

パワー・デバイスIGBT 活用の基礎と実際

MOSFETとトランジスタの特徴を活かしたスイッチング素子

五十嵐征輝 [編著]

Seiki Igarashi

見本

このPDFは、CQ出版社発売の「パワー・デバイスIGBT活用の基礎と実際
【オンデマンド版】」の一部内容見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

<https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/53/53001.html>

目次

第 1 章	IGBT の基礎知識 —————	009
1.1	パワー半導体デバイスの種類 —————	009
1.2	パワー半導体デバイスの構造と特徴 —————	012
	サイリスタ 012	
	バイポーラ・トランジスタ 015	
	MOSFET 016	
	IGBT 017	
1.3	IGBT の最新技術 —————	020
	IGBT の理想的なキャリア分布 021	
	理想的なキャリア分布を実現するための技術革新 022	
1.4	IGBT のいろいろな製品 —————	027
	モジュール構造 030	
1.5	パッケージの進化 —————	032
1.6	IGBT の電気的特性 —————	033
	絶対最大定格 036	
	静特性(出力特性) 036	
	スイッチング特性 037	
	容量特性 040	
	安全動作領域 042	
	還流ダイオード(FWD)の特性 042	
	過渡熱抵抗特性 043	
1.7	IGBT の選び方 —————	044
	電圧定格 044	
	電流定格 044	
1.8	IGBT モジュール選定の際の注意事項 —————	046
1.9	IGBT を使用した装置 —————	050
	column IGBT の等価回路の表記について 019	

第2章	ゲート・ドライブ回路の設計 —————	061
2.1	ゲート順バイアス電圧 $+V_{GE}$ (ON期間) ———	061
2.2	ゲート逆バイアス電圧 $-V_{GE}$ (OFF期間) ———	062
2.3	ゲート抵抗 R_g —————	063
2.4	ドライブ電流について ———	065
2.5	デッド・タイムの設定 ———	067
2.6	ゲート・ドライブ回路の具体例 —————	068
第3章	保護回路の設計と並列接続 —————	077
3.1	短絡保護と過電流保護 ———	077
	短絡の発生原因と短絡耐量 077	
	短絡(過電流)の検出方法 079	
3.2	過電圧保護 —————	081
	コレクター-エミッタ間過電圧発生要因 081	
	過電圧抑制方法 082	
	スナバ回路の種類と特徴 083	
	放電阻止型RCDスナバ回路の設計方法 084	
	サージ電圧の特性 090	
3.3	過熱保護 —————	090
	放熱フィン温度(T_f)検出による保護 090	
	モジュール・ケース温度(T_c)検出による保護 091	
	モジュール内蔵IGBTチップ温度(T_j)検出による保護 092	
3.4	電流分担の阻害要因 —————	092
	ON状態での電流不均衡の要因 092	
	ターンオン/ターンオフ時の電流不均衡の要因 094	
3.5	並列接続方法 —————	094
	配線方法 094	
	素子特性と電流分担の関係 095	
第4章	放熱設計方法 —————	097
4.1	発生損失の求め方 —————	097
4.2	DCチョップパで発生する損失の計算方法 ———	098
4.3	近似式を用いたPWMインバータの発生損失 ———	100
4.4	損失シミュレーション・ソフトを用いた計算 ———	102
	IGBT損失シミュレーション・ソフトについて 102	

	負荷モードが連続時の計算	105
	負荷モードが変化する場合の計算	107
4.5	ヒート・シンク(冷却体)の選定方法	110
	定常状態の熱方程式	110
4.6	過渡状態の熱方程式	112
	冷却体の種類	112
4.7	ヒート・シンクの取り付け方法	114
	ヒート・シンク表面の仕上げ	114
4.8	サーマル・コンパウンドの塗布	115
	サーマル・コンパウンドの種類	115
	サーマル・コンパウンドの塗布方法	117
4.9	IGBTモジュールの締め付け方法	117
第5章	ノイズ低減対策技術	119
5.1	インバータ・システムのEMC	119
5.2	EMI性能	121
5.3	インバータにおけるEMI対策	122
	コモン・モード・ノイズとノーマル・モード・ノイズ	122
	インバータのノイズ対策	123
	モジュール特性に起因するノイズの発生メカニズム	124
5.4	IGBTモジュールの適用におけるEMI対策	127
	モジュールの特性が影響する周波数帯	127
	伝導性ノイズ(雑音端子電圧)対策	128
	IGBTへの放射ノイズ対策	131
	まとめ	138
第6章	トラブル発生時の対処方法	139
6.1	故障の判定方法	140
6.2	代表的なトラブルとその対処方法	144
第7章	インテリジェント・パワー・モジュールIPM	153
7.1	IPMの特徴	153
7.2	IPMの機能	156
	パワー部の特徴	158
	制御部(IGBT駆動, 保護機能)の特徴	159
	保護動作時の出力OFF動作	159

7.3	IPMに内蔵されている保護機能のタイミング・チャート	162
	過電流保護(OC)	162
	短絡保護(SC)	163
	ケース過熱保護機能	165
	IGBTチップ過熱保護機能(OH)	166
	制御電源電圧低下保護(UV)	170
7.4	IPMの応用回路	172
	参考文献	177
	索引	179
	著者略歴	183

第 1 章

IGBTの基礎知識

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 絶縁ゲート型バイポーラ・トランジスタ)は、MOSFETとバイポーラ・トランジスタの長所を活かしたパワー半導体デバイスです。パワー半導体デバイスとは、電源やモータ制御などのように電力を消費する電子回路で使用される半導体素子です。ディスクリートのパワー半導体デバイスとしては、整流ダイオード、トランジスタ、サイリスタなどがありますが、IGBTはトランジスタに分類されます。

これらのパワー半導体デバイスは、電流あるいは電圧をON/OFFすることによって電力をコントロールすることが重要な役割になります。このときのスイッチング速度は、主として直流から低周波領域ではサイリスタが、中速度ではバイポーラ・トランジスタが、そして高速度ではMOSFETが使用されています。このスイッチング速度は、効率の向上と装置の小型化の要求により高速化が進んでいます。IGBTは、バイポーラ・トランジスタとMOSFETの中間に位置しており、モータ可変速駆動装置や産業用ロボット装置、コンピュータの無停電電源装置(UPS)など、スイッチング周波数が数kHz～20kHz程度の中容量の装置に使われています。

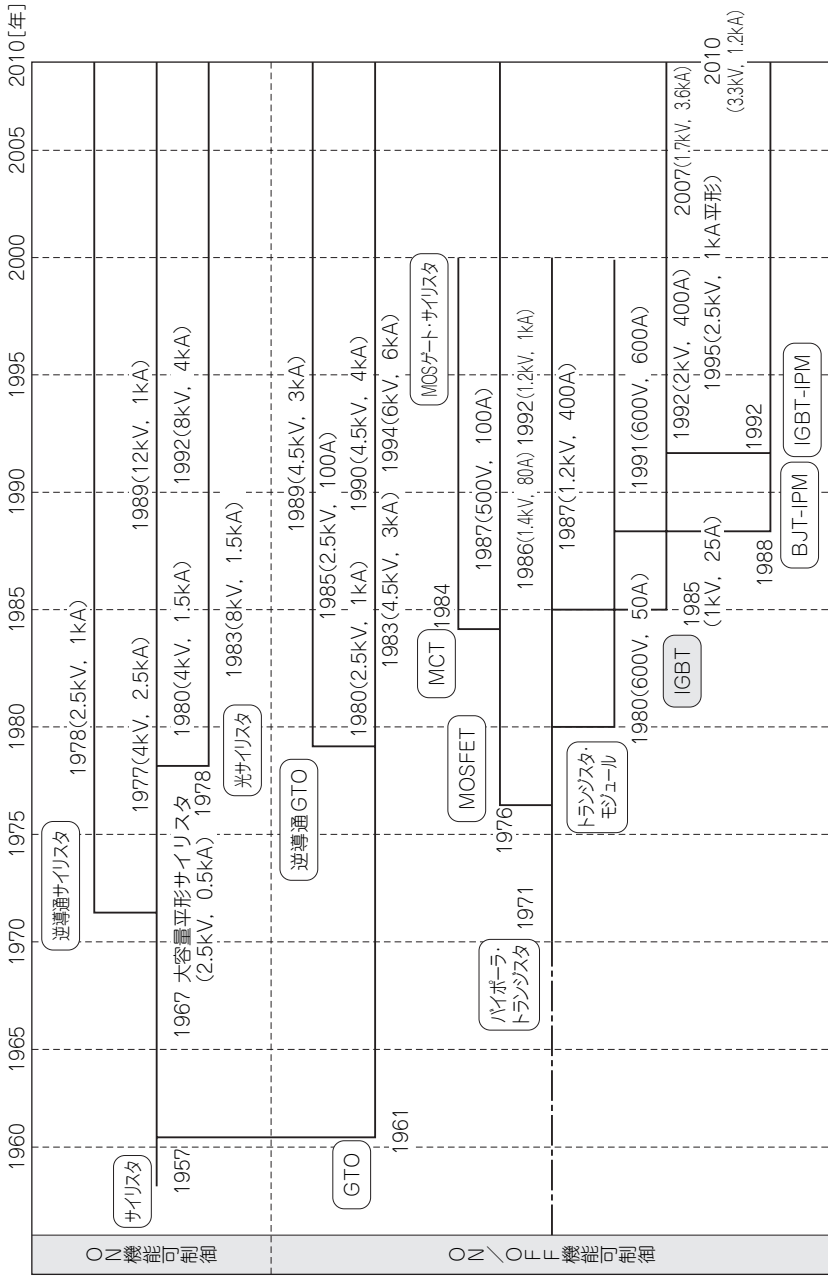
最近では、小容量(家庭用・業務用エアコン、冷蔵庫のコンプレッサ駆動など)から大容量では電車のモータ駆動装置など、我々の周りのいろいろな電気機器にIGBTが使われるようになってきました。

1.1

パワー半導体デバイスの種類

パワー・エレクトロニクスは、パワー半導体デバイスを用いて電力を変換する技術として発展してきました。本節では、パワー・エレクトロニクスのキー・パーツであるパワー半導体デバイスの代表例とその動作や機能について説明します。

図1-1に、主なパワー半導体デバイスの発展のようすを示します。サイリスタは、水銀整流器に代わるパワー半導体デバイスとして高耐圧化、大容量化が進められ、さらに高電圧パワー半導体デバイスとして光サイリスタや、ON/OFF制御が可能

[図 1-1] パワー半導体デバイスの発展⁽¹⁾

第2章

ゲート・ドライブ回路の設計

本章では、IGBTをON/OFFするゲート・ドライブ回路の設計方法について解説します。IGBTの性能を引き出すためには、ゲート・ドライブ回路の設計が大変重要になってきます。すなわち、IGBTはドライブ条件であるゲート電圧、ゲート抵抗によって特性が変化するので、目標とする設計にあわせた設定をしなければなりません。

表2-1は、IGBTのドライブ条件とIGBTの特性の変化についてまとめたものです。本章では、最初にゲート条件とIGBT特性の関係を示し、次に具体的なゲート・ドライブ回路の設計例を示します。そして、最後に設計する際に注意すべきことを紹介します。

2.1

ゲート順バイアス電圧+ V_{GE} (ON期間)

ゲート順バイアス電圧+ V_{GE} は、IGBTをONさせるためにゲートに加える電圧です。IGBTのゲート耐圧は一般的に $\pm 20V$ なので、ゲート順バイアス電圧の推奨値は+15Vです。+15Vを基準にして、少し高め(+1~+1.5V)に設定します。ただし、+ V_{GE} が高いほどON電圧は下がるため損失は小さくなりますが、ターンオン・ス

[表2-1] IGBTのドライブ条件と主要特性

特 性	順バイアス電圧 増やす	逆バイアス電圧 増やす	ゲート抵抗 増やす
ON電圧	減少	変化なし	変化なし
ターンオン特性(時間・損失)	減少	変化なし	増加
ターンオフ特性(時間・損失)	変化なし	減少	増加
ターンオン・サージ電圧	増加	変化なし	減少
ターンオフ・サージ電圧	変化なし	減少	最適値あり
dv/dt 誤点弧	増加	減少	減少
短絡耐量(時間)	減少	変化なし	増加
EMIノイズ	増加	変化なし	減少

注▶スイッチング時間、損失、サージ電圧、ノイズのバランスをとることが重要

ピードが速くなって dv/dt 誤点弧(後述)を起こしたり、短絡耐量の減少、EMIノイズが増えるなどの問題が起こりやすくなります。

以下に、 $+V_{GE}$ の設計時の留意事項を示します。

- (1) $+V_{GE}$ はゲート-エミッタ間最大定格電圧 $V_{GES} = \pm 20V_{(\max)}$ の範囲内で設計する。
- (2) 電源電圧の変動は $\pm 10\%$ 以内を推奨。
- (3) ON期間中のコレクタ-エミッタ間飽和電圧($V_{CE(\text{sat})}$)は $+V_{GE}$ によって変化し、 $+V_{GE}$ が高いほど低くなる。
- (4) ターンオン・スイッチング時の時間や損失は、 $+V_{GE}$ が高いほど小さくなる。
- (5) ターンオン時(FWD逆回復時)の対向アームのサージ電圧は、 $+V_{GE}$ が高いほど発生しやすくなる。
- (6) IGBTがオフ期間中でもFWDの逆回復時の dv/dt により誤動作し、パルス状のコレクタ電流が流れて不要な発熱を招くことがある。この現象は dv/dt 誤点弧と呼ばれ、 $+V_{GE}$ が高いほど発生しやすくなる。
- (7) $+V_{GE}$ が高いほど IGBTの飽和電流(制限電流値)が高くなる。
- (8) 短絡耐量は、 $+V_{GE}$ が高いほど小さくなる。

2.2

ゲート逆バイアス電圧 $-V_{GE}$ (OFF期間)

ゲート逆バイアス電圧は、IGBTをOFFさせておくための電圧値です。ゲート逆バイアス電圧 $-V_{GE}$ の推奨値は、 $-5V$ から $-15V$ です。逆バイアス電圧に依存する主なIGBTの特性は、ターンオフ時間と損失です。逆バイアス電圧が大きいほど、ターンオフ・スピードは速く(損失は小さく)なります。

また、 dv/dt 誤点弧は、逆バイアス電圧が小さいほど発生しやすくなります。ディスクリット・タイプなどの小容量素子では、ドライブ回路との配線を短くできるため、 $-V_{GE} = 0V$ でも問題が生じにくい傾向にあります。モジュールを使用した装置はゲート配線が長くなってしまいますので、逆バイアス電圧の設定には注意が必要です。

以下に、 $-V_{GE}$ の設計時の留意事項を示します。

- (1) $+V_{GE}$ は、ゲート-エミッタ間最大定格電圧 $V_{GES} = \pm 20V_{(\max)}$ の範囲内で設計する。
- (2) 電源電圧の変動は、 $\pm 10\%$ 以内を推奨。
- (3) IGBTのターンオフ特性は $-V_{GE}$ に依存し、特にコレクタ電流がOFFし始める

3

第 3 章

保護回路の設計と並列接続

配線ミスや制御回路の誤動作などによりIGBTモジュールが短絡すると、高い電圧や電流がIGBTに印加されるため、このような短絡状態をすばやく検出して保護する(モジュールを強制的に遮断する)必要があります。そこで本章では、IGBTモジュールの保護回路の設計手法について説明します。

また、通電電流能力を稼ぐためにIGBTを並列に接続して使用することがあります。本章では、IGBTを並列に接続する場合の電流分担の阻害要因と並列接続時の留意点についても説明します。

3.1

短絡保護と過電流保護

● 短絡の発生原因と短絡耐量

IGBTが適用される装置において、短絡事故が発生するとIGBTが破壊されることがあります。インバータ装置の例として、その短絡モードの種類と発生原因を図3-1に示します。IGBTモジュールには、短絡状態での破壊耐量(短絡耐量)が規定されており、短絡が発生してから耐量以内(通常は数 μs ~10 μs 程度)の時間で遮断しなくてはなりません。

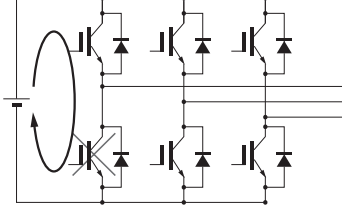
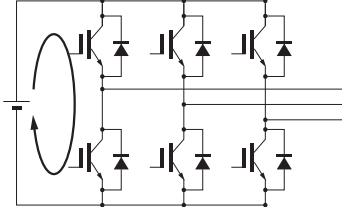
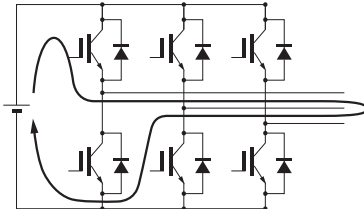
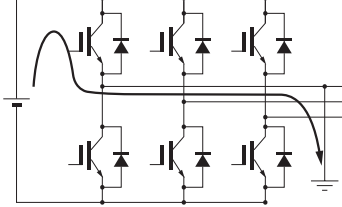
短絡事故が発生するとIGBTのコレクタ電流が増加し、所定の値を超えるとコレクタ-エミッタ間の電圧が急増します(IGBTの活性領域)。この特性により、短絡時のコレクタ電流は一定の値以下に抑制されますが、IGBTには高電圧、大電流の大きな負荷が印加された状態になり、この負荷が過大になるとIGBTが破壊されるので、可能な限り短時間でこの負荷を取り除く必要があります。この許容責務をIGBTの短絡耐量といい、短絡耐量は図3-2のように短絡電流の流れ始めから破壊に至るまでの時間で規定します。その例を下記に示します。

短絡耐量： $\geq 10\mu\text{s}(\text{min})$

〈条件〉

- V_{CC} 600V素子： $E_d(V_{CC}) = 400\text{V}$ ，1200V素子： $E_d(V_{CC}) = 800\text{V}$

- $V_{GE} = 15V$
- R_G : 標準値 R_G
- $T_j = 125^\circ C$

短絡経路	原因
<p>アーム短絡</p> 	<p>トランジスタまたはダイオードの破壊</p>
<p>直列アーム短絡</p> 	<p>制御回路, ドライブ回路の故障, またはノイズによる誤動作</p>
<p>出力短絡</p> 	<p>配線作業などの人為的なミスおよび負荷の絶縁の破壊</p>
<p>地絡</p> 	<p>同上</p>

[図3-1] 短絡モードの種類とその発生原因

第4章

放熱設計方法

IGBTを安全に動作させるためには、接合部温度 T_j が $T_{j(max)}$ を超えないような放熱設計が必要になります。変換装置の定格出力(連続)時はもちろん、短時間過負荷出力などの異常時においても $T_{j(max)}$ を超えないような配慮が必要です。

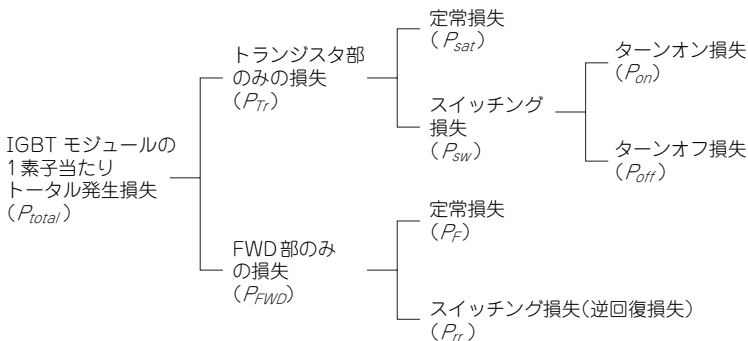
4.1

発生損失の求め方

IGBTモジュールはIGBT部とFWD部で構成されており、それぞれの発生損失の合計がIGBTモジュール全体の発生損失となります。また、損失が発生する場合は定常時とスイッチング時があり、以上のことを整理すると次のようになります。

図4-1に示すように、IGBT部もFWD部も定常損失は出力特性から、またスイッチング損失はスイッチング損失-コレクタ電流特性から計算することができ、これらの発生損失から放熱設計を行い、接合部温度 T_j が設計値を超えないようにします。

したがって、ここで使用されるON電圧やスイッチング損失の値には、通常接合部温度 T_j が設計値(通常は $T_j=125^{\circ}\text{C}$)のときのデータが使われます。これらの特性データは、仕様書に記載されています。



[図4-1] IGBTモジュールの損失要因

まず、基本的なDCチョップで発生する損失の計算方法を紹介します。この場合、IGBTまたはFWDに流れる電流を矩形波の連続と考えれば、簡単に近似計算をすることができます。図4-2は、近似したDCチョップ波形を示したものであり、コレクタ電流が I_C のときの飽和電圧、スイッチング損失をそれぞれ $V_{CE(sat)}$ 、 E_{on} 、 E_{off} とし、FWD順電流が I_F のときのON電圧、逆回復損失をそれぞれ V_F 、 E_{rr} とおけば、発生損失は次のように計算されます。

$$\begin{aligned} \text{IGBT発生損失(W)} &= \text{定常損失} + \text{ターンオン損失} + \text{ターンオフ損失} \\ &= [t_1/t_2 \times V_{CE(sat)} \times I_C] + [f_c \times (E_{on} + E_{off})] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FWD発生損失(W)} &= \text{定常損失} + \text{逆回復損失} \\ &= [(1 - (t_1/t_2)) \times I_F \times V_F] + [f_c \times E_{rr}] \end{aligned}$$

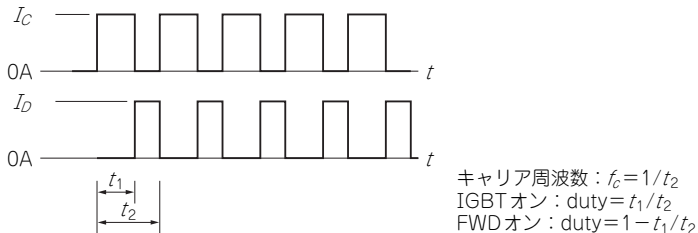
実際には、直流電源電圧やゲート抵抗値などが仕様書に記載されているものと異なるときがあり、このような場合には以下のような規則にしたがって簡略計算することができます。

①直流電源電圧 $E_d(V_{CC})$ が異なる場合

ON電圧 : $E_d(V_{CC})$ に依存しない
 スwitchング損失 : $E_d(V_{CC})$ に比例する

②ゲート抵抗値が異なる場合

ON電圧 : ゲート抵抗値に依存しない
 スwitchング損失 : スwitchング時間に比例し、ゲート抵抗値に依存する



[図4-2] DCチョップパ波形

第5章

ノイズ低減対策技術

最近では、IGBTを使用した装置は産業用にとどまらず、一般家庭や病院など、あらゆる場所で使用されるようになってきました。これにともなって、IGBTがスイッチングすることによって発生するEMIノイズが問題となってきており、この対策がIGBT応用機器エンジニアの悩みの種となっています。

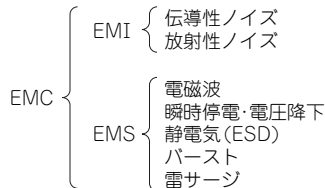
IGBTの特性改善は、高速スイッチングと低損失を最大の目標として技術開発が進められてきましたが、スイッチングの際の高い dv/dt 、 di/dt (電圧/電流変化率)が放射性ノイズの要因となってしまいます。このようなスイッチングに伴うノイズを低減させる手段としては、IGBTの駆動条件を見直し、スイッチング特性、特にターンオン・スピードをソフト(低速)化することが有効です。

5.1

インバータ・システムのEMC

IGBTモジュールを使用したモータ・ドライブ・システムやUPS、新エネルギー変換装置などのパワー・エレクトロニクス機器に対しては、IEC(国際電気標準会議)からEMC規格が規定されており、製品開発においてはEMC対策が必要不可欠となっています。

EMCとは、Electro Magnetic Compatibility(電磁両立性)のことであり、製品が発生するノイズや電磁波がほかのいかなる機器に対しても影響を与えず、逆に外部環境やほかのいかなる機器からも影響を受けないために製品に要求される規格です。

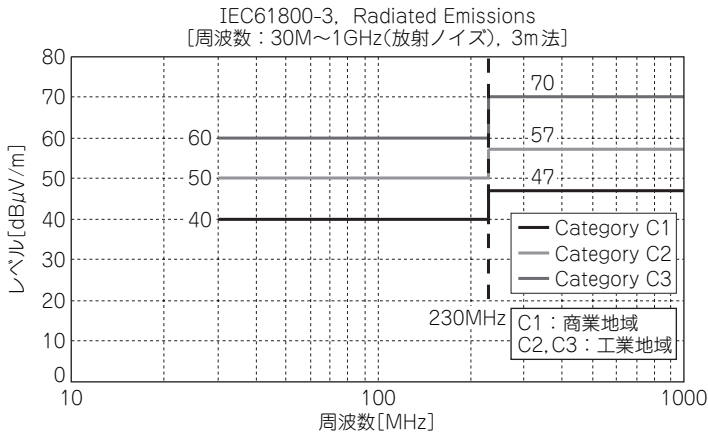


[図5-1] EMCとEMI, EMS

EMCは図5-1に示すように、EMI(Electro Magnetic Interference, 電磁妨害)とEMS(Electro Magnetic Susceptibility, 電磁感受性)に分類されます。EMIとは電子機器が周辺機器に及ぼす悪影響であり、エミッションともいわれます。EMIには、電源に漏洩する伝導性ノイズと、電磁波として放射される放射性ノイズがあります。また、EMSとは周囲からの妨害に対する電子機器の耐量・性能のことで、イミュニティともいわれています。これには、電磁波、静電気、雷サージなどの評価項目が挙げられます。

IGBTモジュールとその周辺回路およびパワー・エレクトロニクス機器に対するEMC性能を考えると、従来のバイポーラ・トランジスタと比較するとスイッチング時間が10分の1以下に低減され、数百V/数百A単位の高電圧/大電流を500ns以下という高速でスイッチングすることが特徴です。したがって、伝導性・放射性EMIは高電界、高磁界の変動により発生するため、IGBTモジュールのアプリケーションにとってはノイズの低減技術が重要になります。

本章では、IGBTモジュールの適用においてトラブルとなりやすい、スイッチングによるほかへの影響、すなわちEMI特性について説明するとともに、対策方法などについて解説します。



[図5-2] IEC61800-3における雑音端子電圧規制値(30M~1GHz)

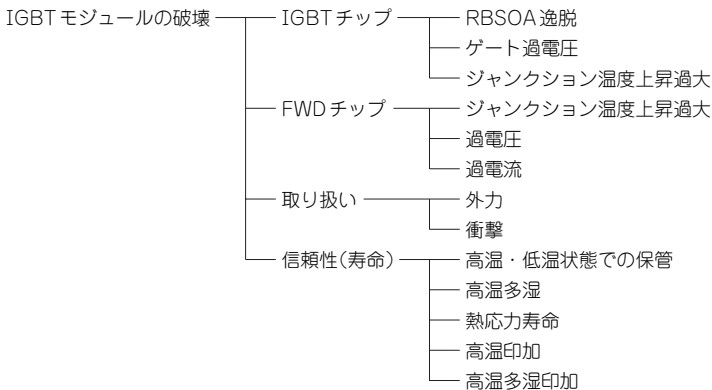
第 6 章

トラブル発生時の対処方法

IGBTモジュールをインバータ回路などに使用した場合、配線ミスや実装上のミスなどにより、素子の破壊をまねくことがあります。もし、このような素子の破壊といった異常が発生した場合は、発生状況や原因を明確にした上で対策をする必要があります。

図6-1に示すように、IGBTチップはRBSOA逸脱、ゲート過電圧、ジャンクション温度の上昇過大などにより、またFWDチップはジャンクション温度の上昇過大、過電圧、過電流などにより破壊することがあり、さらに取り扱いや信頼性(寿命)による破壊もあります。表6-1に、代表的な素子の異常時の要因と破壊モードをまとめました。

図6-2に、IGBTチップの破壊モードとチップ表面の観察結果を示します。過電流や過熱に起因する破壊はチップ中央部が、過電圧に起因する破壊はチップのエッジ部の破壊が多いようです。図6-3に、熱応力による破壊箇所の断面図を示します。熱応力によってワイヤ・ボンディング部が剥離したり、はんだにクラックが入って破壊します。



[図6-1] IGBTモジュールの故障原因

[表6-1] 異常時の対策

素子の異常 波形の異常	推定される原因		
短絡	アーム短絡	短絡電流遮断時のサージ電圧 短絡保護時間遅れ	
		駆動回路誤動作 制御回路誤動作	外来ノイズなど
		dv/dt 誤動作	ゲート逆バイアス不足 ゲート配線が長い
		デッド・タイム不足	ゲート逆バイアス不足 デッド・タイム設定ミス
	出力短絡	配線ミス、配線接触 負荷回路側での短絡	
	地絡	装置配線のミス、配線間の接触	
	過負荷(過電流)	制御回路の誤動作 過電流保護設定値のミス	
過電圧	直流電圧過大	入力電圧過大 過電圧保護	
	スパイク電圧過大	自己スイッチング(ターンオフ)によるスパイク電圧	
		FWD逆回復時のスパイク電圧	
ゲート電圧不足	ドライブ回路異常	駆動回路用電源の誤動作 駆動回路用電源の確立時の定数遅れ	
	ゲート・オープン	ゲート配線のはずれ	
ゲート過電圧	ゲート端子への静電気印加 ゲート配線不適切のためのゲート過電圧		
フィンや ケースの過熱	放熱能力の不足	取り付けネジのゆるみ、冷却ファンの停止、周囲環境 サーマル・コンパウンド不足、フィン能力不足など	
	サーマル・ランナウェイ	制御回路の誤動作によるキャリア異常	
回路オープン	外部配線からの応力、プリント基板の振動などによる製品本体や端子部への応力		

6.1

故障の判定方法

IGBTモジュールが破壊したかどうかを判定するには、トランジスタ特性測定装置[トランジスタ・カーブ・トレーサ(以下、CT)]によって、次の項目をチェックします。

- ゲート-エミッタ間の漏れ電流
- コレクタ-エミッタ間の漏れ電流
(ゲート-エミッタ間を必ずショートさせる)

第7章

インテリジェント・パワー・モジュールIPM

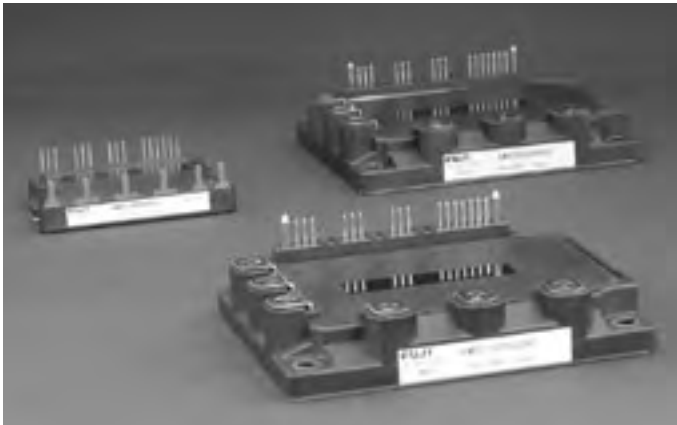
パワー・デバイスは、使いやすさと性能の向上を求めてディスクリート・デバイスからスタンダード・モジュール製品へと進化しましたが、さらにドライブ回路や各種保護回路を内蔵して扱いやすくしたインテリジェント・パワー・モジュール (IPM) が使用されるようになっていきます。写真7-1に、一般的なIPMの外観を示します。

図7-1に示したのは一般的なモータ可変速装置(インバータ)のブロック図ですが、図中の①部はスタンダード・モジュールの機能範囲を示し、②部がIPMの機能範囲を示します。

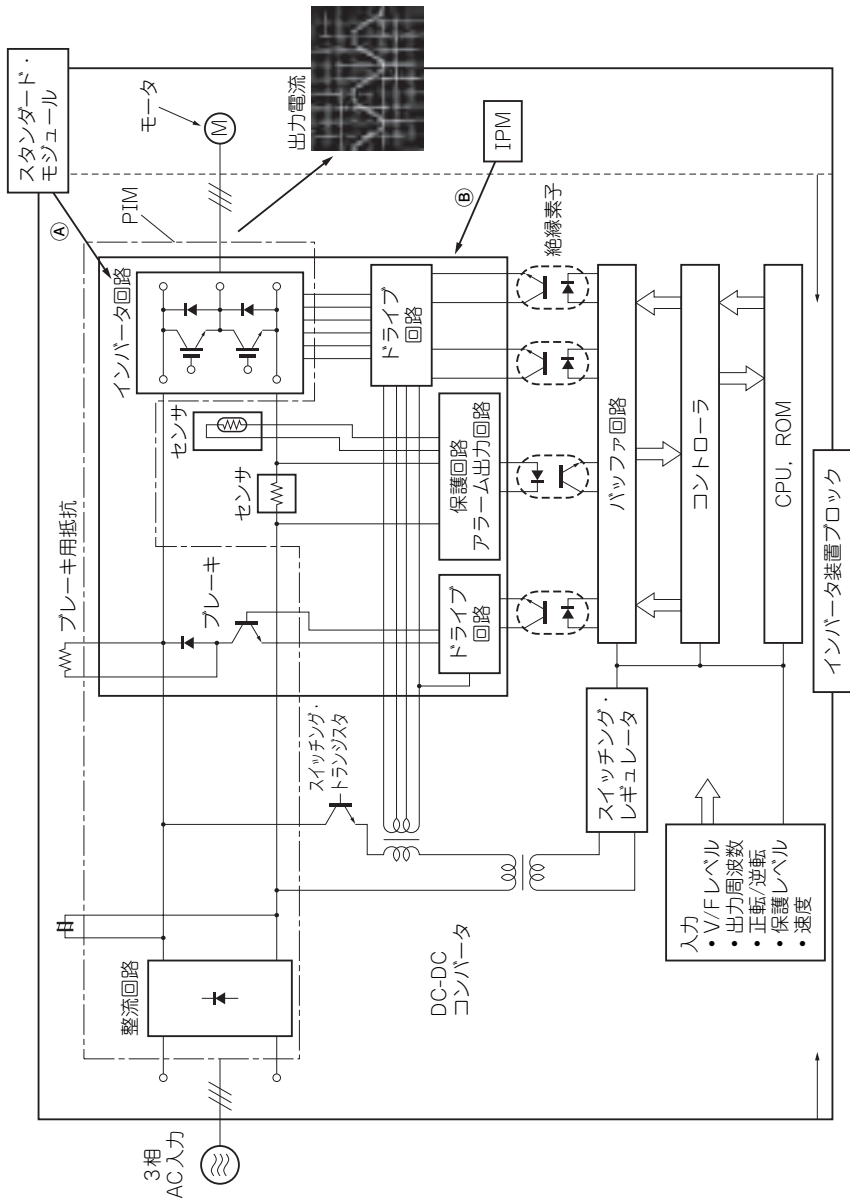
7.1

IPMの特徴

IPMを使用する利点としては、装置の小型化、安定動作と高い信頼性、デバイス性能の発揮、装置設計リード・タイムの短縮などが挙げられます。



[写真7-1] IPMの外観(富士電機製、R-IPMシリーズ)



[図7-1] モータ可変速装置のブロック図