

# 大容量GTOインバータ駆動システム

## Large Capacity GTO Inverter for AC Motor Drive System

GTOサイリスタの大容量化に伴い、従来困難とされていた大容量電動機駆動システムでの高速、高精度を要求される分野で、直流機に代ってAC制御化の動きが活発になってきた。本稿では、このようなAC化の動きに呼応した大容量GTOインバータ、並びにそれにより駆動されるかご形誘導電動機の特長及び特性について述べる。試験機による試験の結果は、従来の直流機での場合と同等の高速・高精度化を実現している。また、大容量化のためのセット並列技術の確立とGTOコンバータでの高力率化、高調波低減技術の確立は、単に電動機駆動システムにとどまらず多岐にわたる用途へのGTO変換器の利用を促す因になると確信する。

松平信紀\* Nobunori Matsudaira  
齊藤啓自\* Keiji Saitô  
奥山俊昭\*\* Toshiaki Okuyama  
本部光幸\*\* Mitsuyuki Honbu

### 1 緒言

交流電動機の世界速度制御技術の進歩は、省エネルギーを目的としたV/f(電圧・周波数比)一定制御から、省力化を目指したDCM(直流電動機)代替市場へとその適用分野を拡大しており、特に自己消弧形素子であるGTO(Gate Turn-Offサイリスタ)のインバータへの適用や交流電動機のベクトル制御技術の普及は、DCMに対する交流電動機の世界速度制御システムとしての優位性を確立しつつある証拠といえる。

日立製作所では、これまでに省エネルギー運転用を主目的とした電圧形GTOインバータのシリーズ化を図るとともに、先般450kVA GTOインバータによる350kW IM(誘導電動機)の高応答速度制御システムを製作し、現在GTOインバータ約100台から成る日本鋼管株式会社福山製鉄所納めEGL(Electrical Galvanizing Line)用全インバータIM駆動システムを製作中である。

### 2 GTOインバータ駆動システム

GTOインバータによるIM駆動システムは、大別して、特に急速加減速を必要としない省エネルギー運転用をはじめとする単なる回転数制御システムと、DCMと同等の高応答制御特性を必要とする高性能制御システムとに分けられる。前者の

代表的システム構成例を図1に、後者のシステム構成例を図2に示す。

前者の回転数制御システムでは一般に電力回生を必要としないため、電源側の変換器はダイオードによる整流器とし、インバータをPWM(パルス幅変調)制御方式あるいは多重制御方式としてインバータだけで周波数と電圧の両方が可変できる方式とし、制御方式としてはV/f一定制御方式が一般的である。

後者のDCM代替システムでは多くの場合電源への電力回生運転を必要とし、ベクトル制御による高応答制御が要求される。図2のシステム構成例は先に試作した450kVA GTOインバータによる350kW IM駆動システムであり、PWM制御GTOインバータによるベクトル制御システムを構成している。電源側の変換器もインバータと同一構成のPWM制御方式によるGTOコンバータであり、電力の順逆変換のほか電源に対する無効電力の制御も可能となっている。また、GTOインバータ及びコンバータはそれぞれユニットインバータのセット並列運転によってシステム容量の増大を図っており、IMはGTOインバータ駆動専用電動機としての設計がなされている。それぞれの詳細については後に述べる。

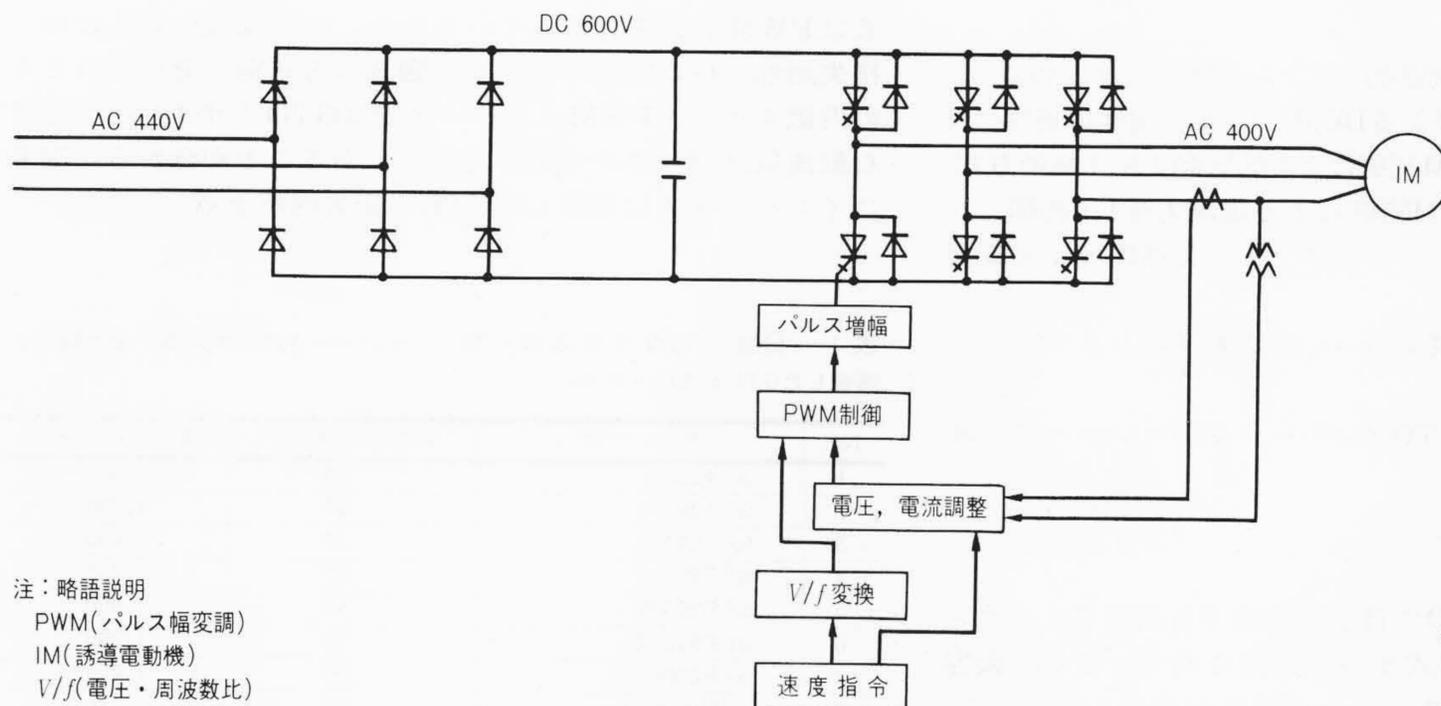


図1 V/f一定制御方式によるGTOインバータIM駆動システム 一般の省エネルギー運転を目的としたIMの世界速度制御システムでは、オープンループのV/f一定制御方式が多く使用される。

注：略語説明  
PWM(パルス幅変調)  
IM(誘導電動機)  
V/f(電圧・周波数比)

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所

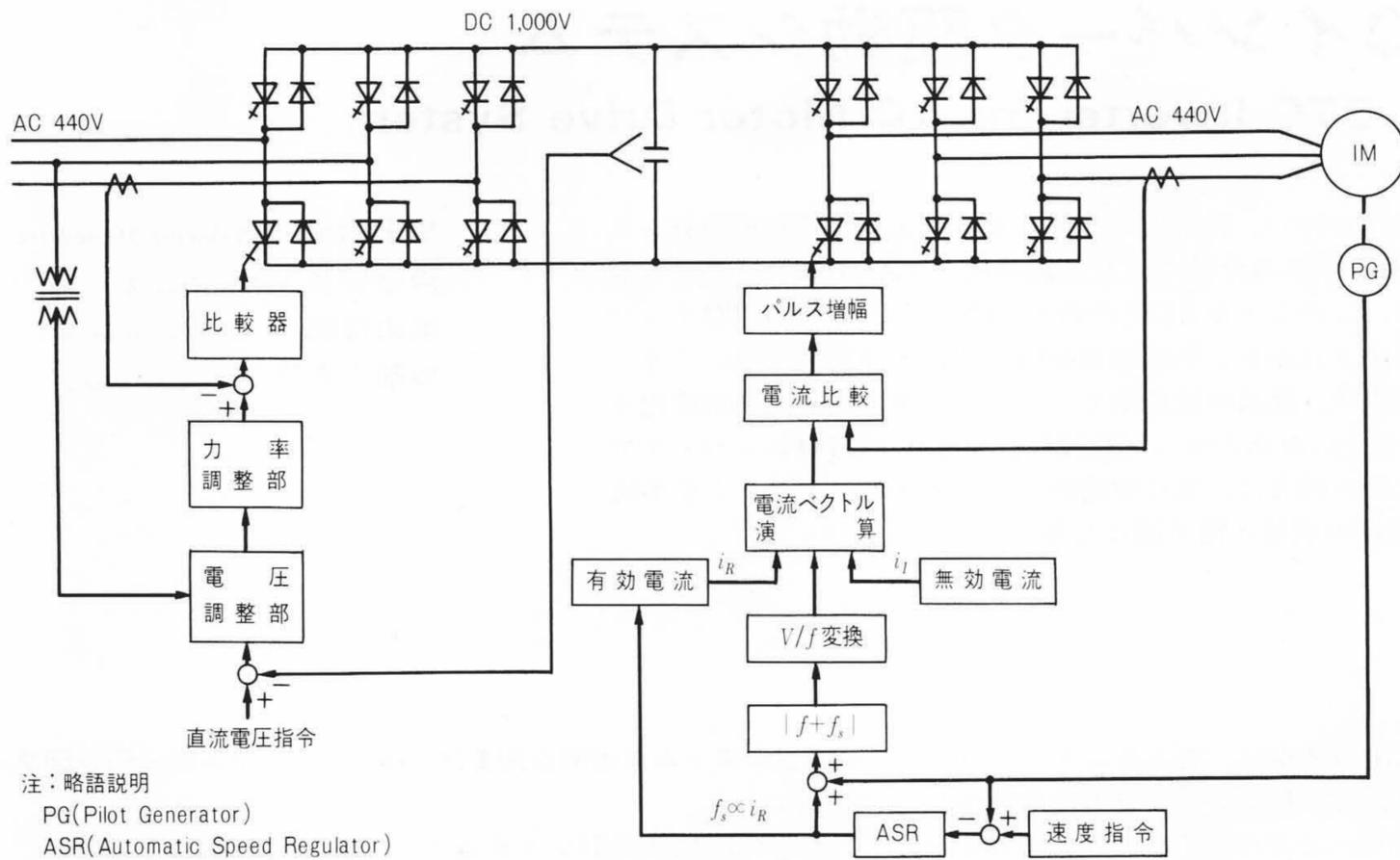


図2 ベクトル制御方式によるGTOインバータIM駆動システム インバータはPWM制御方式、ベクトル制御方式で、コンバータもPWM制御方式で電源に対する無効電力の制御が可能となっている。

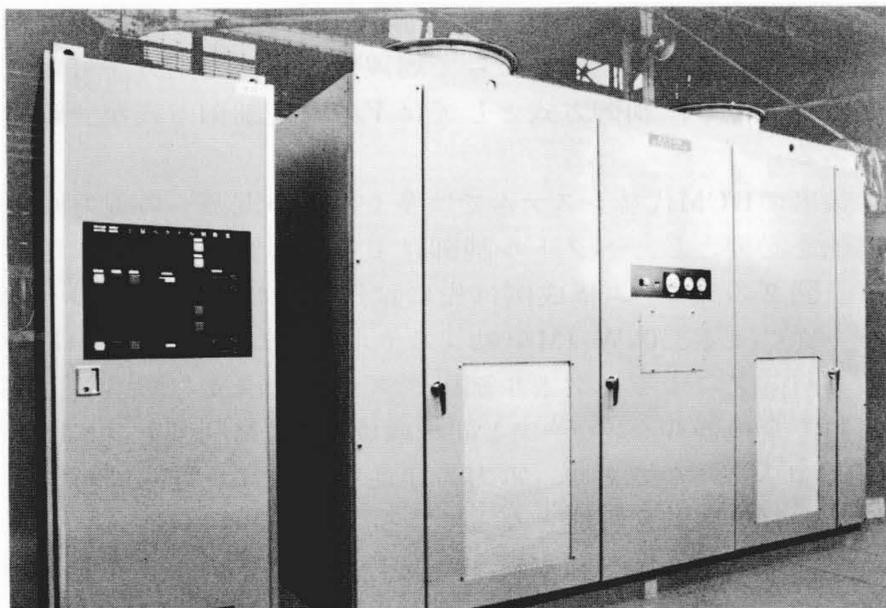


図3 450kVA GTOインバータによる350kW IM駆動システム 右側がGTOインバータとコンバータ、左側が制御盤である。インバータ、コンバータとも1,000A、2,500VのGTO12個で構成されている。

- 上述の450kVAインバータ駆動システムの特長をまとめると、
- (1) 高性能ベクトル制御によるDCMと同等の速度応答性
  - (2) 正弦波インバータPWM制御による低脈動トルク駆動方式
  - (3) 正弦波コンバータPWM制御による電源力率1.0制御
  - (4) GTOコンバータ、インバータのセット並列接続による大容量化
  - (5) インバータ駆動専用IMを用いた高効率運転システムなどが挙げられる。

図3に、試作450kVA GTOインバータ及びコンバータと制御システムの外観を示す。

### 3 GTOインバータ

GTOインバータは、GTOの自己消弧能力と高速スイッチング特性によりPWM制御方式が多く採用されているが、大容量になるとスイッチング損失、スナバ損失が大きくなるので、多重制御方式が採用される傾向にある。

表1に日立製作所で現在実用化されているGTOの一覧を示す。GTOインバータの容量に応じて該当するGTOが使用され

るが、400V出力の小容量電動機用としての量産形インバータには200A、1,200V GTOが、大容量インバータには1,000A、2,500V GTOが多く使用されている。

GTOインバータのハードウェア構成上最も留意すべき部分としては、ゲート駆動回路とスナバが挙げられる。図4に大容量GTO駆動用ゲート回路の構成例を示す。パルストランスによりゲートパルス電源の共通化とオフパルス電流の確保が図られている。ゲート回路のノイズによる誤信号は、GTOの破壊につながるので十分な注意が必要である。また、GTOが大容量になるほどスナバの配線を含めた回路インピーダンスの適正化が困難になる。GTOの $di/dt$ 、 $dv/dt$ 特性との協調のとれた回路常数の設定が必要になる。

表2に、一般用途用中容量GTOインバータの標準容量を示す。これら一般用途のものはコンバータ部分はダイオードにより構成し、インバータはGTOによるPWM制御方式となっている。

450kVA GTOインバータは、コンバータ部、インバータ部共にPWM制御を行なっているため、転流回数の増大に伴う損失増加が特に問題であった。図5に方式別の発生損失とその内訳を示す。PWMインバータではGTOやサイリスタを含む転流回路周りでの損失が支配的であることが分かる。図6にインバータ側に使用したGTOの損失内訳を示す。

表1 日立GTOサイリスタ一覧 インバータの出力容量、出力電圧に適合したGTOが使用される。

No.	形式	可制御電流(A)	阻止電圧(V)
1	GFT20A 6	20	600
2	GFT20B12	20	1,200
3	GFT50A 6	50	600
4	GFT50B12	50	1,200
5	GFF90A 6	90	600
6	GFF90B12	90	1,200
7	GFF200E12	200	1,200
8	GFF300E12	300	1,200
9	GFP450A 8	450	800
10	GFP450B12	450	1,200
11	GFP600C16	600	1,600
12	GFPI000B25	1,000	2,500

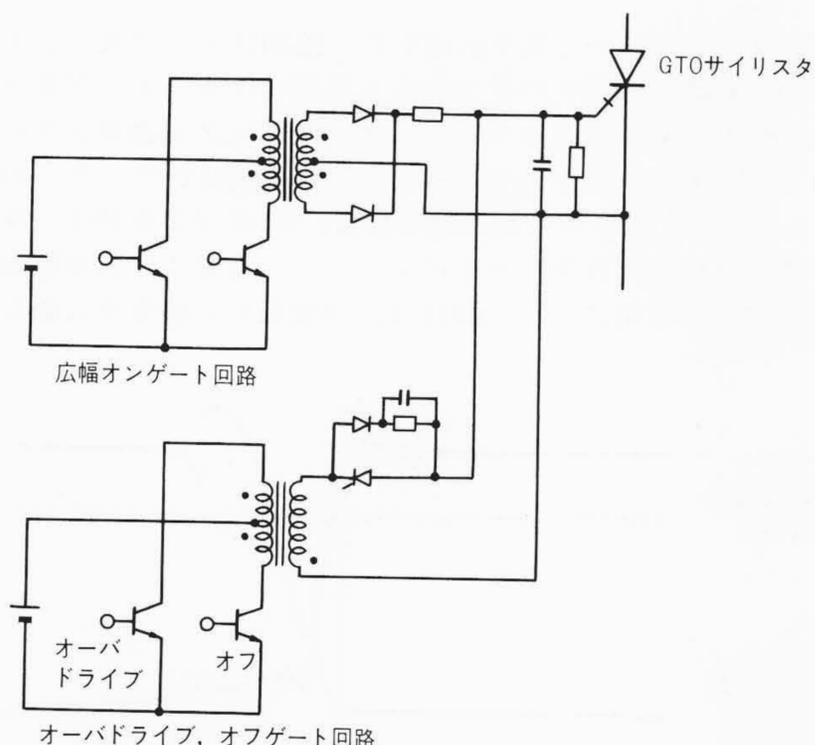


図4 大容量GTOサイリスタのゲート回路例 オン及びオフゲート回路ともパルス変圧器で主回路と制御回路を絶縁しているため、ゲート回路の電源の共通ができ、電源を含めたゲート回路の小形化を図っている。

表2 中容量GTOインバータの標準容量 順変換部分はダイオードにより構成し、逆変換部はGTOによるPWM制御方式となっている。

電圧	容量 (kVA)	寸法 (mm)			概略重量 (kg)
		幅	奥行	高さ	
400V系	60	800	1,000	2,300	600
	100				700
	150	1,200			1,000
	200				1,100
200V系	30	800	1,000	2,300	600
	50				700
	75	1,200			900
	100				1,000

一般に、GTOはその順電流オフ直後の電圧はね上がりを抑えるために比較的大きなスナバコンデンサを必要とし、したがって、コンデンサに蓄えられたエネルギーの放出過程でスナバ抵抗に多大な発生損失をもたらす。今回は、GTOの動特性と主回路定数及びスナバ回路定数の協調を図ることによって、PWM方式であるにもかかわらず図示のように低損失化を実現できた。この結果、後述の電動機と組み合わせた総合効率として84%強と直流機駆動方式をしのぐ良いデータが得られた。

#### 4 GTOインバータの大容量化

GTOインバータを大容量化するためには、素子自体の高圧・大電流化をはじめ、図7に示すように素子の直並列接続、あるいは単位インバータのセット並列運転による方法がある。同図(a)の直列接続の場合、オフ時の電圧分担はもちろん、スイッチング特性に基づくターンオン損失の増加に十分注意する必要がある。(b)の並列接続では、電流バランス用リアクトルの漏れインダクタンスにより、ターンオフ時の電圧のね上がりが大きくなるので、GTOの耐圧上、できるだけ漏れインダクタンスを小さくしなければならない<sup>1)</sup>。(c)は(b)のように電流バランス用リアクトルを用いずに、並列素子を直接接続する方法である。この場合、順方向電圧降下を選定すれば、ターンオフ時間に多少の差があったとしても、ゲート端子を図のように直接接続し、カソード配線抵抗差を小さくするこ

とによって、定常時はもちろんターンオフ時の電流バランスを良好に保つことができる。可制御電流300A程度以下の中・小容量素子に適した方法である<sup>2)</sup>。(d)は単位インバータを並列運転することによって、装置全体としての容量を増大させ

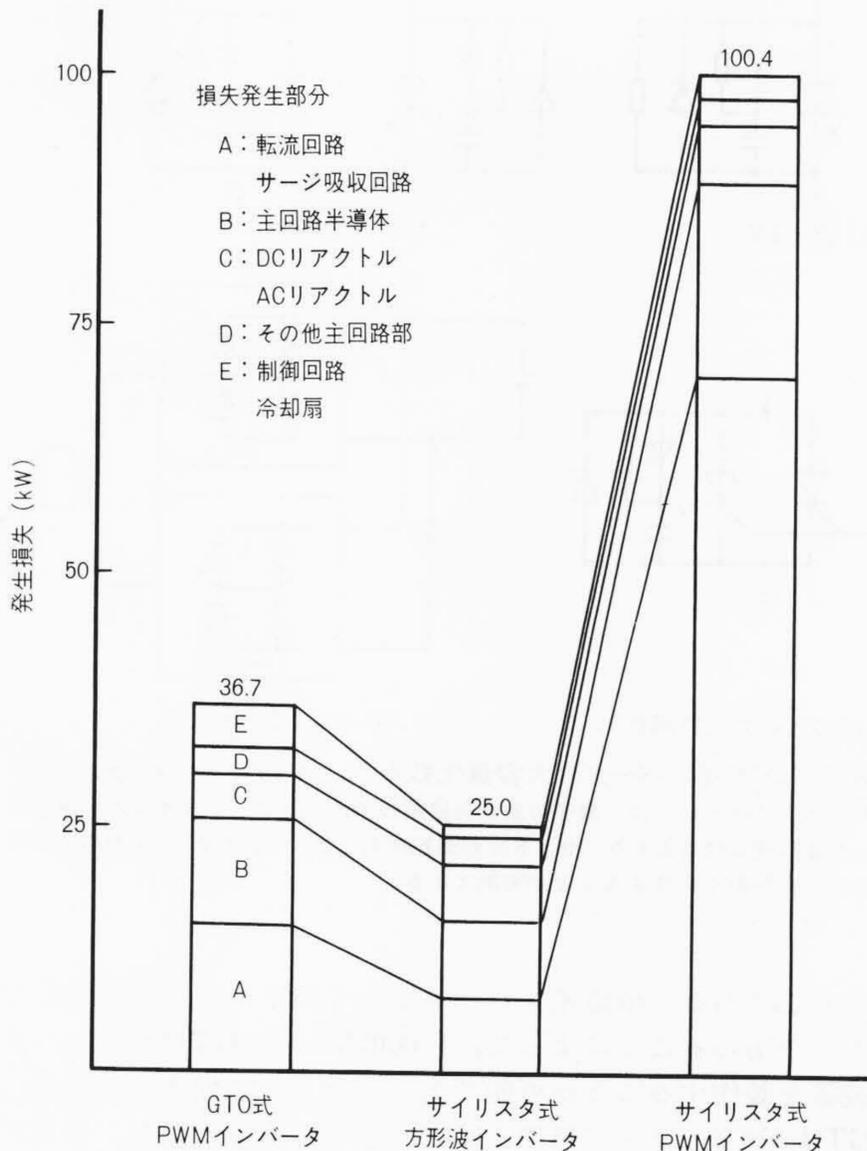


図5 インバータ方式別の発生損失 450kVA出力時の各方式別の発生損失を示す。PWMインバータは540Hz動作、方形波インバータは60Hz動作時の損失である。

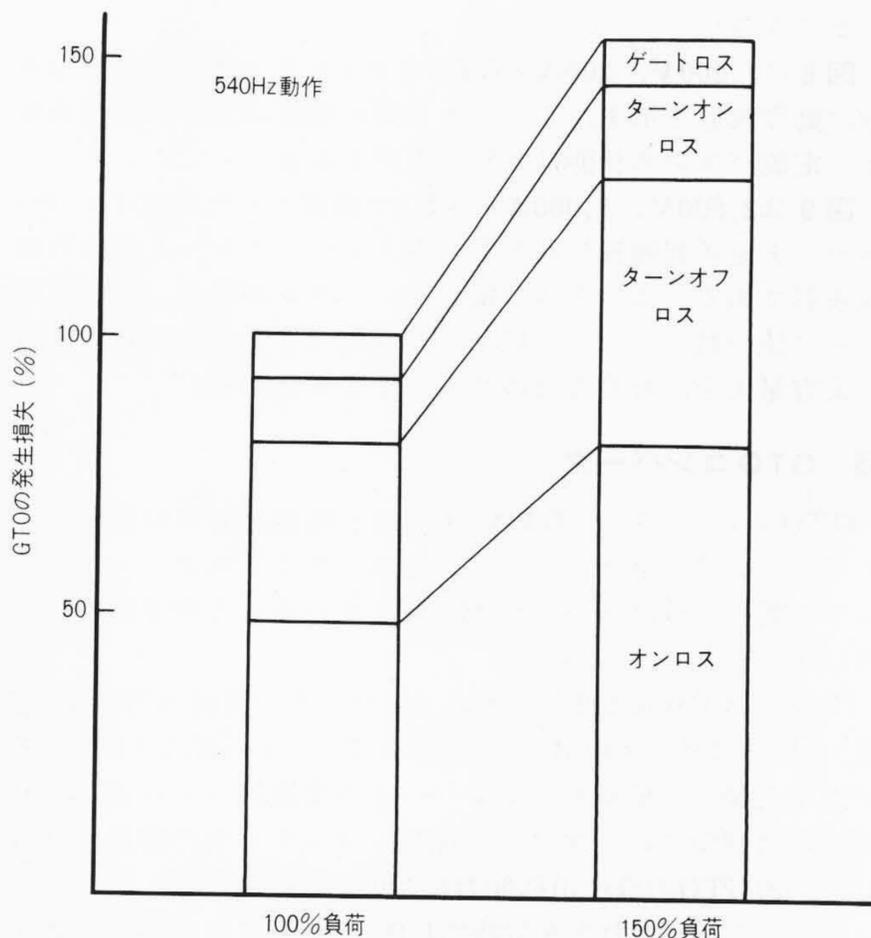


図6 GTOにおける損失内訳 インバータ部に用いたGTOでの損失内訳を示す。使用した素子は1,000A、2,500V定格である。

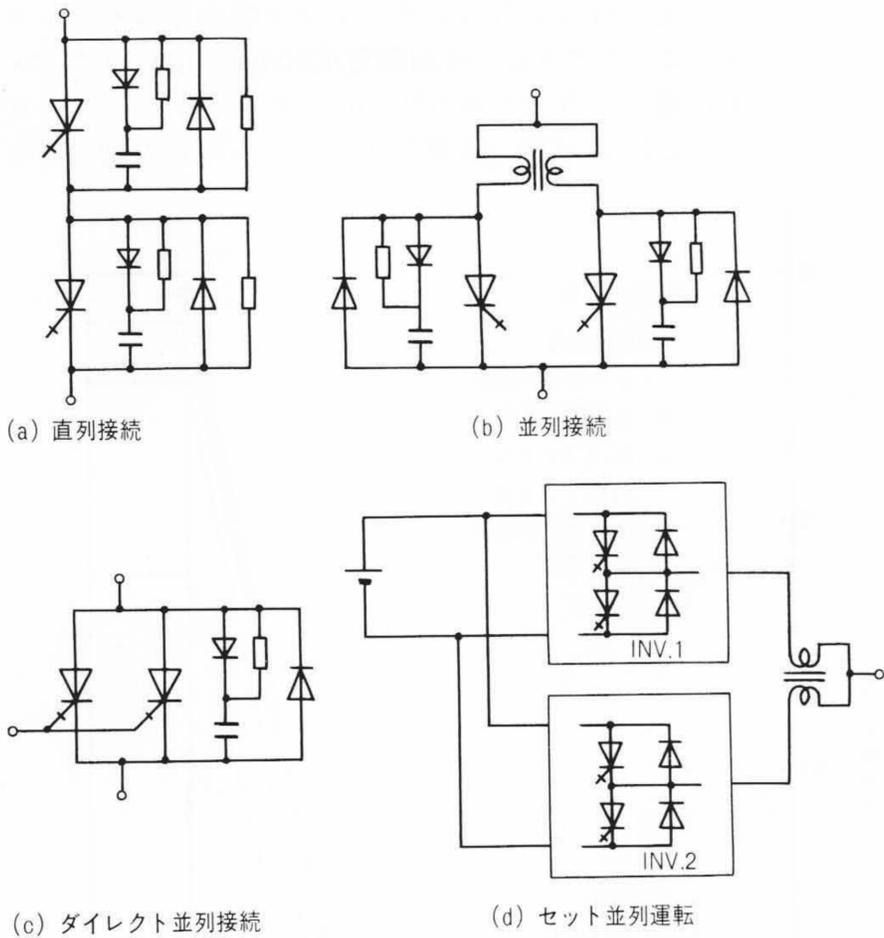


図7 GTOインバータの大容量化技術 GTOインバータを大容量化するための技術としては、素子の直並列接続技術のほかに、単位インバータのセット並列運転技術もある。セット並列運転技術によって、1,000kVA級のGTOインバータ装置を製作することが可能である。

る方法である。単位インバータとして素子を直並列接続したものをを用いることによって、1,000kVA級のGTOインバータ装置を製作することが可能である。セット並列運転の場合、GTOのスイッチング特性、順方向電圧降下のほかに、帰還ダイオードの順方向電圧降下、スナバコンデンサ容量、PWM制御時の転流回数などが電流バランスに影響を及ぼすが、GTOのスイッチング特性の組合せを最適に選ぶことによって、セット間の電流アンバランス量を10%以下に容易に抑制することができる<sup>3)</sup>。

図8に1,200V、200AのGTOをダイレクト並列接続したときの動作波形を示す。ターンオフ時の電流に多少の差はあるが、電流バランス状態は非常に良好である。

図9は2,500V、1,000AのGTOで構成された単位インバータセットを並列運転したときの各インバータセットの出力電流波形である。このときの電流アンバランス量は、合成電流ピーク値の数パーセント以下であり、セット並列運転は装置の大容量化上、有効な技術であることが分かる。

### 5 GTOコンバータ

GTOコンバータは、GTOのもつ自己消弧能力及び高周波スイッチング性の活用によって、従来のサイリスタコンバータにない新しい機能と高い性能を備えている。その主な特長は次に述べるとおりである。

(1)高周波PWM制御により、コンバータの交流入力電圧(電流)を正弦波状にきめ細かに制御することによって、コンバータが出す高調波を低減し、コンバータの交流側フィルタ及び直流側平滑回路でのリアクトル並びにコンデンサの容量を低減した。(2)GTOの自己消弧能力により任意力率の運転を行ない、コンバータの入力力率を常時約1.0に制御して力率改善装置を不要とした。(3)GTOの高速スイッチングにより直流出力電圧を高速応答制御し、負荷変動に伴う直流電圧変動を抑制して

平滑コンデンサの容量を低減した。図10はその結果を示すもので、直流出力電圧のインパクト負荷特性を示す。平滑コンデンサの容量は従来のサイリスタコンバータで必要とされる値よりも1桁小さな値であるが、電圧変動は20%以下に抑えられており、その効果が確認された。(4)順逆変換動作の瞬時切換を行ない、負荷であるインバータの電動及び回生運転の高速切換を可能にした。図11は、逆変換から順変換に動作を

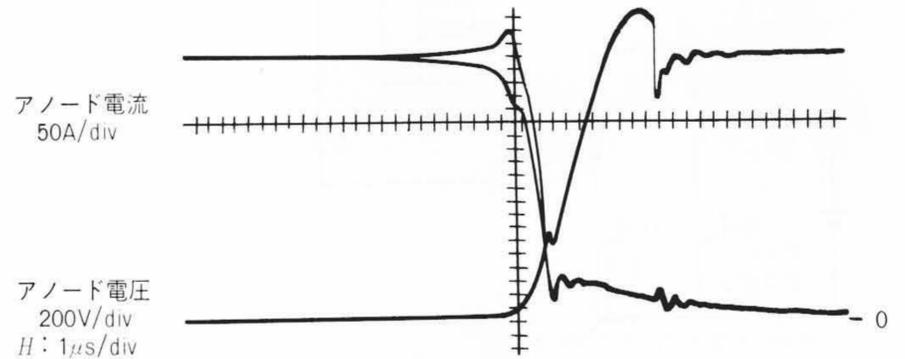


図8 ダイレクト並列接続時の動作波形 ターンオフ時、ターンオフ動作の遅いほうの素子のアノード電流の増加分はわずか20Aであり、電流バランス状態は非常に良好である。

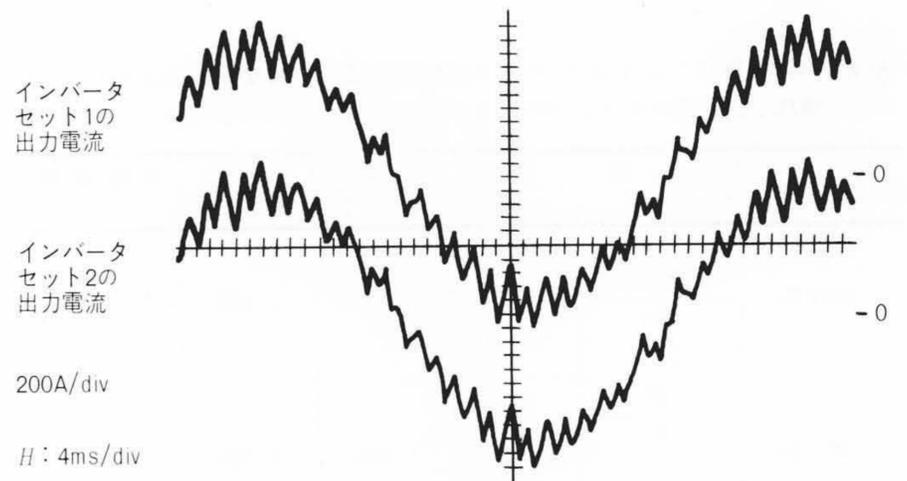


図9 セット並列運転時の動作波形 セット並列運転を利用した450kVA GTOインバータ装置で、350kW誘導電動機を駆動したときの電流波形の一例である。セット間の電流バランス状態は非常に良好であり、セット並列運転技術は大容量化に対して非常に有効である。

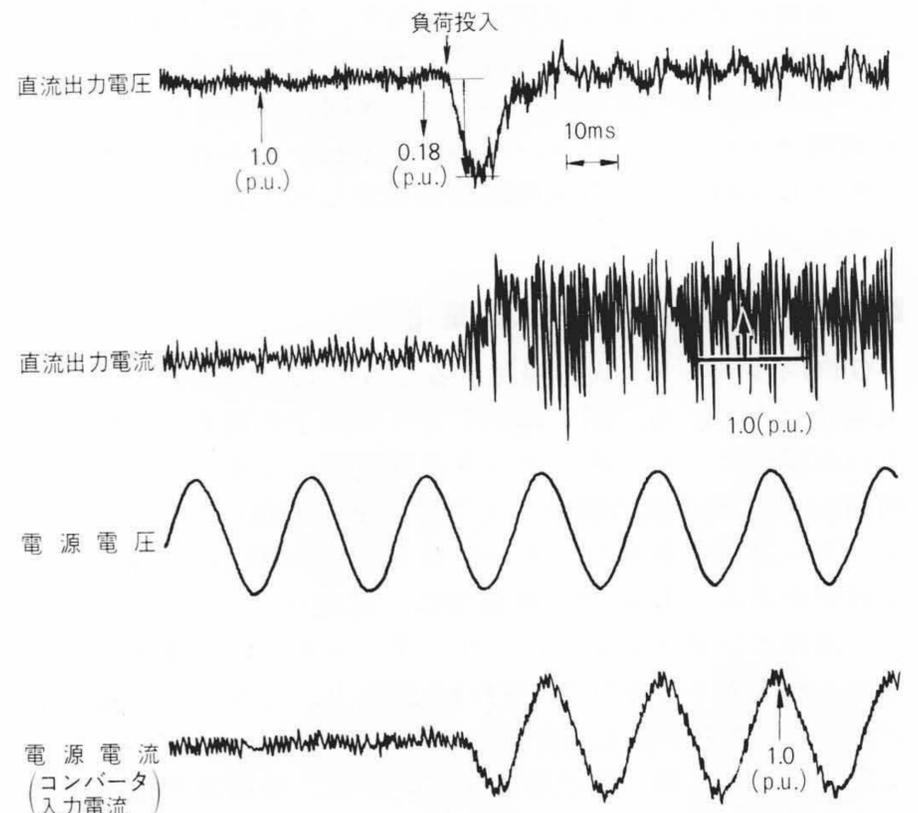


図10 GTOコンバータの直流出力電圧のインパクト負荷特性 平滑コンデンサの容量が小さいにもかかわらず、直流出力電圧の変動は小さく抑えられることを示す。

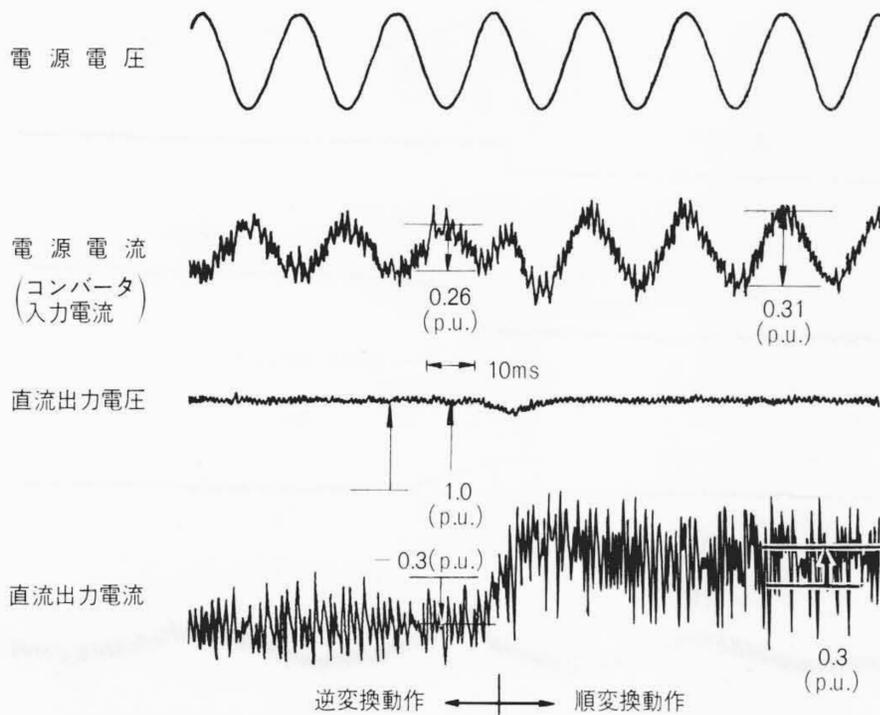
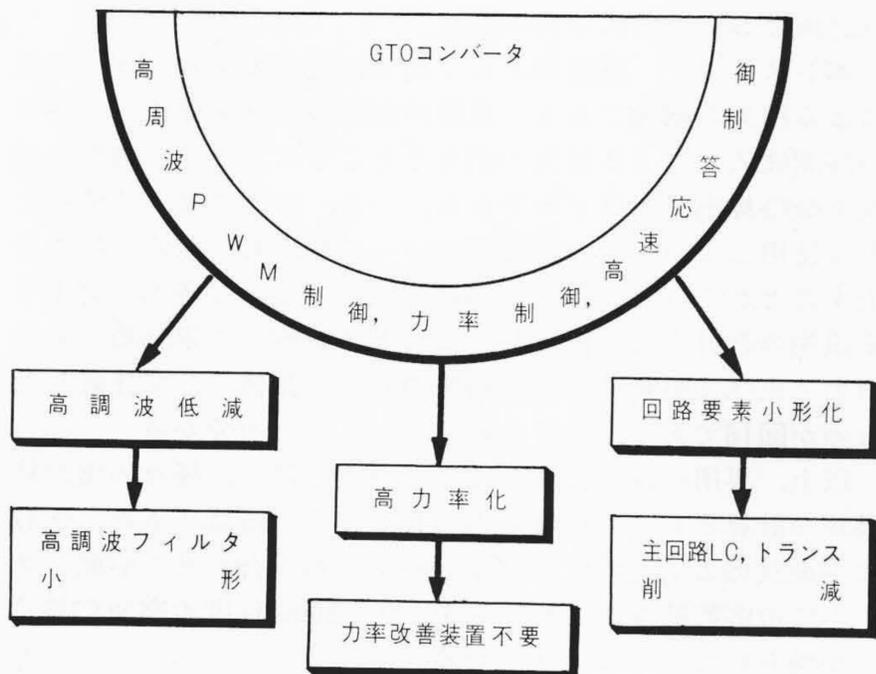


図11 順逆変換切換時の動作波形 各動作で電源電流の位相及び直流電流の極性が反転しており、動作の切りが確認される。また、高速切りが行なえていることが分かる。



注：略語説明 LC(リアクトル及びコンデンサ)

図12 GTOコンバータの特長と効果 PWM制御を行なうGTOコンバータの実現によって、電源側への流出高調波低減、高力率化、直流フィルタの小形化や高速応答制御が可能となった。

移した場合の動作波形を示す。両動作で、電源電流の電源電圧に対する位相及び直流電流の極性が反転しており、順逆動作の切りが確認される。以上の特長をまとめて図12に示す。このように開発したGTOコンバータは、顕著な特長を持っており、将来各方面に適用されると考える。

### 6 インバータ駆動用誘導電動機

本システムに使用する誘導電動機は、可変電圧可変周波で、かつ多くの高調波を含んだ電源で駆動されること、及び定出力特性を必要とすることによって、普通の誘導機と異なり本システム専用の構造となっている。いちばんの特徴は、可変電圧可変周波駆動であることによって、直入れの誘導機に要求されるように起動トルクを大きくし、かつ起動電流を小さく抑えるといった起動時の特性を必要としないこと、及びインバータが高調波を含んでいることによって、ロータの二次導体の外周側の面積を大きくして高調波損失の低下を図ったことである。更に、最高速度時の電圧増加を抑えるため、各部漏れ

インピーダンスを極力小さくして最高速度時の電圧上昇を5%程度としている。本電動機的主要仕様を表3に、その外観を図13に示す。

本電動機と普通の誘導機の基本特性を図14に示す。同図から分かるように、漏れインピーダンス及び二次抵抗が小さいため起動電流が大きく、かつ起動トルクが小さくなっている。一方、最大トルクは逆に大きくなっている。以上のように、

表3 誘導電動機の仕様 ベクトル制御としての誘導電動機的主要仕様一覧表を示す。直流機と同様、定出力制御範囲をもっている。

項目	仕様	備考
出力	350kW	—
相数-極数	3-6	—
回転速度	600/1,200rpm	定出力制御付
電圧	440/460	ベーススピード時
電流	561/533A	—
定格	100%負荷連続 150%負荷1分	—
形式	開放強制通風冷却方式 単層かご形	ファンマウントタイプ

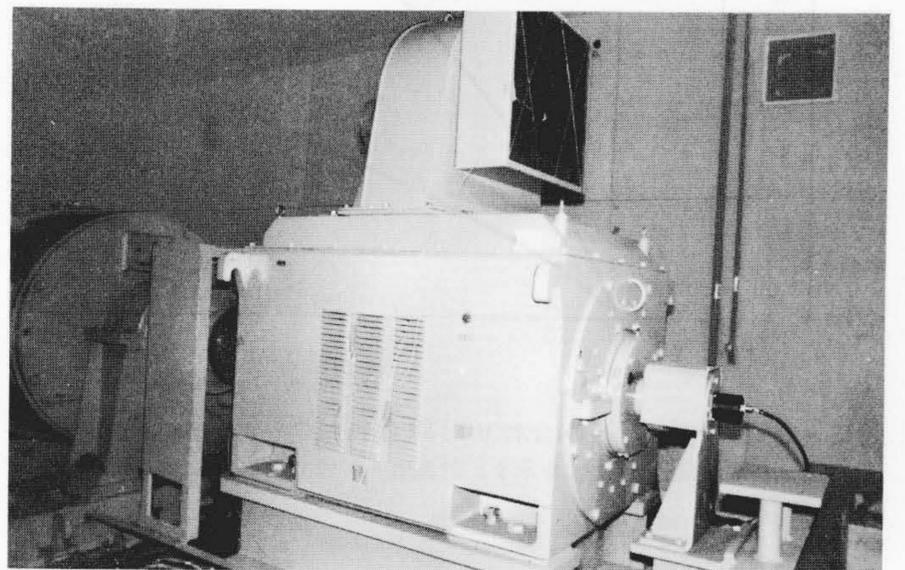


図13 誘導電動機の外観 低速、全負荷運転を考慮し、ユニットクールファン付の強制風冷方式をとっている。

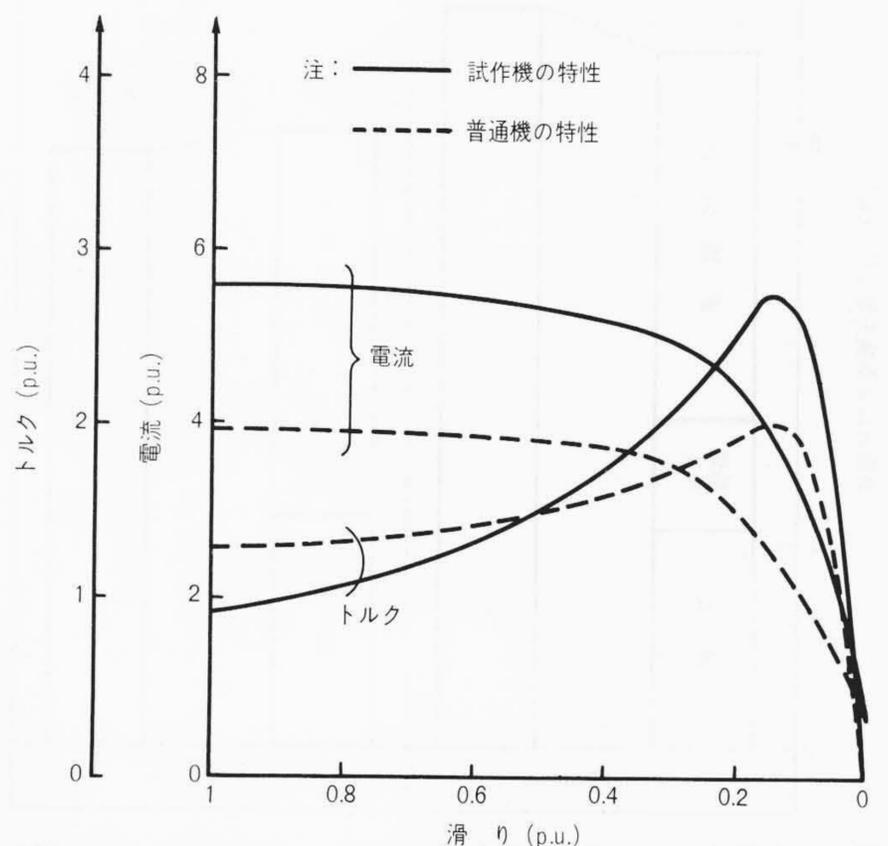


図14 普通誘導機との特性比較 誘導機固有の特性として、滑り特性を示したものである。普通誘導機と比較して起動トルクが小さくてもよい。

起動特性を無視できることによって、基本的には高調波損失増加をも含めた定常運転時の熱限界設計が可能となり、小形・軽量化が可能となった。

本システムでの電動機の特性を評価する上で、電源としてはPWM制御のインバータを用いたため、その出力波形に多くの高調波を含んでいる。そのため、インバータと組み合わせた電動機の発生トルク、滑り、力率、効率といった特性は基本波で評価する必要がある。電動機入力電圧及び電流の基本波をベースにした最高速度時での電動機の発生トルク、滑

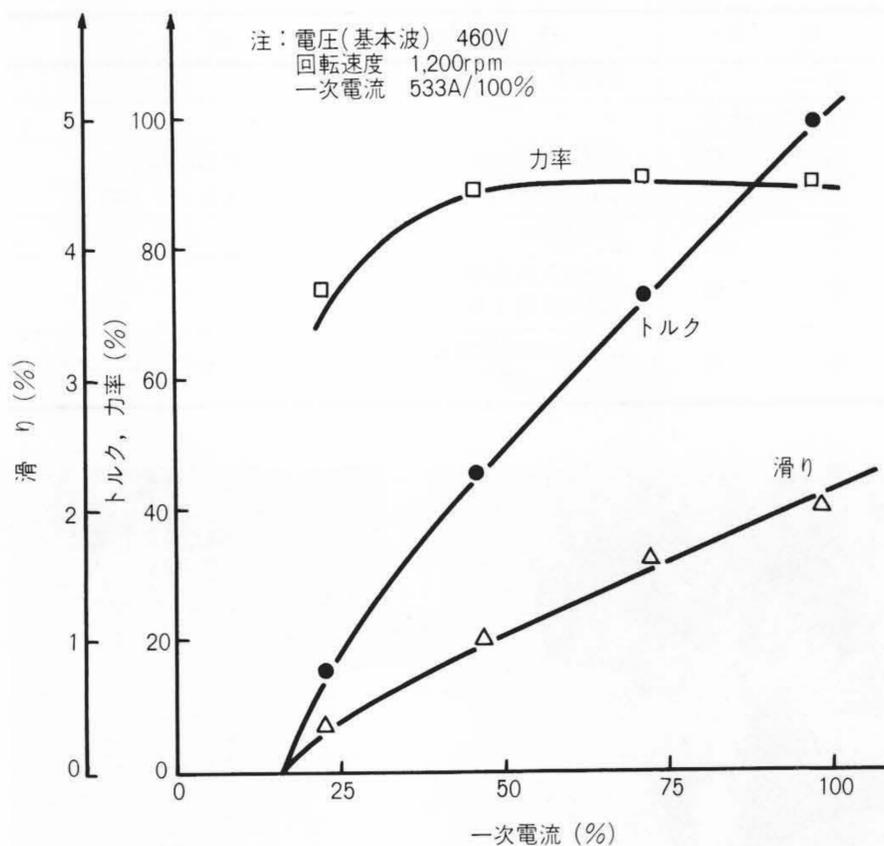


図15 インバータと組み合わせた総合特性 定格最高速度時での特性(すべて基本波成分ベース)を示す。計算値を実線で示し、実測値を各ポイントごとに示す。

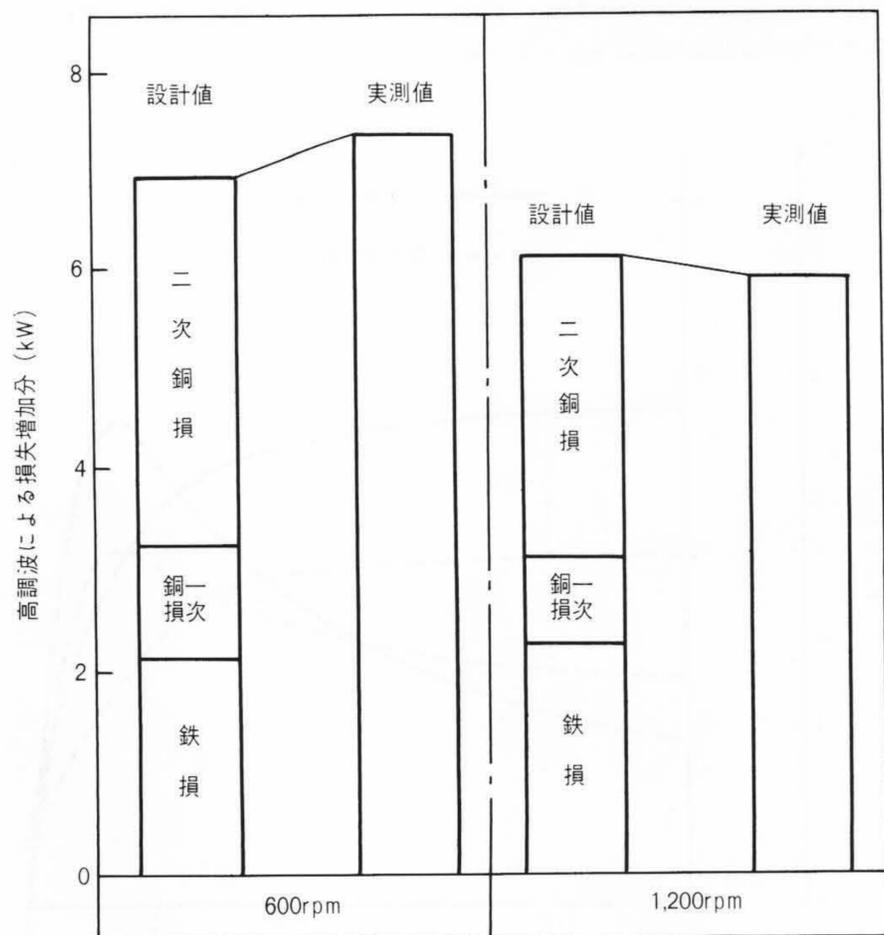


図16 高調波による損失の増加量 設計値は高調波による各発生損失ごとに分離して示し、実測値はインバータ駆動時の発生損失と正弦波駆動時の発生損失との差を示す。

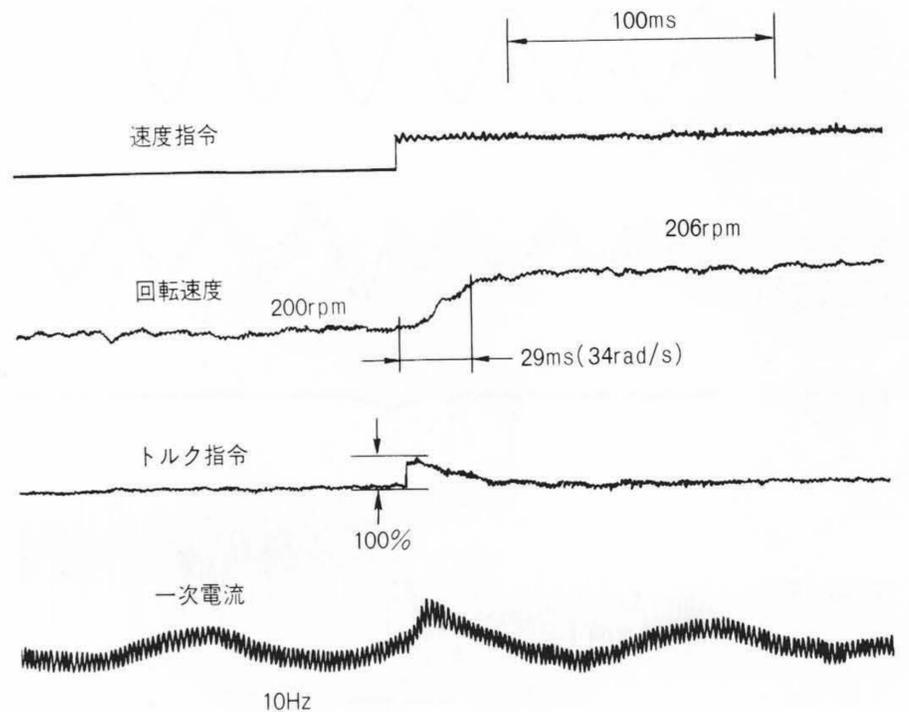


図17 インディシャル速度応答特性 インディシャル応答試験の結果、30ms以下の高速応答特性が得られた。

べり、力率の負荷特性を図15に示す。同図に示すようにほぼ設計値どおりの結果が得られた。

本システムで、電動機として最も注意を要するのは高調波による損失の増大である。電圧の高調波成分を分析し、各々の高調波入力による損失の和をとることによって、損失の増大を概略算出することができる。一方、実測では、負荷機として使用している直流動力計によって軸出力を測定し損失を出すことができる。各々の高調波成分によって各部に発生する損失の合計を設計値とし、これとインバータ駆動時の発生損失と正弦波駆動時の発生損失の差を実測値として比較したものが図16であり、よく一致していることが分かる。

以上、専用の誘導機としての考慮点を述べ、種々の実測結果から計算どおりの特性が得られることが確認できた。図17に本電動機と前述のGTOインバータを組み合わせた駆動システムでの応答特性の試験結果を示す。30ms程度の高速応答特性が得られていることが分かる。

## 7 結 言

以上述べたように、ベクトル制御技術の確立とGTOインバータの出現によって、IM駆動システムの高性能化、大容量化の技術が確立し、比較的大容量で高応答速度制御を要する分野にもIMがDCMにとって代わる機運が生じてきた。ただ現状では、まだインバータ、コンバータのコストの問題が残されており、全面的にIMがDCMにとって代わる段階には至っていない。しかし、省力化の利点によるIM方式の需要増がコスト低下を促し、近い将来圧延機主機駆動用など、急速加減速を必要とする分野にもGTOインバータによるIM駆動システムが大幅に進出することが予想される。

## 参考文献

- 1) A. Ueda, et al. : GTO Inverter for AC Traction Drives, in Conf. Rec. 1982 Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 645~650
- 2) H. Fukui, et al. : Paralleling of Gate Turn-off Thyristors, in Conf. Rec. 1982 Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 741~746
- 3) M. Honbu, et al. : Parallel Operation Techniques of GTO Inverter Sets for Large AC Motor Drives, in Conf. Rec. 1982 Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc., pp. 657~662