

交流電動機用PWMインバータへのGTOサイリスタの応用

Application of GTO Thyristors to PWM Inverters for AC Motor Drive

GTOサイリスタは交流電動機用PWMインバータの小形軽量化、高性能化を実現するのに好適な素子であり、適用範囲も最も広いが、その容量により適用技術が相当異なる。特に応用上の鍵を握るゲート回路は、小容量素子では素子ごとにオン、オフ個別の電源をもつ方式が最も優れているが、大容量素子ではパルストランスで絶縁をとり、電源を全素子共通とする方式が有利との結論を得た。主回路上の重要課題である短絡保護についても、小容量素子では自己しゃ断方式を、大容量素子では短絡サイリスタとヒューズとによる保護協調方式をそれぞれ確立した。小容量インバータについては、駆動電動機の体積以下の小形化を実現でき、またベクトル制御を導入して誘導機を直流機並みの特性で駆動できることを検証した。

松田靖夫* Yasuo Matsuda
本部光幸* Mitsuyuki Honbu
石橋 耀** Akira Ishibashi
宮崎晃一*** Kouichi Miyazaki

1 緒 言

近年、GTO(ゲートターンオフ)サイリスタやパワートランジスタなどの自己消弧機能をもつスイッチング素子の実用化が進み、PWM(パルス幅変調)制御技術の進歩とあいまって小形軽量、高性能インバータの実現が可能となった^{1)~3)}。特に、GTOサイリスタは耐圧、電流容量、スイッチング周波数などの点で適用範囲が最も広く、インバータへの適用技術及びインバータ応用技術の確立が強く要望されている。

本稿では、PWMインバータへの応用という観点から、GTOサイリスタの特徴を明らかにした後、対応の異なる小容量及び大容量のGTOサイリスタのそれぞれについて、インバータ適用上の鍵を握るゲート回路の構成と特性、主回路に関する最も重要な課題である短絡事故時の保護法について述べる。また更に、GTOサイリスタの交流電動機用PWMインバータへの応用例として、GTOサイリスタモジュールを用いることにより、駆動電動機の体積以下に小形化された超小形インバータ、及びベクトル制御を適用したGTOサイリスタインバータによる誘導電動機駆動特性についても言及する。

2 GTOサイリスタを用いたPWMインバータの特徴

GTOサイリスタをPWMインバータに適用した場合の特徴を、トランジスタやサイリスタを用いた場合と比較しながら簡単に説明する。図1にPWMインバータの原理的な主回路構成を示す。スイッチング素子としてサイリスタを用いた場合、ターンオフさせるための転流回路が必要であるが、自己消弧形の素子であるGTOサイリスタやトランジスタを用いた場合、転流回路が不要となり、装置の大幅な小形軽量化を図ることができる。

図2はPWMインバータの出力電圧、電流波形を示したものである。変調波の振幅と周波数を調整することにより、インバータの出力電圧及び出力周波数を制御することができる。GTOサイリスタやトランジスタでは、ターンオフに要する時間が短いので、図2に示したオフ時間 t_{off} を短くすることができる。このため、サイリスタを使用する場合に比べ基本波

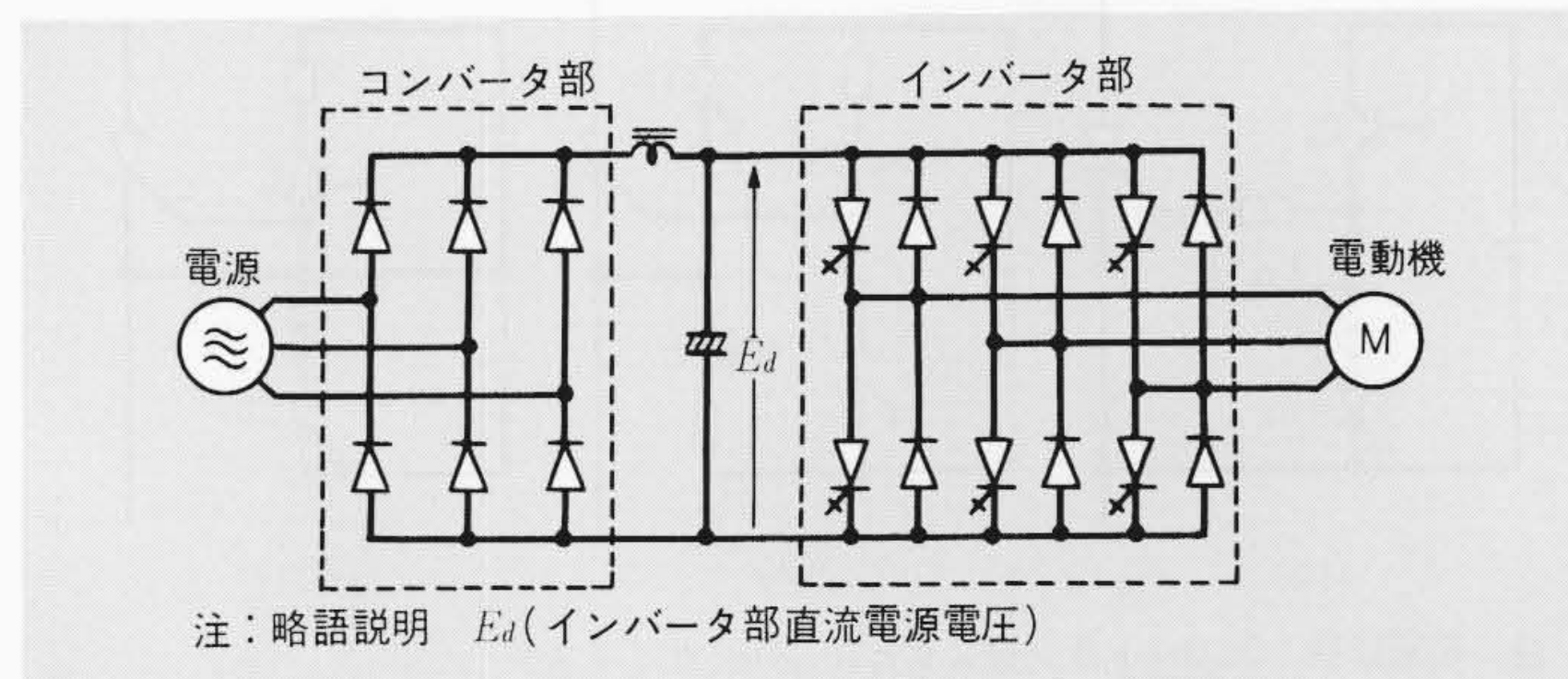


図1 PWMインバータの主回路構成 スwitchング素子にGTOサイリスタを用いることにより、インバータを小形軽量化することができる。また、制御機能を向上させることもできる。

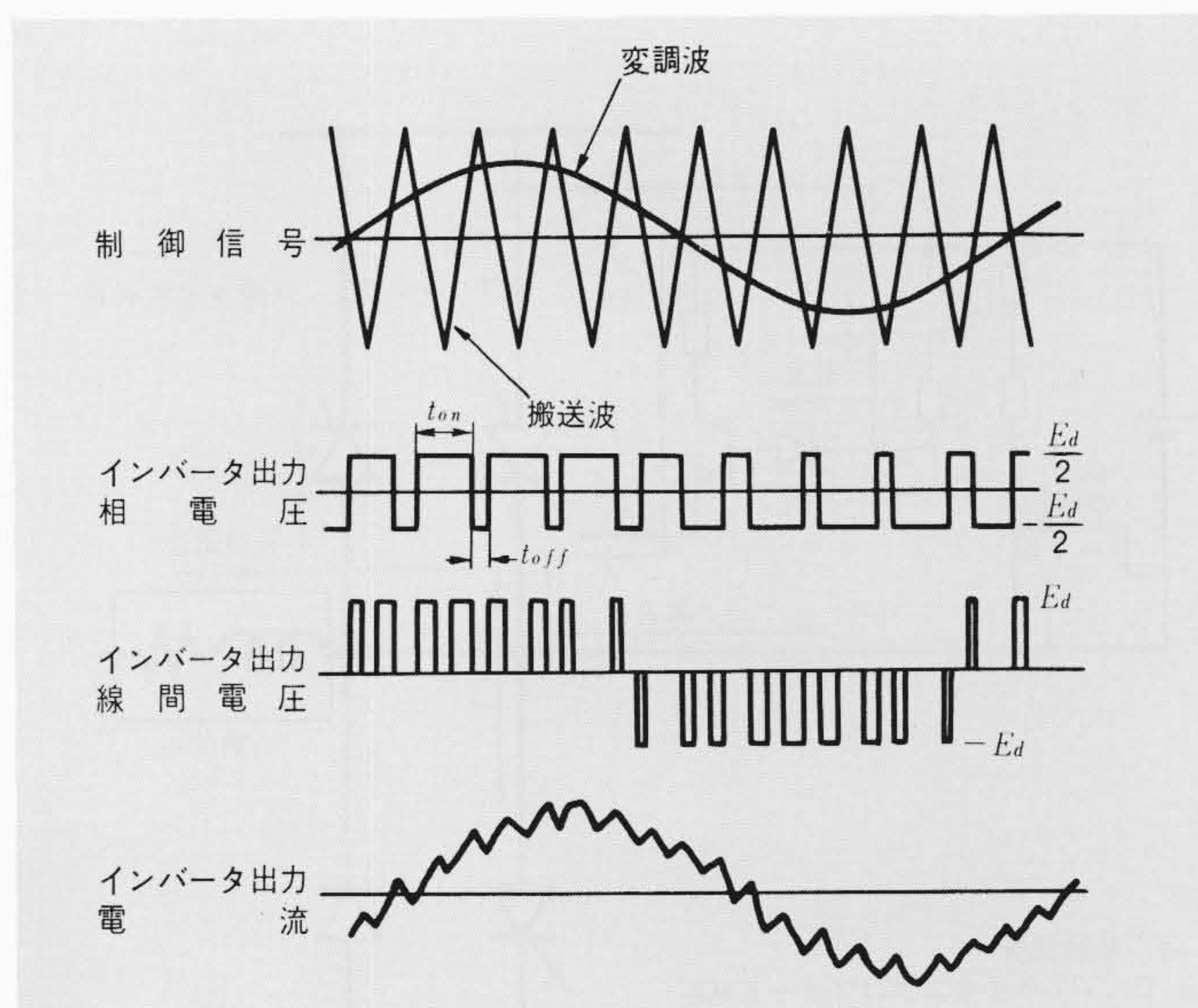


図2 PWMインバータ出力電圧電流波形 パルス数(搬送波周波数/変調波周波数)が9の場合の出力電圧、電流波形である。パルス数を多くすることにより、出力電流を正弦波に近づけることができる。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所習志野工場 *** 日立製作所日立工場

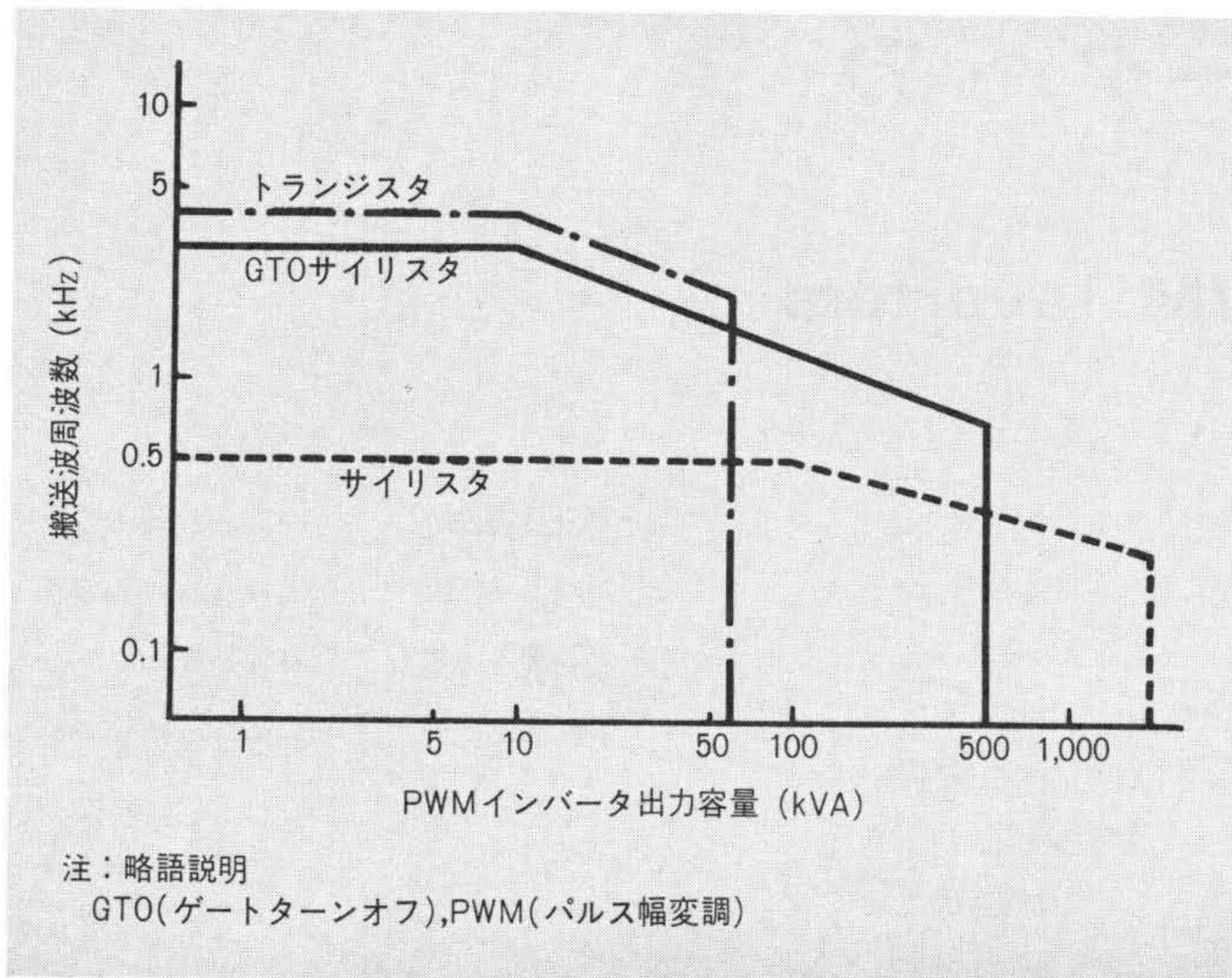


図3 スイッチング素子のPWMインバータへの適用領域 GTOサイリスタは大容量、高周波PWMインバータに適用でき、電動機駆動用に好適なスイッチング素子であることが分かる。

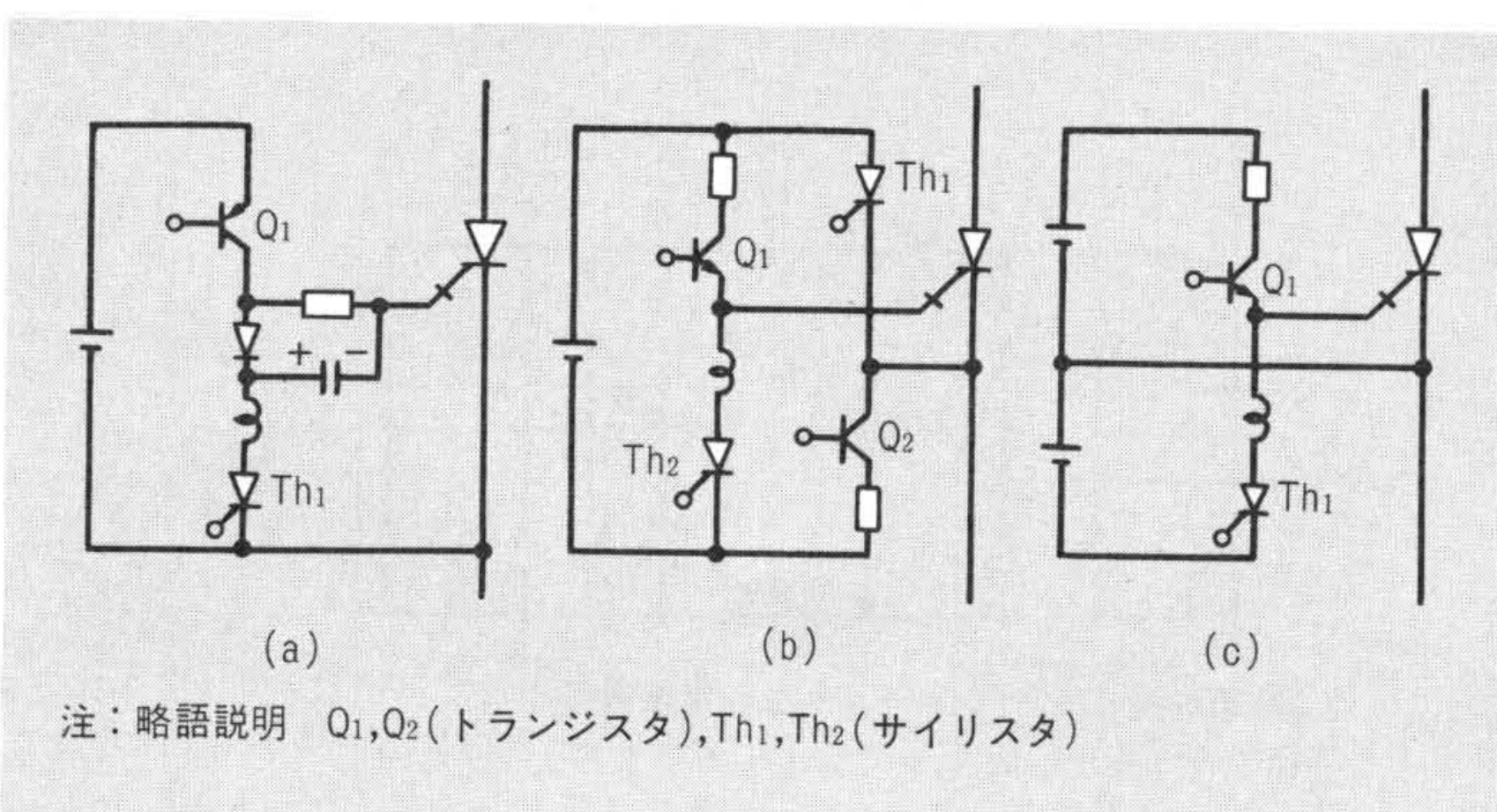


図4 GTOサイリスタの基本ゲート回路方式 小容量GTOサイリスタの基本ゲート回路方式には、オフ電源が従属的に形成される方式(a)、オンオフ電源を共用する方式(b)及びオンオフ電源を個別にもつ方式(c)がある。

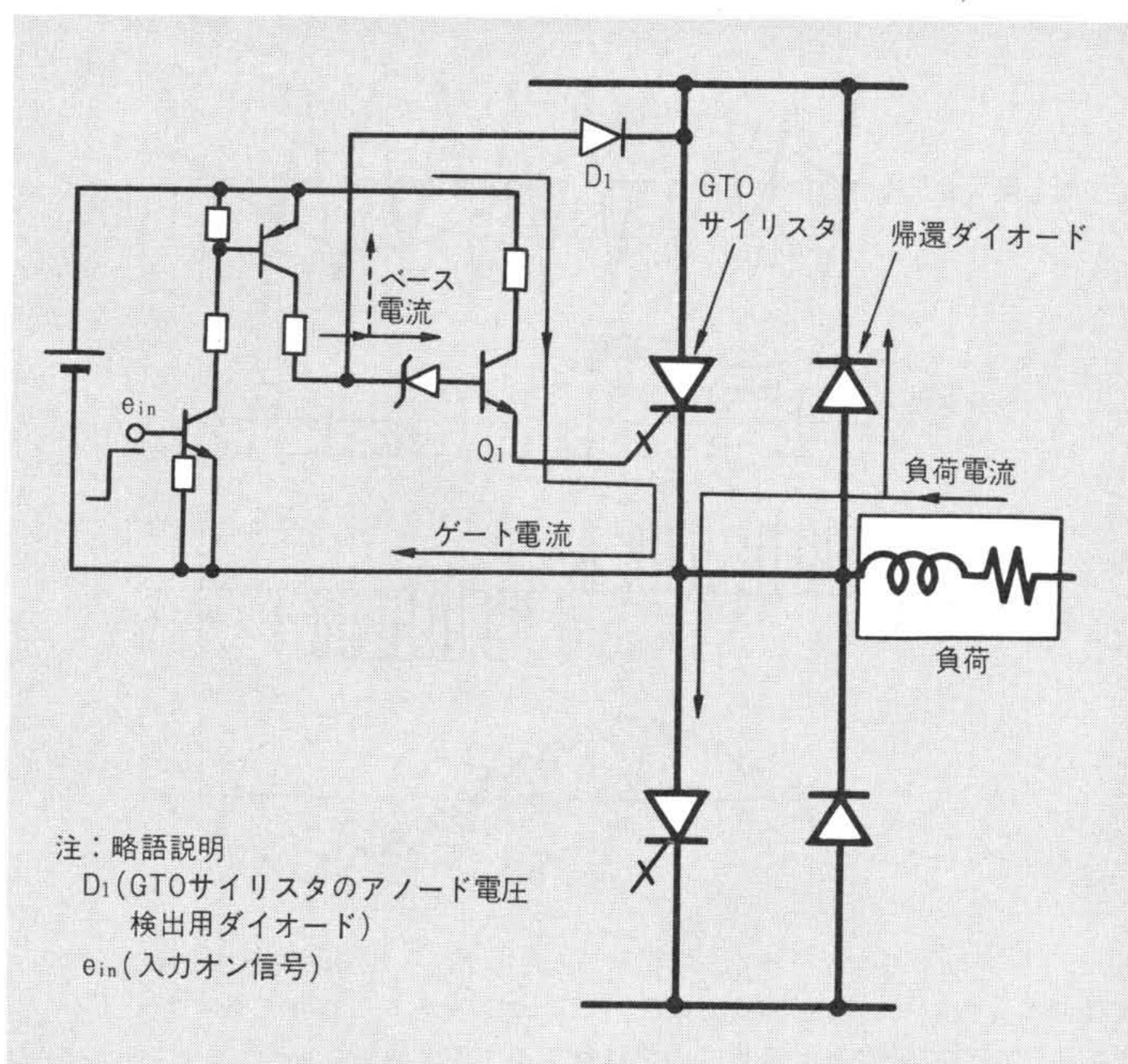


図5 オンゲート電流の狭幅パルス化原理 GTOサイリスタのアノード電圧をダイオードで検出し、入力オン信号とのアンド条件でオンゲート電流を流すことにより、オンパルスが狭幅化される。

成分の大きい出力電圧が得られ、素子の電圧定格を有効に利用することができる。また、出力電圧波形に現われるパルス数を多くすることができるので、高応答制御が可能となる。更に、出力電流が正弦波に近い形となるので、トルク脈動が小さくなり、電動機駆動上有利になる。

自己消弧形の素子でも、GTOサイリスタはトランジスタに比べ、高電圧化、大電流化が容易であり、既に2,500V, 1,000Aといった素子も開発されている。したがって、GTOサイリスタは小容量のPWMインバータだけでなく、大容量のものにも適用が可能であり、その適用範囲はトランジスタに比べ非常に広がる。

以上のことを考慮し、各スイッチング素子がどの程度のPWMインバータに適用できるかを示したものが図3である。出力容量はインバータの1アームを1素子で構成した場合を基準にしている。この図から、GTOサイリスタはトランジスタやサイリスタに比べ、電動機駆動用PWMインバータに好適なスイッチング素子であることが分かる。更に、GTOサイリスタはトランジスタに比べ、平均電流に対するしゃ断可能な電流の比が大きいため、始動電流や衝撃負荷に対する制限が緩和できる。GTOサイリスタは、この点からも電動機駆動に適している。

3 小容量GTOサイリスタのインバータへの応用

(1) ゲート回路

GTOサイリスタのゲート回路は、ターンオンゲート電流と、これと逆極性のターンオフゲート電流を流せるように構成する必要がある。図4は、その代表的な基本回路方式を示す。同図(a)の方式は、オン用トランジスタ Q_1 のオン期間中にコンデンサを充電し、オフ用電源として用いるもので、回路構成を最も簡単化できる。しかし、オンゲート電流の狭幅パルス化が困難なため発生損失が大きく、また従属的に形成されるオフ用電源が弱いので、GTOサイリスタのしゃ断性能を十分に引き出せないという難点がある。(b)の方式は、オン時はトランジスタ Q_1 , Q_2 を介して、オフ時はサイリスタ Th_1 , Th_2 を介して共通の独立した電源で直接GTOサイリスタを駆動するもので、大きなしゃ断能力が得られるとともに、オンゲート電流の狭幅パルス化が可能のため発生損失を大幅に低減できる。しかし、最終段のスイッチ素子が多いため回路構成は複雑化する。これに対し(c)の方式は、オンオフ個別の独立した電源をもつもので、簡単な回路構成で最良の特性が得られる。

図5は、独立した電源をもつ図4(b)(c)方式の場合に適用可能な狭幅オンパルス発生回路の原理を示す。通常オンゲート電流を狭幅パルス化するには、オン用トランジスタのベース駆動回路に微分要素を挿入することが考えられるが、一般に誘導性の負荷をとるインバータでは正常な動作は得られない。これは誘導性負荷の場合、対アームのGTOサイリスタのターンオフ後、負荷電流は帰還ダイオードに転流してGTOサイリスタを逆バイアスするため、オンパルスを与えてもオンできないからである。このため、通常はGTOサイリスタと帰還ダイオードがら成るアームの導通期間中ゲート電流を与える続けるようにしている。オンゲート電流を狭幅パルス化し、かつ支障のないインバータ動作を得るためには、帰還ダイオード電流が零となりGTOサイリスタに順電圧が加わったときにオンパルスを与える必要がある。そこで、図5中のダイオード D_1 でGTOサイリスタのアノード電圧を検出し、入力オン信号 e_{in} とのアンド条件が成立したときにオン用トラ

ンジスタ Q_1 が導通してオンパルスが発生するようにした。これによってGTOサイリスタがオンすると、 Q_1 のベース電流がダイオード D_1 のほうへ側路されるため、 Q_1 がオフしオンパルスが狭幅化される。この方法は、負荷力率の影響を全く受けない点が大きな特徴である。図6は、5kVAインバータ用ゲート回路の入力パワーの内訳を、狭幅パルス方式と広幅パルス方式について最大定格条件で比較したもので、オンパルスの狭幅化によってオン電流制限抵抗及びオン用トランジスタの損失が非常に小さくなり、入力パワーを約 $\frac{1}{4}$ に低減できることが分かる。これによって、ゲート回路は著しく小形化される。

ターンオフ回路としては、電流しゃ断直後に十分大きな逆電圧を印加することがしゃ断性能上重要である。ここでは各基本回路によるしゃ断性能の差異について述べる。図7は、

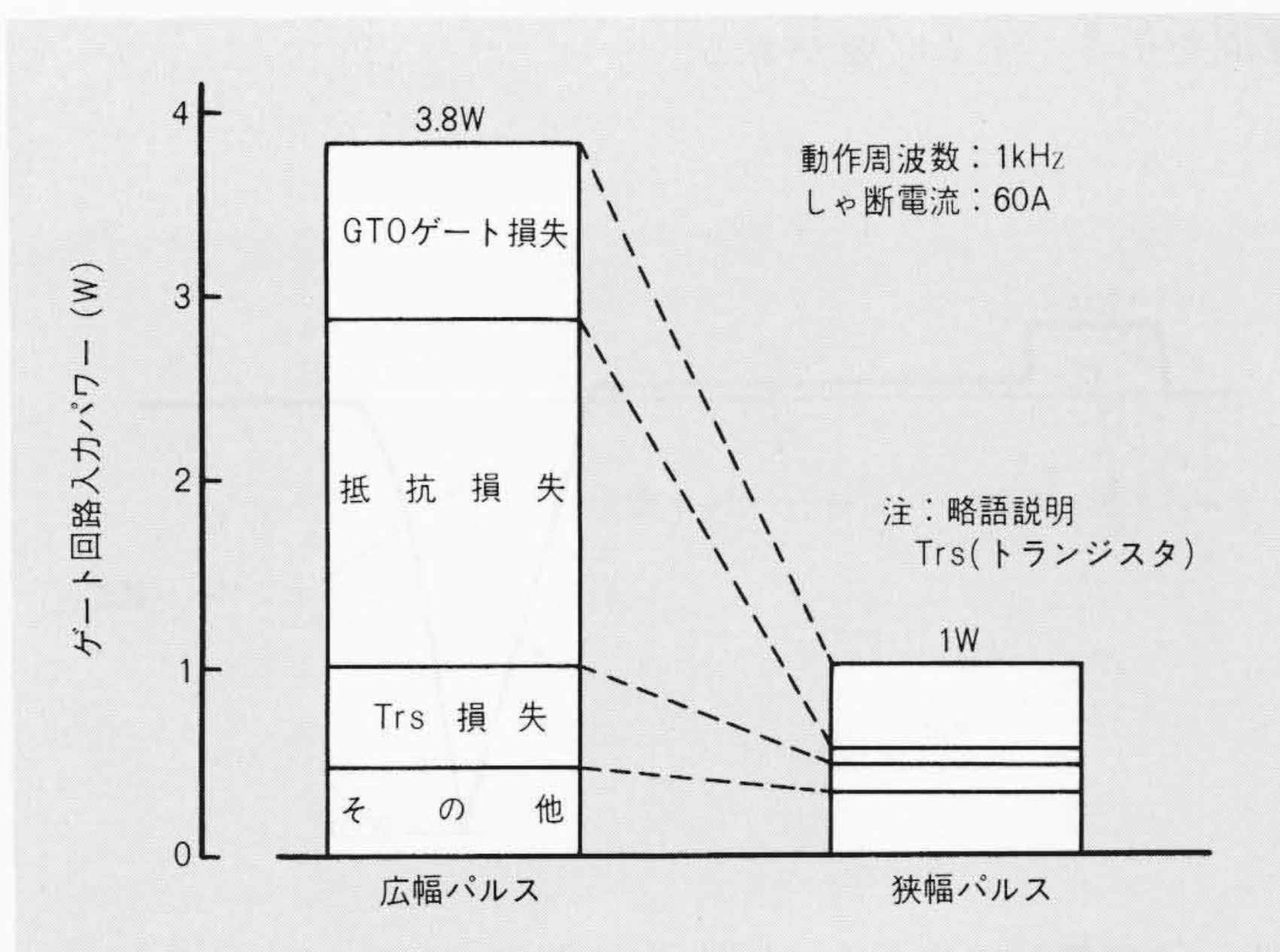


図6 5kVAインバータ用ゲート回路の入力パワー比較 狭幅パルス方式は、広幅パルス方式に比べ入力パワーを約 $\frac{1}{4}$ に低減できる。

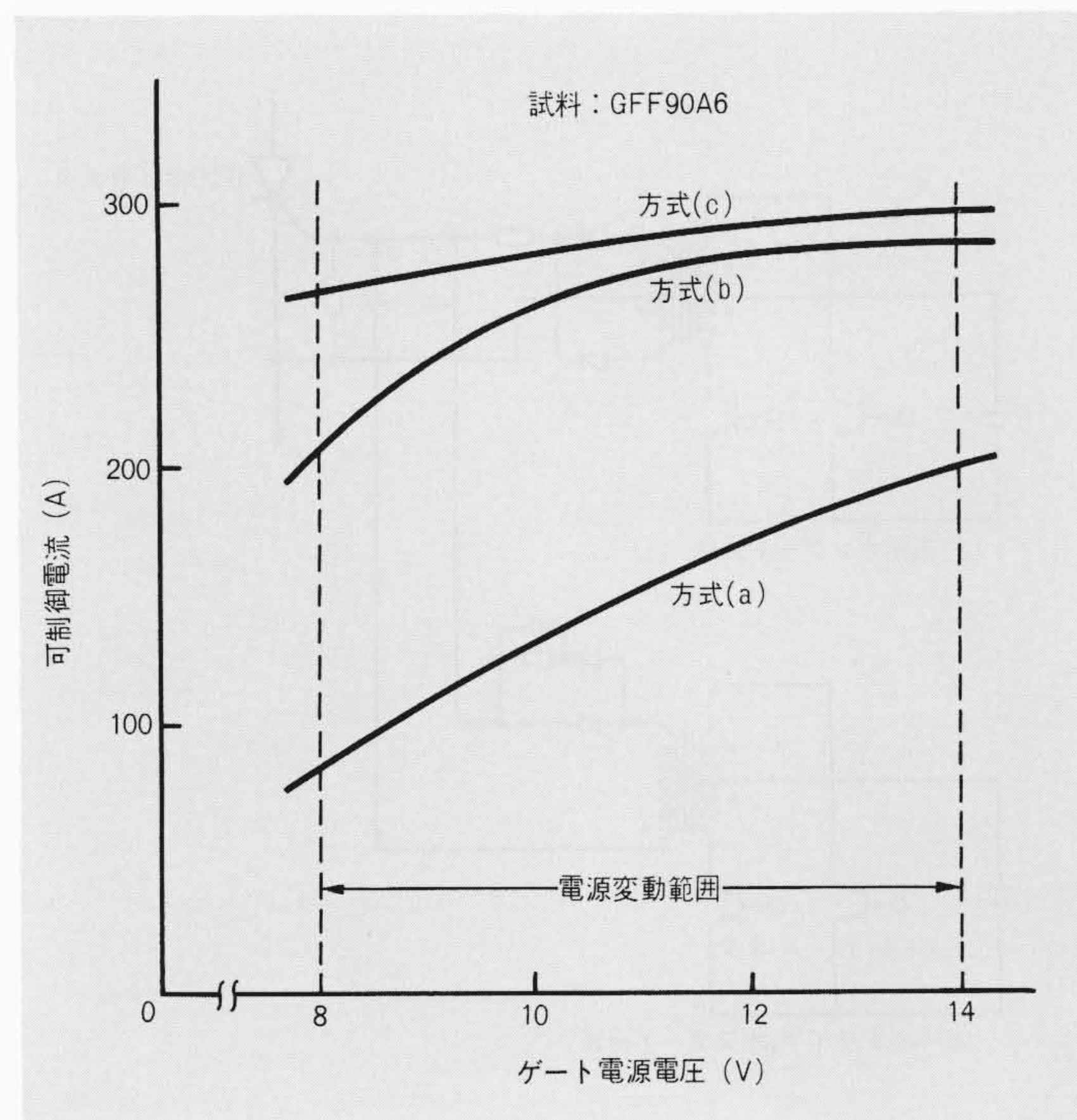


図7 各ゲート回路方式のしゃ断特性 オンオフ個別の電源をもつ方式(c)が最もしゃ断能力も大きく、電源電圧依存性も小さい。

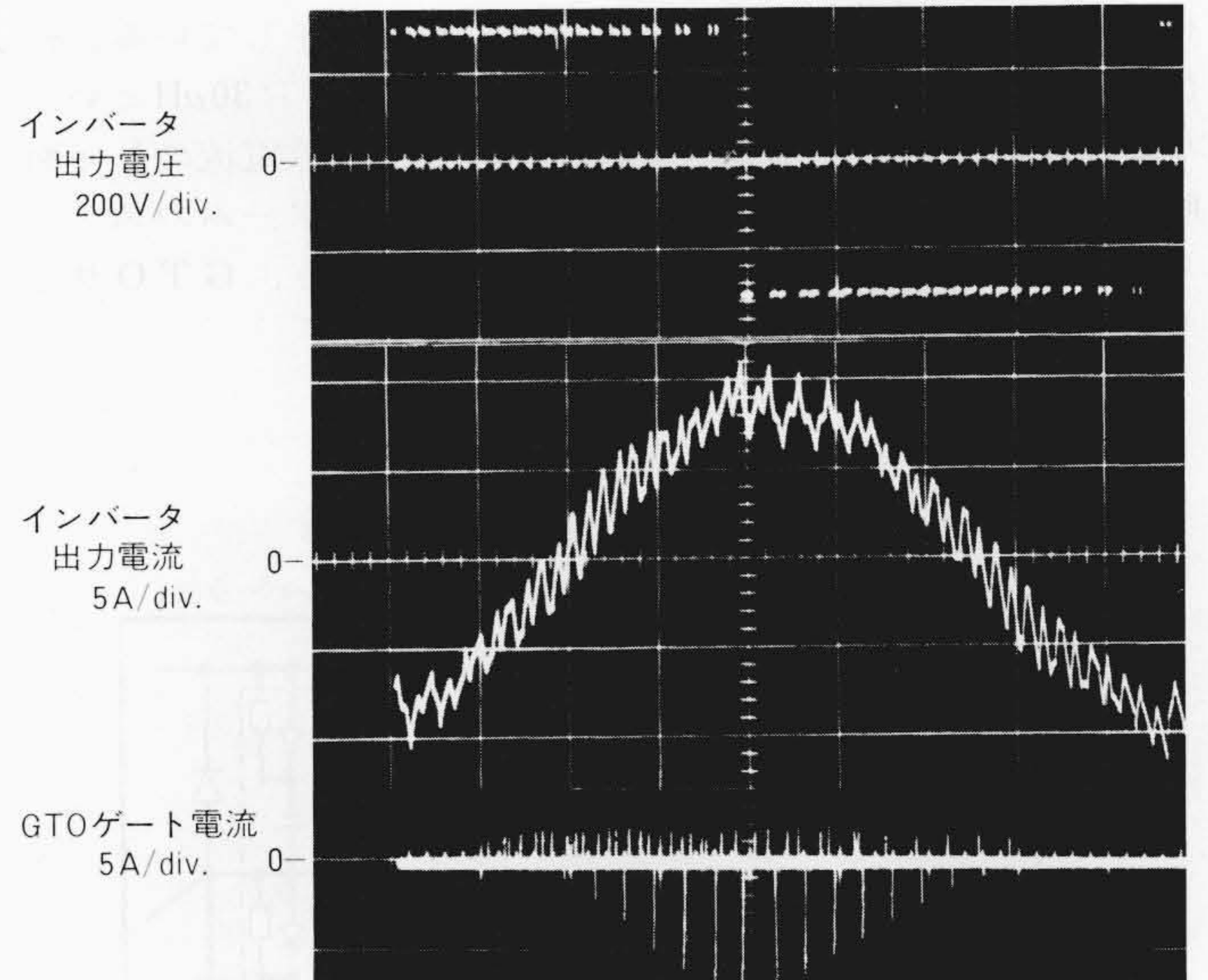


図8 インバータ出力電圧、電流及びゲート電流波形 図4に示した方式(c)のゲート回路をPWMインバータに実装して誘導電動機を駆動し、所要の性能を十分満足できることを確認した。

ゲート電源電圧に対する各方式の可制御電流特性を示すもので、試料は600V, 90A(GFF90A6)のGTOサイリスタである。図4(a)の方式は、しゃ断能力が小さく電源電圧依存性も大きい。これは、PWMインバータの最小パルス幅の制約からオフ用コンデンサ容量を大きくできないことに主因がある。(b)の方式は電源電圧の低い領域でしゃ断能力が急に低下する。これはオフ用サイリスタが、2個直列となって動作するための電圧降下分の影響である。これに対し(c)の方式は、しゃ断能力自体も最も大きい、電源電圧依存性の小さいことが優れた特徴であり、電源部にレギュレータを必要としない。

上記したように、小容量のGTOサイリスタのゲート回路としては、回路構成、発生損失、しゃ断性能などを総合し図4(c)の方式が最も適したものであるといえる。図8は、このゲート回路をPWMインバータに実装し、誘導電動機を駆動したときの各部波形を示すもので、所要の性能を十分満足できることを確認した。

(2) 主回路

主回路として重要なことは短絡事故時の保護法であり、図9に保護システムの構成を示す。GTOサイリスタインバータでは、短絡電流を限流するためにリアクトルが必要であるが、特に小容量のインバータでは、装置の小形軽量化の点から図示のように直流入力部に一括して挿入する必要がある。リアクトルの値も小さいほど望ましい。このためには、短絡を速やかに検出しGTOサイリスタ自身で短絡電流をしゃ断するのが得策である。小容量GTOサイリスタの場合は非繰返し可制御電流が大きいので、このような短絡保護法が特に有効である。図9の保護システムでは、GTOサイリスタのスイッチング時に生ずるスナバコンデンサへの大きな充電電流を、インバータ直流入力部に設けたパルス電流供給回路から供給することによって、定常動作に起因するパルス電流の影響を受けずに直流電流を検出できるため、検出レベルを低く設定でき、5 μ s以下の短時間で確実に短絡検出が可能となる。図10は、5kVAインバータでの短絡事故時の保護動作波形を示す。検出遅れ時間約2 μ s、ゲート回路での伝送遅れ時間4 μ sの後にGTOサイリスタにオフゲート電流が流れ始め、

検出から約15μs後には短絡電流のしゃ断が完了している。検出が早いため、約200Aの電流をしゃ断するのに30μHという小さな限流リアクトルで済む。なお、短絡事故電流のしゃ断時には実効スナバコンデンサ容量として、各アームのスナバコンデンサ容量の最低2倍を見込むことができ、GTOサイリスタのしゃ断耐量もその分だけ増大する。

4 大容量GTOサイリスタのインバータへの応用

4.1 ゲート回路

可制御電流数百アンペア以上の大容量GTOサイリスタのゲート回路は取り扱う電流が大きいので、小容量素子のゲート回路に比べかなり異なった構成になる。1,600V、600AのGTOサイリスタ(GFP600C16)の場合、必要なゲート電流波形は図11に示すようになる。この図に示すように、大容量GTOサイリスタのゲート電流、特にオフゲート電流は600A素子を例にしても、ピーク値200Aと非常に大きくなる。したがって、3章に示したようにオフ電源から直接供給する方式にすると、電流容量の大きなスイッチング素子が必要となるほかに、オフ用電源コンデンサとして許容充放電電流の大きなものを使用しなければならない。このため、ゲート回路が大形化する。そこで、大容量GTOサイリスタのゲート回路としては、パルストランスの変流作用を利用しオフゲート回路で取り扱う電流を小さくする必要がある。

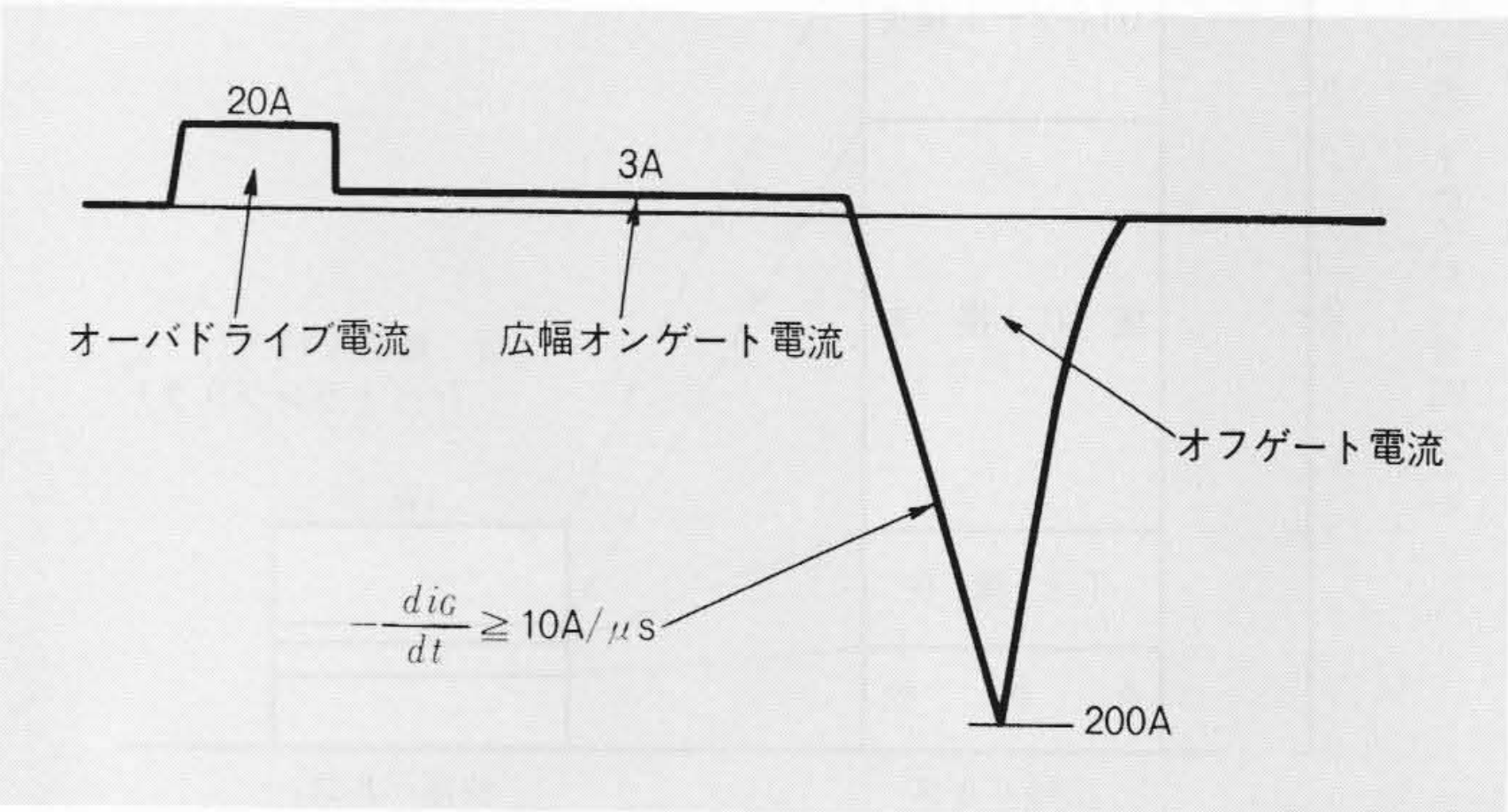


図11 大容量GTOサイリスタのゲート電流波形例 (1,600V、600A GTOサイリスタ) オフゲート電流のピーク値が200Aと非常に大きい。このため、大容量GTOサイリスタのゲート回路は小容量のものとは異なった構成となる。

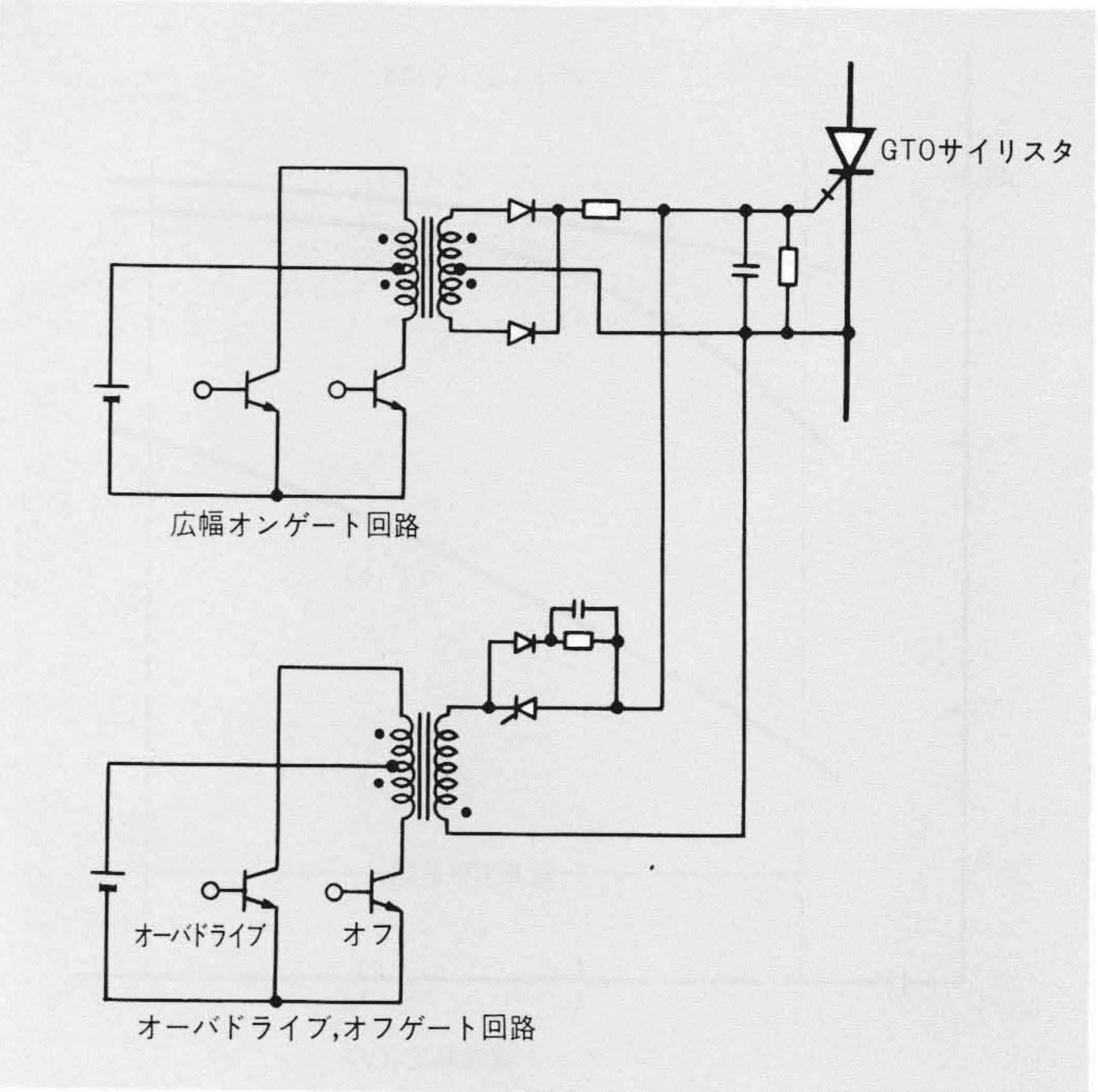


図12 大容量GTOサイリスタ用ゲート回路 オン及びオフゲート回路共にパルストランスを利用し、素子側と回路側を絶縁しているので、ゲート回路の電源を共通化でき、電源を含めゲート回路を小形化できる。

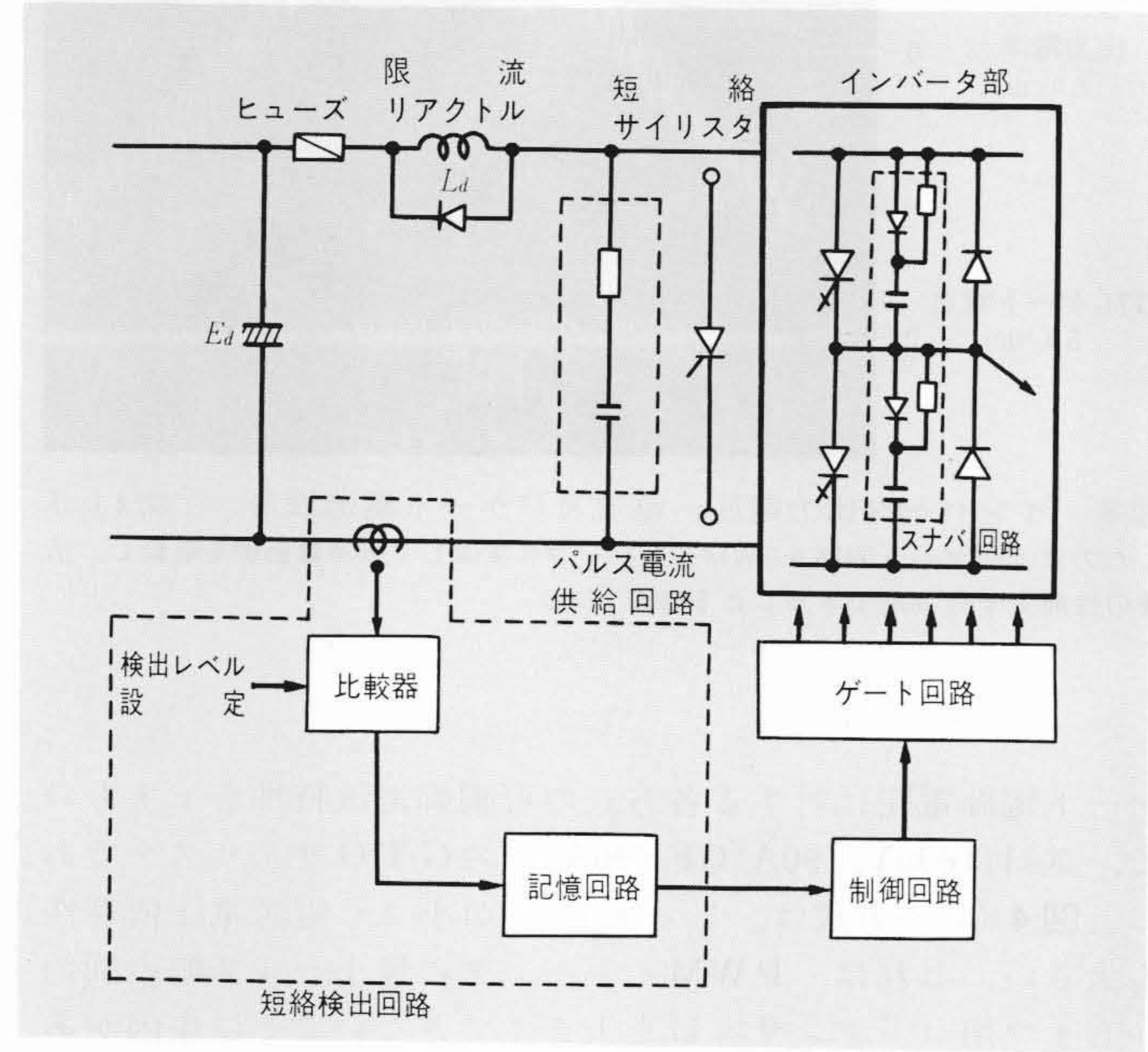


図9 GTOサイリスタインバータの短絡保護システム パルス電流供給回路を直流入力部に挿入し、電源側の直流電流を検出することにより、5μs以下の短時間で確実に短絡検出が可能となる。

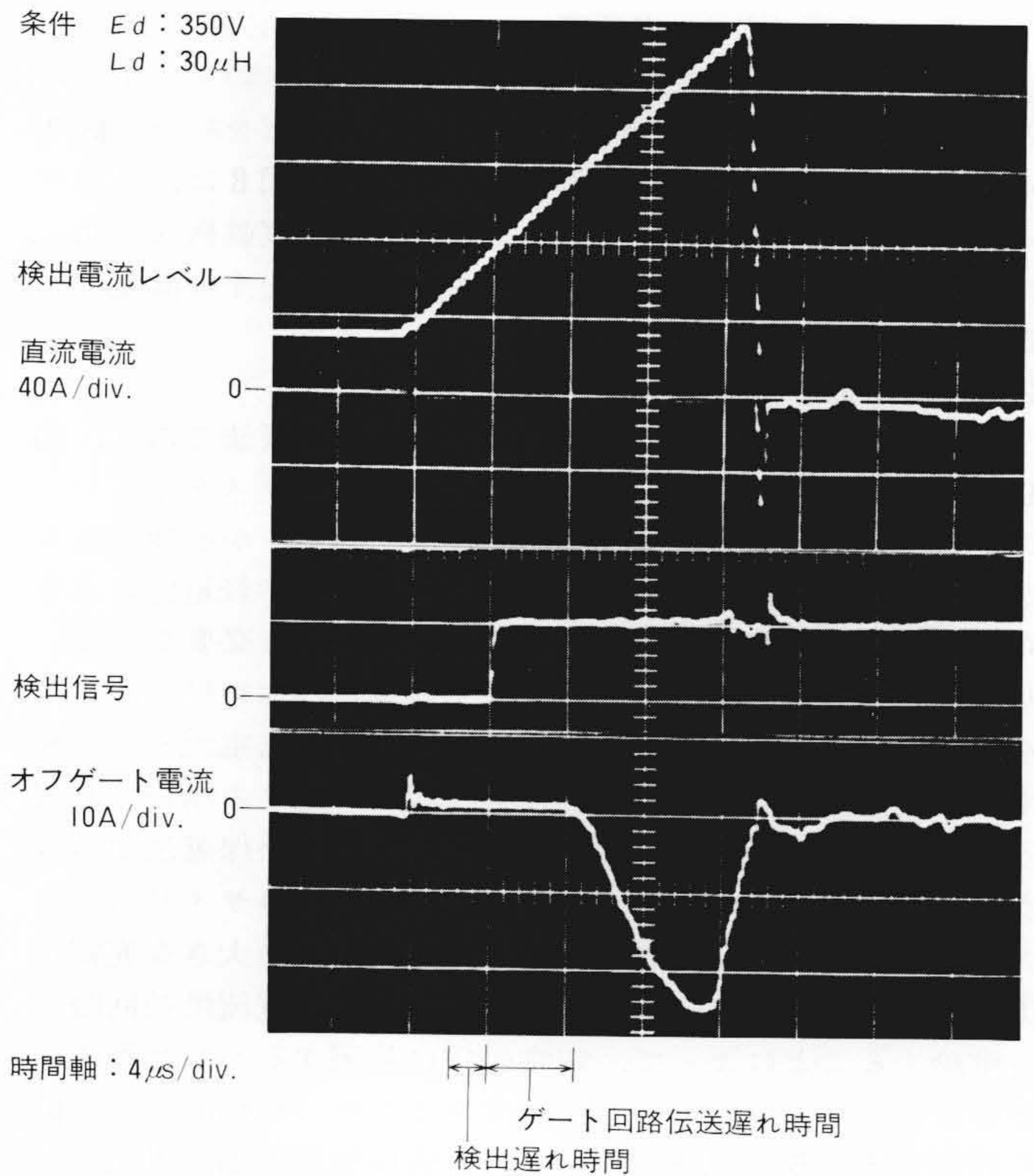


図10 自己しゃ断方式の短絡保護動作波形 検出遅れ時間約2μs、ゲート回路伝送遅れ時間4μsの後にオフゲート電流が流れ始め、約15μs後には短絡電流の自己しゃ断を完了している。

図12に、大容量GTOサイリスタに適したゲート回路の基本構成を示す。オフゲート電流だけでなく、オンゲート電流もパルストランスを介して供給する方式である。パルストランスで素子側と回路側を絶縁しているので、インバータを構成する各GTOサイリスタのゲート電源を共通化でき、電源を含めてゲート回路を小形化することができる。

図13は、図12に示したゲート回路でGF P 600 C 16をしゃ断したときの動作波形である。しゃ断時のアノード電流は600Aであり、所要の性能を十分満足できることを確認した。

4.2 主回路

大容量GTOサイリスタでは、特に主回路実装上注意を要する⁴⁾。ターンオフ動作中、アノード電流が減少するとき、この減少率が非常に大きいので、アノード、カソード間にはスナバ回路のインダクタンスによる大きなスパイク電圧が生ずる。このスパイク電圧によりターンオフ損失が増大し、GTOサイリスタが破壊するおそれがある。このため、実装上スナバ回路の配線インダクタンスを小さくするとともに、内部インダクタンスの小さいコンデンサ、及び動作遅れによる過渡電圧の小さいダイオードをスナバ回路に用いる必要がある。

また、短絡保護に関しては、大容量GTOサイリスタの場合、非繰返し可制御電流が小容量素子に比べ相対的に小さいので、GTOサイリスタ自身で短絡事故時の電流をしゃ断する方法は得策でない。そこで、図9中に示した短絡サイリスタを接続し、事故検出と同時にこのサイリスタを点弧し、事故電流を分流することにより、GTOサイリスタに流れる電流を抑制し、保護を行なう。短絡サイリスタには、サージ電流耐量の大きいものを用いて、ヒューズとの保護協調を図る。

図14は、短絡事故時の保護動作波形である。短絡事故が発

アノード電流
200A/div.

アノード、カソード
間電圧
400V/div.

ゲート、カソード
間電圧
10V/div.

オフゲート電流
40A/div.

時間軸：10 μ s/div.

図13 600Aしゃ断時の各部動作波形 オフゲート電流のピーク値は130A、上昇率($-di/dt$)は17A/ μ sである。600Aのアノード電流が確実にしゃ断できていることが分かる。

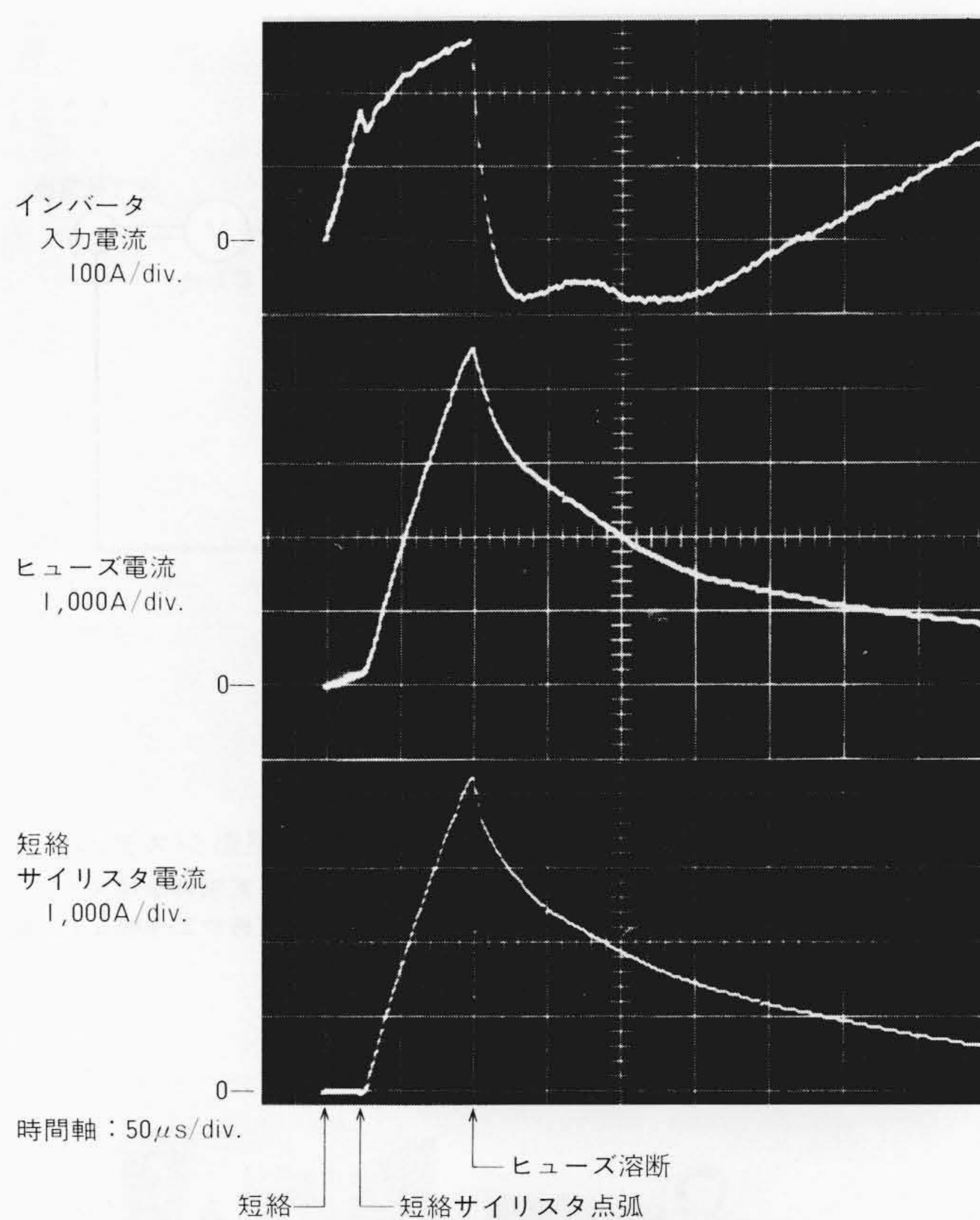


図14 短絡サイリスタ方式の保護動作波形 短絡サイリスタの点弧以後、事故電流がこのサイリスタに分流し、インバータ入力電流の増加が抑制され、インバータが確実に保護されていることが分かる。

生し、インバータの入力電流、すなわちGTOサイリスタに流れる電流が急激に増大しているが、短絡サイリスタの点弧以後はGTOサイリスタの電流増加は鈍化している。その後、ヒューズが溶断し、短絡サイリスタの電流も減少し、インバータが確実に保護されていることが分かる。

5 GTOサイリスタインバータの応用例

GTOサイリスタインバータを電動機駆動システムに応用した場合の構成を図15に示す。速度の応答性や精度など、要求される性能によって速度制御法は異なってくる。 V/f 一定制御はポンプやファンなどの省エネルギー運転用に、ベクトル制御は圧延機や工作機駆動などの応答性や精度の要求されるものに、それぞれ適用される。

交流電動機用インバータに対しては、制御性能はもちろん、小形化に対する要求が非常に強い。図16は、主回路にGTOサイリスタモジュール及びゲートモジュールを、制御回路に電動機駆動専用LSIとマイクロコンピュータを使用し、集積度を大幅に向上させた超小形インバータの外観である。このインバータは、定格出力容量が5kVAで、3.7kWの誘導電動機を駆動するもので、小形化のために実装密度を極限まで高め、更にヒートパイプを利用して冷却筐体の3面から放熱するようにしている。この超小形インバータは、駆動電動機体積の $\frac{1}{10}$ という小形化を実現しており、従来のインバータのイメージを一新するものである。

図17、18にGTOサイリスタインバータで誘導電動機をベクトル制御により駆動した場合の加速時、及び速度のステップ応答のオシログラムを示す。誘導電動機のベクトル制御法

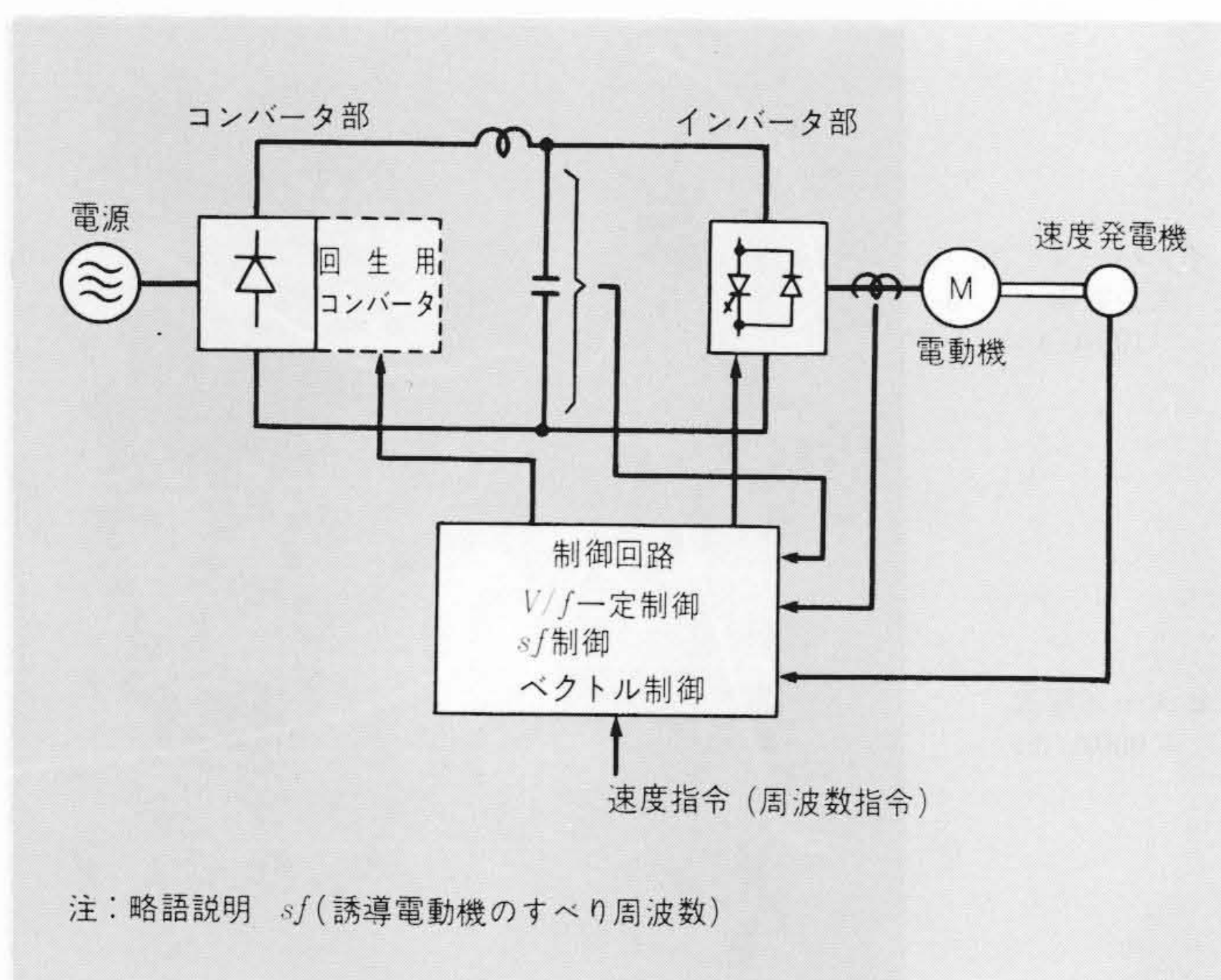


図15 GTOサイリスタインバータによる電動機駆動システム
要求される性能により速度制御法は異なってくる。V/f一定制御法はファン、ポンプなどの省エネルギー運転に、ベクトル制御法は圧延機や工作機など、応答性や精度の要求されるものに適用される。

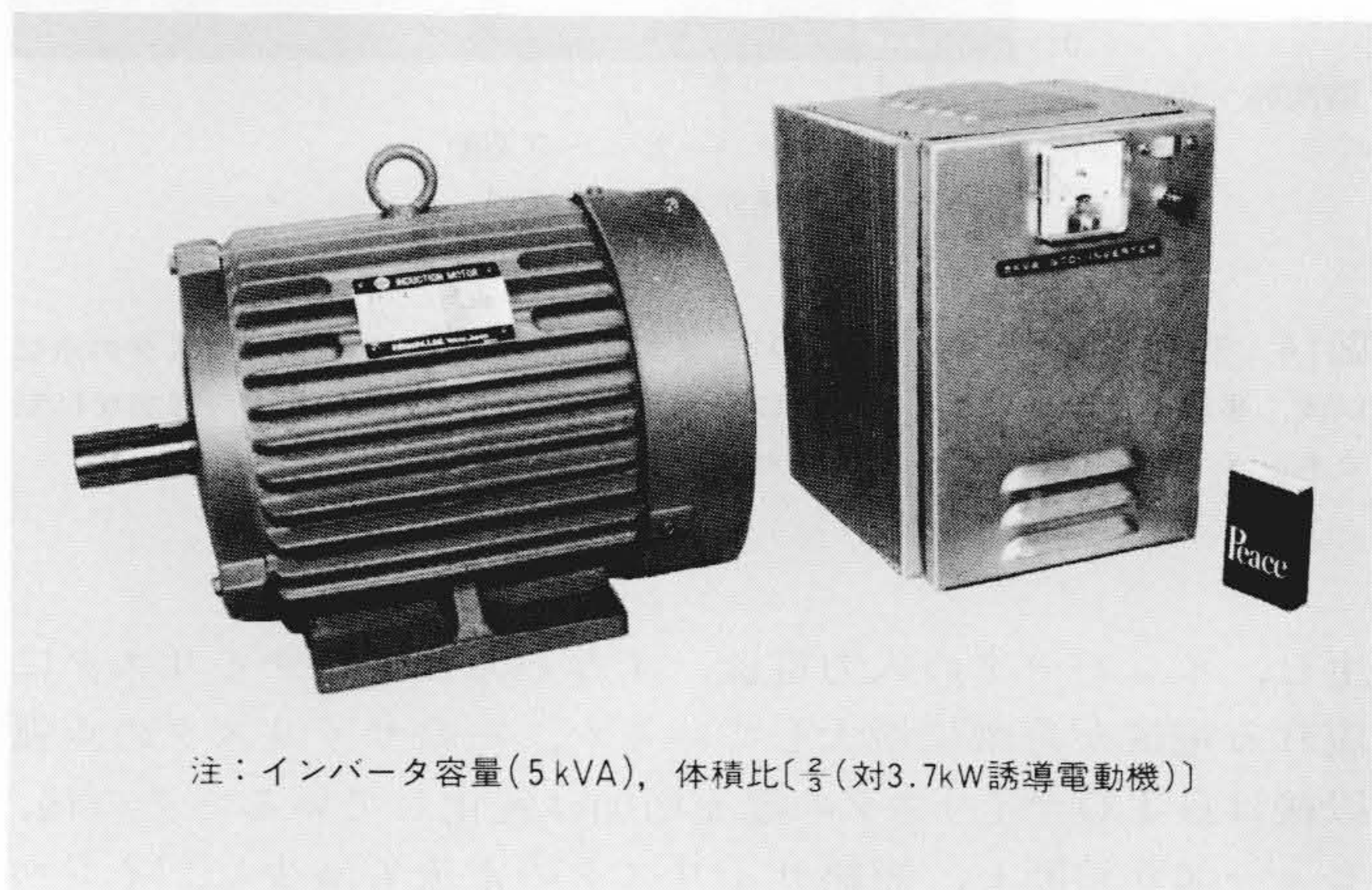


図16 超小形インバータ及び駆動電動機の外観 インバータの体積は駆動誘導電動機の $\frac{1}{3}$ であり、従来のインバータのイメージを一新した。

は、電動機電流を励磁電流成分とトルク電流成分とに分解して制御するもので、高応答の速度制御特性が得られる。GTOサイリスタを用いたPWMインバータは、瞬時応答に優れており、ベクトル制御に適した変換器である。図17から、速度の上昇率は一定であり、定トルク加速という優れた加速特性が得られていることが分かる。また、図18から分かるように速度応答の時定数は50msであり、直流機と同等の性能が得られている。

6 結 言

GTOサイリスタのPWMインバータへの適用技術及びインバータ応用技術について、

- (1) ゲート回路あるいはインバータの短絡保護法につきGTOサイリスタの容量に応じた回路方式、保護システムを明らかにし、GTOサイリスタのPWMインバータへの適用技術を確認することができた。
- (2) GTOサイリスタの適用により、小容量インバータでは駆動電動機の体積以下の小形化を実現し、またベクトル制御

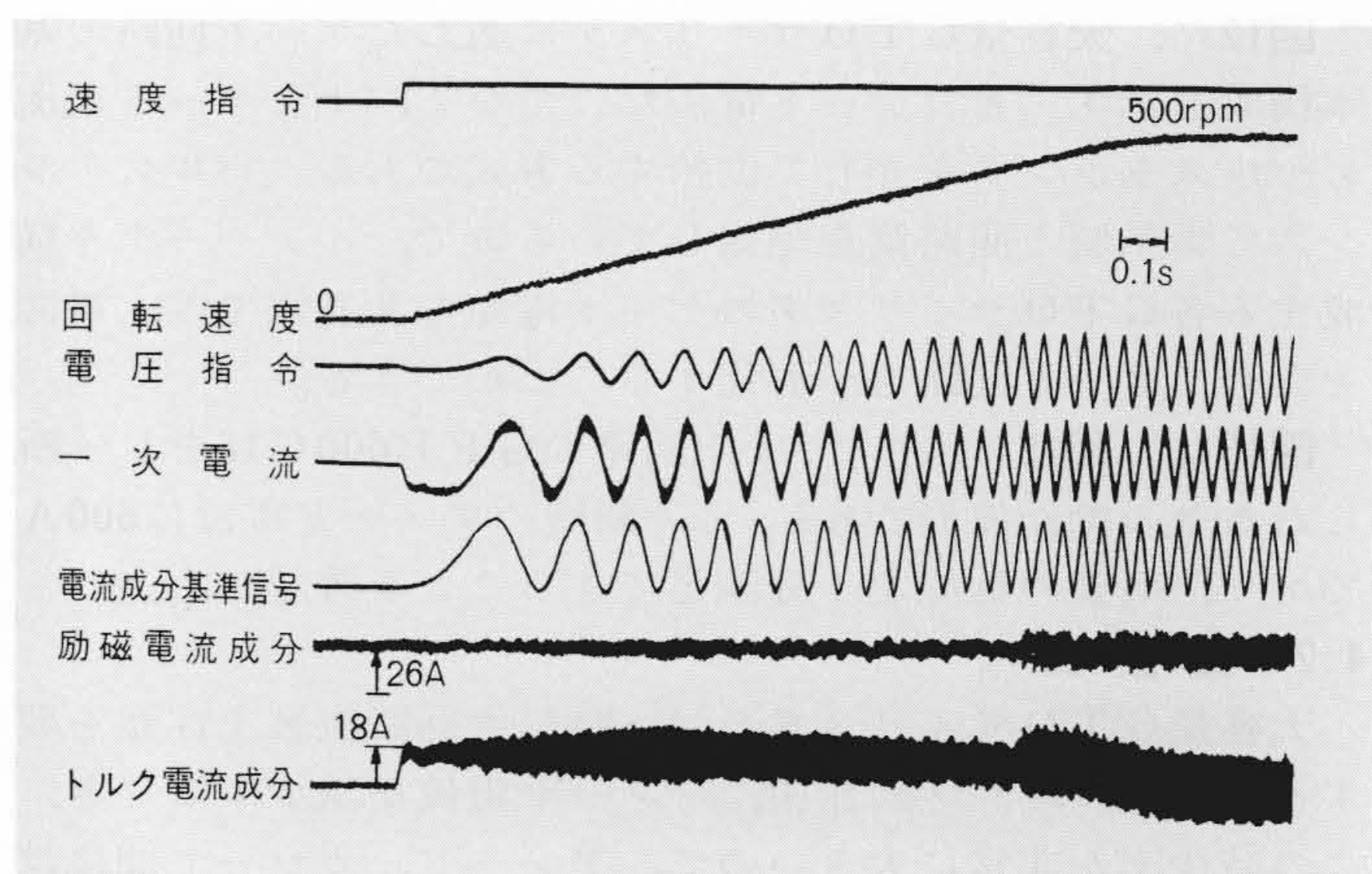


図17 ベクトル制御誘導電動機の加速特性 励磁電流は一定に、トルク電流は電動機が必要とするトルクに応じて制御されている。速度の上昇率は一定であり、優れた加速特性が得られている。

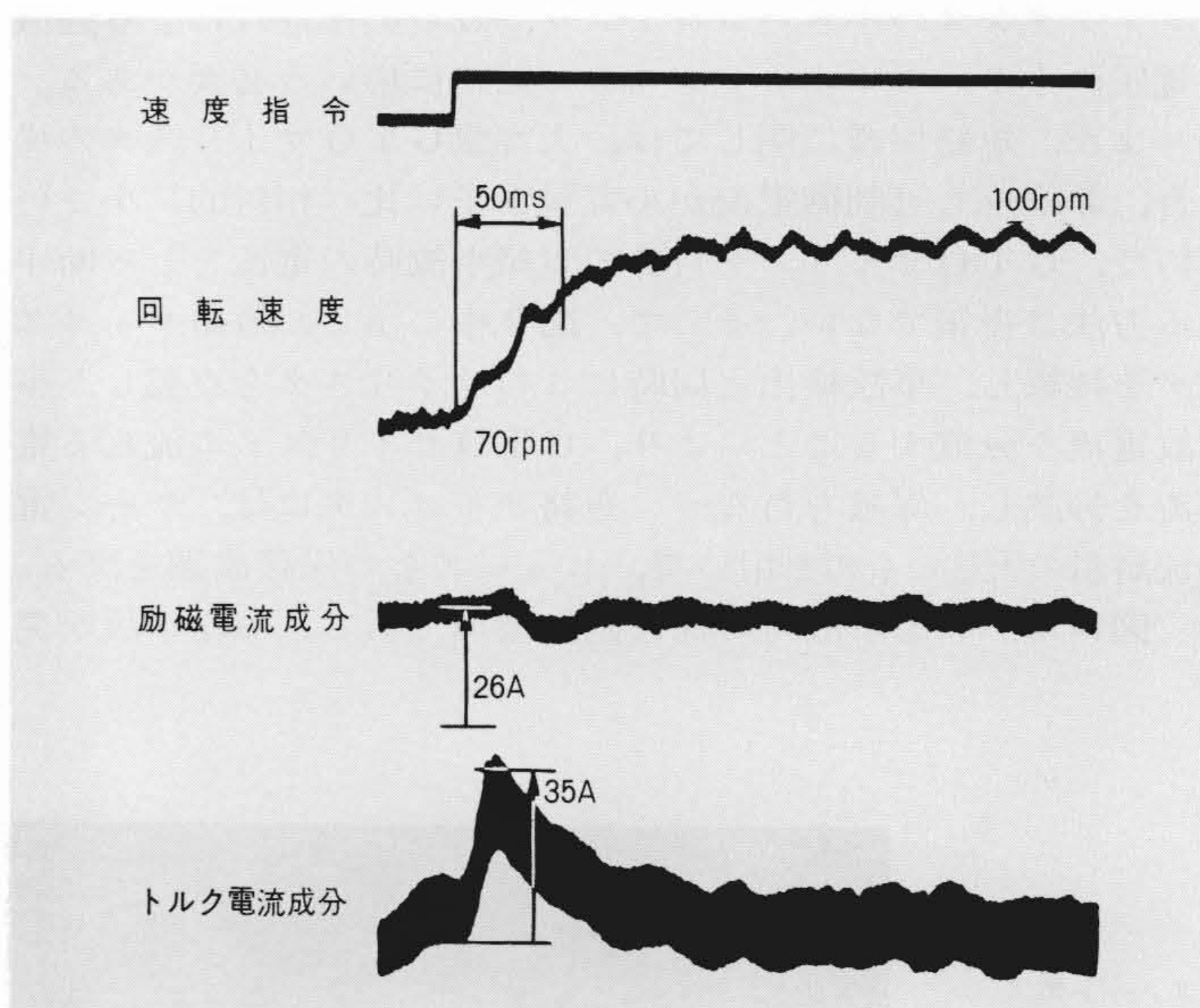


図18 ベクトル制御誘導電動機の世界応答特性 応答周波数 ω_c は20 rad/s(時定数=50ms)であり、直流機並みの応答特性が得られていることが分かる。

を導入して、誘導機を直流機並みの特性で駆動できることを検証した。

交流電動機用インバータに対して、小形軽量、低価格であることはもちろん、高性能、高効率化、そして大容量化と、その要求はますます多様化していく傾向にあるが、GTOサイリスタはこれらの要求に応ずることのできるスイッチング素子であると確信している。今後とも、GTOサイリスタのインバータへの応用技術を更に高め、複雑多岐にわたるニーズに応じ得るよう、いっそうの努力を重ねる考えである。

参考文献

- 1) 八尾, 外: 最近の電力用半導体スイッチング素子, 日立評論, 61, 689~692 (昭54-10)
- 2) 恩田, 外: 大容量GTOを使用したPWMインバータ, 昭52年電気学会全国大会, 659 (昭52-7)
- 3) 松田, 外: ゲートターンオフサイリスタを用いたインバータとその応用, 日立評論, 60, 427~432 (昭53-6)
- 4) 松田, 外: GTOインバータの動作と特性, 電気学会制御変換装置研究会, PCC-79-32 (1979-6)