

パワートランジスタの保護技術

一條 正美(いちじょう まさみ)

重兼 寿夫(しげかね ひさお)

1 まえがき

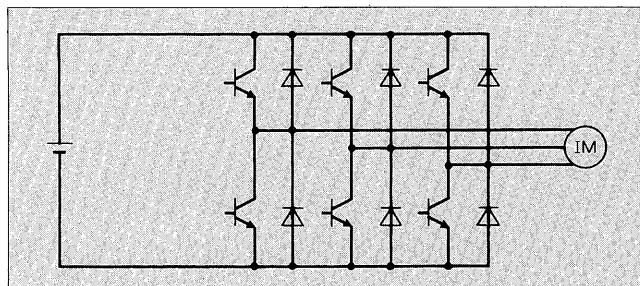
近年、各種の電力変換装置にパワートランジスタが広く用いられるようになってきた。これは、パワートランジスタが従来のサイリスタと異なり、自己消弧機能を有しているのみならず、 di/dt や dv/dt の制限が基本的に不要なために、各種の保護回路が簡素化できる点も大きな理由となっている。しかしながら、各種の保護回路の簡素化のためには、これに関係するパワートランジスタの素子特性、破壊耐量を熟知する必要がある。本稿では、VVVFインバータを具体的な事例として取り上げ、(1) 大容量のスイッチング回路であるがゆえに生じる問題 (2) インバータ回路であるがゆえに生じる問題を中心として、パワートランジスタに印加される過電圧や過電流の発生メカニズムと、これに関係する素子特性、破壊耐量及び基本的な保護方法について述べる。

2 過電圧保護

2.1 過電圧の発生要因

図1にVVVFインバータの基本的な回路構成を示す。この例においては、交流入力電圧の上昇や電動機の制動時の回生エネルギー吸収による直流中間回路電圧の増加、及び素子のスイッチング動作によるサージ電圧がパワートランジスタの過電圧の要因になる。ここでは、素子のスイッチング動作によるサージ電圧に対する保護方法について詳

図1 VVVFインバータの基本回路構成例



細を述べる。

2.2 スイッチングサージ電圧発生のメカニズム

インバータ回路においては下記の2種類のスイッチングサージ電圧が発生する。

- ・フリーホイーリングダイオード逆回復時のサージ電圧
- ・パワートランジスタターンオフ時のサージ電圧

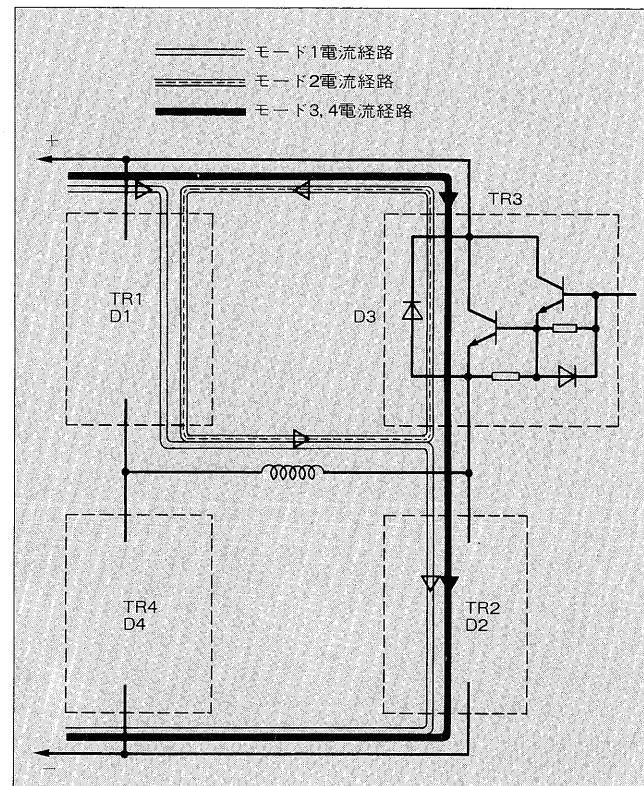
以下に、各々のサージ電圧の発生メカニズムを説明する。

(1) フリーホイーリングダイオード逆回復時のサージ電圧

図2は、インバータ回路における負荷電流経路を示したものである。図2を用いて、フリーホイーリングダイオード逆回復時のサージ電圧発生のメカニズムを説明する。

モード1：TR1, TR2がオン状態にあり、TR3, TR4が

図2 インバータ回路の動作



一條 正美

昭和46年入社。パワーデバイス応用技術の研究・開発に従事。現在、ディスクリート事業部パワーデバイス営業技術部担当課長。



重兼 寿夫

昭和49年入社。高速サイリスタの開発を経て、パワートランジスタの開発設計に従事。現在、松本工場パワーデバイス部課長補佐。

オフ状態にある。負荷電流は TR1及び TR2を通して流れている。

モード 2 : TR2がターンオフする。負荷電流は TR1と D3の経路に転流し流れ続ける。

モード 3 : 再び TR2がターンオンすると D3-TR2 - 直流電源の経路で短絡回路が構成され、D3の逆回復動作が行われる。

モード 4 : D3の逆回復電流が最大値に到達した後、急激に減少し始める。D3の逆回復電流消滅時の急激な電流変化と、主回路中に存在するインダクタンスの作用によってサージ電圧が誘起される。このサージ電圧は D3とともに、これに並列接続されている TR3にも印加されることになる。この様子を図 3 に示す。

(2) パワートランジスタターンオフ時のサージ電圧

図 4 にパワートランジスタがターンオフする際の動作波形を示す。下降期間中の急激なコレクタ電流の変化と主回路中に存在するインダクタンスの作用によってサージ電圧が発生する。

2.3 サージ電圧印加時のパワートランジスタの動作

(1) フリーホイーリングダイオード逆回復時

フリーホイーリングダイオード逆回復時のサージ電圧が印加される時点で、パワートランジスタはオフ状態にある。パワートランジスタの耐圧は、ベースドライブ条件によって異なるので注意を要する。スナバ回路は図 3 に示したフリーホイーリングダイオード逆回復時のサージ電圧をパワートランジスタの耐圧以下に抑えるように設計する。

図 3 フリーホイーリングダイオード逆回復時の動作波形例

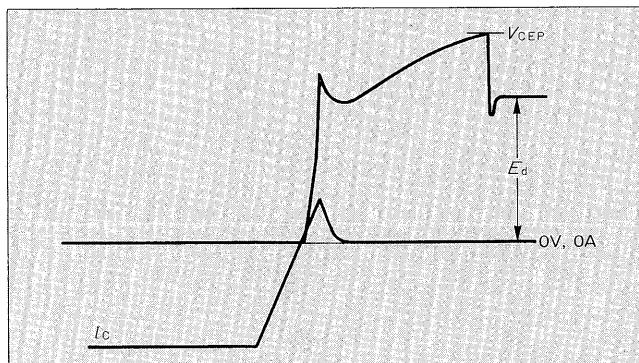
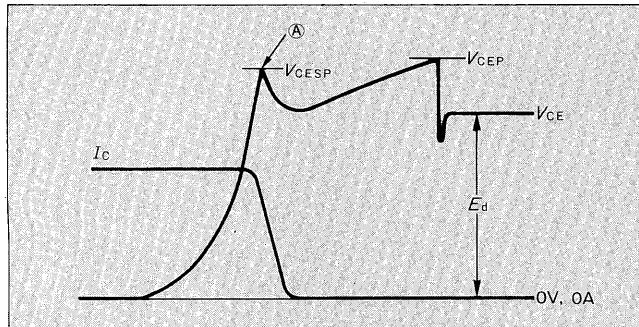


図 4 パワートランジスタターンオフ時の動作波形例



(2) パワートランジスタターンオフ時

パワートランジスタのターンオフ時の動作軌跡例を図 5 に示す。一般に、パワートランジスタはターンオフ時間の短縮を目的として逆バイアスベース電流を与えて適用される。この場合には、ターンオフ時の動作軌跡が図 5 に示されるような RBSOA (ベース逆バイアス安全動作領域) を逸脱してはならない。ターンオフ時の動作軌跡を RBSOA 内に収めるための回路がスナバ回路であり、詳細は後述するが、種々の理由により一般的に放電阻止形 RCD スナバが適用されている。図 5 に示したターンオフ時の動作軌跡例は、放電阻止形 RCD スナバを適用した場合のものである、理想スナバ回路での動作軌跡は破線で示したようなものになるが、実際の回路では、実線で示すように右肩のふくらんだものになる。このふくらんだ部分も RBSOA に近接するので、図 5 にⒶで示した部分 (V_{CESP}) と V_{CEP} の双方が RBSOA を逸脱しないようにするこがスナバ回路の設計ポイントになる。

2.4 スナバ回路の種類

図 6 に代表的なスナバ回路を示す。RC スナバは主に小容量のパワートランジスタに適用され、充放電形 RCD スナバと放電阻止形 RCD スナバが大容量のパワートランジスタに適用される。充放電形 RCD スナバはターンオフ時の dv/dt 抑制効果を有するので、RBSOA の狭いパワートランジスタを適用せざるを得ない場合には有効なスナバ回路となる。しかしながら、充放電形 RCD スナバでは、スナバコンデンサに蓄積された電荷を放電する際の損失が発生し、これがパワートランジスタのスイッチング周波数を高めるほど増大すると言う欠点を有しているために、このような欠点を持たない放電阻止形 RCD スナバが最も一般的に採用されている。放電阻止形 RCD スナバ回路は dv/dt 抑制効果を持たないので、RBSOA の広いパワートランジスタと組み合わせて用いる必要があるが、最近のパワートランジスタは放電阻止形 RCD スナバの採用を前提として RBSOA の広いものが製品化されている。本稿では、最も一般的に採用されている放電阻止形 RCD スナバ回路の設計方法について述べる。

図 5 ターンオフ時の動作軌跡と RBSOA の例

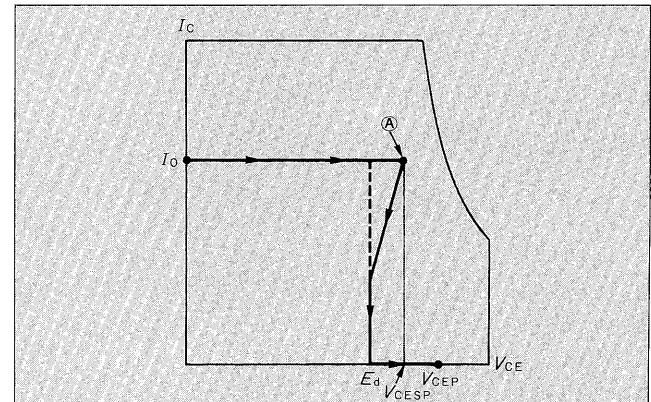
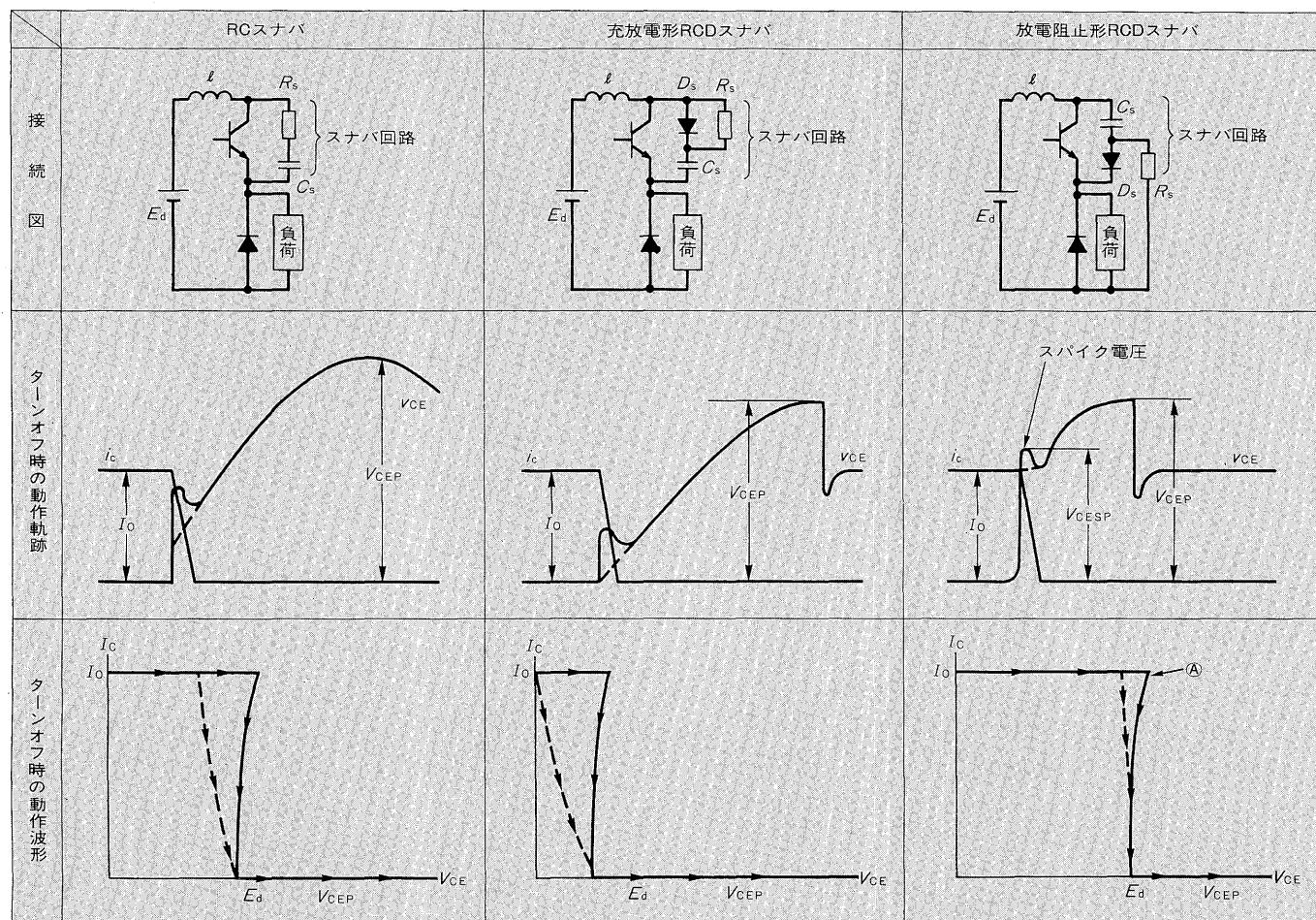


図6 代表的なスナバ回路



----は理想的なスナバ回路の場合。 ——は現実的なスナバ回路の場合。

2.5 放電阻止形RCDスナバ回路の基本的な設計方法

(1) スナバコンデンサ容量の決定方法

図3及び図4に V_{CEP} で示した電圧は、いずれもパワートランジスタのコレクタ電流が流れていらない状態（すなわち、遮断領域）で印加される。この電圧からパワートランジスタを保護するには、下式が満足されなければならない。

(a) ベース-エミッタ間が逆バイアスされている場合

$$V_{CEP} < V_{CE0(SUS)} \quad (1)$$

(b) ベース-エミッタ間が逆バイアスされない場合

$$V_{CEP} < V_{CEO(SUS)} \quad (2)$$

スナバコンデンサ容量 (C_s) は下式で求められる。

$$C_s = \frac{I_0^2}{(V_{CEP} - E_d)^2} \quad (3)$$

ここで、

I : 主回路インダクタンス

I_0 : フリーホイーリングダイオードの逆回復電流せん頭値又はパワートランジスタのコレクタ電流最大値

V_{CEP} : スナバコンデンサ端子電圧最終到達値

E_d : 直流中間回路電圧

である。

(2) RBSOAの考慮方法

パワートランジスタのターンオフ過程中的スパイク電圧 V_{CESP} (図5においてⒶで示した部分の電圧) は下式で求められる。

$$V_{CESP} = E_d + V_{FM} + I_s \cdot \frac{di_c}{dt} \quad (4)$$

ここで、

I_s : スナバ回路のインダクタンス

di_c/dt : 下降期間中のコレクタ電流変化率

V_{FM} : スナバダイオードの過渡順電圧降下 (一般的に500Vクラスの高速ダイオードで20~30V, 1,000Vクラスの高速ダイオードで40~60V程度)

である。

ここで、図5で示したⒶ部分をRBSOA内に収めなければならない。パワートランジスタを有効に活用するには、スナバ回路のインダクタンス低減を目的として配線構造に十分留意するとともに、過渡順電圧降下の小さいダイオードを選定するなどの注意が必要である。

(3) スナバ抵抗 (R_s) の決定方法

スナバ抵抗に要求される機能は下記の二つである。

- (a) パワートランジスタが次のターンオフ動作を行うまでの期間にスナバコンデンサに蓄積した電荷を放電すること。次のターンオフ動作までに90%の電荷を放電させる場合の条件式は次式で与えられる。

ここで、 f はパワートランジスタのスイッチング周波数である。

(b) スナバ回路の電流の振動を抑制すること。回路の制動係数を1.0とする場合の条件式は下式で与えられる。

スナバ抵抗の発生損失 (P_s) は下式で与えられ、スナバ抵抗の値とは全く無関係となるので、スナバ抵抗の値は式(5)、(6)を満足する範囲内で極力大きな値とするのが望ましい。

③ 過電流保護

3.1 過電流の発生要因

図1に示したVVVFインバータではモータ起動時の突入電流や誤配線による出力短絡など、様々な原因でパワートランジスタが過電流にさらされる可能性がある。この内、モータ起動時の突入電流など電流変化が比較的遅い過電流は、従来のサイリスタの場合と同様に、PI調整器などを用いた電流制限回路によって保護を行うことになるが、出力短絡時などのように電流変化が極めて速い過電流に対しては、サイリスタとは異なった保護の考え方が必要になる。本稿では、出力短絡などのように電流変化が極めて速い過電流に対する保護方法について述べる。図7にVVVFインバータにおける短絡事故の発生要因を示す。

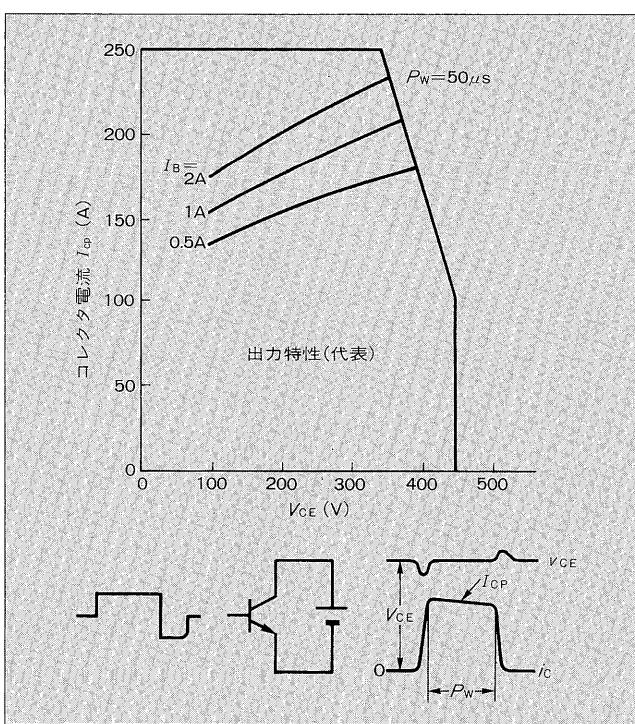
3.2 パワートランジスタの短絡耐量

図 8 にパワートランジスタの短絡耐量の例を示す。図 8 は図 7 に示したアーム短絡を模擬して取得したものであり、短絡期間 $50\mu\text{s}$ の条件での保護可能な領域を示してある。更に、図 8 では 3 種類のベース電流値をパラメータとして、直流電源電圧による短絡電流の変化の様子を示してある。図 8 に示すように、短絡事故時のコレクタ電流はパワートランジスタの出力特性（直流電流増幅率 h_{FE} ）で制限された値になり、サイリスタやダイオードの場合と異なり、回路インピーダンスで決まるような極めて大きな電流に到達することは無い。しかしながら、短絡事故時には、パワートランジスタは高電圧・大電流の極めて厳しい責務が課せられることになり、サイリスタやダイオードなどのようにヒューズによる保護は困難である。このような理由から、パワートランジスタでは、素子自ら過電流を遮断して保護を行う方法が一般的に採用されている。図 8 は、500V 50A のダーリントントランジスタの短絡耐量であるが、この例では、例えば 2A 以下の順バイアスベース電流を与えて用いれば、直流電源電圧 350V までのアーム短絡事故に対して $50\mu\text{s}$ の期間内に過電流を遮断することにより、パワートランジスタを保護できることを示している。

図 7 短絡事故の発生要因

短絡経路	原因
アーム短絡	トランジスタ又はダイオードの破壊
直列アーム短絡	制御回路、ドライブ回路の故障又はノイズによる誤動作
出力短絡	配線作業などの人為的なミス及び負荷の絶縁破壊
地絡	同上

図8 パワートランジスタの短絡耐量と測定回路
(EVK31-050A の例)



3.3 過電流の検出方法

過電流の検出方法には、抵抗やCT(変流器)などの電流検出器とコンパレータを組み合わせる方法と、パワートランジスタの動作状態から間接的に検出する方法がある。各々一長一短を有するので、保護の対象、範囲などに応じて選択して適用する必要がある。

(1) 電流検出器とコンパレータを組み合わせる方法

電流検出器としては、小容量の装置では抵抗が、そして大容量の装置ではACCT(交流変流器)やDCCT(直流変流器、ホール素子を用いたものなどがある)が用いられる。また、図9及び表1に示すように、電流検出器の挿入位置によって検出し得る過電流の種類が異なってくるので、保護の対象、範囲などを考慮して挿入位置を決定すべきである。図10にVVVFインバータにおける過電流保護回路の例を示す。図10に示した回路では、電流検出器をインバータの出力線に挿入しており、出力短絡及び地絡に対する保護が可能である。図10に示すように、過電流保護ループ内には応答遅れの原因となる種々の回路が存在する。パワートランジスタの過電流保護を確実に行うには、これらの回路の応答遅れがあまり大きくならないように注意しなければならない。

(2) 間接的に検出する方法

通常の動作におけるオン状態では、パワートランジスタ

のコレクタ-エミッタ間電圧は数V以下の低い値になる。これに対して、過電流状態では、パワートランジスタが飽和動作状態を維持できなくなり、コレクタ-エミッタ間電圧が急激に増加する。したがって、順バイアスベース電流が供給されているにもかかわらずコレクタ-エミッタ間電圧が異常に高い場合には、過電流が流れていると判断できる。

図11は、この原理を応用した過電流保護回路の例である。順バイアスベース電流が供給されているにもかかわらずコレクタ-エミッタ間電圧が高い状態は、通常のスイッチング動作におけるターンオン期間にも生じるので、この期間が過電流として検出されないようにしなければならない。図11では、R1, Cで構成されたタイマによって、この機能を持たせている。

図12は、図11に示した過電流保護回路の動作波形例である。図11に示すような過電流保護回路は、過電流検出から順バイアスベース電流停止までの一連の保護動作をドライブ回路内で行うので、短時間内での保護が可能であると言う特長を有している。ただし、過電流保護動作が制御回路を経由せずに、個々のパワートランジスタのドライブ回路内で行われるので、過電流保護動作が行われた時に装置の運転を停止するなどの処理を行う場合には、個々の過電流保護回路から制御回路への信号のフィードバックループが必要になる。

図9 インバータにおける電流検出器の挿入方法

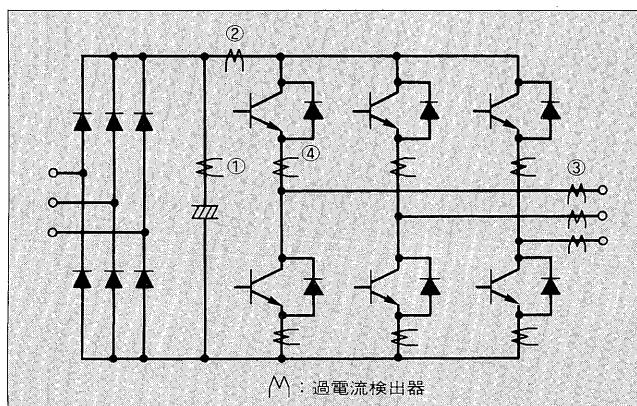


表1 電流検出器の挿入位置と検出内容

検出器の挿入位置	特 徴	検 出 内 容
①平滑コンデンサと直列に挿入	・ACCTが採用可能 ・低検出精度	・アーム短絡 ・直列アーム短絡 ・出力短絡 ・地絡
②インバータの入力に挿入	・DOCTの採用が必要 ・低検出精度	同上
③インバータの出力に挿入	・高周波出力の装置ではACCTが採用可能 ・高検出精度	・出力短絡 ・地絡
④各素子と直列に挿入	・DOCTの採用が必要 ・高検出精度	・アーム短絡 ・直列アーム短絡 ・出力短絡 ・地絡

図10 VVVFインバータにおける過電流保護回路例

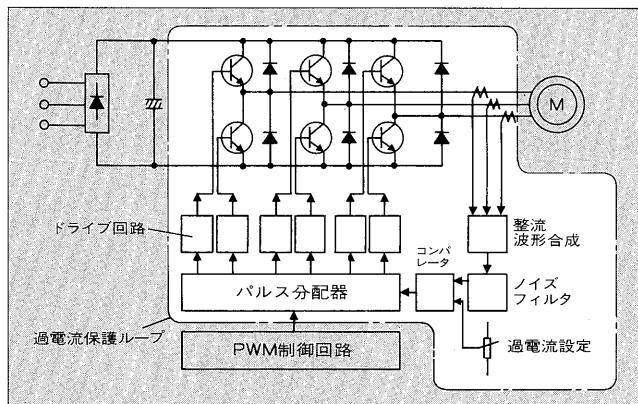


図11 間接的な過電流検出方法

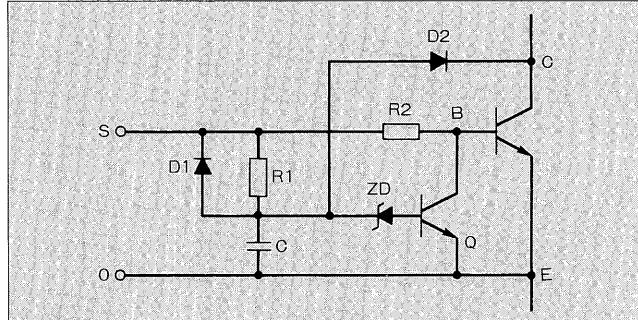


図12 過電流保護動作波形例

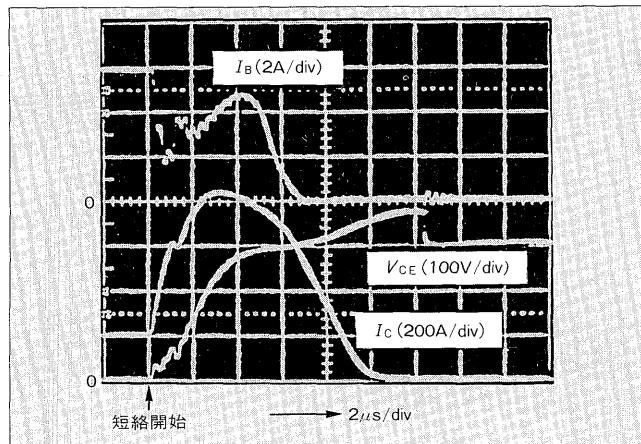
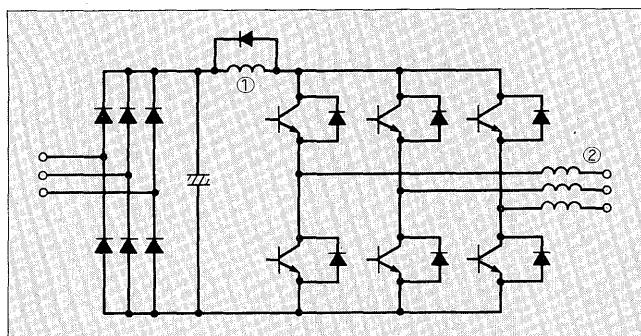


図13 過電流抑制リアクトルの挿入方法



3.4 過電流ピーク値の抑制方法

パワートランジスタの短絡耐量不足などの理由によって過電流のピーク値を抑制する必要がある場合には、図13に示すように、主回路内にリアクトルを挿入しなければならない。図13には、インバータの入力側に挿入する方法と出力側に挿入する方法とを示してある。各々の方法は下記の

ような特徴を有しているが、いずれの場合も、装置の大形化、変換効率の低下などの弊害は避けられない。

(1) インバータの入力側に挿入する方法

アーム短絡、直列アーム短絡、出力短絡、地絡のすべての短絡事故時の過電流ピーク値抑制に効果がある。スナバ回路の大形化を避けるために、リアクトルと並列に環流用ダイオードを接続する必要がある。

(2) インバータの出力側に挿入する方法

アーム短絡、直列アーム短絡に対しては効果が無いが、環流用ダイオードが不要である。リアクトルでの電圧降下によって装置の出力容量が低下するので、あまり大きなものは挿入できない。

図8に示したように、500Vクラスのパワートランジスタの短絡耐量は、リアクトルの挿入無しに保護できるレベルにあるが、1,000V、1,200Vクラスのパワートランジスタでは十分なレベルに無く、リアクトルの挿入無しでの保護は困難であった。富士電機が新しく開発したパワートランジスタモジュール“Zシリーズ”(1,000V, 1,200V)は、短絡耐量の大幅な向上が達成されており、リアクトルの挿入無しでの保護の可能性が一段と高められている。

4 あとがき

VVFインバータを具体例に採り上げて、これに適用されるパワートランジスタの過電圧、過電流に対する保護の考え方について述べた。パワートランジスタを長時間にわたって安定に動作させるために、過電圧・過電流保護技術は極めて重要であり、本稿で述べた内容が保護回路設計の一助となれば幸いである。また、保護回路の簡素化、保護範囲の拡大を可能とするような素子の開発に向けて、今後共たゆみない努力を続けて行く所存である。

技術論文社外公表一覧

題 目	所 属	氏 名	発 表 機 関
水力発電所の運転シミュレータ	電力システム技術統括部	松村 基史	電力と技術 No.12 1987秋季号
無停電電源装置	電機システム統括部	定由 征次	日刊工業新聞 (1987-8-7)
MRI機器一覧表	千葉工場	川口 博巳	MRI入門講座テキスト (1987-8)
熱画像監視センサと応用例	電力システム技術統括部	金子 英男	配管技術 29, 10 (1987)
キーボード配列検査システムのアルゴリズム	富士電機総合研究所	本郷 保夫 小室 明夫	電気学会論文誌 107, 8 (1987)
画像センサ	富士電機総合研究所	原 利雄	計測技術 15, 11 臨時増刊 (1987)
フォトリモードメモリ材料の開発動向	富士電機総合研究所	古庄 昇	電気学会絶縁材料研究会 (1987-8)
PC用関数型中間言語	富士ファコム制御 システム事業本部	田中 春樹 中島 千尋 吉田 昌弘	電気学会産業計測制御研究会 (1987-8)
エポキシ樹脂の硬化収縮と注型成形	富士電機総合研究所	元起 巍	産業技術研究会講座 (1987-8)
鉄鋼業におけるビジョンシステムの応用	電機システム統括部	小平 俊実	電気学会金属産業研究会 (1987-8)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。