

圧延主機用交流可変速ドライブ

AC Adjustable-Speed Main Drives for Rolling Mills

交流可変速ドライブの高性能化が最近急速に進展し、鉄鋼プラントでの交流化は従来の圧延補機用から重要圧延主機用へと拡大している。交流化の波は、今まで圧延仕上主機用として長い間君臨してきた直流可変速ドライブの対象分野にも波及しようとしている。このような情勢から、日立製作所は今回新たに大容量仕上圧延(熱間仕上圧延機及び冷間圧延機)主機用として、ベクトル制御による全デジタル循環電流制御72アームサイクロコンバータの開発を行なった。これは、制御性能やトルク脈動に関して直流可変速ドライブと比べて劣るところがなく、広範囲な定出力領域でも特に優れた制御性を発揮できる。

本論文では、鉄鋼プラントでの可変速ドライブに対する交流化の必要性、高性能化制御技術、今回開発した高性能サイクロコンバータとその特性などについて紹介する。

神山健三*
鮎川 隆**
竹村 明***
松竹 貢***
長瀬 博****

Kenzô Kamiyama
Takashi Sukegawa
Akira Takemura
Mitsugu Matsutake
Hiroshi Nagase

1 緒 言

この数年来、交流可変速ドライブは、デジタル制御やベクトル制御などの関連技術の進歩、発展により、著しく高性能化した。また、圧延製品の品質向上や生産性向上に対する非干渉制御の有効性が実証され¹⁾、制御のデジタル化による高精度化に加えて、特に交流化による高応答化や高速化が要請されてきたため、交流可変速ドライブの重要圧延主機への適用検討が最近活発に行なわれるようになってきた。

日立製作所は、鉄鋼プラント用交流可変速ドライブとして、既に世界初の圧延主機用サイリスタモータインバータ²⁾及びEGL(電気亜鉛めっきライン)用全ラインGTO(ゲートターンオフ)サイリスタインバータ³⁾を稼動させるなど、豊富な対応技術をもっている。

2 可変速ドライブの交流化

2.1 圧延主機交流化の背景と必要性

オイルショック以降、省エネルギー、省保守の観点から適用が拡大した交流可変速ドライブは、最近高性能化を支援する下記の技術が確立され、圧延補機を中心に適用拡大が進展している。

(1) マイクロプロセッサ適用デジタルコントローラ及びその応用技術

(2) TRS(トランジスタ)インバータ、GTOインバータなどの

高速可変周波電源技術

(3) 交流電動機を直流電動機と同等以上に高性能に制御可能とするベクトル制御技術

(4) 適応制御、有限整定、非干渉制御など制御性改善に有効な現代制御理論の応用技術

(5) PWM(Pulse Width Modulation)制御やサイクロコンバータ制御による高調波低減技術及び非対称制御による力率改善技術

ところで、圧延製品の品質向上や生産性向上を図る圧延制御手段として、デジタル化による高精度化に加えて、非干渉制御適用の有効性が実証された。また、フレキシブルな圧延スケジュールに対応するため、広範囲の定出力領域も要請されている。その結果、これらの対応に容易な圧延主機用可変速ドライブの交流化が必要となってきた。

2.2 各種交流可変速ドライブ

鉄鋼プラント用交流可変速ドライブは、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で、従来の直流可変速ドライブと同じ対象分野に適する。また、汎用はV/F一定制御付きで、主として省エネルギー、省保守の用途に適用する。表1に、主な用途に適する日立製作所の交流可変速ドライブ方式を示す。代

表1 各種交流可変速ドライブ ドライブには各種の方式があり、用途に最も適した方式を選定することが重要である。用途によっては、アナログ式も適用される。

区分	主 回 路		出力電流 波 形	最高周波数 Hz 10 100 200	電動機	電動機容量 (kW)					速度精度 デジタル式	主 な 用 途
	方 式	使用素子				2.2	10	100	1,000	3,000		
高性能 (ベクトル制御付き)	電 圧 形 インバータ	バ ワ ー トランジスタ	正弦波		IM						±0.05%	プロセッシングライン 圧延補機(圧下、テーブル他) CGL(溶融式亜鉛めっきライン) 連続鋳造 CPL(コイル準備ライン) RCL(リコイルライン) CAL(連続焼鈍ライン) CCL(連続塗装ライン) EGL(電気亜鉛めっきライン) TFL(ティンフローライン)
		GTO	正弦波		IM						±0.05%	
	電 流 形 インバータ	GTO	正弦波		IM						±0.05%	大・中容量圧延主機、補機 (ビレット、線材仕上ミル、リール、シャワー、ブライドル、ルーバ、他)
		サイリスタ	方形波 又は 階段波		IM						±0.05%	
	サイクロ コンバータ	サイリスタ	正弦波		IM SM						±0.05%	低速・大容量圧延主機 (ホットストリップミル(粗、仕上スタンド)タンデムコールドミル、 厚板ミル、他)
	電 流 形 サイリスタ モ ー タ	サイリスタ	方形波 又は 階段波		SM						±0.05%	高速・大・中容量圧延主機、補機 (線材ブロックミル、ホットストリップミル(粗、仕上スタンド))
汎 用 (V/f一定 制 御)	電 流 形 インバータ	サイリスタ	方形波 又は 階段波		IM						±0.05%	各種テーブル ファン、ポンプ

注：略語説明 IM(かご形誘導電動機)、SM(同期電動機)、GTO(ゲートターンオフ)サイリスタ

* 日立製作所大みか工場 工学博士

** 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

表的適用例として、日立製作所は昭和58年4月に世界に先駆けて全ラインベクトル制御GTOインバータによる交流化EGL⁴⁾を稼働させた。中でもテンションリール用は電動機出力165kWであるが、回転速度範囲1:5(305~1,500rpm)という広範囲な定出力制御を実現している。

日立製作所は、今まで主としてトルク脈動の観点から適用がちゅうちょされていたホットタンデムミルやコールドタンデムミルの大容量圧延仕上主機への交流可変速ドライブに対しても、今回低トルク脈動の高精度、高応答全デジタル循環電流制御72アームサイクロコンバータを開発した。

3 高性能化制御技術

3.1 ベクトル制御の高性能化

ベクトル制御はかご形誘導電動機の一次電流をトルク電流成分 I_t と励磁電流成分 I_m に分離し、それぞれを独立に制御して、直流電動機と同様に高精度、高応答のトルク制御を行なう方式である。

図1に、圧延機用交流可変速制御用として通常用いられる非干渉制御の他に日立製作所が採用している制御方式を示す。

ベクトル制御は、速度制御回路(SC)の出力をトルク電流指令 I_t^* とし、励磁電流指令 I_m^* とのベクトル和から、常に次式の関係が成立するように制御する方式である。

$$I_1^* = \sqrt{I_t^{*2} + I_m^{*2}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta^* = \tan^{-1}(I_t^*/I_m^*) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\omega_s^* = (1/T_2^*) \cdot (I_t^*/I_m^*) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここでは、 I_1 :一次電流実効値、 θ :磁束と一次電流ベクトルのなす角、 ω_s :滑り角周波数、 T_2 :二次時定数($= (l_m + l_2)/r_2$)、 l_m , l_2 :励磁、二次漏れインダクタンス、 r_2 :二次抵抗、*:諸量の指令値である。すなわち、交流の一次電流の指

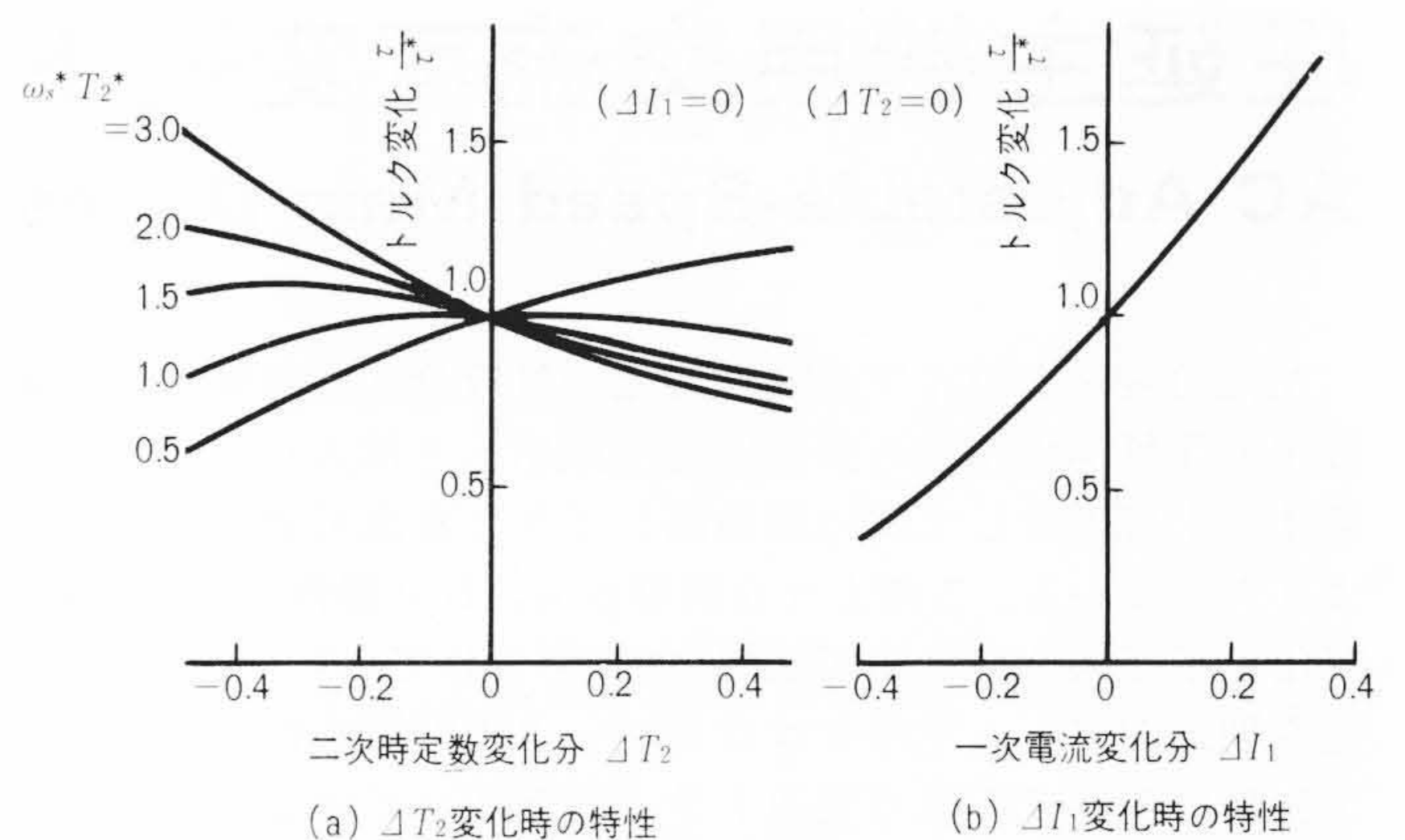


図2 ΔT_2 , ΔI_1 変化時のトルクの変化特性 トルク τ は二次時定数 T_2 、一次電流の大きさ i_1 の変化により誤差を生じるため、それらを補償する必要がある。

令 i_1^* を次式から得て、一次電流 i_1 を制御する。

$$i_1^* = I_1^* \sin(\omega_1^* t + \theta^*) \\ = I_m^* \sin \omega_1^* t + I_t^* \cos \omega_1^* t \quad \dots\dots\dots(4)$$

このように一次電流を制御すると、かご形誘導電動機の発生トルク τ は極数を p とすると、次式のように I_t , I_m に比例して制御される。

$$\tau = \frac{3}{2} p \frac{l_m^2}{l_m + l_2'} I_t I_m \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、指令値 T_2^* , I_1^* の誤差を次式のように表わすと、トルク変化は(7)式のように与えられる^{5),6)}。

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_2}{T_2^*} &= 1 + \Delta T_2 \\ \frac{I_1}{I_1^*} &= 1 + \Delta I_1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{\tau}{\tau^*} = \frac{1 + (\omega_s^* T_2^*)^2}{1 + (\omega_s^* T_2)^2 (1 + \Delta T_2)^2 (1 + \Delta I_1)^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

(7)式から T_2 , I_1 誤差に対するトルク誤差は図2のように表わされる。したがって、トルク制御を高性能に行なうためには、 T_2 , I_1 を補正する必要がある。

図1の制御方式はこれらの誤差を制御的に補正するために、 $I_d - I_q$ 制御ループ(CC_{1,2})⁶⁾及び $E_d - E_q$ 制御ループ(VC_{1,2})⁷⁾をもつ。すなわち、一次電流の誤差に対してはその成分 I_d , I_q を検出し、フィードバックすることによって誤差補正を行なう。また、 T_2 に誤差が生じると電圧成分 E_d , E_q が設定値(E_d は零)から変化するので、これを利用して誤差補正を行なうことができる。

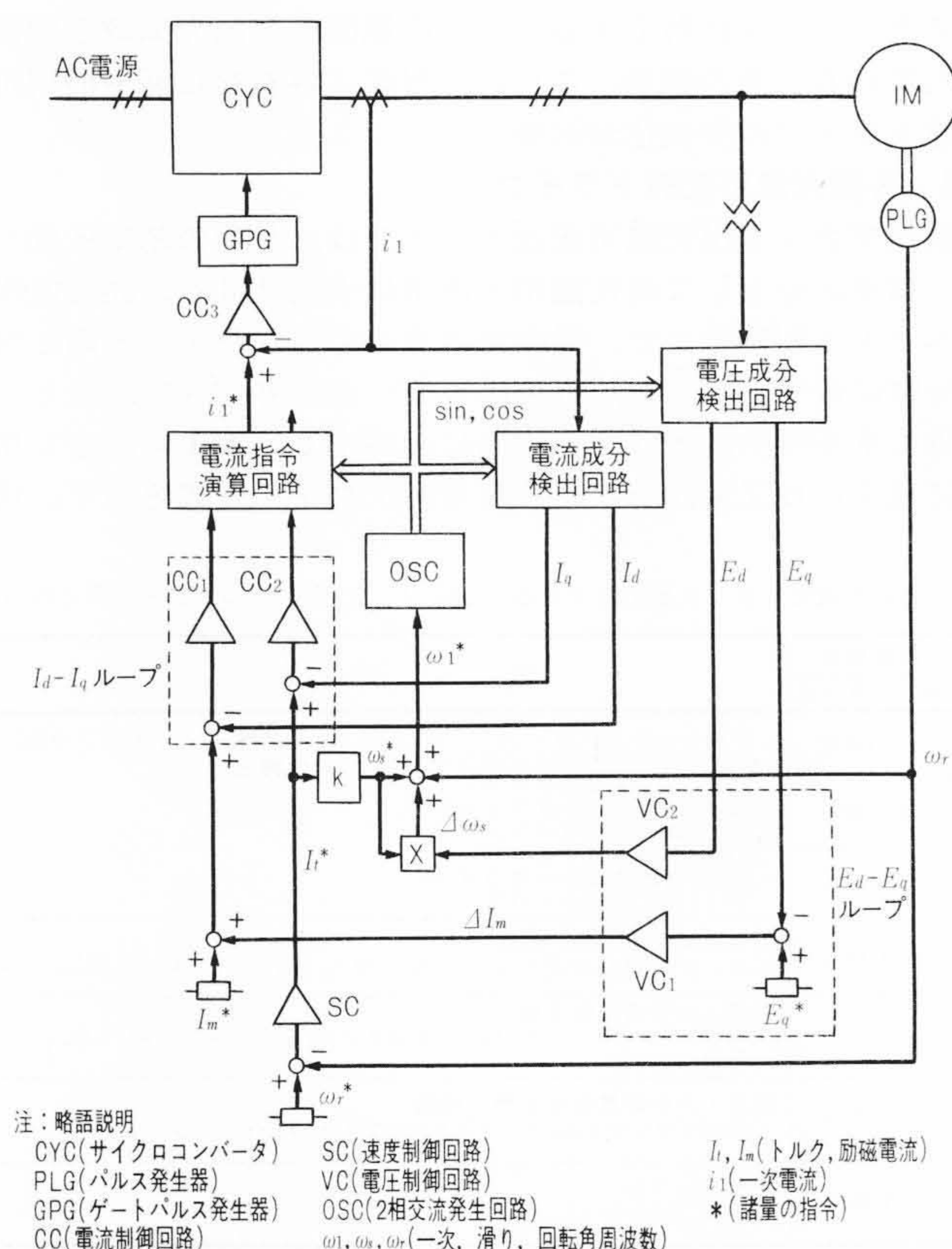
3.2 シミュレーション

ベクトル制御72アームサイクロコンバータドライブシステムの開発を行なうに当たり、電源力率、高調波、トルク脈動、制御応答など静特性や動特性を総合的に解析し評価するため、実波形を出力できるデジタルシミュレータを開発した。

実試験装置の実測値とシミュレーション結果からシミュレータの妥当性を検証し、ベクトル制御によるサイクロコンバータ方式交流可変速ドライブシステムのシミュレーション技法を確立した。

シミュレータの構成規模は、次のとおりである。

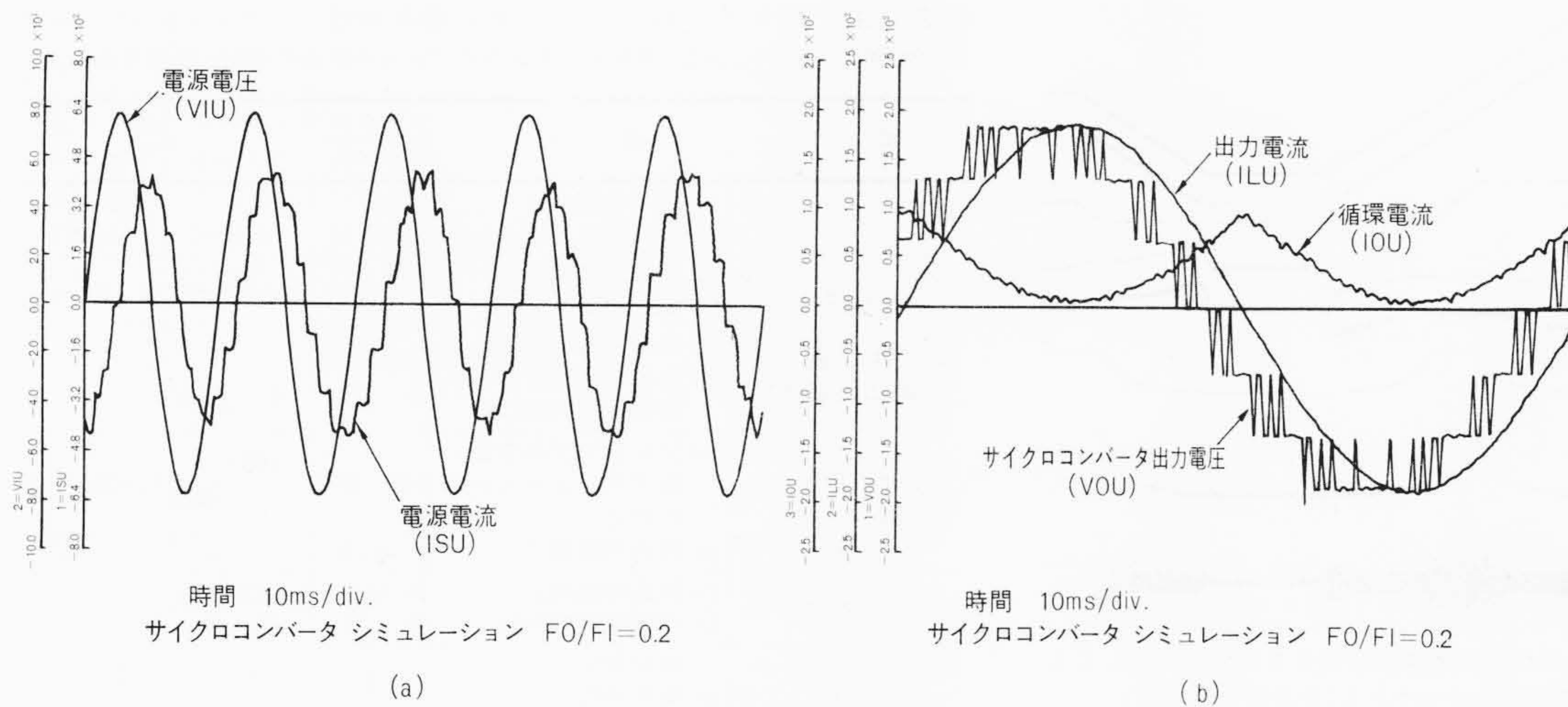
- (1) アナログ式及びデジタル式自動速度制御系(ASR)・自動電流制御系(ACR)
- (2) マイナーループ循環電流・無循環電流制御及びマイナーループ負荷電流制御($I_d - I_q$, i_u , i_v , i_w)
- (3) 36・72アームサイクロコンバータ



注:略語説明

CYC(サイクロコンバータ) SC(速度制御回路) I_t , I_m (トルク, 励磁電流)
PLG(パルス発生器) VC(電圧制御回路) i_1 (一次電流)
GPG(ゲートパルス発生器) OSC(2相交流発生回路) *(諸量の指令)
CC(電流制御回路) ω_1 , ω_s , ω_r (一次, 滑り, 回転角周波数)

図1 制御ブロック図 かご形誘導電動機のベクトル制御サイクロコンバータ方式交流可変速ドライブで、電動機の各種パラメータを補償し、高精度、高応答を得る制御方式である。



(4) 交流電動機速度-トルク特性

(5) 交流電源電圧・電流波形

静特性解析結果の一例として、電源電圧、電流及びサイクロコンバータの出力電圧、電流、循環電流の出力波形を図3に示す。

4 大容量圧延主機用交流可変速ドライブ

4.1 ベクトル制御72アームサイクロコンバータ

日立製作所では圧延主機用として無循環電流制御方式サイクロコンバータを既に開発しているが⁸⁾、今回新たに大容量圧延仕上主機用として循環電流制御方式72アームサイクロコンバータの開発を行なった。

図4に、今回開発したサイクロコンバータのシステム構成図を示す。主回路は3相全波ブリッジを2セット直列接続し、更に直流リアクトルを介して逆並列接続した。直流リアクトルは正負コンバータ間に流す循環電流を抑制するためのものである。また制御方式は静止レオナードと同等の制御性能を得るベクトル制御方式を採用し、制御精度向上に加え非干渉制御、適応制御対応に容易な全デジタル制御方式とした。

サイクロコンバータで検討すべき重要な項目に電源力率の

低下がある。その対策として、例えば交流電動機を星形接続し、相電圧に出力周波数の3倍周波数を重畳させることにより、電源力率を約20%改善することができる。また、直列接続された2セットのコンバータ間を非対称制御することにより、ほぼ静止レオナード並みの電源力率を達成できる。

また、電源高調波の発生については、その対策法の一案としてアクティブフィルタ方式を開発した。この方式は n 段直列接続された3相ブリッジにリアクトルを接続し、サイクロコンバータの発生する高調波と逆位相の電流を流すことにより、高調波の発生を大幅に改善することができる。

図5は350kW誘導電動機をサイクロコンバータで制御した場合の4象限運転特性を示す。本装置では最高回転数での出力周波数は、電源周波数50Hzに対し約42Hzである。出力周波数については、周波数を上げる研究がいろいろなされている。

定出力可変速制御範囲は1:6である。図6は負荷印加時回転速度を変えたときの出力電流の拡大波形で、各周波数ではほぼ正弦波となっている。

図7はステップ応答波形でカットオフ周波数は45rad/sで、静止レオナードの30rad/sに対し十分良好な結果が得られた。

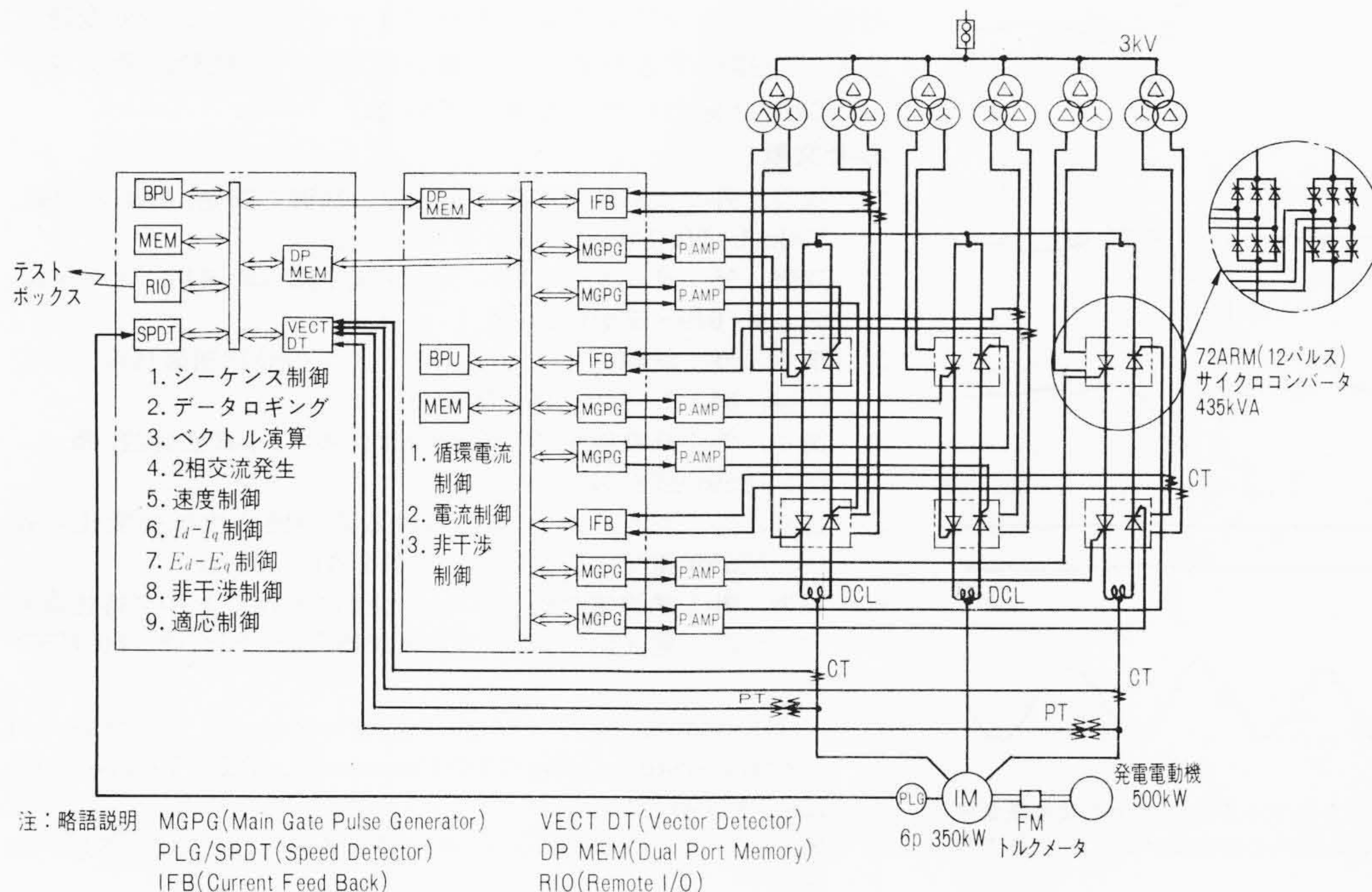


図4 ベクトル制御サイクロコンバータ試験装置システム構成図 試験装置のシステム構成図を示す。350kW誘導電動機、循環電流制御72アームサイクロコンバータ及びベクトル制御による全デジタル制御回路で構成されている。

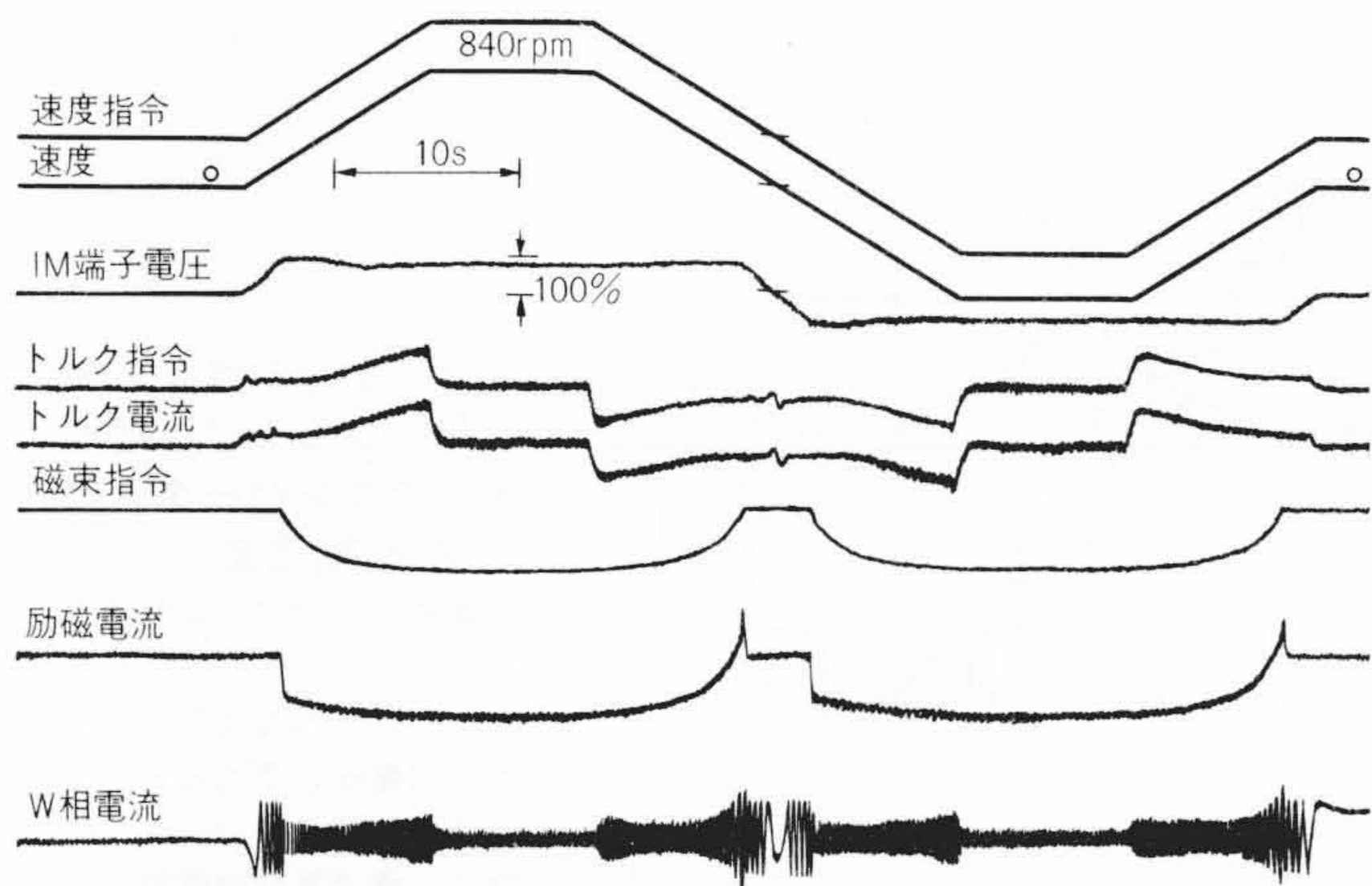


図5 4象限運転特性 350kWかご形誘導電動機を4象限加減速したときの各部波形を示す。最大出力周波数は約42Hzである(電源周波数50Hz)。

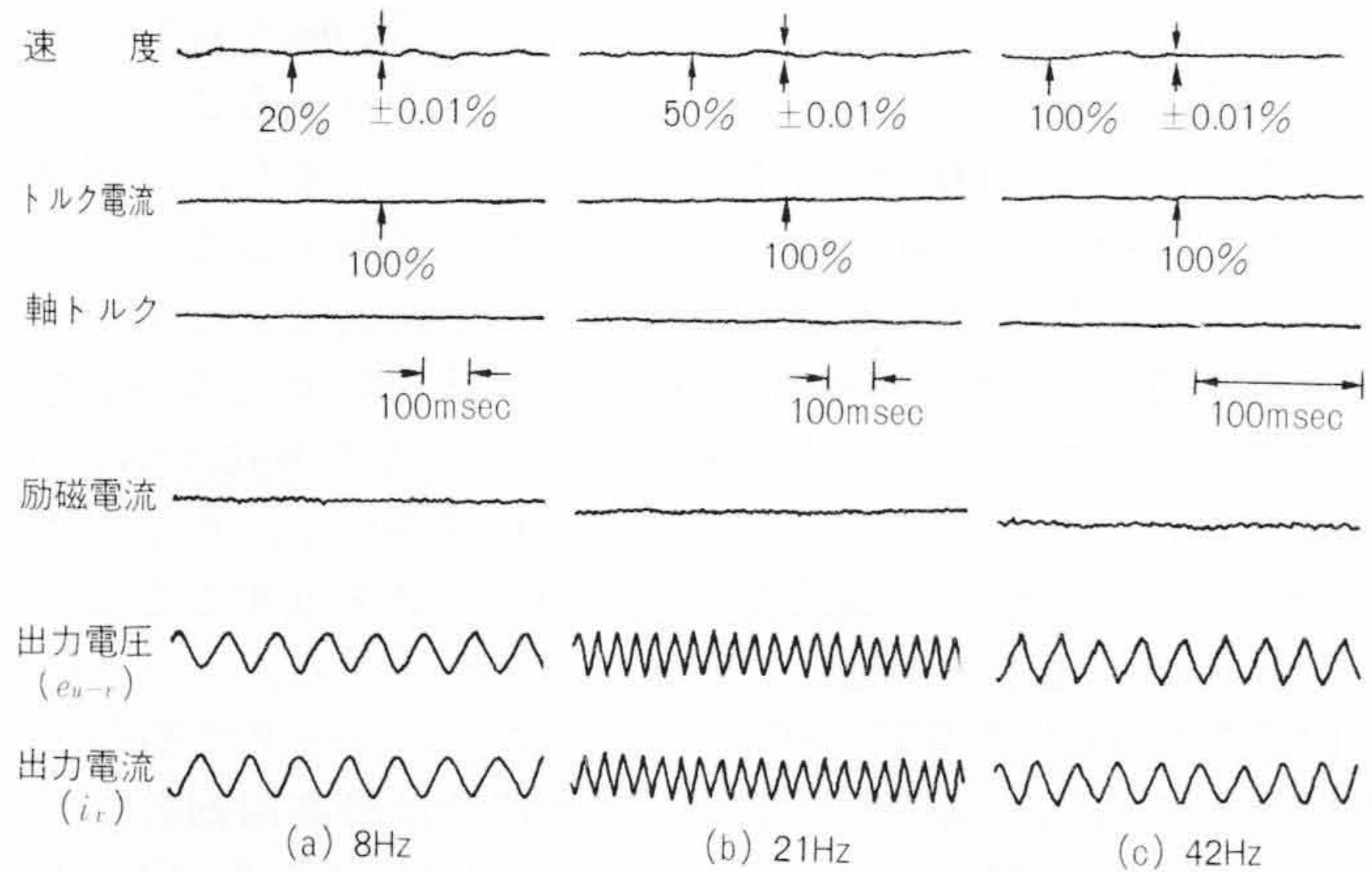


図6 出力電流波形 負荷約100%、8Hz、21Hz、42Hzで運転時の速度精度、軸トルク、出力電圧、電流波形で、良好な特性が得られている(電源周波数50Hz)。特に、全可変速範囲でトルク脈動はほとんど認められない。

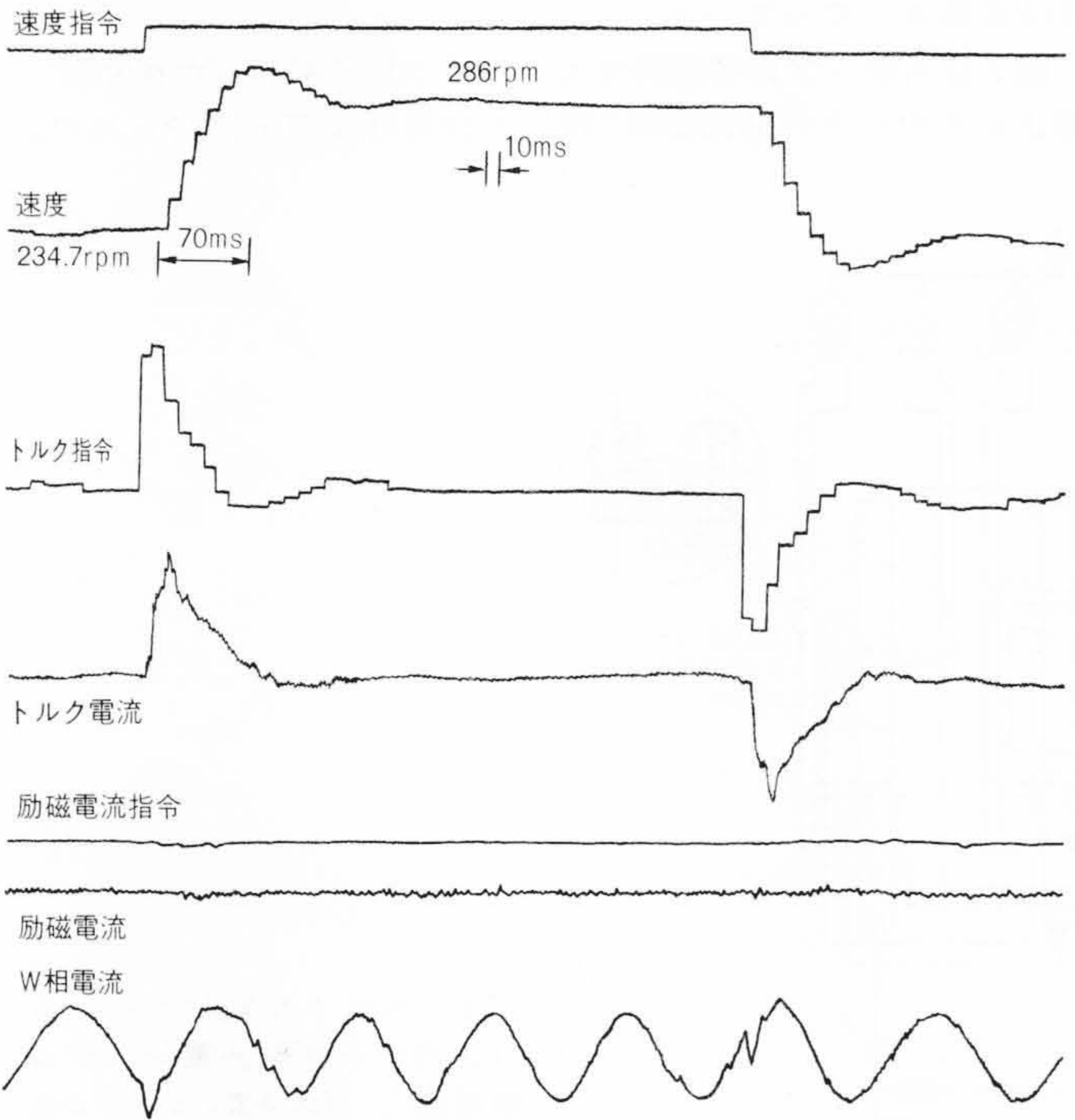


図7 ステップ応答特性 速度指令をステップ状に変化させた場合の速度応答結果である。カットオフ周波数は45rad/sの好結果が得られた(電源周波数50Hz)。

表2 主機用サイクロコンバータの標準特性 サイクロコンバータの方式選定では、特に応答、最高出力周波数及びトルク脈動の検討が重要である。

項目	目的	サイクロコンバータ		静止 レオナード
		36アーム	72アーム	
精 度	(1) 製品精度向上 (2) 製品歩留り向上	$\pm 0.01 \sim 0.05\%$	$\pm 0.01 \sim 0.05\%$	$\pm 0.01 \sim 0.05\%$
応 答 (カットオフ周波数 ω_c)	(1) 製品精度向上 (2) 製品歩留り向上	10~30rad/s	20~60rad/s	10~30rad/s
高 速 運 転 (最高出力周波数)	(1) 生産性向上 (2) 生産設備の小形軽 量化(経済的設備)	電源周波数 f_s ($\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$) f_s	($\frac{1}{2} \sim \frac{5}{6}$) f_s	—
可変速 範 囲	定トルク	1:100~200	1:100~ 1,000	1:100~200
	定出力	1:4~6	1:6	1:5
ト ル ク 脈 動	(1) 製品精度向上 (2) 機械軸振動抑制	DCMと 同 等	DCMと 同 等	—
省 エ ネ ル ギ ー (力率)	(1) 高効率化 (2) 省保守化	0.5	0.7	0.75

注：略語説明 DCM(直流電動機)

4.2 サイクロコンバータの特性検討

サイクロコンバータには動作方式として循環電流と無循環電流が、回路方式として実用上36アームと72アームがあり、いずれも出力周波数やトルク脈動に互いに密接に関係する。表2に、圧延主機用に対する各サイクロコンバータの標準特性をまとめて示す。これらの技術は日進月歩であり、今後の適用拡大に当たっては、制御性能、トルク脈動、力率及び高調波に関し、より簡単で経済的な総合化技術の早期開発が期待される。

5 結 言

以上、圧延主機用交流可変速ドライブで、日立製作所が最近開発した大容量圧延主機用高性能サイクロコンバータに関する新技術を中心に紹介した。

交流可変速ドライブは、我が国の鉄鋼プラントでは、圧延補機から主機へといずれの用途でも、現在適用拡大中である。特に大容量圧延仕上主機への適用については、今まで主としてトルク脈動の観点から適用がちゅうちょされていたが、今回開発した高性能サイクロコンバータにより、解決できることをモデルテストにより確認できた。今後は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よい可変速ドライブを提供するため、より良い新製品、新技術、新システムの開発に努力したいと考えている。

参考文献

- 1) 福谷，外：大形仕上圧延機自動厚み制御の開発，計測と制御，Vol.23，No.10(昭59-10)
- 2) 森野，外：サイリスタモータの圧延主機への適用，日立評論，61，9，649~654(昭54-9)
- 3) 清水，外：鉄鋼プロセッシングラインの最新制御技術，日立評論，65，2，159~164(昭58-2)
- 4) 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)
- 5) 長瀬，外：ベクトル制御における誘導機2次抵抗変化の補償，昭55年電気学会全国大会，No.541(昭55-4)
- 6) 長瀬，外：誘導電動機ベクトル制御におけるトルク特性直線化の検討，電気学会半導体電力変換研究会，SPC-82-60(昭57-12)
- 7) T. Okuyama, et al.: High Performance AC Motor Speed Control System Using GTO Converters, IPEC-Tokyo Conf. Rec. A(1983-3)
- 8) 堀，外：サイクロコンバータ，電気学会雑誌，98巻，5号(昭53-5)