

# 圧延機用ACドライブシステム

## AC Motor Drive Systems for Rolling Mills

AC可変速ドライブの高性能化が急速に進展しており、鉄鋼プラントでのAC化の適用は補機用から主機用へと拡大している。AC化のねらいは省力化と省エネルギー化に加え、従来のDCドライブ以上の高精度化と高応答化を実現することによって、究極目的である圧延製品の品質化と歩留まりの向上にある。

今回、日立製作所は、圧延主機用全デジタル72アームサイクロコンバータの製品化を行なった。マルチプロセッサ構成及びシグナルプロセッサをコプロセッサとして使用し、コントローラの全デジタル化と処理速度の大幅な高速化を図るとともに、高分解能サインエンコーダによる高精度な速度検出方式を確立した。これらにより、非干渉制御やオブザーバなどの現代制御理論の適用を可能とし、従来のDCドライブに対し質的な性能向上を実現した。

これらの成果を株式会社中山製鋼所納め熱間圧延用5,000kWサイクロコンバータに採用し、社内組合せ試験により所期の性能を確認した。

佐藤 潔\* Kiyoshi Satō  
 鮎川 隆\*\* Takashi Sukegawa  
 竹村 明\*\* Akira Takemura  
 松竹 貢\*\*\* Mitsugu Matsutake  
 山品光則\*\*\* Mitsunori Yamashina  
 奥山俊昭\*\*\*\* Toshiaki Okuyama  
 大前 力\*\*\*\*\* Tsutomu Oomae

### 1 緒 言

AC可変速ドライブシステムは、パワーエレクトロニクス及びマイクロエレクトロニクスの進歩、発展による小形化、低価格化により適用範囲がますます拡大している。ベクトル制御技術<sup>1),2)</sup>やデジタル制御技術の適用<sup>3),4)</sup>により、ACドライブシステムの制御性能は著しく高性能化し、ACドライブシステムはDCドライブシステムに取って代わろうとする勢いにある。圧延主機ドライブシステムの性能は、従来、直流機の整流条件により制約されていたが、AC化により大幅な高性能化が可能となり、圧延製品の品質化と歩留まりの向上が期待されている。これらが実現可能となってきたのは、電動機の完全ブラシレス化とコントローラの全デジタル化に加えて、非干渉制御やオブザーバなどの現代制御理論の適用を可能とする高速デジタルコントローラの進歩と発展によるものである。

### 2 AC化の背景と適用

#### 2.1 AC化の背景

従来、AC化は直流機のもつ整流機構の保守面、信頼面の改善を目的として採用され始めたが、オイルショック後の省電力化のニーズから急速に進展した。その後、制御性能の面ではベクトル制御が実用化され、高速・大容量サイリスタ、GTO (Gate Turn Off)サイリスタやパワートランジスタなどを用いた正弦波形可変周波電源技術、マイクロプロセッサ適用の

デジタル制御技術とその応用技術や多変数制御技術などに支えられ、AC可変速ドライブの高性能化と高度化が急速に進展してきた。その結果、鉄鋼プラントのAC化の適用は圧延補機から圧延主機へと拡大している。

圧延製品の品質化、生産性向上や歩留まり向上を図るために、主機用ドライブシステムには可変速範囲の大幅拡大と高精度、高応答性が要求され、日立製作所は大容量かご形誘導電動機をベクトル制御サイクロコンバータにより低トルク脈動で駆動するシステムを製品化した。高精度速度センサとして高分解能サインエンコーダを開発するとともに、トルク電流 $I_q$ と励磁電流 $I_d$ の非干渉制御、軸振動抑制負荷トルクオブザーバを採用し、可変速度範囲の拡大、高精度化、高応答化を実現した。熱間圧延用としては電源設備が簡素である無循環電流方式を採用し、冷間圧延用としては、トルク脈動低減に有効な循環電流方式を採用する。この場合、負荷一循環電流の非干渉制御により両者の干渉を防ぐとともに、循環電流の極少化を図り、電源力率の向上を図った。

#### 2.2 用途と適用

鉄鋼プラント用AC可変速ドライブは、負荷の基本仕様から、用途区分として高性能用と汎用に大別される。高性能用はベクトル制御付きとし、従来のDC可変速ドライブの代替となる。表1に主な用途で区分した日立製作所のAC可変速ドライブ方式を示す。また、同表を容量(kW)と回転速度(rpm)に展開す

表1 各種AC可変速ドライブ ACドライブには各種の方式があり、プラント全体としての統一性はもとより、用途に適した方式の選定が重要である。

区 分	No.	主 回 路		出力電流波形	最高周波数 (Hz)	電動機	主 な 用 途
		方 式	使用素子				
高 性 能 (ベクトル制御付き)	1	電圧形INV	PTRS	正弦波	120	IM	● プロセッシングライン ● 圧延補機(圧下、テーブル他) ● 連続鋳造 ● 大・中容量圧延主機、補機(ビレット、線材ミル、リール、シヤー他) ● 低速、大容量主機(ホットストリップミル、タンデムコールドミル他) ● 高速、大・中容量圧延主機、補機(線材ブロックミル他) ● 各種テーブル ● ファン、ポンプ
	2		GTO	正弦波	120	IM	
	3	電流形INV	GTO	正弦波	120	IM	
	4		THY	方形波又は階段波	60	IM	
	5		サイクロコンバータ	THY	正弦波	50	
	6	電流形サイリスタモータ	THY	方形波又は階段波	100	SM	
汎 用 (V/f一定制御)	7	電流形INV	THY	方形波又は階段波	100	IM	

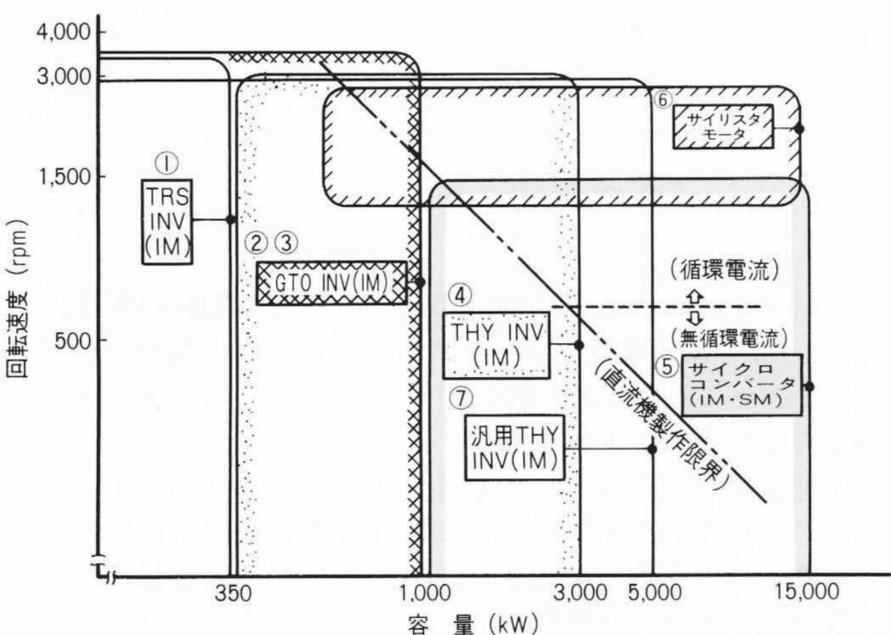
注：略語説明 INV(インバータ), PTRS(パワートランジスタ), THY(サイリスタ), GTOサイリスタ (Gate Turn Offサイリスタ), IM(誘導電動機), SM(同期電動機)

\* 株式会社中山製鋼所新形鋼工場 \*\* 日立製作所大みか工場 \*\*\* 日立製作所日立工場 \*\*\*\* 日立製作所日立研究所  
 \*\*\*\*\* 日立製作所日立研究所 工学博士

ると図1に示すマップとなる。現時点では機種が多く、マップ上互いに重なっている部分があるのは、容量、回転数によりコストミニマムを実現する方式が異なるためである。

### 3 ACドライブにおける高性能化技術

圧延主機駆動用には、広い可変速範囲で高精度かつ急速な加減速運転が要求される。図2にベクトル制御を用いたかご形誘導電動機のサイクロコンバータドライブシステムの構成を示す。基本的な制御ループは、広範囲な回転速度を高精度、高応答で制御する速度制御ループ(ASR)、励磁電流とトルク電流をオフセット誤差なしに高応答で制御する電流制御ループ( $I_d/I_q$  ACR)及び電動機の各相電流を主回路定数に影響されずに高速に制御する電流制御ループ( $i_M$  ACR)から構成される。ベクトル制御では、誘導電動機の二次抵抗の変化に



注：①～⑦は、表1のNo.に対応する。

図1 AC化適用マップ ACドライブには各種方式があり、用途及び電動機仕様に最適な方式を選定することが重要である。

よりトルク精度が低下するが、直軸電圧 $e_d$ によりスリップを補償( $\Delta\omega_s$ )して高精度なトルク特性を確保している。

ところで、AC化のメリットの一つに、可変速範囲を大幅に拡大することによるギヤレス化と電動機の小型化があるが、最近このニーズが特に強くなってきている。これを実現するためには、まず零速度近傍から最高速度までの広範囲な回転速度を高精度、高応答で検出できる速度検出器が必要となる。また、広範囲な界磁弱め制御(例えば速度比1:6)を行なうと、最高速度、過負荷運転で電動機電流に占める励磁電流の割合は数パーセント以下に減少するため、トルク変化時に電動機磁束が変動しやすくなる。これはトルク電流成分と励磁電流成分の相互の影響によるものであり、トルク電流成分と励磁電流成分の非干渉化制御によりそれぞれを高精度に制御する技術が必要となる。更に、速度制御性能の高度化を阻んでいた軸振動を積極的に抑制制御する必要が生じてきた。

また、大容量圧延主機駆動に用いるサイクロコンバータでは、出力電圧が正弦波となるためサイリスタレオナードに比べて、電源の平均力率が低下する。これら重要課題の対応策について、以下に述べる。

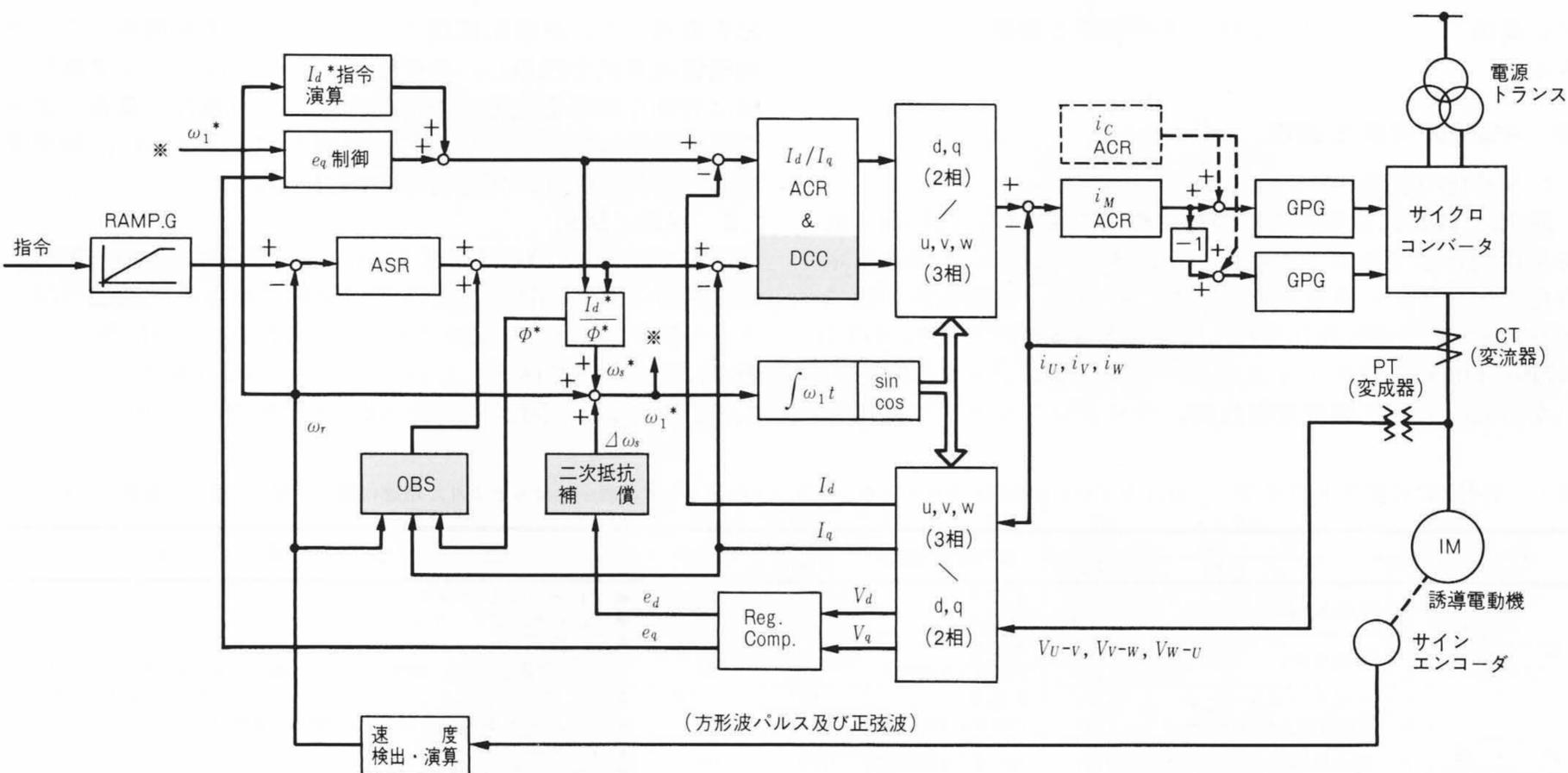
#### 3.1 高精度速度検出器

今回製品化したサインエンコーダは、特殊な高精度回転スリットディスクを用いており、従来のパルス発信機に比べ下記の特徴を実現している。

- (1) 計測時間ピッチを短縮し、かつ高精度化を図るためにパルス数を約10倍化した。
- (2) パルス信号のほかに正弦波信号をもち、低速から零速度では正弦波の信号処理により中、高速と同一の短計測時間ピッチ及び高精度を実現した。

#### 3.2 励磁電流 $I_d$ とトルク電流 $I_q$ の非干渉制御

ベクトル制御は、電動機電流を励磁電流成分とトルク電流成分に分離して制御するので、磁束とトルクをそれぞれ制御できることになるが、各電流成分に基づく電動機内電圧降下



注：略語説明 RAMP.G(ランプゼネレータ), ASR(Automatic Speed Regulator), ACR(Automatic Current Regulator), DCC(Decoupling Control), OBS(Observer), GPG(Gate Pulse Generator), d,q(d軸, q軸を示す。)  
\* (指令値を示す。)  $\phi$ (磁束),  $i_C$ (循環電流),  $i_M$ (電動機電流),  $\omega_1$ (電動機電源の角周波数),  $\omega_r$ (電動機回転角周波数),  $\omega_s$ (スリップ角周波数)

図2 ベクトル制御サイクロコンバータドライブシステム構成 ベクトル制御サイクロコンバータにより、かご形誘導電動機をドライブし、非干渉制御(DCC)と二次抵抗補償及びオブザーバ(OBS)により高精度、高応答を得る制御方式である。

の変動が、各電流成分間の干渉原因となる。各電流成分信号を用いて電動機内部電圧降下をフィードフォワード的に補償することにより、電流成分間の干渉を取り除くのが非干渉制御であり、これにより高応答制御が可能となる。

### 3.3 軸振動抑制制御

軸振動を軽減する方法としては、(1)フィルタの利用、(2)速度もしくは軸トルクのフィードバック、(3)指令パターンの工夫など種々の方法が提案されている。特に、第2の方法はフ

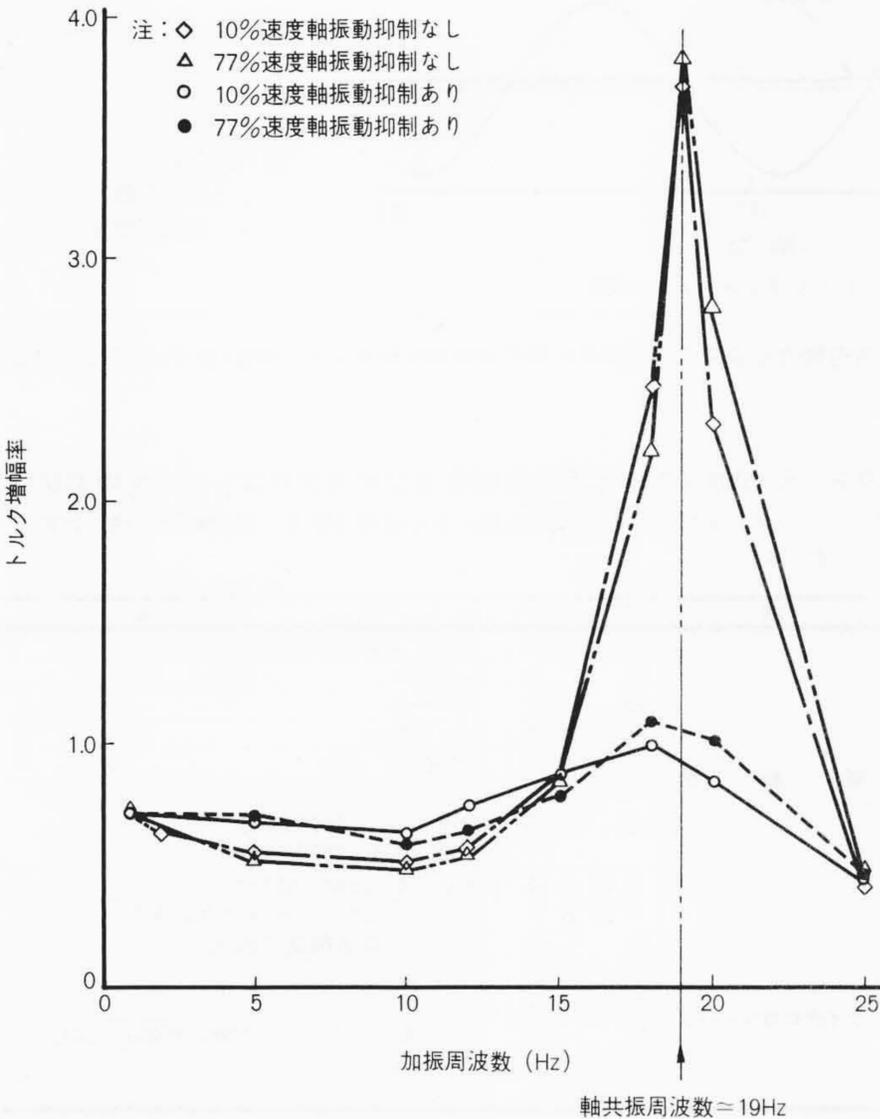


図3 オブザーバによる軸振動抑制効果 外乱トルクに対する軸トルクの増幅率の周波数特性を示したもので、共振周波数近傍の振動を著しく減衰させている。

ィードバック信号を用いるので軸振動の抑制効果は大きいですが、機械側になんらかのセンサを必要とすることが欠点であった。これに対して日立製作所では、現代制御理論の状態オブザーバ<sup>5)</sup>を用いて機械側のセンサを不要とした軸振動抑制制御方式を開発した。開発した負荷トルクオブザーバはトルク電流  $I_q$ 、磁束指令値  $\phi^*$  及び速度検出値  $\omega_r$  から電動機の負荷トルクを推定する方式である。速度検出器にサインエンコーダを使用しているため、前述のように極低速領域まで非常に高い分解能と精度で速度検出が可能である。この結果、オブザーバの演算を行なうマイクロコンピュータのサンプリング周期を短く選ぶことが可能となり、高応答な負荷トルク推定が実現されている。

軸振動抑制制御は、オブザーバによって得られた負荷トルク推定値をトルク電流成分に換算して、電動機のトルク電流成分の指令値に加算することで構成する。一例として、負荷機との間で約19Hzの軸共振周波数をもつ100kWの誘導電動機を用いて、軸振動抑制効果の評価試験を行なった。負荷機から正弦波トルクで加振し、軸トルクを測定した結果を図3に示す。今回開発した方式により、共振周波数近傍の振動が著しく少なくなっており、その有効性が明らかとなった。

### 3.4 サイクロコンバータの力率改善

力率改善のための各種制御方式を図4に示す。三次調波重畳はサイクロコンバータの入力電圧を約15%程度下げても、線間電圧として所定の基本波電圧が得られるので力率改善が図られる。非対称制御Iはサイリスタ変換器を2段連続接続時に上段側ブリッジに正の直流バイアスを加算し、下段側ブリッジに負の直流バイアスを加えることにより、2段の合計出力には直流分が生じないようにし、制御角を零度又は180度に近づけて運転し、電源力率を改善する方式である。非対称制御IIは2段連続接続されたブリッジの一方を固定位相とし、他方を移相制御する方式である。固定位相側の制御角は10~15度又は155~160度のできるもので、力率改善効果は最も良いが出力電圧の脈動が増加する。

循環電流制御の場合には、負荷電流と循環電流が同一の平滑リアクトルに流れるため、相互干渉が生じる。これを防ぐには循環電流を負荷電流の約20%と大きくする必要があり、力率を大幅に低下させることになる。今回、負荷電流と循環

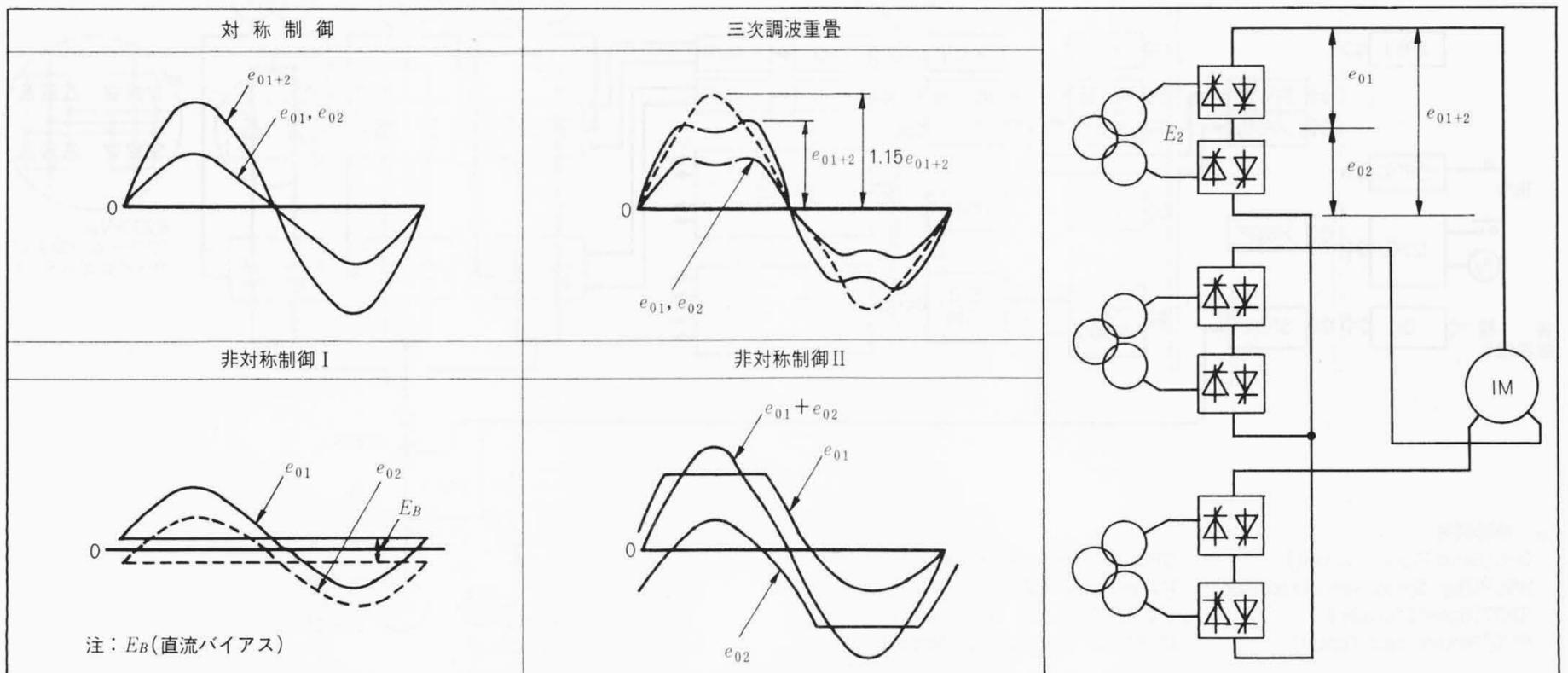


図4 力率改善制御方式 各種力率改善制御時のサイクロコンバータの出力電圧波形を示す。

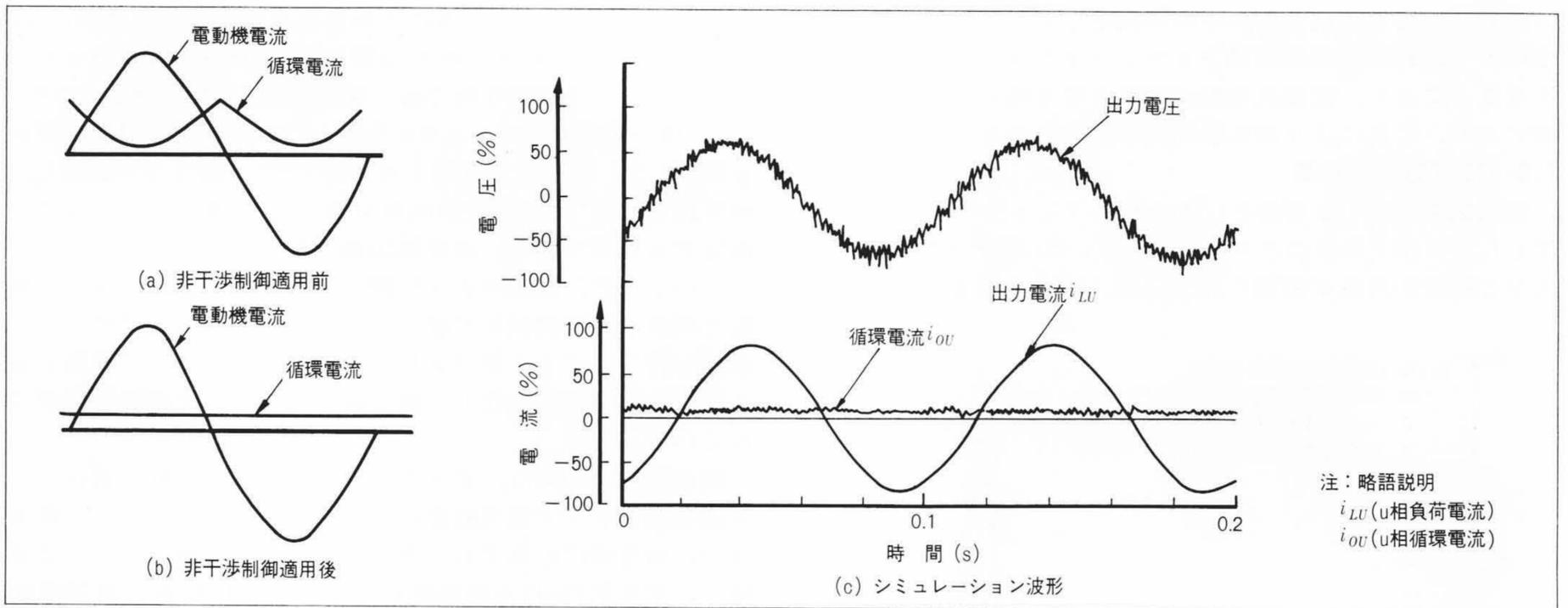


図5 非干渉制御時の負荷電流と循環電流のシミュレーション結果 (a) 非干渉制御適用前 (b) 非干渉制御適用後 (c) シミュレーション波形

電流の非干渉制御を適用し、循環電流を大幅に低減した。非干渉制御を適用した場合の負荷電流と循環電流のシミュレーション結果を図5に示す。

4 ミル主機駆動5,000kWサイクロコンバータシステム

株式会社中山製鋼所納め5,000kWサイクロコンバータシステムの社内組合せ試験による性能の検証を完了したので、概要及び試験結果について紹介する。

表2に電動機及びサイクロコンバータの仕様を、図6にシステム構成を示す。電動機は固定子2分割及び無循環電流制御方式のために16極、定格周波数16Hzとした。

4.1 5,000kWミル用誘導電動機

本システムに使用する誘導電動機は、ミル駆動特有の大トルクかつ頻繁な負荷変動に耐えられるように設計されており、これまでの圧延機用直流電動機で確立した技術を各部に反映

表2 5,000kWミル用誘導電動機及びサイクロコンバータの主な仕様

項目	仕様	
電動機	形式	三相かご形誘導電動機
	出力	5,000kW
	極数	16ポール
	回転速度	60・120rpm
	定格電圧	2,700・2,780V
	定格	100%連続 常用：225・200% 1分 非常：275・250% 1分
サイクロコンバータ	適用規格	JEC-37, JEM-1157-1
	冷却方式	強制内冷循環(クーラマウント)
	形式	72アーム無循環電流方式
	容量	6,270kVA
	電圧	2,700V
	定格	100%連続, 215% 1分, 260% 20秒
出力周波数	8・16Hz	
冷却方式	強制風冷方式	

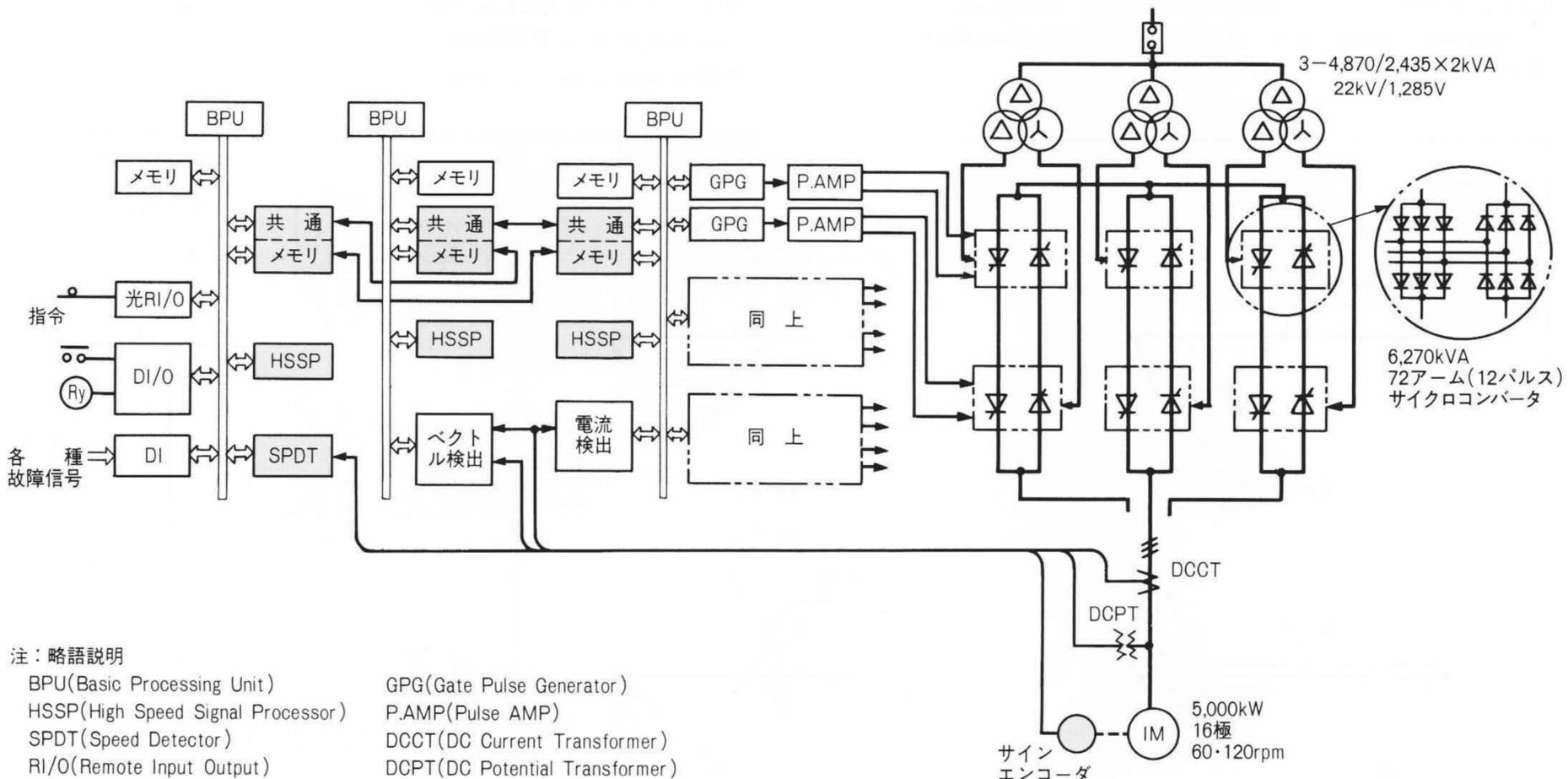


図6 72アームサイクロコンバータのシステム構成図

して、信頼性の高い電動機としている。

性能面では、起動時から周波数制御が行なえるので、大きな始動トルク特性をもつ特殊かご形とする必要がなく、各部の漏れインピーダンスを極力小さくして、運転特性の良い高出力電動機としている。また、直流電動機と異なり、整流上の制限がないため、回転子の直径を小さくし、 $GD^2$ の低減を図っている。以上から、直流電動機に対して約20%の $GD^2$ の低減及び約1.5%の効率向上を実現している。本電動機の外観を図7に示す。

(1) 回転子

シャフトは、直流電動機と同様にスキンストレス、 $\Delta$ アーム構造を採用しTAF(Torque Amplification Factor)を十分に考慮した構造となっている。回転子は、かみ込み時に大きな衝撃トルクを受けるので、ロータバーには特殊銅合金を使い、スロット内に強固に固定する構造とした。また、ロータバーエンド部は、直流電動機と比較して十分高い剛性をもっており、機械耐力の高い構造となっている。

(2) 固定子

据付け、保守時の省力化を図るため、直流電動機と同様に固定子の2分割構造を採用している。従来の2層巻では、コイルエンドでの接続が必要となり、現地での接続作業が煩雑となるため、電動機の極数を4の倍数に選定し、巻線を1スロット当たり1コイルしか収めない一層巻として、わたり線だけの接続で容易に2分割できる構造としている。また、従来の大形誘導電動機では実績のない急しゅんな可逆運転を行なうため、固定子コアとフレームの固定は、特殊ダブテール構造によりトルク伝達を行なうように考慮してある。

固定子の設計に当たっては、有限要素法による詳細な構造解析を行ない、十分な剛性をもつようにし、かつ工場試験で実際に過負荷トルクを発生させ、固定子のたわみ量を確認し計算の妥当性を検証した。有限要素法による固定子強度解析例を図8に示す。

固定子コイルは、大形交流機で豊富な実績のあるF種プリプレグ絶縁方式を採用し、特に、頻繁な負荷変動によるコイル

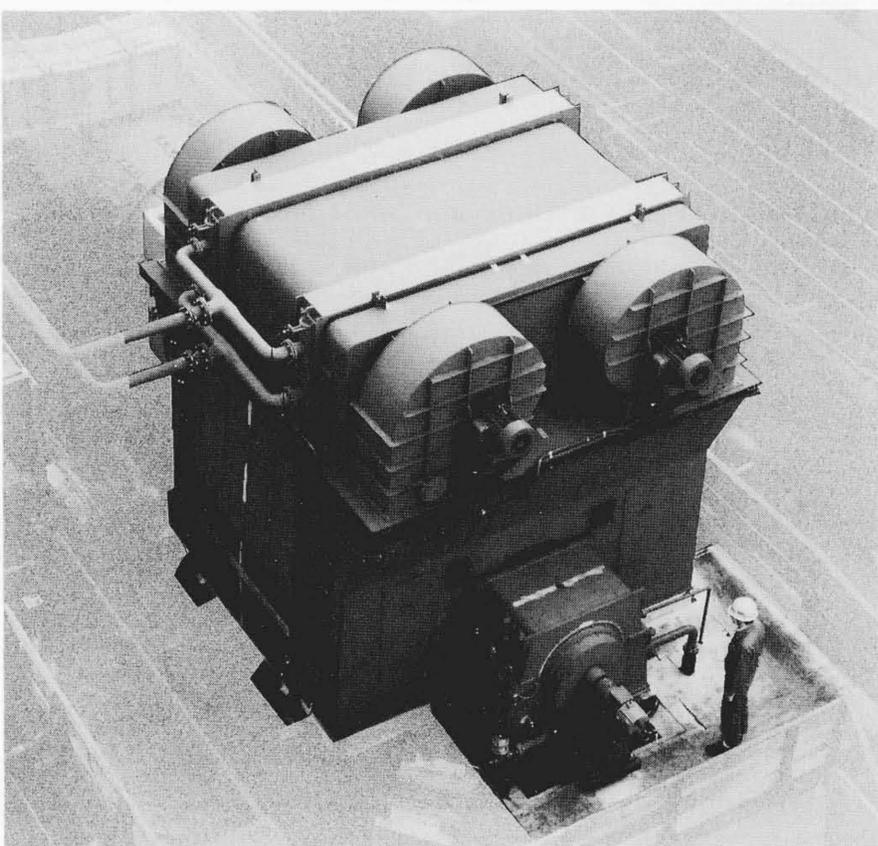


図7 5,000kWミル用誘導電動機の外観 固定子を2分割とし、冷却はクーラマウント方式を採用している。

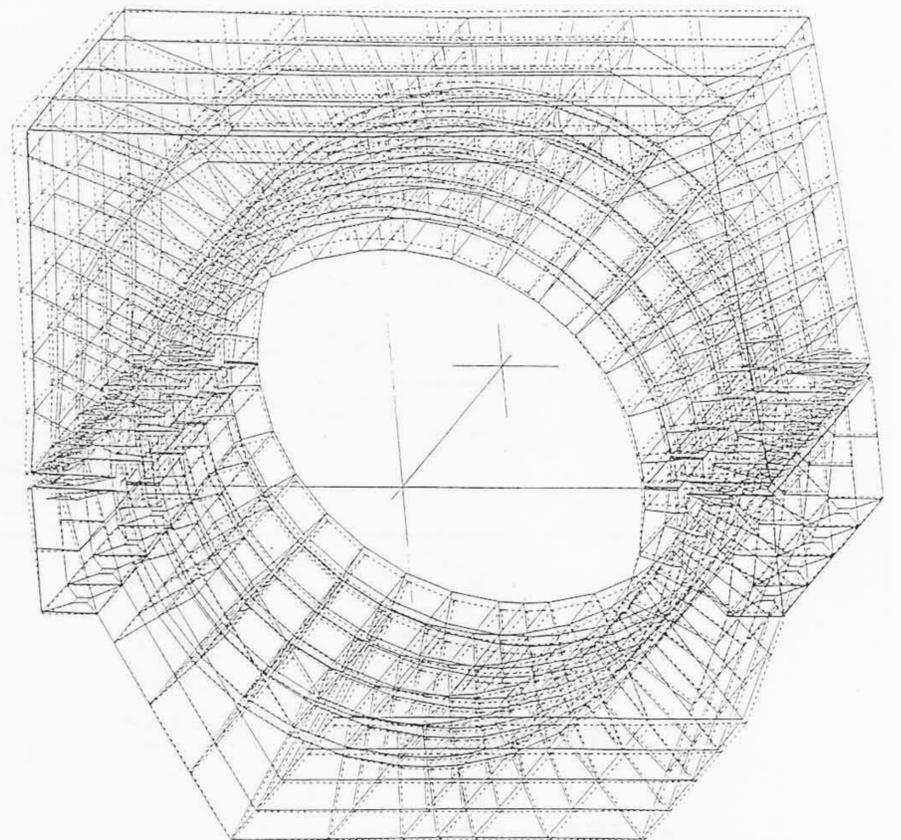


図8 有限要素法による固定子強度解析例 解析及び工場試験により、十分な剛性をもっていることを確認した。

の熱伸びに対し、十分な強度をもつように配慮している。

また、コイルエンド部は、基礎からの衝撃荷重を受けるので、十分な強度をもつようにコイルエンド支持装置やコイル相互の糸しばりにより強固なものとしている。

4.2 サイクロコンバータ

今回の5,000kW誘導電動機駆動用サイクロコンバータの主回路は、非対称制御による力率改善制御が行なえるように72アーム方式を採用した。サイリスタ素子は、並列通風方式及び低熱抵抗冷却フィンの採用により、素子の電流利用率を高くし、4,000V、1,000Aを1S1Pで構成した。また、サイリスタブリッジが2セット直列接続されるので、電流断続時の過電圧防止のために、ゲートパルスは広幅方式を採用した。

無循環電流制御方式サイクロコンバータでは、トルクリプル低減のため、高速かつ確実に逆並列切換えを行なうことが望ましい。このためサイリスタアノード~カソード間電圧の有無を切換論理回路に取り込む方式を採用したが、機器の信頼性向上及びコンパクト化を図るために光電圧検出方式とした。また、今回のサイクロコンバータ盤は、従来の直流用サイリスタ変換器に比べ回路電圧が約4倍高いが、絶縁性の良好な絶縁材料を使用し盤の小形化を図った。これにより、同容量の対称制御される直流用サイリスタ変換器の体積に比べ、約20%の低減が図れた。

4.3 制御装置

72アームサイクロコンバータの制御内容は、サイリスタレオナードに比べてはるかに複雑であり、更に交流の波形を制御するため高速処理が必要である。これは約1桁の性能アップに相当し、従来のシングルプロセッサに対し図6に示すように、BPU3台から成るマルチプロセッサ構成及びコプロセッサとしてシグナルプロセッサを採用し数値演算を分担させて、高速処理を実現した。マルチプロセッサは、任意の2台のプロセッサ間にそれぞれ共通メモリをもつ方式としたので、共通メモリに対する同時アクセスによる処理待ちが発生する確率は、グローバルメモリ方式に比べ $\frac{1}{3}$ に減少する。シグナルプロセッサは積和演算が250nsと非常に高速であるので、オブザーバや非干渉制御の演算時間短縮にその威力をいかな

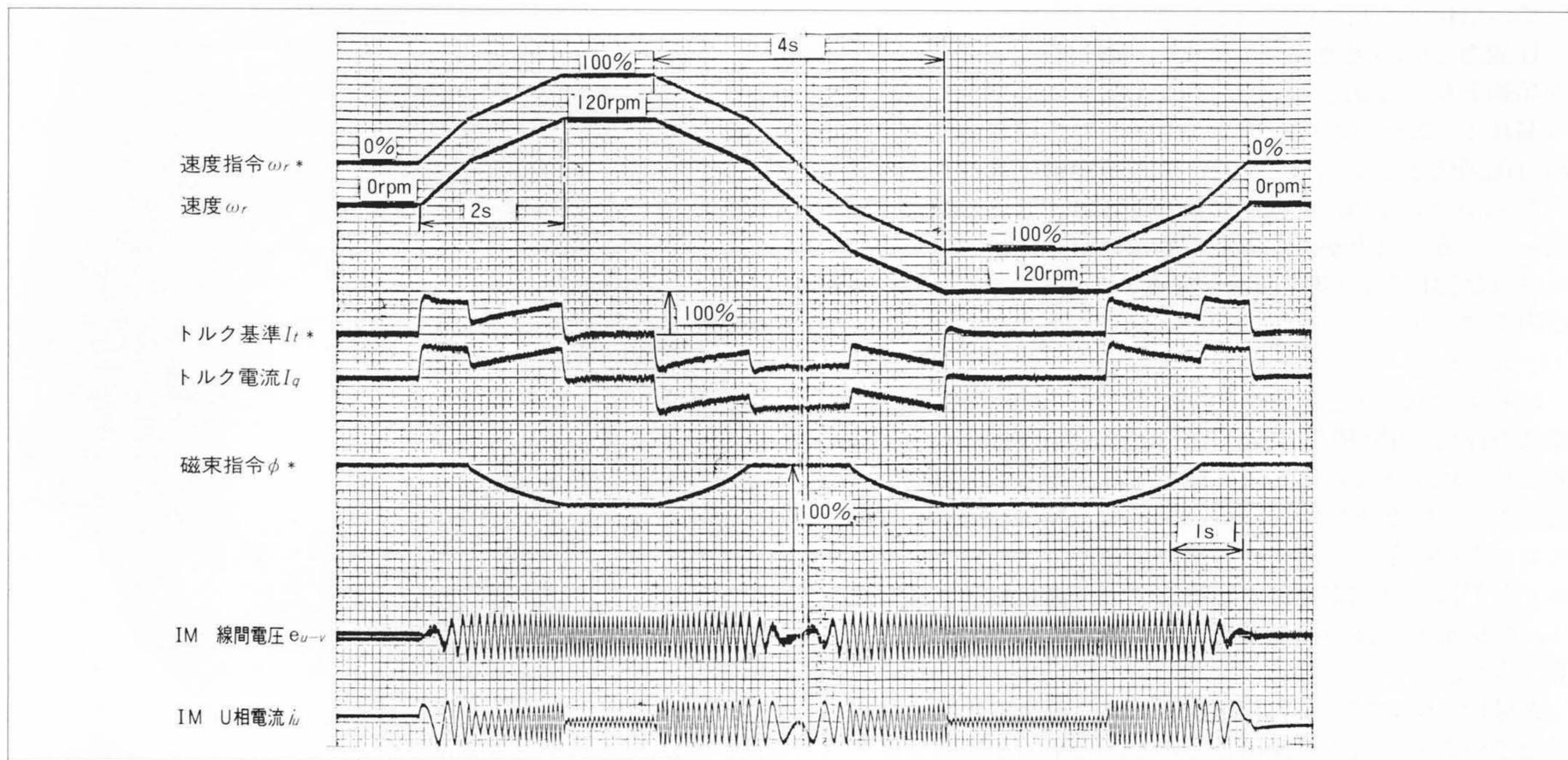


図9 4象限加減速特性 0→TOP 2秒の急速加減速がスムーズに行なわれている。

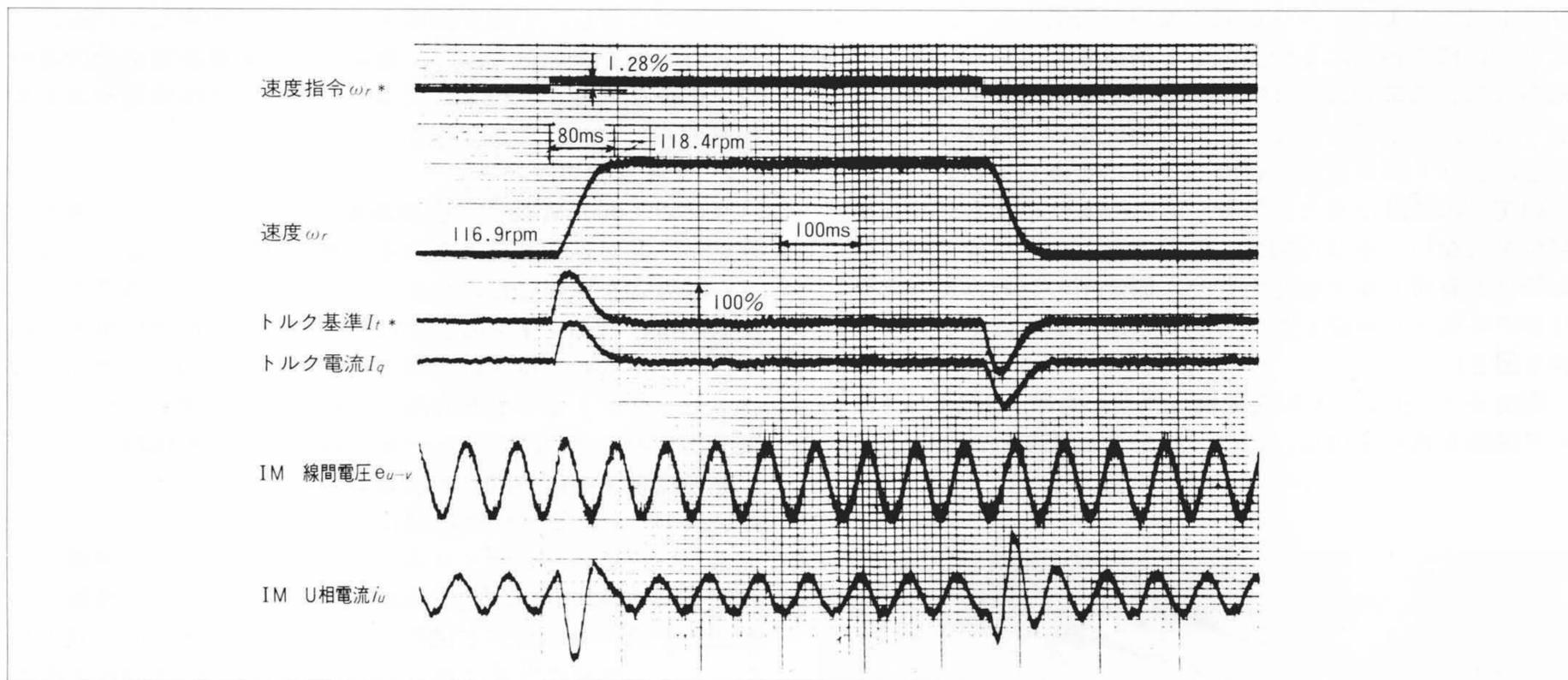


図10 速度のインディシャル応答 ピーク値までの到達時間が80msで、遮断角周波数 $\omega_c \approx 40 \text{ rad/s}$ を実現している。

く発揮している。

#### 4.4 運転特性

図9は4象限加減速特性を示し、0→Top 2秒の急速加減速がスムーズに行なわれている。

図10は速度のインディシャル応答を示し、ピーク値までの到達時間は80msであり遮断角周波数 $\omega_c \approx 40 \text{ rad/s}$ を実現している。

### 5 結 言

以上、圧延主機用AC可変速ドライブシステムであるサイクロコンバータへ各種高性能化技術を適用することにより、DCドライブ以上の高精度化及び高応答化を図る技術を確立した。本ドライブシステムは、圧延製品の高品質化及び歩留まり向上に寄与する点が大で、かつ省エネルギーの点でも有利であるため圧延機ドライブに最適と考えられる。

今後、需要の多様化に対し、フレキシブルでコストパフォーマンスの高いドライブシステムを提供するため、新技術、新システムの開発にまい進する考えである。

#### 参考文献

- 1) 清水, 外: 高性能交流可変速制御システム, 日立評論, 65, 4, 251~256(昭58-4)
- 2) T. Okuyama, et al.: High Performance AC Motor Speed Control System Using GTO Converters, IPEC-Tokyo Conf. Rec.(1983-3)
- 3) 鮎川, 外: 最近の電動機デジタル制御, 日立評論, 67, 4, 331~335(昭60-4)
- 4) 神山, 外: 圧延主機用交流可変速ドライブ, 日立評論, 67, 4, 319~324(昭60-4)
- 5) 小郷, 外: システム制御理論入門, 実教出版(1979)