

# 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

## New Inverter Employing GTO Thyristor and Its Application

現在、サイリスタインバータは種々の用途に応用されているが、なお性能の向上とともに、小形軽量化、高効率化などの要請が強い。しかし、中・小容量のインバータでは、最近実用化の域に入った大容量GTOサイリスタの適用によりこれらの要請が大部分満足される。GTOサイリスタインバータを開発した結果、転流回路が不要のため小形軽量、低騒音、高効率などの長所をもつほか、制御応答の面でも優れた特長のあることが確認された。同時に、スイッチング動作の補償や保護などのGTOサイリスタ適用技術、ゲート回路及び主回路の構成法が確立され、更に、GTOサイリスタインバータを無停電電源装置及び電動機駆動用電源装置に応用することにより、GTOサイリスタの動作、信頼性を検証することができた。

松田靖夫\* *Matsuda Yasuo*  
 恩田謙一\* *Onoda Kenichi*  
 国貞秀明\*\* *Kunisada Hideaki*  
 石橋 耀\*\*\* *Ishibashi Akira*

### 1 緒 言

最近、ゲートターンオフサイリスタ(以下、GTOサイリスタと略す)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電流容量が向上し、中・小容量のインバータを大幅に小形軽量化するとともに、パルス幅変調(以下、PWMと略す)制御を効果的に適用し、制御性能をも向上させることが可能となった。特に、GTOサイリスタはトランジスタに比べ高耐圧・大電流化に適しており、インバータ回路への適用法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、GTOサイリスタを用いたインバータを一般のサイリスタインバータと比較してその特徴を明らかにした後、GTOサイリスタの基本的なスイッチング特性とゲート駆動条件、大容量GTOサイリスタの駆動に適したゲート回路構成、GTOサイリスタインバータの主回路構成法と特性などについて述べる。また、GTOサイリスタインバータを無停電電源装置及び電動機駆動用可変周波電源装置に応用した場合の検証結果についても述べる。

### 2 GTOサイリスタインバータの特徴

GTOサイリスタがゲートパルスでごく短時間にターンオフできるサイリスタであることから、GTOサイリスタインバータは一般のサイリスタインバータに比べて多くの長所をもっている。表1に、GTOサイリスタインバータと一般のサイリスタインバータの特徴を比較して示す。比較対象は、効率が良く高周波大容量にも適した汎用性の高い補助インパルス転流方式のものである。一般のサイリスタインバータは、直流電圧の変化範囲が小さく転流用補助電源を必要としない直流定電圧形と変化範囲が大きく補助電源の必要な直流可変電圧形とに分けられる。前者は、定電圧定周波電源やPWM制御の可変周波電源に用いられるが、後者は、可変周波電源専用である。前者では転流用のコンデンサ、リアクトル、サイリスタが、また後者では更に転流用補助電源と電源間絶縁用ダイオードといった転流要素が不可欠である。これに対し、GTOサイリスタインバータは転流要素を全く必要としない

ため、いずれの形のインバータにも適用できる。構成上からは、直流可変電圧形に用いた場合のほうが効果は大きい。

GTOサイリスタインバータは、ゲート回路容量が一般のサイリスタインバータの2~2.5倍になるという欠点はあるが、転流要素が不要のため、直流定電圧形に対しては体積、重量がそれぞれ約60%及び70%に、直流可変電圧形に対しては約50%及び65%と大幅に低減できる。また、一般のサイリスタインバータでは転流リアクトルの発生する騒音が相当に大きいですが、GTOサイリスタインバータでは騒音源はほとんど冷却ファンだけであり、低騒音化が図れる。効率の点でも、一般のサイリスタインバータの場合大きな転流パルス電流により生ずる転流損失のために、周波数1kHzでは80~85%程度の値しか得られないが、GTOサイリスタインバータでは92~94%と大幅に向上する。更に、GTOサイリスタインバータは、所要転流余裕時間が一般のサイリスタインバータに比べ桁程度短いため、特にPWM制御に適しており、出力電圧の相当高次の高調波まで除去するとともに、速応性に富んだ制御を行なうことができる。今後、GTOサイリスタの普及に伴い素子のコスト低減とともに、経済性の面でもGTOサイリスタインバータは一般のサイリスタインバータを上回るものと思われる。

### 3 GTOサイリスタの基本特性とゲート駆動条件<sup>1)</sup>

GTOサイリスタのスイッチング特性は、ゲート駆動条件に大きく依存する。このため、GTOサイリスタの優れた特性を十分利用するには、適切なゲート電流を供給することが重要である。ここでは、GTOサイリスタの基本的なスイッチング特性とゲート電流について述べる。

#### (1) ターンオン特性

図1に100A級GTOサイリスタのターンオンゲート電流 $I_{GFP}$ とターンオンタイム $t_{gt}$ の関係を示す<sup>2)</sup>。 $I_{GFP}$ が小さいと $t_{gt}$ が長くなり、スイッチング損失が増大する。またGTOサイリスタ内部全体が均一に導通状態とならない場合もある。図1では3.5A以上ゲート電流を流しても $t_{gt}$ の減少はほとん

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

表1 GTOサイリスタインバータと一般のサイリスタインバータの特徴比較 GTOサイリスタインバータは、一般のサイリスタインバータに比べ小形、軽量、高効率、低騒音、高制御性といった長所をもっている。

項目	インバータ方式	GTOサイリスタインバータ	一般のサイリスタインバータ(補助インパルス転流方式)	
			直流定電圧形	直流可変電圧形
主回路基本構成(一相分)				
転流要素		なし	転流L,C 転流用サイリスタ	転流L,C, 転流用サイリスタ 転流用補助電源 電源間絶縁ダイオード
ゲート回路容量		大(200~250%)	小(100%)	
体積		60%	100%	120%
重量		70%	100%	110%
騒音		小(冷却ファンの騒音のみ)	大(転流Lの騒音大)	
効率(周波数1kHz)		92~94%	80~85%	
制御応答		速応性が良い(所要転流余裕時間が短い)。	適応性が悪い(所要転流余裕時間が長い)。	

注：ゲート回路容量、体積及び重量については、直流定電圧形サイリスタインバータの場合を100%として示してある(当社比)。

で見られない。 $t_{gt}$ が一定となり始めるゲート電流でターンオンさせることがスイッチング損失の低減、ゲート回路の経済性などの面で好ましい。GTOサイリスタは自己保持能力をもつため、パルス状のゲート電流でターンオンさせればよいが、保持電流が大きいことや、遅れ力率負荷の場合などを考えると、GTOサイリスタ内部全体を導通状態に保てるゲート電流 $I_{GT}$ を流し続ける必要がある。

(2) ターンオフ特性

大容量GTOサイリスタの内部は、等価的に多数のGTOサイリスタが並列接続されているとみなすことができる。したがって、GTOサイリスタ内部が均一にターンオフするように駆動することが重要である。図2に多数のGTOサイリスタを用いて測定したターンオフゲート電流の上昇率 $di_{GR}/dt$ とターンオフタイム $t_{gq}$ のばらつき関係を示す。 $di_{GR}/dt$ が大きくなるほど $t_{gq}$ は短くなり、ばらつきも小さくなっている。

以上のことから、GTOサイリスタの駆動に適するゲート

電流波形は図3に示すようになる。

図4に一般のサイリスタとGTOサイリスタのターンオフ時の電圧、電流波形を示す。一般のサイリスタは順電流の下降期間にアノード~カソード間電圧はほとんど加わらない。一方、GTOサイリスタは $0.5\mu s$ 程度の短時間に順電流が減少するため、周辺回路の配線のインダクタンスによってスパイク電圧 $V_{DOP}$ が生じ、ターンオフ時の損失が増大する。GTOサイリスタのターンオフ能力を向上させるには、スパイク電圧 $V_{DOP}$ とその後の電圧上昇率 $dv/dt$ の抑制が重要であり、GTOサイリスタ周辺回路の配線を極力短くして、インダクタンスの低減を図るとともに、スナバコンデンサの容量を $dv/dt$ を十分低減できる値に選定する必要がある。

4 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

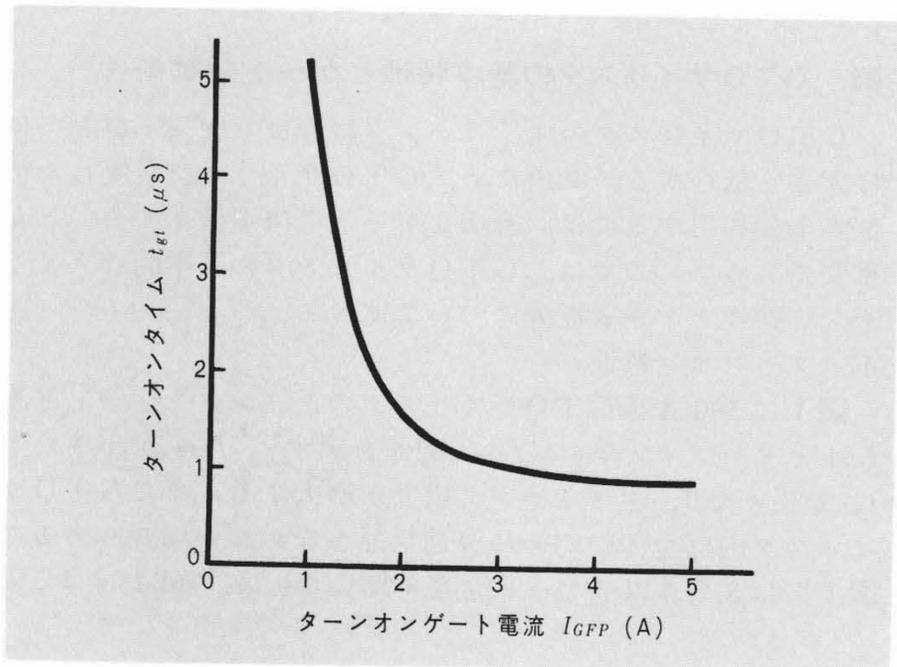


図1 ターンオン特性 ターンオンタイム $t_{gt}$ が一定となるようなターンオンゲート電流 $I_{GFP}$ でGTOサイリスタをターンオンさせることが好ましい。

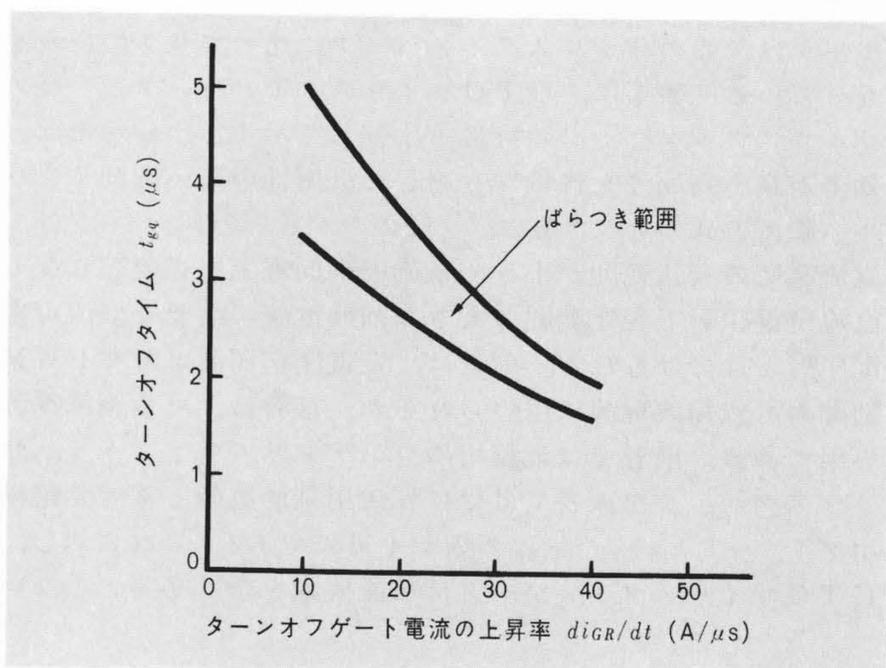


図2 ターンオフ特性 大きな上昇率 $di_{GR}/dt$ をもつターンオフゲート電流で、GTOサイリスタをターンオフさせることが重要である。

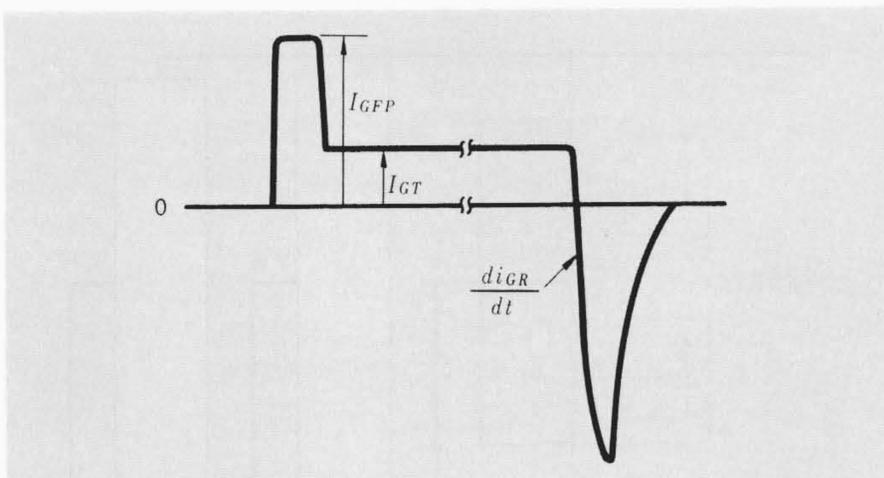


図3 GTOサイリスタの駆動に適するゲート電流 GTOサイリスタを駆動するには、 $I_{GFP}$ によってターンオンを加速し、更に $I_{GT}$ を流し続けてGTOの導通状態を確実に保ち、ターンオフ時には $di_{GR}/dt$ の高いゲート電流を流すことが好ましい。

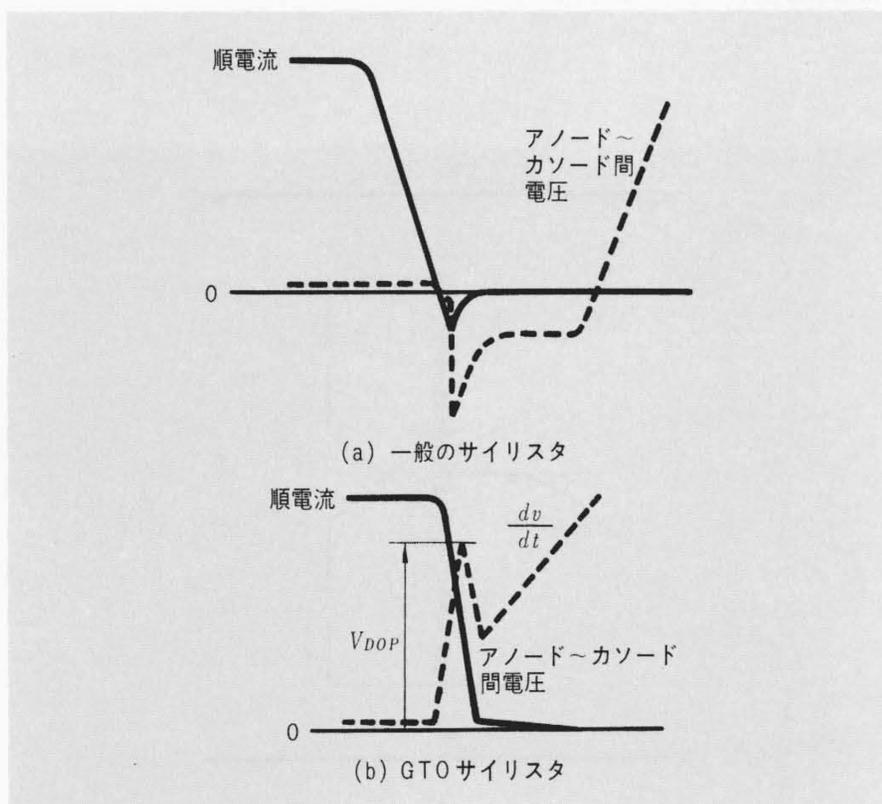


図4 ターンオフ時の電圧、電流 一般のサイリスタは、電流下降期間に順電圧がほとんど印加されず、損失は極めて小さい。一方、GTOサイリスタは電流下降期間に順電圧が印加されるため、ターンオフ時に損失が生ずる。

成する必要がある。基本的には、コンデンサの充放電を利用するものと、リアクトルの蓄積エネルギーを利用するものとに大別できる<sup>3)</sup>。表2にゲート回路の構成例を示す。No.1の方式は、大容量GTOサイリスタを高周波で駆動する場合ゲートのターンオフパワーが不足する危険がある。No.2は構成が簡単で高周波運転が可能である。しかし、ターンオンゲート電流がパルス状になるため、保持電流以下となる負荷や遅れ力率負荷には適さない。No.3は大容量GTOサイリスタを駆動させるための基本回路であり、簡単な構成で信頼性が高い。No.4はNo.3の方式を単一入力信号で駆動し、GTOサイリスタのターンオンの加速を行なうとともに、 $di_{GR}/dt$ を高めるように構成したものである。 $di_{GR}/dt$ を高めるにはゲート回路の配線を短くして、インダクタンスの低減を図ることと、ターンオフゲート電源の電圧を高くすることが考えられる。しかし、GTOサイリスタのゲート、カソード間逆耐電圧が一般に20V程度であるため、ターンオフゲート電源の電

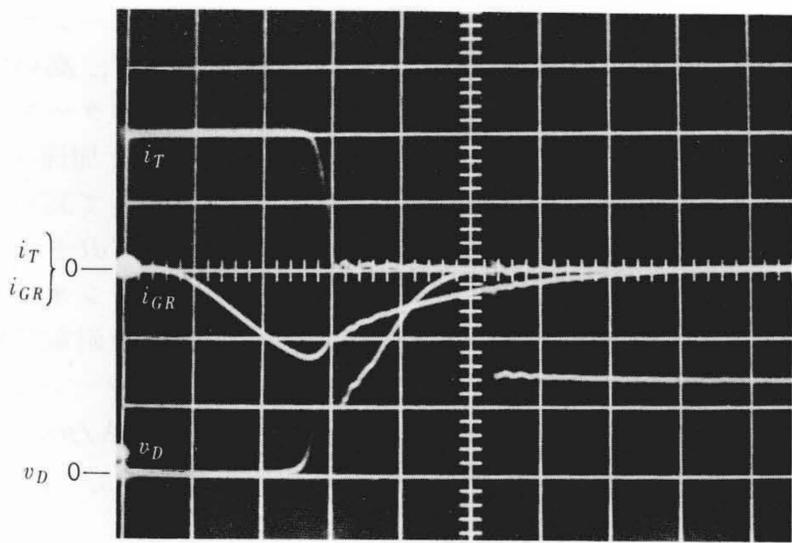
圧はこれ以下に選定する必要がある。一方、ターンオンゲート電源はGTOサイリスタによる制限を受けず、高い電圧に選定できる。No.4では、GTOサイリスタのターンオン時にはコンデンサの充電電流によってターンオンを加速する。ターンオフ時には、ターンオンゲート電源によって高い電圧に充電されたコンデンサの放電を利用して、 $di_{GR}/dt$ を十分高くすることができる。コンデンサの電圧は、ターンオフゲート電流を流すことによってゲート～カソード間逆耐電圧以下に低下するため問題はない。No.4の方式によるターンオフゲート電流波形の一例を図5に示す。 $di_{GR}/dt$ は $40\text{ A}/\mu\text{s}$ と高く、500Aの順電流を $2.2\mu\text{s}$ でターンオフしている。

### 5 インバータ主回路

主回路構成上重要なことは、GTOサイリスタの保護用リアクトルの挿入方法とその蓄積エネルギーの処理である<sup>4)</sup>。図6に三相GTOサイリスタインバータの主回路構成を示す。アームリアクトルは、短絡事故時の電流を抑制しGTOサイリスタとヒューズの協調を取り、GTOサイリスタを保護する。また、PWM制御時などで、等価的に進相モードのスイッチングを行なう場合には、電流、電圧の上昇率抑制効果をもつ。GTOサイリスタのターンオフ時には、このアームリ

表2 ゲート回路の構成例 No.1及び2は中小容量サイリスタの、No.3及び4は大容量GTOサイリスタの駆動に適する。

No.	回路構成	特徴
1		(1) コンデンサの放電によりターンオフ (2) $I_{GFP}$ の形成が容易 (3) 大容量、高周波用には限界あり。
2		(1) リアクトルのエネルギーによりターンオン (2) 構成が簡単 (3) 低周波時に損失大 (4) 遅れ力率負荷には不適
3		(1) 大容量GTOサイリスタ用基本回路 (2) 高周波用にも好適
4		(1) $di_{GR}/dt$ が大 (2) 大容量・高周波用に好適 (3) 構成がやや複雑



横軸 1μs/div.  
縦軸  $\begin{cases} i_T(\text{アノード電流}): 250\text{A/div.} \\ i_{GR}(\text{オフゲート電流}): 50\text{A/div.} \\ v_D(\text{アノード電圧}): 100\text{V/div.} \end{cases}$

図5 表2 No. 4の方式によるGTOサイリスタのターンオフ時の波形  $di_{GR}/dt$ は40A/μsと高く、500Aの順電流を2.2μsでターンオフしている。

アクトルの蓄積エネルギーを、ゲート帰還ダイオードによりゲート電源へ回収し、過電圧の発生を抑えている。この方式は、回収したエネルギーをゲート駆動電力として利用するので、ゲート電源回路の容量低減効果をもつ。GTOサイリスタのスイッチング周波数が高い場合やしゃ断電流が大きい場合には、回収エネルギー量がゲート消費電力を上回ることもある。そのような場合には、図7に示すようにアームリアクトルを分割挿入する構成とし、蓄積エネルギーの一部はゲート電源に回収し他は負荷回路を環流させ処理する。

また、スナバコンデンサ容量と電圧上昇率、過充電電圧の関係は、GTOサイリスタのターンオフ動作を補償する上で重要である。電圧上昇率は、スナバコンデンサがGTOサイリスタのしゃ断電流で充電されていくときのものである。一方、過充電電圧は、スナバコンデンサが直流電源部を含めた配線インダクタンスの蓄積エネルギーを吸収するのに際して生ずる。このため、スナバコンデンサ容量は、GTOサイリスタのしゃ断電流、 $dv/dt$ 耐量、配線インダクタンス、耐圧などの相互関係を把握し決定する必要がある。特に、GTOサ

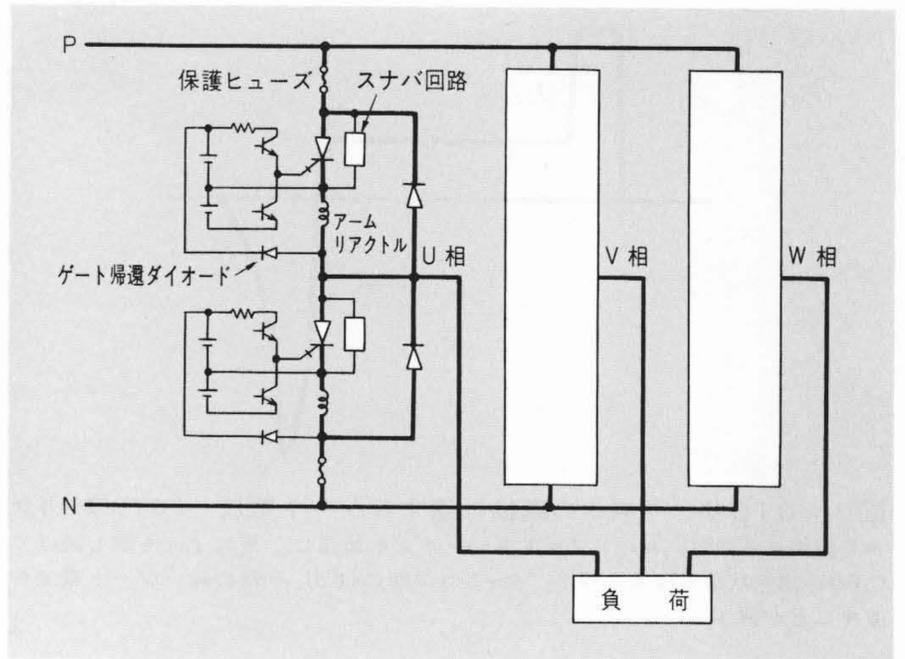


図6 三相GTOサイリスタインバータの主回路構成 この構成の主回路では、アームリアクトルの蓄積エネルギーをゲート電源に回収して過電圧発生を抑え、かつゲート駆動電力として利用している。

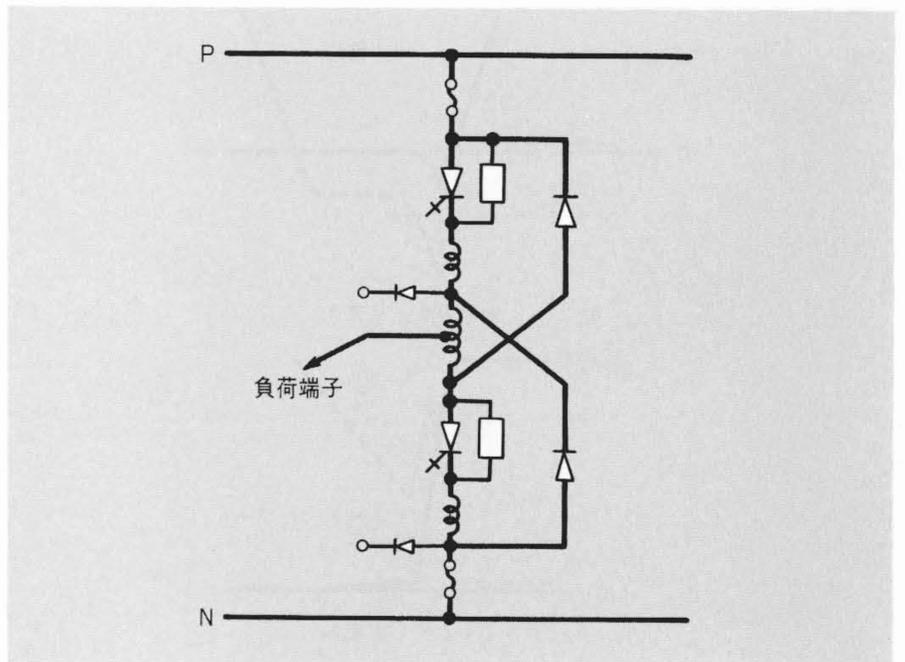


図7 リアクトル分割挿入時のアーム構成 この構成の主回路は、アームリアクトルを分割し蓄積エネルギーを負荷側へも環流させ、ゲート電源への回収量を低減している。

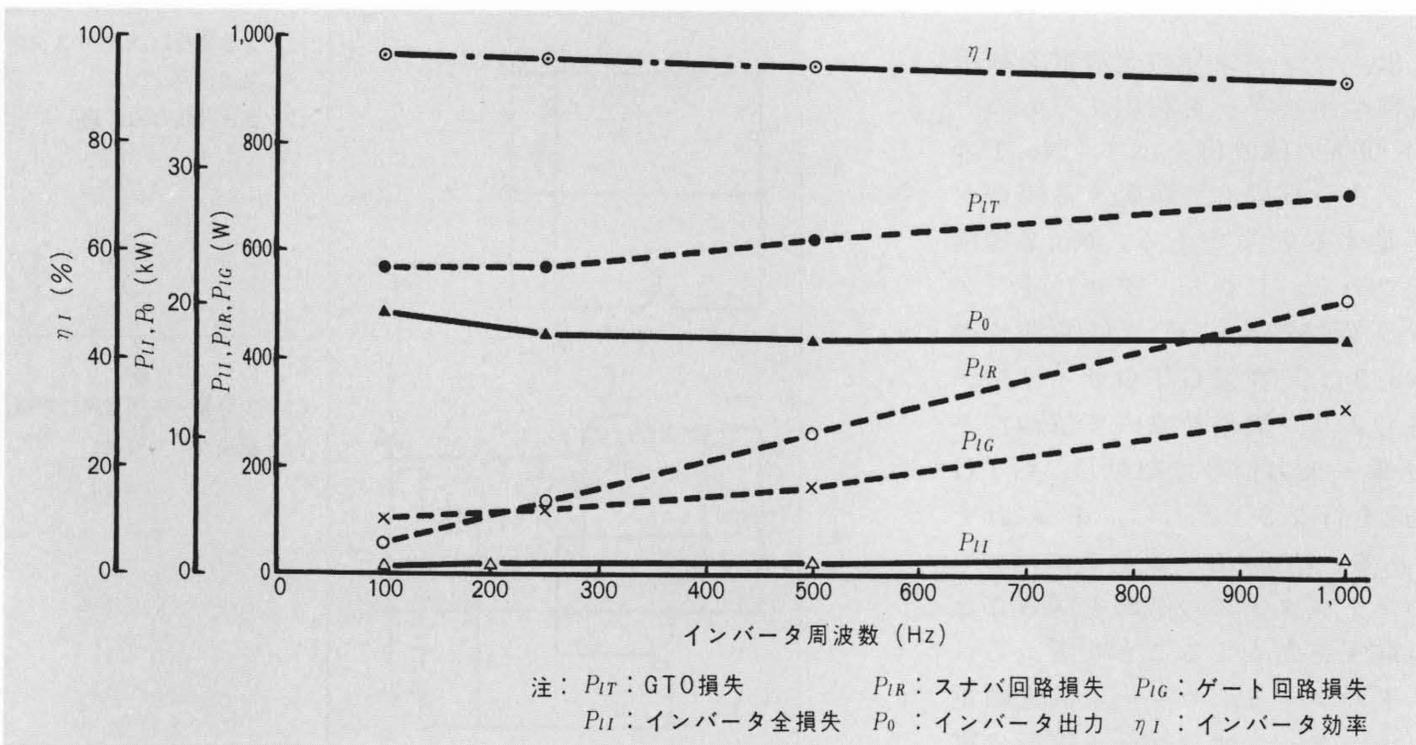


図8 GTOサイリスタインバータの損失分布と効率 GTOサイリスタインバータの効率は、周波数1kHzで92.5%と極めて高い。

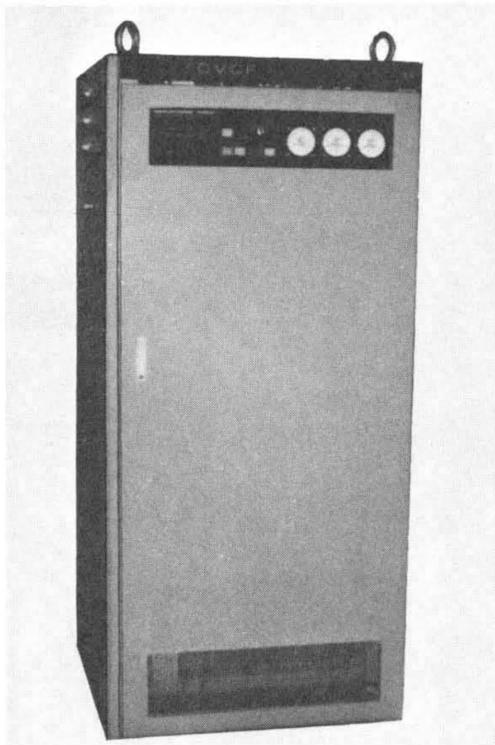


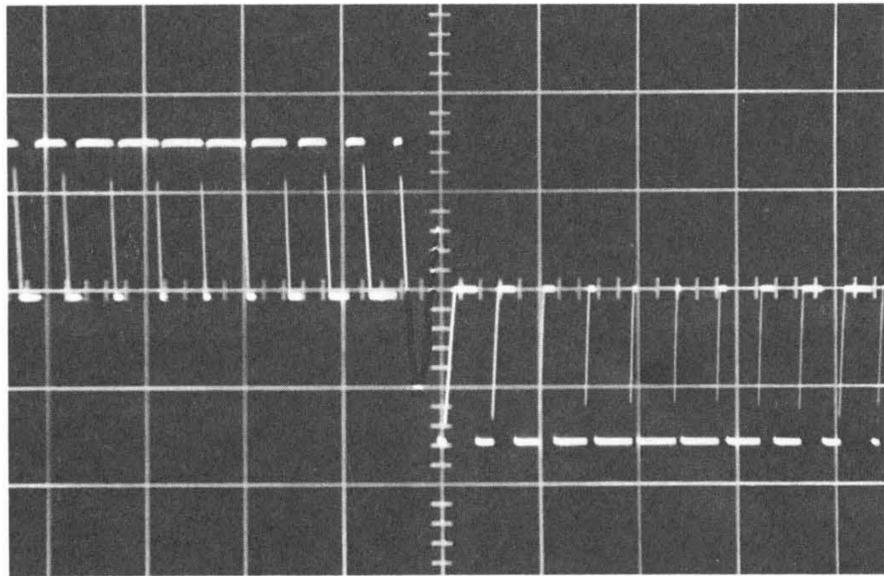
図9 10kVA定電圧定周波無停電電源装置 GTOサイリスタインバータの応用により体積が約90%に小形化されたが、特に制御性能の面での向上が著しい。

イリスタインバータでは、前述のスナバ回路配線だけでなく、電源部を含めた主回路配線も極力短縮して、インダクタンスを低減することが必要であり、これは同時にインバータの小形化に効果をもたらす。

図8は、50A級GTOサイリスタを図6の回路に適用し、周波数に対する出力約20kW時のインバータの損失分布と効率の特性を示したものである。インバータの損失はGTOサイリスタ、スナバ回路及びゲート回路で発生する。低周波領域ではGTOサイリスタ損失の割合が大きいが、高周波になるとともにスナバ回路損失とゲート回路損失が増し、1kHzでは全損失の大半を占める。インバータ効率は、周波数100Hzで96.5%、1kHzで92.5%であり非常に良い。

6 無停電電源装置への応用

日立製作所で開発した100A級GTOサイリスタを用いて出力10kVAのPWM方式定電圧定周波無停電電源装置を製作した。図9に外観を、図10に基本的なブロック構成を示すが、インバータの主回路は単相フルブリッジ形である。GTOサイリスタの高速スイッチング特性を生かし、11個の変調パ



注：横軸 2ms/div.  
縦軸 100V/div.

図11 試作インバータの出力電圧波形 多数個の変調パルスの形成により、高次の高調波成分まで除去されている。

ルスで交流出力の半サイクルを形成し、高次の高調波成分まで除去している。このため、交流フィルタを軽減でき、また負荷や電源の変動に対する制御性能が大幅に向上した。インバータ出力電圧波形の一例を図11に示す。GTOサイリスタの過電流保護は、インバータ及び負荷の電圧異常を検出することによって行なう。この電源装置は、GTOサイリスタインバータの応用によって、一般のサイリスタインバータの場合に比べ騒音、効率及び体積の点で大幅な改善がなされた。

7 電動機駆動用電源装置への応用

50A級のGTOサイリスタを使用し開発した出力容量20kVAの可変周波電源装置の外観を図12に示す。装置の大きさは高さ1,600mm、幅700mm、奥行600mmであり、日立製作所の直流可変電圧形のサイリスタインバータを用いた装置に比べ、体積で約1/5と大幅に小形化されている。図13にこの可変周波電源装置の基本的なブロック構成を示す。供試電動機は三相、22kW、200V、50Hzの誘導電動機である。負荷が変化の大きい可変インピーダンスの電動機であるため、GTOサイリスタのゲートターンオフ失敗による破壊を予防保護するため、

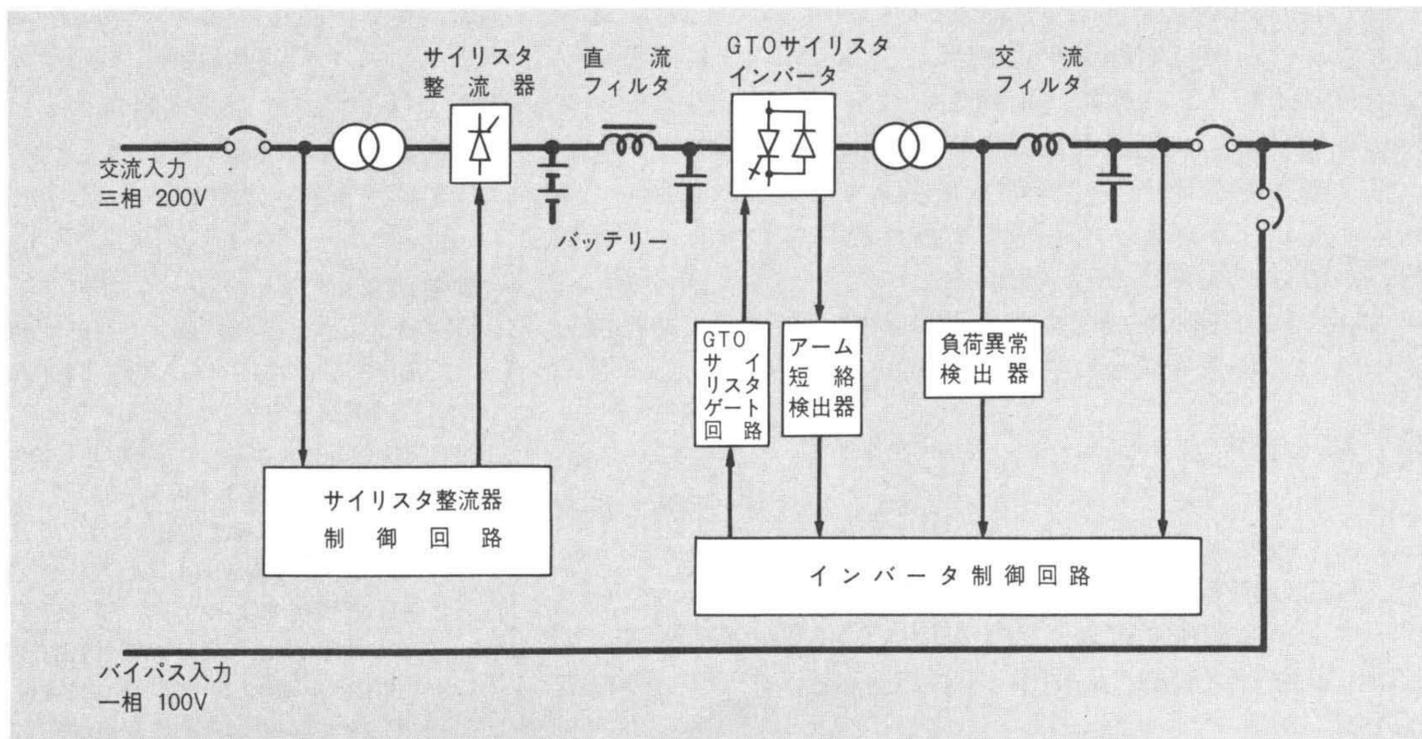


図10 試作無停電電源装置の基本構成 インバータのアーム短絡及び負荷の電圧異常を検出し、GTOサイリスタを過電流から保護している。

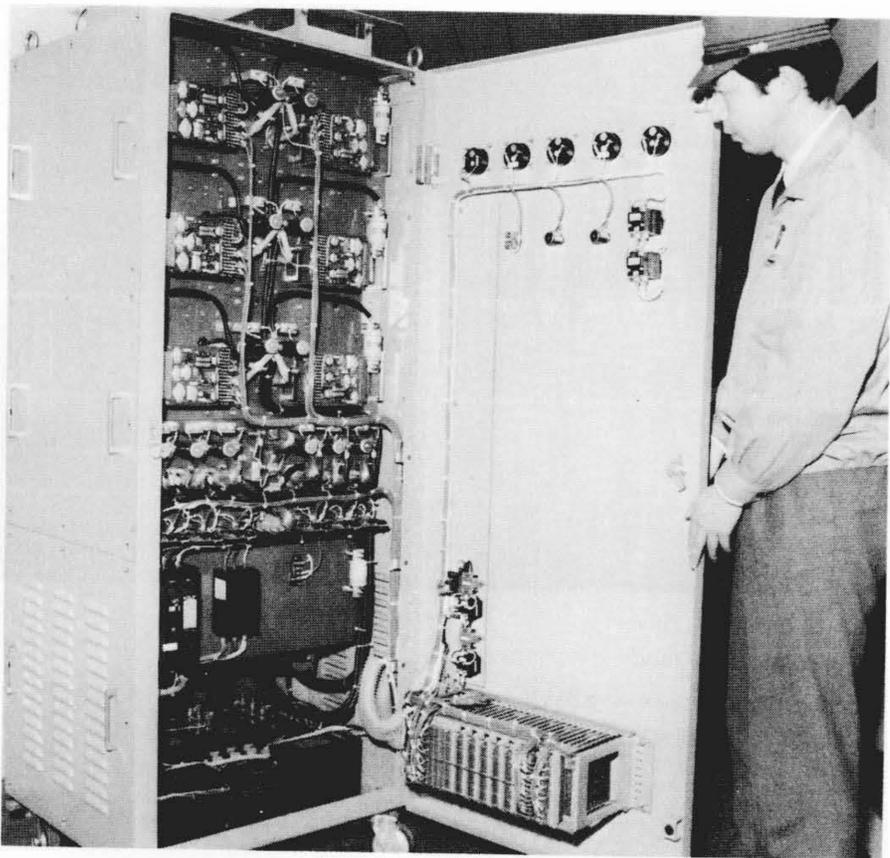


図12 20kVA可変周波電源装置 この装置は、サイリスタインバータを用いた装置に比べ約半に小形化されている。

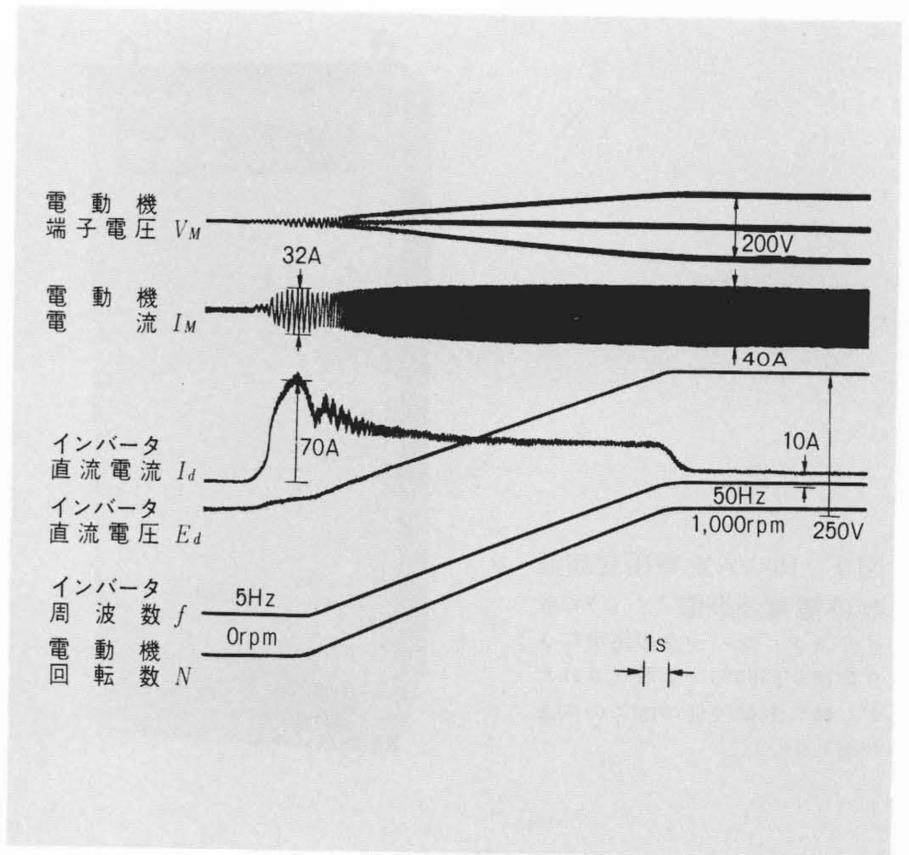


図14 22kW誘導電動機の可変周波始動特性 高力率の滑らかな始動特性が得られている。

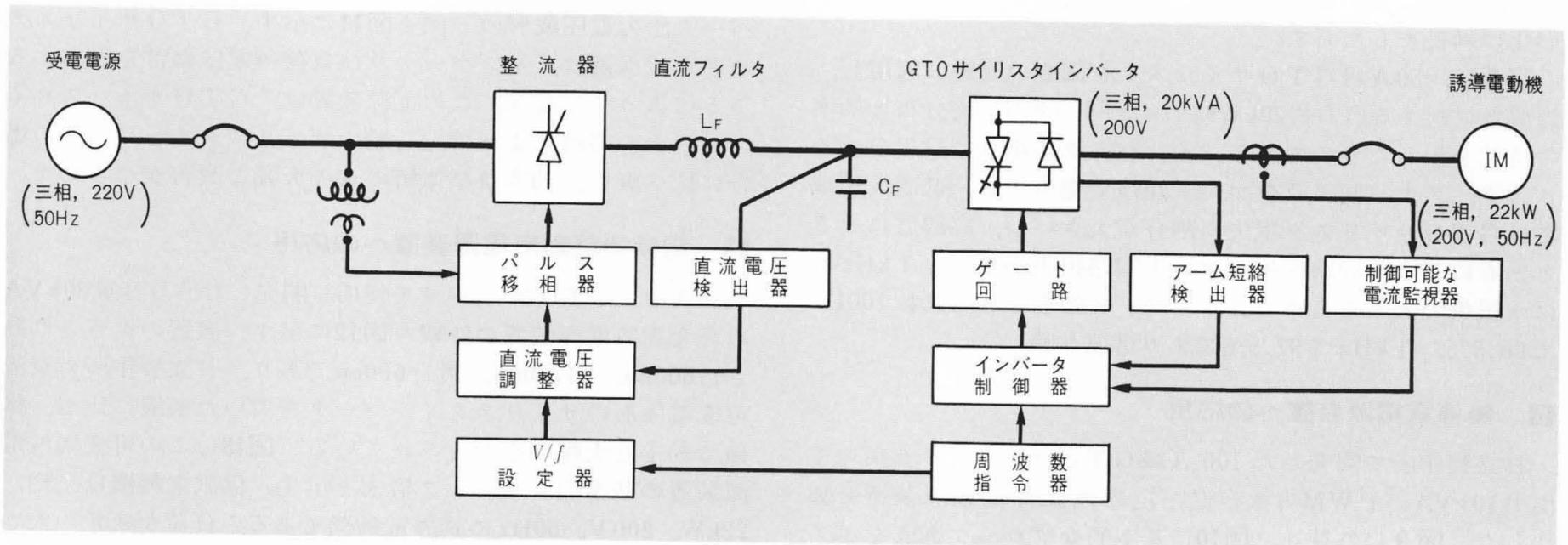


図13 可変周波電源装置のブロック図 GTOサイリスタのゲートターンオフ失敗による破壊を予防保護するため、制御可能な電流の監視を行なっている。

制御可能な電流の監視を行なっている。この可変周波電源装置により、供試電動機を電動機出力20kWで連続駆動し、GTOサイリスタの動作、信頼性を検証するとともに、装置の総合効率91%、過負荷耐量175%を実証した。また、図14は供試電動機を5Hzから定格周波数まで可変周波始動したときのオシログラムを示すものであり、高力率の滑らかな始動特性が得られていることが分かる。

このような小形、高効率の電動機駆動電源装置は、紡糸機、工作機、ブロワや種々のライン制御などに好適である。

## 8 結 言

大容量GTOサイリスタを適用したインバータ装置を開発し、種々の検討を行なった結果、次の結論が得られた。

(1) GTOサイリスタインバータは、一般のサイリスタインバータに比べ体積、重量を約半分程度に低減できるほか、高効率、低騒音、制御性の向上といった特長をもつことが確認された。

- (2) ゲート回路、インバータ主回路の構成法など大容量GTOサイリスタの適用技術が確立できた。
- (3) GTOサイリスタインバータを無停電電源装置及び電動機駆動用電源装置に応用し、その特徴を実証するとともに、GTOサイリスタの動作及び信頼性を検証することができた。

## 参考文献

- 1) M. Okamura et al : THE CURRENT STATUS OF THE POWER GATE TURN-OFF SWITCH (GTO). ISPC (1977)
- 2) 恩田ほか4名：大容量GTOの周辺回路、昭52年電気学会東京支部大会173 (昭52-11)
- 3) SCR MANUAL, III, GE, p. 219~234 (1964)
- 4) R. L. Steigerwald : APPLICATION TECHNIQUES FOR HIGH POWER GATE TURN-OFF THYRISTORS, ANNUAL p. 165~174 (1975)
- 5) 恩田ほか4名：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)