置していましたが、最近では室内機の背面にもフィンを広げるなど、さまざまな手段を駆使しています。

もちろん、制御基板の小型・省スペース化の要求もきわめて強く、超小型モジュールであるIRSM836-035MAなどのμIPM™シリーズもいち早く採用されています。

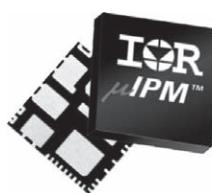


図2.μIPM™

### エアコンに用いられるコントローラIC

省エネ・高効率を追求した製品では、各メーカーが独自のノウハウを駆使してモータ制御を行っており、高性能のマイクロコントローラ上で高度な制御演算を実現しています。そのようなメーカーでは、センサレス駆動などソフトウェア制御を用いてハードウェアを簡略化し、低価格で製品化している例もあります。

一方、低価格を追求した製品では、専用のコントローラICを採用することによって、マイクロコントローラやソフトウェア開発のコストを削減することが多くなっています。

IRでは、さまざまな分野のモーション・コントロール・アプリケーションに向けて、IRMCK311、IRMCK341などの専用のコントローラICやIRSM505-035MAなどのIPMをプラットフォームとして供給しています。その中で、エアコン向けのコントローラICは供給量が多く、IRのコントローラICを搭載したエアコンは世界中で広く使われています。



図3.コントローラIC

## こうして使おうパワーデバイス



### 第13回 HVIC の構造と使い方の注意点

MOSFETやIGBTで高電圧の負荷を駆動するときには、負荷電圧よりさらに高い電圧でゲートを駆動することが必要になる場合があります。そのために作られた高耐圧のゲート・ドライバICをHVIC(High Voltage MOS Gate Driver IC)と呼びます。今回は、このHVICを実際に使う場合に注意すべきポイントを紹介します。

#### HVICの構造と寄生ダイオード

MOSFETやIGBTをハイサイド(高電圧側)とローサイド(低電圧側)に組み合わせたブリッジ回路では、ハイサイドの駆動時にソース(IGBTではエミッタ)端子が負荷駆動電圧 $V_S$ まで上昇し、ゲートにはそれより10～15V高い駆動電圧を与える必要があります。そのため、高電圧の負荷を駆動するアプリケーションでは、フォトカプラなどの絶縁素子を用いてゲート・ドライバをフローティングにするか、高耐圧のゲート・ドライバを使用する必要があります。

IRでは接合分離による高耐圧モノリシックIC技術を開発し、昇圧用電源とゲート駆動素子を内蔵した使いやすいHVIC(高耐圧MOSゲート・ドライバIC)を製品化しています。これを用いれば、600Vや1200VのMOSFET、IGBTでもロジック・レベル信号で簡単に駆動することができます。

HVICは部品点数の削減、システムの小型化に貢献し、簡単に使えるという大きなメリットがありますが、実際の使用時には知っておきたいことがあります。

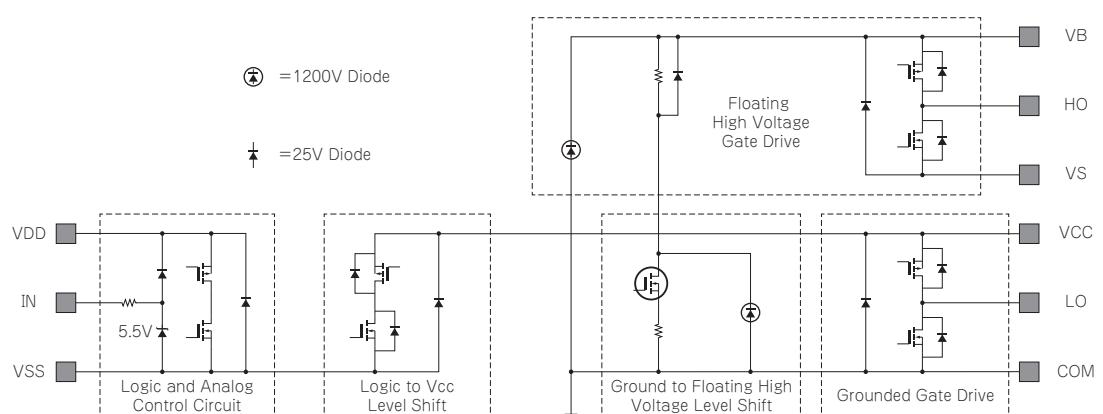


図1.HVIC のESD 及び接合分離構造(1200V 耐圧品)

耐圧1200VのHVICの概略構造を図1に示します。入力回路、レベル・シフタ回路、COMに接続されたローサイドのゲート駆動回路、フローティングされたハイサイドのゲート駆動回路などから構成されています。

CMOSモノリシックICの構造上、実際の素子にはいくつかの寄生ダイオード(寄生トランジスタ、寄生サイリスタ)が存在します。寄生ダイオードは通常時は逆バイアスされていて問題を起こしませんが、スイッチング時などに過渡的に順バイアスされると、誤動作や故障などの問題を起こすことがあります。また、高耐圧ICの内部で実際に高電圧が加わることを想定していない部分は、小型・高速・低損失などのために

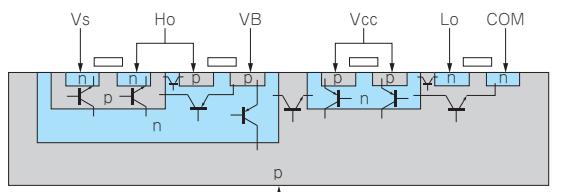


図2.HVIC のシリコン断面図

低耐圧プロセスを採用しています。寄生ダイオードに予期しない高電圧が加わると、故障にいたることもあります。

図1にはこれらの寄生ダイオードが記載されています。このうち、○印の付いた二つが耐圧1200V、それ以外は耐圧25Vの寄生ダイオードです。

実際のHVICのシリコン基板の概略構造を図2に示します。左半分がハイサイドのゲート駆動回路、右半分がローサイドのゲート駆動回路です。基板裏面側のp層はCOMに接続されます。

パワーデバイスでは基板表面側から裏面側に向けて縦方向に電流が流れる縦型構造のMOSFETを使っていますが、制御回路やゲート駆動回路では基板表面近くを横方向に電流が流れる横型構造のMOSFETを採用しています。HVICは横型CMOSですから、通常は $V_B$ -Ho間、Ho- $V_S$ 間、 $V_{CC}$ -Lo間、Lo-COM間に横方向に電流が流れます。

それに対して、寄生ダイオードでは縦方向にも電流が流れます。たとえば $V_B$ がCOMよりも低電圧(負電圧)になれば、 $V_B$ -COM間の寄生ダイオードが導通し、不正な電流が縦方向に流れることになります

#### $V_B$ のアンダーシュートに注意する

図3に示すように、ブリッジ構成のパワーデバイスで負荷をスイッチングするとき、負荷インダクタンスや寄生インダクタンスの影響で、負荷駆動電圧 $V_S$ に大きなアンダーシュートを生じる場合があります。

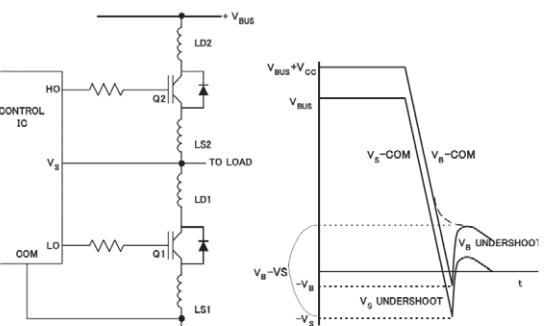


図3.負の電圧スパイクノイズ

これによって、HVICの $V_S$ はグラウンド(COM)に対する負電圧となり、アンダーシュートが-5Vを超える

ると $V_B$ -COM間に電源を供給できなくなってしまいます。しかし、 $V_S$ -COM間には寄生ダイオードがない、 $V_B$ - $V_S$ 間の絶対最大定格を超えない場合は問題は起きません。

問題は、 $V_S$ のアンダーシュートと同時に、 $V_B$ にもアンダーシュートが生じることです。フローティング電源を用いて $V_B$ の電圧を $V_S + 10V$ に保っている場合は、 $V_S$ とともに $V_B$ が変動し、アンダーシュートが大きければ $V_B$ が負電圧になります。これによって $V_B$ -COM間の寄生ダイオードが導通し、誤動作や故障などの問題を生じます。

この $V_B$ のアンダーシュートによる誤動作や故障は、実際のアプリケーションでHVICに生じるトラブルの大きな原因になっています。

$V_B$ のアンダーシュートを防ぐ根本的な方法は、 $V_S$ のアンダーシュートを防ぐことです。寄生インダクタンスの原因となっているパターン設計を変更する、ゲート抵抗を大きくする、 $V_S$ にクランプ・ダイオードを使用するなど、いくつかの方法があります。

#### HVICのラッチアップ耐量

IRの最近のHVICでは、 $V_B$ -COM間にラッチアップ耐量をもたせることによって、この問題に対処しています。

アプリケーションで $V_B$ のアンダーシュートが避けられない場合は、 $V_B$ のピーク電圧と持続時間を評価し、それに適したラッチアップ耐量をもつHVICを選択する方法もあります。

#### $V_B$ - $V_S$ 間の過電圧に注意する

$V_B$ の電圧生成をブートストラップ電源で行う方法もあります。この場合、 $V_S$ にアンダーシュートを生じても $V_B$ -COM間にアンダーシュートを生じないよう制御されますから、 $V_B$ が負電圧になることを防げます(図3の点線)。

ただし、この場合は $V_S$ のアンダーシュート分の電圧が元々の $V_B$ - $V_S$ 間電圧に加わりますから、 $V_B$ - $V_S$ 間の絶対最大定格に注意する必要があります。HVICであっても、 $V_B$ - $V_S$ 間は25V耐圧のプロセスを用いているので、これを超えると故障の恐れがあります。

## こうして使おうパワーデバイス

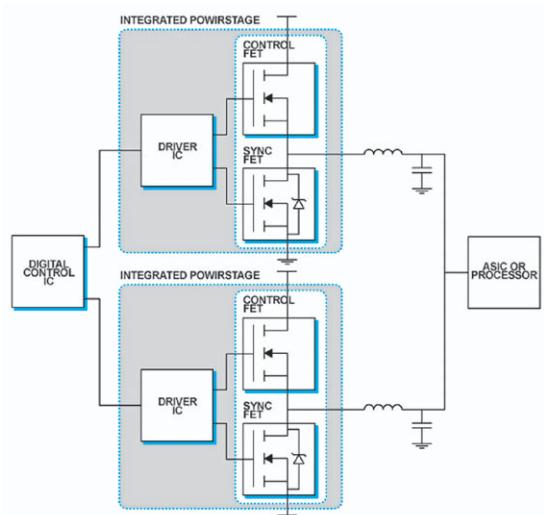
# 第14回 高性能プロセッサ向け電源技術 デジタル・コントローラ



PC、サーバなどの高性能プロセッサを動作させるには、1V前後の低電圧で100A以上の大電流を供給可能な電源回路が必要です。さらに、低電圧動作に対応する高精度・低リップル特性、負荷変動に対応する高速応答特性、きめ細かい省電力に対応する電源管理機能なども要求されます。これらを満足するために、高性能プロセッサ向けとしてデジタル・コントローラやマルチフェーズなどのさまざまな電源技術が開発・活用されています。今回は、デジタル・コントローラの最新技術を中心としてご紹介します。

### 高性能プロセッサ向けの電源ソリューション

プロセッサ・メーカーではPC、サーバ、グラフィックス、ストレージ、モバイルなどに向けて各種の高性能プロセッサを供給しています。それらの高性能プロセッサの動作には大容量・高効率かつ高速、高精度の電源回路が必要であり、マルチフェーズ対応のコントローラや、高効率のパワーデバイスが用いられています。特に、コントローラに関しては、最近ではデジタル制御方式が用いられるようになっています。

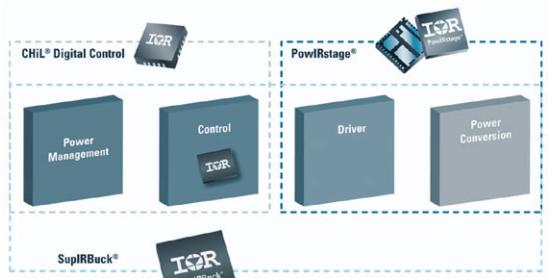


IRでは2011年にデジタル制御の先進的な技術で知られていたCHiL® Semiconductorを統合し、IRのパワーデバイス技術と組み合わせることによって、高性能プロセッサ向けの新しい電源ソリューションを提供しています。

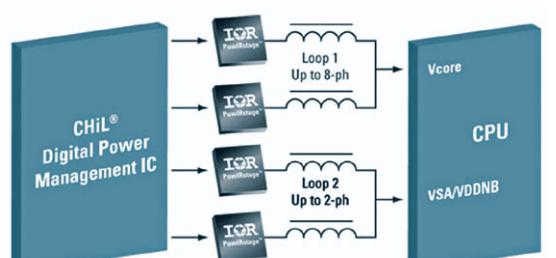
電力管理とデジタルPWM制御を行うIRのデジタル・コントローラと、ゲートドライバとMOSFETを

統合したPowIRstage®を組み合わせて、VR12/VR12.5対応をはじめとして各種の高性能プロセッサに最適な電源回路を構成できます。さらに、小出力で特に小型化が要求される用途向けには、統合型レギュレータのSupIRBuck®も用意しています。

また、IRではこれらのデバイスのもう機能、性能を十分に引き出せるように、専門のFAEチームによってコントローラからパワーステージまで、回路レベル、基板レベル、実装レベルまで総合的なサポート体制をとっています。



IRのデジタル・コントローラは当初からマルチフェーズを前提としてデジタル制御技術を開発してきたことが大きな特長です。デジタル制御電源は各社から製品化されていますが、マルチフェーズ化ではIRが世界をリードしていると言えます。



### デジタル・コントローラのメリット

IRのデジタル・コントローラは多くの先進的な機能を搭載しており、それによって従来のアナログ制御のものと問題を解決しています。以下に、代表的なものを紹介します。

#### (a) Loop Compensation

ループ補償性能は、コントローラ全体の性能を決める重要なポイントです。アナログ制御でもデジタル制御でも基本的には同じ補償特性が必要ですが、デジタル制御にはパラメータの調整・変更がきわめて容易にできるというメリットがあります。

アナログ制御では、部品定数によって補償特性が決まるので、調整は部品の交換と特性評価の繰り返しになります。開発段階で手間と時間がかかることがあります。デジタル制御ではソフトウェアのパラメータを変更するだけなので、適切なツールを用いれば評価中にパラメータを変更していくことも可能になります。

#### (b) Programmable Fault and Operating Conditions

電源回路では常に過電流、過熱などの異常状態(Fault Condition)を監視し、発生時には即座にシャットダウン、電圧低下などの対策をとることが必要です。

デジタル制御ならば、どのような状態を異常として検出するか、検出時にどのような対策をとるかをソフトウェアで柔軟に設定できます。また、変更も容易です。

#### (c) Telemetry

デジタル制御電源では、異常状態の検出だけでなく、電源回路のさまざまな状態をきめ細かく監視、記録することができます。さらに、電源回路を使用しているユーザ機器でトラブルが発生したときも、内部レジスタに保存された記録を読み出すことにより、トラブルシューティングに役立てることができます。

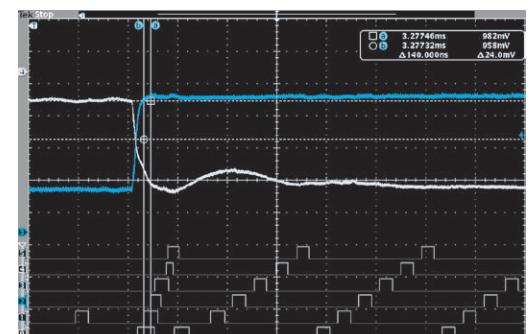
#### (d) Dynamic Phase Control

マルチフェーズ電源を効率良く利用するには、負荷電流に応じてフェーズ数をダイナミックに変化させることができます。アナログ制御ではきめ細かいフェーズ数の制御は難しいのですが、IRのデジタル制御技術を用いれば、必要に応じて1フェーズ単位でフェーズ数を最適化できます。

#### (e) ATA(Adaptive Transient Algorithm)

IRの優れたデジタル制御技術の一つです。電源の出力変動をきめ細かく検出して、即座に適切な対応をとることによって、出力変動を最小に抑えることができます。

たとえば、急激な負荷電流の変動によって出力電圧が変動する場合、デジタル制御では初期の出力電圧下降、それに続く出力電圧の傾斜、変動の底の波形、変動から戻る出力電圧上昇などを高い精度で検出して対応することにより、変動の大きさや変動時間を最小化できます。それによって、プロセッサ・メーカーが要求する厳しい電圧変動の規格を満たすことができます。



#### (f) Field Upgrade Compatibility

デジタル制御では、I2C/PMBusインタフェースを利用して内部ファームウェアの書き換えが可能です。電源回路を使用しているユーザ機器を、フィールドでアップデートすることもできます。

#### (g) Fast System Bring Up Tuning and Validation

最近では、ユーザ機器の開発スケジュールもきわめてタイトになっており、早い時期に基板レイアウトを決定することが要求されています。

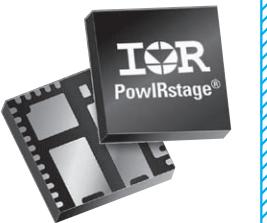
アナログ制御では、電源の設計変更やパラメータ調整には受動部品の変更が必要なので、基板レイアウト決定よりも前に電源設計を済ませておく必要があります。デジタル制御ならソフトウェアの変更だけですむので、早い時期に基板レイアウトを決定することが可能です。

同じ基板を使って、きめ細かく仕様をカスタマイズすることも可能ですし、ユーザ側での急な仕様変更にも対応することができます。

このように多くのメリットが得られることから、最近の高性能プロセッサ向け電源ではデジタル・コントローラが用いられることが多くなってきました。

## こうして使おうパワーデバイス

### 第15回 高性能プロセッサ向け 電源技術、マルチフェーズ



PC、サーバなどの高性能プロセッサを動作させるには、1V前後で100A以上の大電流を供給可能な電源回路が必要です。さらに、低電圧動作になるほど出力電圧精度、低リップル、高速負荷応答が必要になり、きめ細かい省電力に対応する電源管理機能なども要求されます。これらを満足するために、高性能プロセッサ向けとしてデジタル・コントローラやマルチフェーズなどの電源技術が開発・活用されています。今回は、マルチフェーズの最新技術を中心に紹介します。

#### マルチフェーズが使われる背景

高性能プロセッサ向けの電源にマルチフェーズが用いられるようになったのは、出力電流の増加への対応と、応答性向上の要求という二つの理由からです。

プロセッサは、半導体プロセスの微細化を進めるためにコア電圧を下げ、トータル消費電力をなるべく増やさずに高集積化と高速化を両立してきました。これは、プロセッサの性能を急速に向上させてきた主要な要因ですが、電源回路はより厳しい条件です。

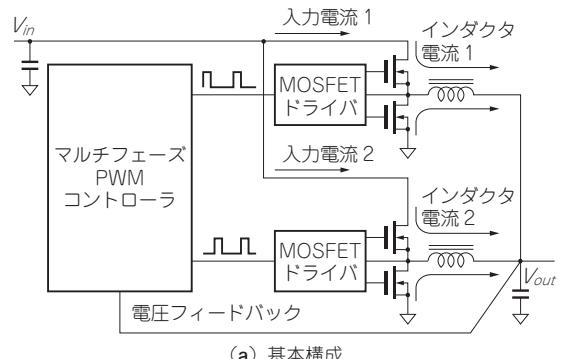
電源回路が出力する電力が同じでも、出力電圧 $V_{OUT}$ が低下すればその分だけ出力電流 $I_{OUT}$ が増加するので、電流に比例して損失が増大します。損失を増やさないためには、MOSFETなどの半導体部品や、インダクタなどの受動部品、さらには配線などあらゆる部分の抵抗成分を減らすことが必要で、部品の大型化やコストアップなどの問題が出てきます。

さらに、プロセッサの高速化が進むとともに、負荷変動も高速化の一途をたどり、電源回路の応答性に対する要求も厳しくなっています。過渡的な負荷変動には出力コンデンサの充電/放電によって対応しますが、大きな変動にはスイッチングのサイクルごとにパルス幅を制御して追従させる必要があります。プロセッサの高速化に対応して、電源回路のスイッチング周波数 $F_{SW}$ や制御の高速化も求められます。

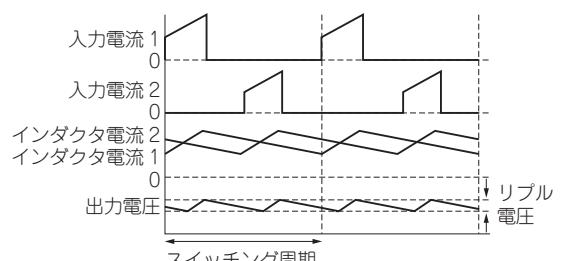
目安として、高性能プロセッサ用電源では、クロックスピードの1/1000程度の周波数でスイッチングすることが必要です。例えば2GHzのプロセッサには

2MHzのスイッチング周波数が要求されるので、電源回路にはなかなか厳しい条件です。

マルチフェーズ電源は、複数の電源回路を並列接続し、位相をずらして動作させるものです。並列化によって出力電流を増大できるとともに、同じスイッチング周波数でも複数の位相を用いることで疑似的にスイッチング周波数を高め、リップル低減や応答性向上、そして効率改善の効果があります。部品点数は増えますが、各部品は小型化できるので、低電圧、大電流、高速応答の電源を低成本で実現できます。



(a) 基本構成



(b) 位相をずらして入力ピーク電流や出力リップル電圧を低減する

図1.マルチフェーズ電源の基本構成と動作波形

マルチフェーズ電源の発想は古くからありました。実用回路として広く普及したのは2000年頃からです。その背景には、2000年にPentium IIIの1GHz版(コア電流20A超)、2001年にPentium 4の2GHz版(コア電流50A超)、2004年にPentium 4の3.8GHz版(コア電流100A超)が登場するというように、2000年代初頭

にはPC用プロセッサが急速に高速化するとともに、コア電流も急増したことがあります。

初期には1相あたり20A程度のものが多かったのですが、最近ではMOSFETやインダクタの低損失化が進んだため、1相あたり40A以上のものが多く用いられています。たとえば、2相で80A以上、3相で120A以上のマルチフェーズ電源が使われています。

#### 最近のマルチフェーズ用コントローラと PowIRstage®

複数の世代のサーバ/デスクトップPC/ノートPC向けに、マルチフェーズ用デジタル・コントローラと、統合型パワー段モジュールが製品化されています。

マルチフェーズ用デジタル・コントローラは、コア用電源(2~8フェーズ)とプロセッサ制御用電源(シングルフェーズ)を一括して制御可能な2ループ構成のコントローラ製品が各種ラインナップされています。

また、パワー段については、40~60Aの同期整流MOSFETとMOSFETドライバを組み合わせて6mm×6mmなどの小型で放熱性の高いパッケージに封入したPowIRstage®が各種ラインナップされています。次世代のPowIRstage®では、温度センサや電流センサも統合されて、より安全で使いやすいモジュールとして活用できます。

	IR3553	IR3558	IR3551	IR3550	IR3548 (二相)
連続出力電流	40A	45A	50A	60A	30/相
外形寸法	4mm×6mm	5mm×6mm	5mm×6mm	6mm×6mm	6mm×8mm

図2.PowIRstage®のラインナップ

#### マルチフェーズ電源の注意点

降圧型DC-DCコンバータは、元々はMOSFETなどのスイッチング素子とダイオードを組み合わせて実現されていました。この回路では、ダイオードは、スイッチング素子がオフすると自動的にオンする受動的スイッチング作用と、GNDからインダクタに電流を流す転流作用の二つの機能をもっていました。

また、MOSFETのオン時の損失はオン抵抗で決まりますが、十分に低オン抵抗のMOSFETを用いれば損失も十分に低減できます。ところが、ダイオードの

オン時の損失はダイオードの順電圧で決まりますが、順電圧の低いSBD(ショットキ・バリア・ダイオード)を選んでも、損失が生じるのは避けられません。さらにプロセッサのコア電圧の低下は、ダイオードの導通時間が長くなり、損失がさらに増加します。

これらの点から、MOSFETのスイッチング速度やオン抵抗が向上するに従って、降圧型DC-DCコンバータではダイオードが損失のボトルネックとなり、ダイオードをMOSFETで置き換えた同期整流型DC-DCコンバータが広く普及しました。

ただし、同期整流型DC-DCコンバータには注意すべき点があります。元々、降圧型DC-DCコンバータ(Buck Converter)と昇圧型DC-DCコンバータ(Boost Converter)は、ダイオード整流型では異なるトポロジだったのですが、ダイオードをMOSFETに置き換えると、トポロジは同一になってしまいます。

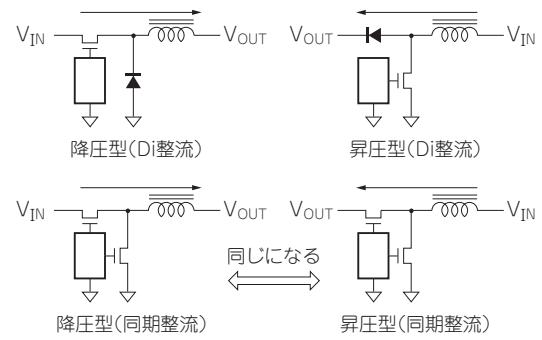


図3.降圧型トポロジと昇圧型トポロジ

すなわち、同期整流型の降圧型DC-DCコンバータは、出力から入力に電力を供給する昇圧型DC-DCコンバータとして働く可能性があるということです。

マルチフェーズ電源は、あるフェーズが降圧型DC-DCコンバータとして入力から出力に電力を変換しているとき、他のフェーズは昇圧型DC-DCコンバータとして出力から入力に電力を変換してしまう可能性があります。

これは、元々のダイオード転流型ではダイオードの整流作用を利用していたのが、同期整流型ではダイオードをMOSFETに置き換えたために整流作用が失われてしまったことから生じたものです。IRのマルチフェーズ用デジタル・コントローラは、このような降圧型同期整流のマルチフェーズDC-DCコンバータ特有の問題が生じないように制御を行っています。

## こうして使おうパワーデバイス

### 第16回 時代とともに

## 大きく変わってきたパッケージ技術



パワーデバイスのパッケージには、外部環境から半導体素子を保護すること、半導体素子と外部接続端子を接続すること、外部接続端子を用いてプリント基板に接続すること、半導体素子で発生する熱を外部に放熱することなどの役割があります。デバイスの信頼性向上、小型化やコスト低減、大電流化への対応に加えて、面実装化や鉛フリー化などプリント基板の実装技術の変化もあって、パッケージ技術は大きく進化してきました。今回は、パッケージの歴史から最新技術までを紹介します。

#### パッケージの外形寸法と標準化

半導体メーカーが違ってもプリント基板への実装に支障がないように、パッケージの形状・寸法などが標準化されてきました。日本ではJEITA、米国ではJEDEC、さらに国際的にはIECによって名称と仕様が登録されています。

JEDECではトランジスタ用パッケージにTO-xxの名称を用いており、小型面実装トランジスタが登場するとSOT-xxの名称を用いるようになりました。JEITAではSC-xxの名称を用いています。よく知られている例としては、メタルCANのTO-3、エポキシモールドの挿入実装用TO-247、TO-220、面実装用のSOT-23などがあります。ピン数が多いデバイスでは、ICと同じSO-8、TSOP-6などのパッケージのものもあります。

登録されたもの以外でも、D-PAK、D2-PAK、QFNのように複数のメーカーで使われているパッケージ、IRのDirectFET®のようにメーカー独自のパッケージもあります。

メタル CAN			面実装標準パッケージ(小電力用)		
TO-3	TO-5	TO-46	SO-8	TSOP-6	SOT-23
大電力用パッケージ					
表面実装型		挿入実装型			
DirectFET®	D-PAK	D2-PAK	PQFN	TO-220	TO-247

図1.主なパッケージの種類

#### パッケージの変遷

1960年代から円筒形の金属を用いたメタルCANパ

接続用ワイヤは一般的なIC/LSIで直径20～40μm、パワーDEVISでは数10～数100μm程度の金線、アルミ線、銅線などが用いられます。このワイヤの接続は、ワイヤ先端に超音波振動と圧力を加えて融着させるワイヤボンディングが用いられてきました。

最近では、MOSFETなどのデバイスの低オフ抵抗化、大電流容量化や高速化が急速に進み、ワイヤボンディングやリードフレームの電気抵抗、熱抵抗、インダクタンスが問題になってきました。それを解決するために、さまざまな新しい構造が使われるようになります。パッケージ技術の多様化が進んでいます。

まず、ワイヤボンディングを並列化し、本数を増やして電気抵抗を減らし、放熱性も向上させたパッケージが作られています。また、接続用極細ワイヤを幅広のリボンワイヤや銅クリップにすることで、大幅な低抵抗化、放熱性向上を実現しています。はんだ付けによる内部接続も行われており、そのため半導体素子でもはんだ付け対応の表面処理技術が使われています。

また、挿入実装のパッケージでも、端子を線状から板状に変えることで電気抵抗、熱抵抗、インダクタンスの低減をはかったWIDELEAD(幅広リード)が開発されています。このような新しい技術を駆使することにより、最大240Aという大電流容量も可能になっています。

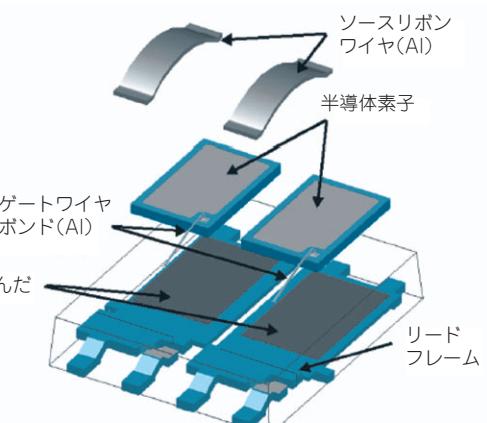


図2.リボンワイヤを使用したパッケージの例



図3.WIDELEAD(幅広リード)ビンパッケージ

#### パッケージ性能を追求した最新のDirectFET®

さらに低抵抗化、放熱性向上を進めるために、半導体素子の両面での半田による接続も行われています。

それを最も強力に押し進めたDirectFET®では、半導体素子の両面を金属電極でサンドイッチした構造を採用しています。それぞれをプリント基板の銅箔に直接はんだ付けすることによって、きわめて低抵抗かつ高い放熱性をもち、配線インダクタンスも極小のため高速性に優れ、放射ノイズも小さく、サイズもきわめて小型・薄型で、製造も容易にできるという多くの優れた特徴をもつ最新のパッケージです。

DirectFET®はコンピュータ用の高性能電源回路のために開発されたパッケージですが、高性能を生かしてD級オーディオアンプに用いられる他、超薄型の特長を生かして電動工具などにも用いられています。

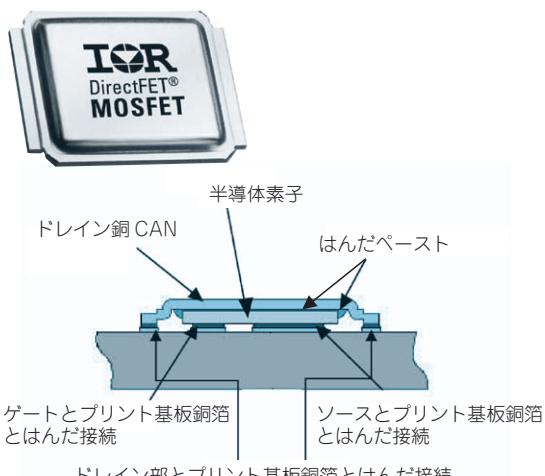


図4.DirectFET®の構造

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

### 第17回 モータ駆動アプリケーションを簡単にするIPM



クリーンで高効率な動力源であるモータを利用するアプリケーションは、産業用から家庭用まであらゆる分野で急激に増加しています。モータを利用するアプリケーションを開発するには、回路、モータ、メカ機構にまたがる広い技術が必要で、システム全体の設計に手間や時間がかかります。そのため、回路設計はなるべく簡単に済ませることが望まれます。また、製品の構造・形状ではモータやメカ機構が優先されることが多いので、回路の小型化も強く求められます。このような要望に応えて、パワーデバイスと駆動回路を統合して簡単に使えるIPM(Integrated Power ModuleまたはIntelligent Power Module)製品が作られています。

今回は、IPMの選び方や活用法をご紹介します。

#### IPMの構成と種類

IPMは、パワーデバイス(IGBTまたはMOSFET)とゲートドライバ(HVIC)を組み合わせ、さらにパワーデバイスに合わせて最適化した保護回路やブートストラップ回路を統合して、モジュールを構成しています。

難しい設計なしに簡単にパワーデバイスを動作させることができるとともに、安全性が高く、かつわめてコンパクトに回路を実現できます。

IPMは熱やEMCなどの問題も十分に考慮して作られているので、ユーザ側で基板設計や部品実装を行ったときに生じるさまざまな問題も避けられます。保護回路に必要な電流検出用シャント抵抗や温度検出用サーミスタも、高精度の素子をIPMに内蔵できるので、保護の信頼性も高くできます。

最も一般的なIPMは、6個のパワーデバイスと3相ゲートドライバを組み合わせた3相インバータ構成のものです。また、2個のパワーデバイスとゲートドライバを組み合わせたハーフブリッジ構成のものもあります。

IPMが最初に使われはじめたのはエアコンなどの家電機器です。ファンモータなどに適する数十Wクラスから、コンプレッサモータなどに適する数百W

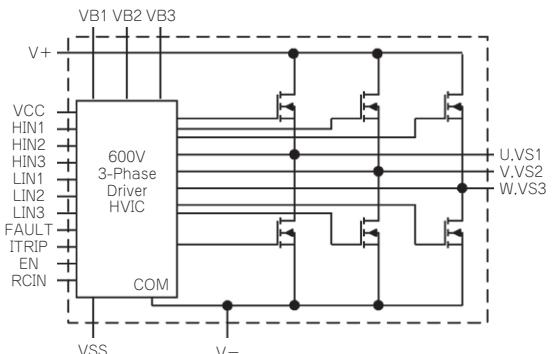


図1. 3相ブリッジ構成IPMの概略図

～数kWクラスまで、さまざまなIPMが作られるようになりました。それとともに、家電からポンプ、ファン、サーボなどの小型産業用モータまでIPMのアプリケーションも広がっています。

比較的高出力のものは、600V耐圧のIGBTとHVICを組み合わせた構成です。家電向けとして誕生したことから、IR社ではIRAM(IR Appliance Module)と呼んでいます。実装面積が極小のSIPタイプ(IPMファミリ)と、低背で面実装も可能なDIPタイプ(IPM-DIPファミリ)が作られています。

低出力のものは、250Vまたは500V耐圧のトレンチMOSFETとHVICを組み合わせた構成で、IR社ではμIPM™と呼んでいます。12×12mm, 8×9mm, 7×8mmなどの超小型面実装タイプ(μIPM™ファミリ)と、DIPタイプ(μIPM™-DIPファミリ)があります。

#### IPMの内部構造の特長

IRAMのSIPタイプとDIPタイプは、モジュール形状や実装方法が異なるだけでなく、内部構造にも違いがあります。

SIPタイプのIRAMは、絶縁型金属基板(IMS)上に配線を形成し、パワーデバイス、HVIC、周辺素子などを実装しています。配線や部品配置の自由度は一般的のプリント基板と同様に高く、放熱性が高い金属基板を採用するとともに、金属基板の部分を露出させるこ

とにより、優れた熱特性を実現しています。

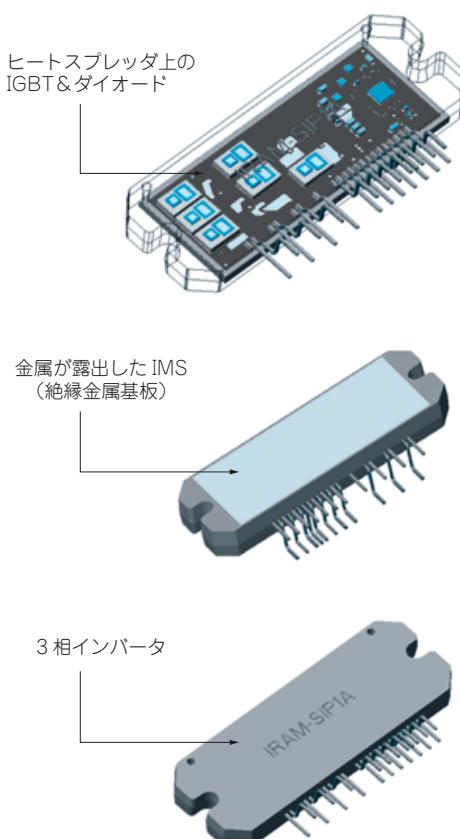


図2. IRAMの構造

IRAMのDIPタイプは、基板を使用せず、金属のリードフレームに直接パワーデバイス、HVIC、周辺素子などを実装しています。これも優れた放熱性が得られる方法ですが、配線や部品配置の自由度は低くなります。また、リードフレーム自体の材料コストは低いのですが、金型などの開発コストが高いため、大量生産向けの構造です。

IRAMの選択では、単に形状や実装方法だけでなく、このような内部構造の違いも考慮すると良いでしょう。

μIPM™はより小型で、大量に使用されることが多い製品なので、基本的にはリードフレーム構造を採用しています。

超小型面実装タイプは、システム基板にはんだ付ける端子部分の面積が広く、かつ内部素子から端子ま

での距離が極小になっているため、システム基板の銅箔を通じて、効率良く外気に放熱することができます。ヒートシンク不要で、実装面積を極小にできる特長があります。

μIPM™のDIPタイプは、広く用いられている標準パッケージを採用しています。ラインナップが豊富で、用途や製造設備の制約がなく、実装が容易で使いやすい特長があります。

#### 今後のIPMの拡大

モータを利用したアプリケーションの拡大とともに、IPMの製品化も広がっています。従来のIRAMを超える高出力向けの製品、IRAMとμIPM™の間を埋めるような製品が考えられています。形状や構造のバリエーションもさらに広がっていくと考えられます。

また、出力の違いや実装の違いだけでなく、機能的な発展も考えられます。

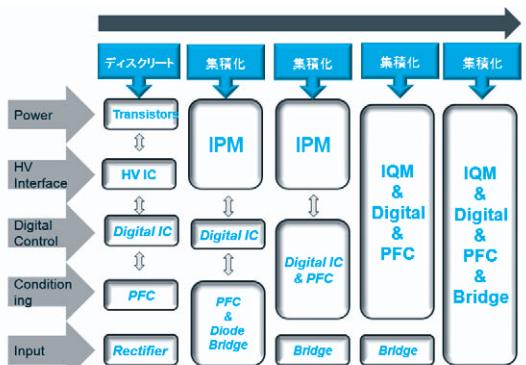


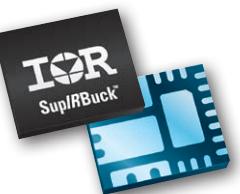
図3. モジュールの集積化が進む

一般的なAC給電のモータ・アプリケーションは、入力側から順に見て、整流器/ブリッジ⇒PFC⇒デジタル・コントローラ(マイコン/専用IC)⇒HVIC⇒IGBT/MOSFETのように構成されます。IPMは、このうち最も出力側にあるHVICとIGBT/MOSFETをモジュールとして統合したものです。

今後はさらに入力側にも統合を広げてほしいという要望はもちろんあります。ただし、これから先の統合を進めると、汎用性が急速に失われてしまう問題があります。現在は一般的なIPMの他に、IPMとPFCを統合したPFC内蔵IPMが製品化されています。

## こうして使おうパワーデバイス：応用編

### 第18回 Buck コンバータの フィードバック技術



多くのアナログ回路では、クローズド・ループのフィードバック回路を用いて、電流や電圧を一定値に保ったり、対象の変化に追従させるような制御を行っています。DC-DCコンバータなどの定電圧電源はフィードバック・ループの典型的な例であり、入力電圧や負荷電流の変動に影響されずに出力電圧を一定に保つように制御を行っています。現実の回路では、理想通りにフィードバック制御を行うことはできず、変動に対する過渡的な応答性や、発振を防止する位相補償特性が、制御の良し悪しを決める重要な評価ポイントになります。

今回は、Buck型DC-DCコンバータを例として、フィードバック制御の方法や注意点をご紹介します。

#### フィードバック制御の原理

フィードバック制御は、制御で得られた出力電圧を基準電圧と比較し、それらが一致するように出力電圧を制御します。そのために、出力電圧と基準電圧の差(偏差)を検出してエラー・アンプで増幅し、偏差が0になるように常に制御を行います。出力が高すぎれば低くするように、低すぎれば高くするように、誤差を打ち消す方向の制御なので、負帰還(Negative Feedback)と呼んでいます。

実際の回路では、アンプの特性や回路の寄生成分による位相遅れが生じ、遅れが $180^\circ$ になる周波数では負帰還( $-180^\circ$ )が正帰還( $-360^\circ$ )に変化してしまいます。この周波数でゲインが0dB以上あると、発振により出力電圧が不安定になるので、位相補償回路が必要になります。

位相補償は、一般に高域におけるエラー・アンプの

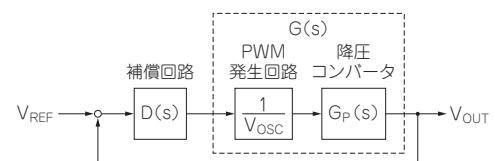


図1. クローズド・ループのフィードバック回路の原理図

ゲインを下げる方向に働くので、変動に対する応答性を低下させる問題があります。応答性をなるべく低下させずに補償を行うように、さまざまな位相補償回路が用いられています。

#### 高速負荷応答の要求

特に、最近では負荷変動に対する応答性の要求が厳しくなっています。大規模ロジック回路に電源を供給するDC-DCコンバータでは、ロジック回路の高速化、大規模化が進むとともに、負荷変動はきわめて高速、大電流になっています。このような用途では、負荷電流は連続ではなくパルス電流の集まりと見なさなければなりません。負荷電流が0Aと最大電流の間で急激に変化しても、高精度な出力電圧を保つことが求められています。

一般には負荷変動と呼ばれる特性ですが、このようなパルス電流による出力電圧の変動を考えるときは、特に「高速負荷応答特性」、「過渡応答特性」、「トランジション特性」などと呼んでいます。

#### 位相補償の方法

位相補償回路は、元々のパワーレベルの位相特性に対してゼロや(zero)ポール(pole)を挿入して位相特性を改善します。

基本的には、ゲインが0dBになる周波数 $f_0$ で位相余裕をもたせるために、ゼロを挿入して位相を進めます。逆に、位相遅れが $180^\circ$ に近づく周波数でゲインを低下させるために、ポールを挿入します。負荷応答性を高めるには、なるべく広い帯域で高いゲインをもたせます。かつ、発振を防ぐには、ゲインが0dB以上の帯域で十分な位相余裕をもたせます。そのために、ゼロやポールを適切に挿入することが必要です。

DC-DCコンバータの位相補償では、タイプIIと呼ばれる方式とタイプIIIと呼ばれる方式が主に用いられています。

タイプIIは、2ポール1ゼロの方法で、少ない部品で位相補償を実現できる特徴があります。ただし、エラー・アンプの周波数帯域はあまり広くできないので、高速負荷応答が求められる用途には不向きです。一般的なDC-DCコンバータに用いられます。

タイプIIIは、エラー・アンプの入出力間にCRと並列C、入力側の電圧設定用抵抗(分圧抵抗の上側)と並列にCRという5個の素子を使用して、3ポール2ゼロの補償を行います。回路はやや複雑になりますが、エラー・アンプの周波数帯域を広くでき、負荷応答を高速化できます。

CPU用のVRM(Voltage Regulator Module)やFPGA(Field Programmable Gate Array)用のDC-DCコンバータにはタイプIIIの位相補償が用いられています。

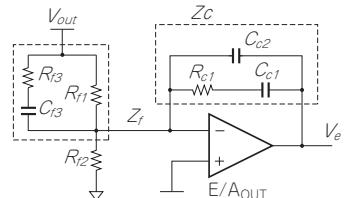


図2. タイプIIIの位相補償回路の図

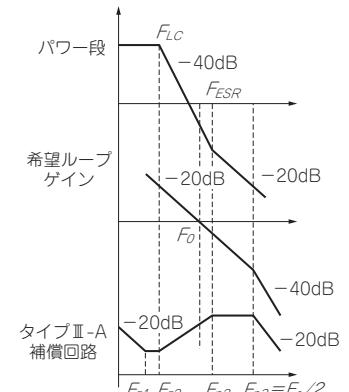


図3. タイプIIIの位相補償の特性の図

#### 出力電圧の制御方式による違い

DC-DCコンバータでは出力電圧の制御に電圧モード、電流モードの二つのPWM(Pulse Width Modulation)方式や、PWMを使用しない固定ON時間モード(Constant ON time)など、複数の方法が用いられています。

います。方式によって位相補償の方法が変わります。電流モードと固定ON時間モードは、位相補償を必要としない利点があります。

電圧モードでは、出力電圧を安定化するために、出力電圧をフィードバックして基準電圧と比較・增幅します。最も広く用いられている方式であり、特性も良好です。位相補償が必要ですが、タイプIIIを用いれば高速の負荷応答が得られます。一方、高速応答が必要ない用途では、タイプIIの位相補償を用いて回路を簡素化できます。

電流モードは、電圧のフィードバックに加えて、インダクタ電流などの電流を検出してフィードバックを行います。基本的に、位相補償は不要になります。

固定ON時間モードは、固定幅のONパルスを使用し、ONパルスとONパルスの間隔(OFF時間)を制御して出力電圧を安定化します。PWMを使用せず、位相補償も必要ないので、回路を小型化できます。最近、多く使われるようになってきた方式です。

IRのSupIRBuck®は、Buck型同期整流DC-DCコンバータを用いた高速・高効率のパワー・モジュールです。ハイサイド、ローサイドの2個のMOSFETと制御用ICの3チップで構成され、少ない外付け部品で簡単に使えて、最大35Aまでの出力が得られます。

SupIRBuck®には、IR38xxシリーズとIR34xxシリーズがあります。IR38xxシリーズは電圧モードの制御用ICを用いた製品で、タイプIII位相補償を用いることによって、高速負荷応答と広帯域での安定性を両立しています。IR34xxシリーズは固定ON時間モードの制御用ICを用いた製品で、位相補償回路が不要で、少ない部品点数で実現されています。

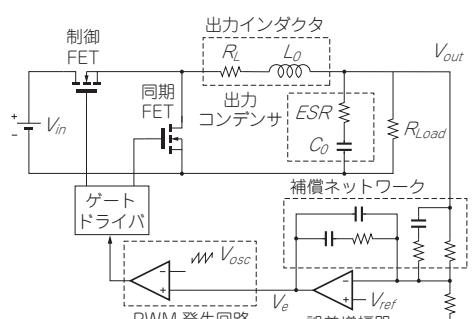


図4. 電圧モード・アンプによるBuck型同期整流DC-DCコンバータの基本回路

## こうして使おうパワーデバイス

### 第19回 高効率モータ制御を トータルに実現する iMotion™



エアコンをはじめ、数多くの家電製品にモータが使われています。モータを効率良く駆動するには、IGBTやMOSFETなどのパワー・デバイスの低損耗化だけでなく、モータ制御の良し悪しがトータルの効率に大きく効いてきます。そして、高効率モータ制御を実現するためには高性能マイコンと高度な制御プログラムが必要で、ハード・ソフトの負担がとても大きくなっていました。そこで、IRでは専用デジタル制御プロセッサ、HVIC、IPM、PFCを組み合わせて高効率モータ制御を簡単に実現できる統合設計プラットフォームiMotion™を提供しています。今回は、この統合設計プラットフォームiMotion™と、専用デジタル制御プロセッサであるiMotion™ ICについてご紹介します。

#### 統合設計プラットフォームiMotion™

エアコン、冷蔵庫、乾燥機などのヒートポンプに用いられるコンプレッサ、それらの送風や扇風機などのファン、洗濯機や掃除機など、家電製品では多くのモータが使われています。それらのモータは、単なる定速回転ではなく、可変速制御を用いて駆動することが必要です。

そのため、一般的にはまずマイコンで制御演算を行

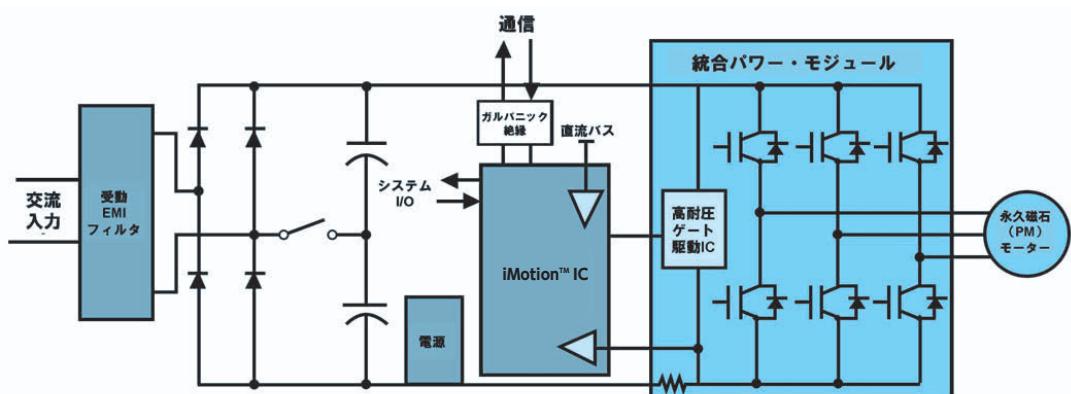


図1. iMotion™(統合設計プラットフォーム)の全体図

#### 高度なモータ制御を簡単に実現できるiMotion™ IC

iMotion™統合設計プラットフォームの中核となっているのが、高度なモータ制御を簡単に実現する専用デジタル・コントローラであるiMotion™ ICです。

IRはパワー・デバイスに特化した専門メーカーですが、意外なことに、一つの型番でワールドワイドの出荷個数が最も多いのは、このiMotion™ ICです。汎用マイコンに替わるモータ制御用デジタル・コントローラとして、iMotion™ ICは広く支持されていると言えるでしょう。

コンプレッサ、ファンなどの家電製品用モータとしては、効率が良くインバータによる可変速制御が容易な永久磁石同期モータ(PMSM)が主に用いられています。以前は制御が簡単な方形波駆動でしたが、電流変動が小さく騒音や振動を抑えられる正弦波駆動に置き換えられ、最近では位置センサなしに高精度、高効率を実現できるセンサレスのベクトル制御が主流となっています。

このようなモータ制御は、一般的にはマイコンやDSPを用いた制御演算で実現されてきました。しかし、制御演算が複雑化するにつれて、ソフトウェア開発の負担が大きいこと、リアルタイム演算のために高性能マイコンを必要とすること、高効率モータ制御を実現するには高度なノウハウが必要なことなど多くの問題を生じています。

IRでは、ソフトウェア開発なしに高効率のセンサレス・ベクトル制御を高速に実行するMCE(モーション・コントロール・エンジン)を開発しました。MCE

は、特に高速演算を必要とする電流ループなどの部分をハードウェアで高速化し、最適化された制御演算を実行します。さらに、MCEはプログラマブルに構成されていて、ユーザが制御をカスタマイズしたい場合は、MATLAB/Simulinkのグラフィカルなブロック図を用いて簡単に編集ができます。

iMotion™ ICは、このMCEと、アナログ信号の整形/変換を行うASE(アナログ制御エンジン)、システム全体の制御やユーザ・インターフェースを行う汎用MCU(8051)を統合したアナログ・デジタル混在ICです。汎用MCUのソフトウェアは任意に開発できます。

現在、iMotion™ ICとしてIRMCF/K300シリーズ、IRMCF/K100シリーズ、IRMCF/K0シリーズの3シリーズがラインアップされています。IRMCKは量産向けのワンタイムROM搭載のデバイス、IRMCFは開発用および量産用にも使用できるフラッシュメモリ搭載のデバイスです。

IRMCF/K300シリーズは2個のモータ制御機能とPFC機能を内蔵する多機能デバイスです。エアコン室外機のコンプレッサ・モータ制御とファン・モータ制御を1個のデバイスで行うことができます。

IRMCF/K100シリーズは、1個のモータ制御機能をもつ单機能デバイスです。

IRMCF/K0シリーズは、MCEに特化したモータ制御専用デバイスです。単純にモータだけを回したい用途や、外付けマイコンと組み合わせてシステムを構成したい用途に適しています。

このiMotion™を活用すれば、高効率モータ制御アプリケーションを誰でも簡単に実現でき、かつシステム全体をトータルで高効率化できます。

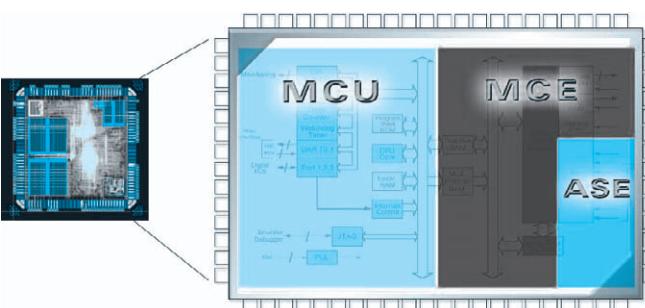


図2. iMotion™ IC

MCU：アプリケーションプログラムおよび通信プログラム  
MCE：モータ制御およびパワエレ制御  
ASE：アナログ信号処理