

鉄鋼プラントにおけるACドライブシステム

AC Motor Drive Systems for Steel Plants

鉄鋼プラントでのドライブシステムは、AC化が急速に進んできた。これは交流機が保守性、省エネルギーの面で優れていることに加え、圧延主機用・補機用とも性能及び価格面で非常に向上したことによる。一方、最近の制御装置は、保守・調整の簡単化、使い勝手の容易さなどが求められている。

ACドライブシステムには、用途によって最適な方式が種々ある。今回、補機用として数多く用いられているベクトル制御付き電圧形インバータを、2台のマイクロプロセッサを使用して電流検出、PWMパルス出力をも含め全デジタル化、高精度化を図るとともに、デジタルの特徴を生かし、オートチューニング、速度センサレスベクトル制御、メンテナンスツールの機能改善などによって、保守性や使い勝手を考慮したシステムを実現することができた。

木谷 進* *Susumu Kitani*
高橋潤一* *Jun'ichi Takahashi*
松井孝行** *Takayuki Matsui*

1 緒言

近年鉄鋼プラントでは、直流機よりも交流機が主流となっている¹⁾。主な理由としては、交流機のほうがメンテナンスの面で優れており、かつ最近の制御技術の進歩によって、性能面及びトータル価格の面で直流機を越えつつあり、交流機のほうが有利になってきたからである。交流機を直流機並みに制御するには、複雑で高精度の演算が必要であるが、近年のマイクロプロセッサの進歩によってこれが可能となった。このことは更に制御装置のマンマシンインタフェースに関する大幅な機能アップをもたらし、操作性及び調整面でも非常に使い勝手が改善されてきている。

一方、パワー素子として小容量ではパワートランジスタが、また中・大容量ではGTO(Gate Turn Off)サイリスタやサイリスタが、応用技術及び価格面で非常に進歩し、前述の高性能制御技術と融合され、交流機の制御技術は長足の進歩を遂げている。

日立製作所では長年の鉄鋼プラントに関する技術をベースに、最近の新技术の導入を図り、鉄鋼プラント用ACドライブシステムの開発を行ってきている¹⁾。これらの制御装置は全デジタル化され、性能面、マンマシン性、システム構成の容易さの面などで、従来よりも格段に機能アップされたものである。

本稿では、ACドライブシステムに関して、小容量システムを中心にその概要及び特徴について述べる。

2 ACドライブシステムの適用

2.1 鉄鋼プラントへの適用

鉄鋼プラント用ドライブシステムは、電動機容量で数キロワットから約1万キロワットの広範囲にわたる。また、鉄鋼

設備には連続 casting、熱間圧延、冷間圧延、プロセッシングラインなどがある。用途によって負荷特性、精度、応答性などの要求仕様が異なり、また電動機容量及び性能的にも圧延主機用と圧延補機用に大きく分類される。ドライブ方式にはAC方式とDC方式があり、DCドライブは静止レオナードが主体であるが、ACドライブは変換器方式によって、(1)電圧形インバータ、(2)電流形インバータ、(3)サイクロコンバータの各種方式がある。各方式の特徴を表1に示すが、ACドライブを適用する場合、用途及び容量に適した方式の選択が最も重要である。

また、制御方式には、負荷特性から直流機と同等の性能を持つベクトル制御²⁾が採用されている。この場合、複雑な演算を高精度に行う必要があり、デジタル化が必要である。更に最近では、保守・調整の簡単化、使い勝手の容易さなどを目的として、デジタルの特徴を生かしマンマシンツールをインテリジェント化し、故障時のトレースバックデータ、制御定数などの図形によるビジュアル化によって、RAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能の向上が図られている。

2.2 各種ドライブ方式の特徴

(1) 電圧形インバータ

本インバータには、自己消弧形スイッチング素子であるパワートランジスタを使用した方式とGTOを使用した方式がある。制御方式は正弦波PWM(Pulse Width Modulation:パルス幅変調)方式が採用されている。TRS(トランジスタ)インバータは、トランジスタの耐圧及び容量が小さいが、他方式に比べて主回路構成が簡単であるため、小容量機に多く適用されている。しかし、最近では、トランジスタの大容量化と並列

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所

表1 ACドライブシステムの特徴と適用・用途 ACドライブシステムには各種方式があり、特徴を生かして用途に適した方式を選定することが重要である。

方式	使用素子	長所	短所	適用容量	用途					
					プロセッシングライン	熱間圧延		冷間圧延		連続鋳造
						補機	主機	補機	主機	
電圧形インバータ	TRS	<ul style="list-style-type: none"> 構成が簡単 電流は正弦波 出力周波数高い。 	<ul style="list-style-type: none"> TRS容量が小さい。 高圧にできない。 	●小・中容量に最適	◎	◎	—	◎	—	◎
	GTO	<ul style="list-style-type: none"> 高圧・大電流可能 電流は正弦波 出力周波数高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 効率が悪い。 高価である。 	●中・大容量	○	○	○	○	○	○
電流形インバータ	サイリスタ	<ul style="list-style-type: none"> 出力周波数高い。 回生制動容易 	<ul style="list-style-type: none"> 電流は方形波又は階段波 トルク脈動あり。 強制転流回路を要する。 	<ul style="list-style-type: none"> 中・大容量 比較的高速回転機 	○	○	—	○	—	○
サイクロコンバータ	サイリスタ	<ul style="list-style-type: none"> 高圧・大電流最適 電流は正弦波 トルク脈動少ない。 	<ul style="list-style-type: none"> 出力周波数に上限あり。 電源力率が悪い。 	●低速・大容量に最適	—	—	◎	—	◎	—

注：略語説明など TRS(トランジスタ), GTO(Gate Turn Off サイリスタ)
◎;最適, ○;適, —;不適

接続技術の進歩によって400 kVA若しくはそれ以上の中容量に適用拡大されてきている。

一方、GTOインバータは、高耐圧、大容量のGTO素子が開発されてきたので、中・大容量機に適用される。

(2) 電流形インバータ

電流形インバータは、出力周波数に応じたスイッチングのため高速スイッチングを必要としないサイリスタ素子が使用される。この方式は、電流波形が方形波となりトルク脈動が大きく、これが問題となる場合には、12相整流などの多重化及び低速領域でのPWM制御の並用などを行い、トルク脈動低減を図る必要がある。したがって、容量が比較的大きな中・大容量機でトルク脈動があまり問題とならない用途(例えば、ファンなどの用途)に適用される。

(3) サイクロコンバータ

サイクロコンバータは、他励式サイリスタ変換器で良好な正弦波を出力し、低トルク脈動を実現できる。一方、サイクロコンバータの出力周波数には制限があり、72アーム無循環電流方式で約20/24 Hz(at電源50/60 Hz)、72アーム循環電流方式では約40/48 Hz(at電源50/60 Hz)まで可能で、主機用低速・大容量機に適用される。この方式は、電源力率がDC方式の静止レオナードに比べ劣るため、電源設備での力率改善に配慮が必要である。

3 電圧形インバータの制御技術

圧延補機駆動用としては、高性能が要求されるため、交流機を直流機のように駆動するためのベクトル制御付きパワートランジスタによる電圧形インバータが従来から適用されている。今回、2台のマイクロプロセッサを使用し、電流検出、PWMパルス出力をも含め全デジタル化、高性能化を図った

電圧形PWMインバータを新しく開発した。本装置は、マルチマイクロプロセッサによる制御回路をワンボードのプリント基板に搭載し、コンパクトなハードウェアで実現している。

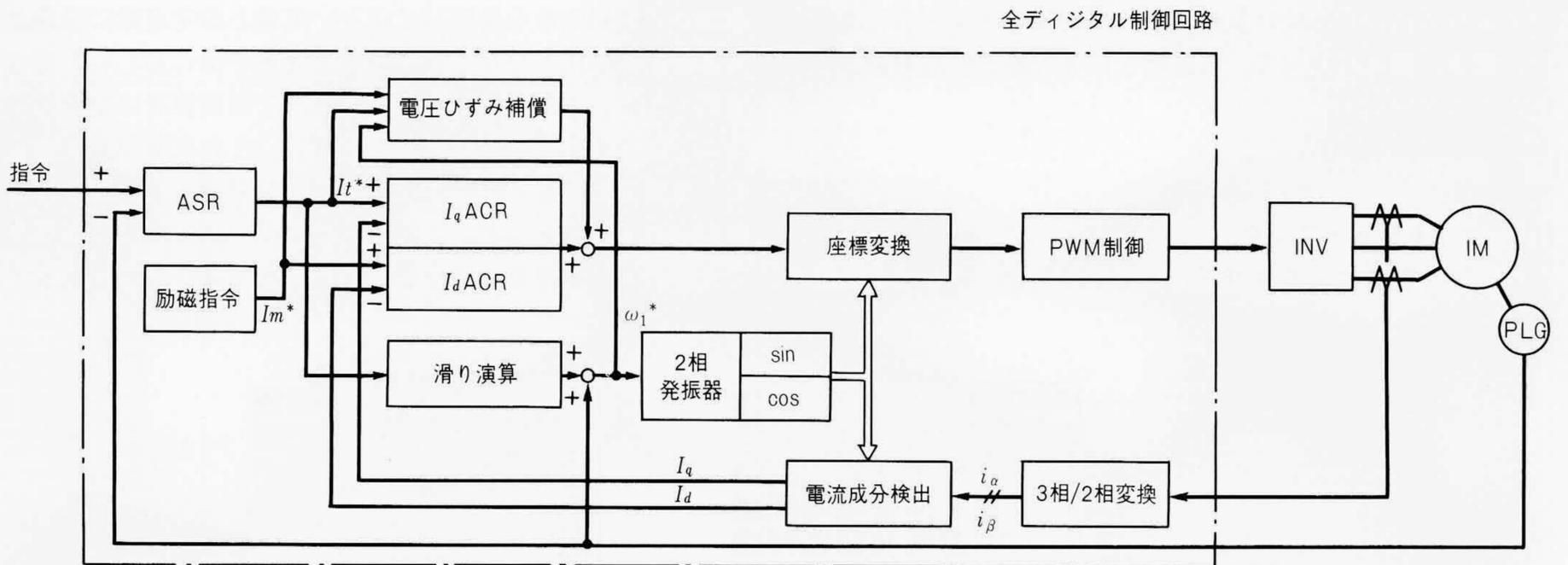
全デジタルのPWMインバータを実現するに当たり、採用した新技術を以下に述べる。

3.1 全デジタル化ベクトル制御

従来の制御方式(アナログ・デジタル並用方式)では、電動機電流の瞬時波形を直接制御していた。この回路は複雑なハード回路で構成されていたが、今回この部分も含めデジタル化を図った。従来回路をそのままデジタル化すると複数の高速プロセッサが必要となり、複雑・高価な制御回路となる。そこで、速度制御系の応答を左右する電動機トルクは、電流の大きさと位相によって制御されることに着目し、二つの成分(励磁及びトルク電流)を独立に高精度制御することによって電流の瞬時波形制御を不要とする新制御方式を開発した。図1に新制御方式の構成を示す。基本的な制御ループは、高精度の速度制御を行う速度制御ループ(ASR: Automatic Speed Regulator)、励磁電流とトルク電流成分に分離し独立に制御する電流制御ループ(I_d/I_q ACR: d 軸, q 軸成分電流 Automatic Current Regulator)、出力電圧ひずみを予測してフィードフォワード補償する電圧ひずみ補償部、及び座標変換された電圧指令に応じたパルス幅を演算し、PWMパルスを出力するパルス発生部から構成されている。これらを2台のマイクロプロセッサで機能分担し、1台は座標変換とPWMパルス出力を行い、他の1台は出力電圧ひずみ補償、電流及び速度制御を分担している。

3.2 高精度電流検出方法²⁾

全デジタルで高精度なベクトル制御が行えるようにするためには、インバータ出力電流の高調波に影響されず、制御



注：略語説明 ASR(Automatic Speed Regulator), I_d, I_q (d 軸, q 軸成分電流), ACR(Automatic Current Regulator), PWM(Pulse Width Modulation) IM(誘導電動機), INV(インバータ), PLG(Pulse Generator), I_t^* (トルク電流指令), I_m^* (励磁電流指令)

図1 電圧形PWMインバータの全デジタルベクトル制御構成図 指令からPWMパルス発生まで全デジタル化されている。

表2 電流検出デジタル化の問題点と対策 従来回路のデジタル化と新方式の回路構成及び検出電流ベクトルのシミュレーション結果を示す。

	検出回路構成	問題点と対策	検出電流ベクトル
従来回路のデジタル化	<p>(A-D変換) (デジタル演算)</p>	<p>(1) 検出信号リップル大 (2) 検出精度悪い(右図)。 (サンプリングによる検出) 位相遅れ</p> <p>↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 高速サンプル必要 ● 高速A-D, 高速プロセス必要 	
新方式によるデジタル化	<p>(A-D変換) (デジタル演算)</p>	<p>新電流ベクトル検出</p> <p>↓</p> <p>(1) 電流リップル影響除去 (リップル小) (2) 高精度電流検出</p>	

量である電流ベクトルの基本波成分を高精度に検出する必要がある。このため、表2に示すような問題点を解決し、同表に示す回路構成でデジタル演算化し、高精度化を図った。

新方式は電動機電流をサンプル周期ごとに積分して、インバータのPWM動作によって発生する有害な高調波を効果的に除去し、電流のベクトル成分を長いサンプル周期で高精度に分解検出することができる。

3.3 出力電圧ひずみ補償

インバータのパワーデバイスによる短絡防止を目的に、

PWMパルスのオンタイミングに時間遅れを設けているが、この影響でインバータ出力電圧波形が正弦波からひずむという問題がある。今回、この出力電圧ひずみを出力電流の空間ベクトルに基づいて予測し、電圧ひずみをフィードフォワード補償する方式を開発し、トルク脈動の防止と高精度速度制御を実現した。図2にインバータの出力電流波形に対するひずみ補償効果を示す。

3.4 運転特性

図3に4象限運転特性を示す。0～Top 3秒の急速加減速

がスムーズに行われている。図4に速度のステップ応答を示す。図3, 図4によって、直流機と同等の制御性能を持っていることが分かる。

4 制御装置の高機能化

4.1 オートチューニング

ベクトル制御による誘導電動機制御の場合、電動機定数に

基づいて制御定数を設定している。実機と設定定数に差異があると特性悪化となり、その調整は複雑で煩わしいという問題がある。これらの解決手段として、制御装置に定数測定機能を持たせ、定数の自動測定を行い、これに基づき制御定数を自動設定するオートチューニング機能⁴⁾がある。図5に自動測定のフローを示す。このオートチューニングには高精度で大量のソフト演算処理が必要のため、マイクロプロセッサ

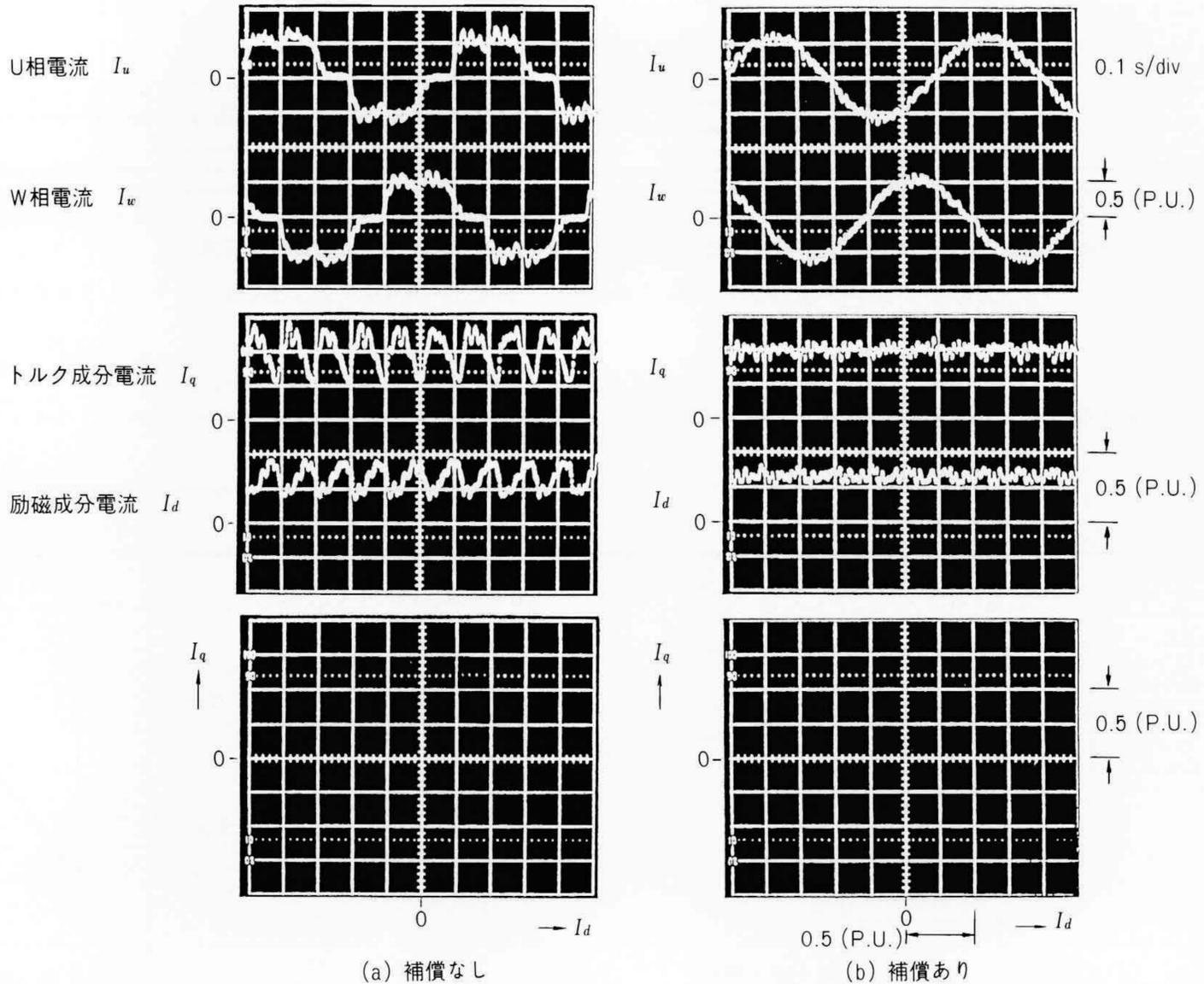


図2 出力電圧ひずみフィードフォワード補償の効果 出力電圧ひずみ補償なしの場合(a)と、ありの場合(b)のインバータ出力電流及びベクトル成分電流検出波形を示す。

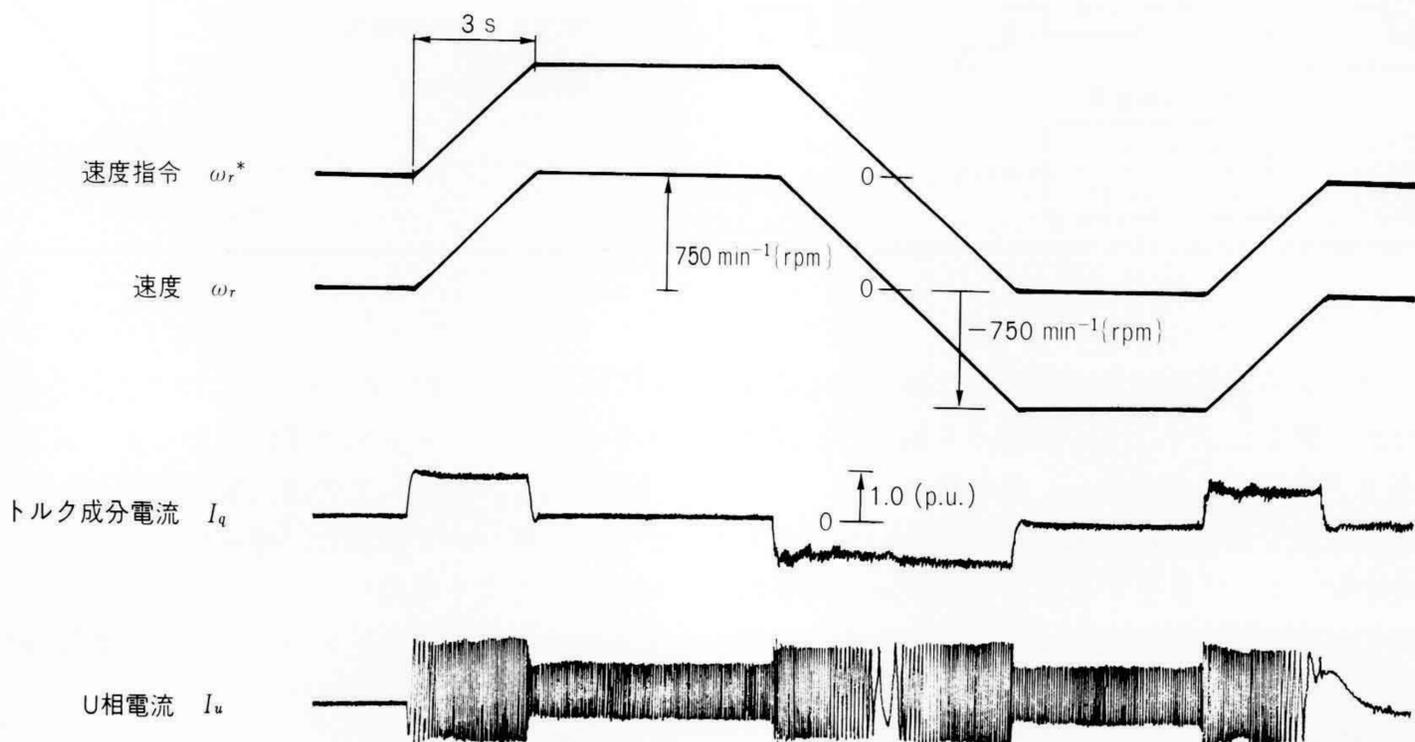


図3 4象限運転特性 0~Top 3秒の急速加減速がスムーズに行われている。

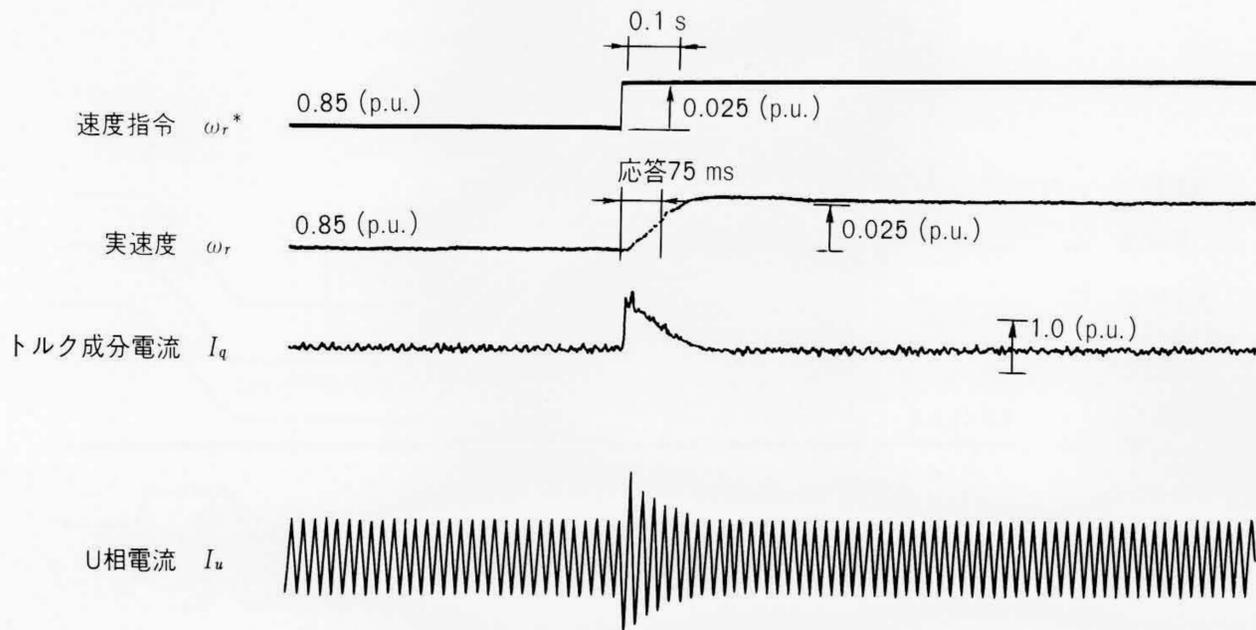


図4 速度のステップ応答 全デジタル制御によって、DCドライブシステムと同等の制御性能を実現している。

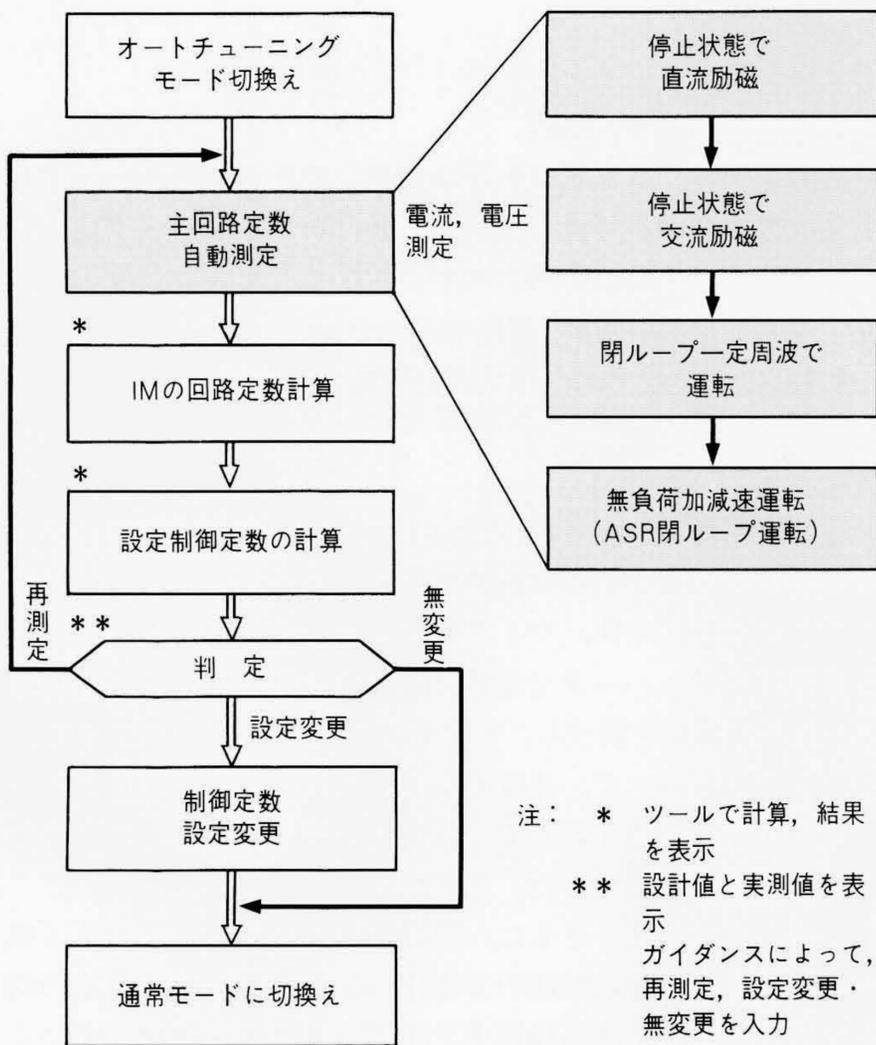


図5 オートチューニングのフローチャート 電動機定数を自動測定することによって、制御定数を自動設定する。

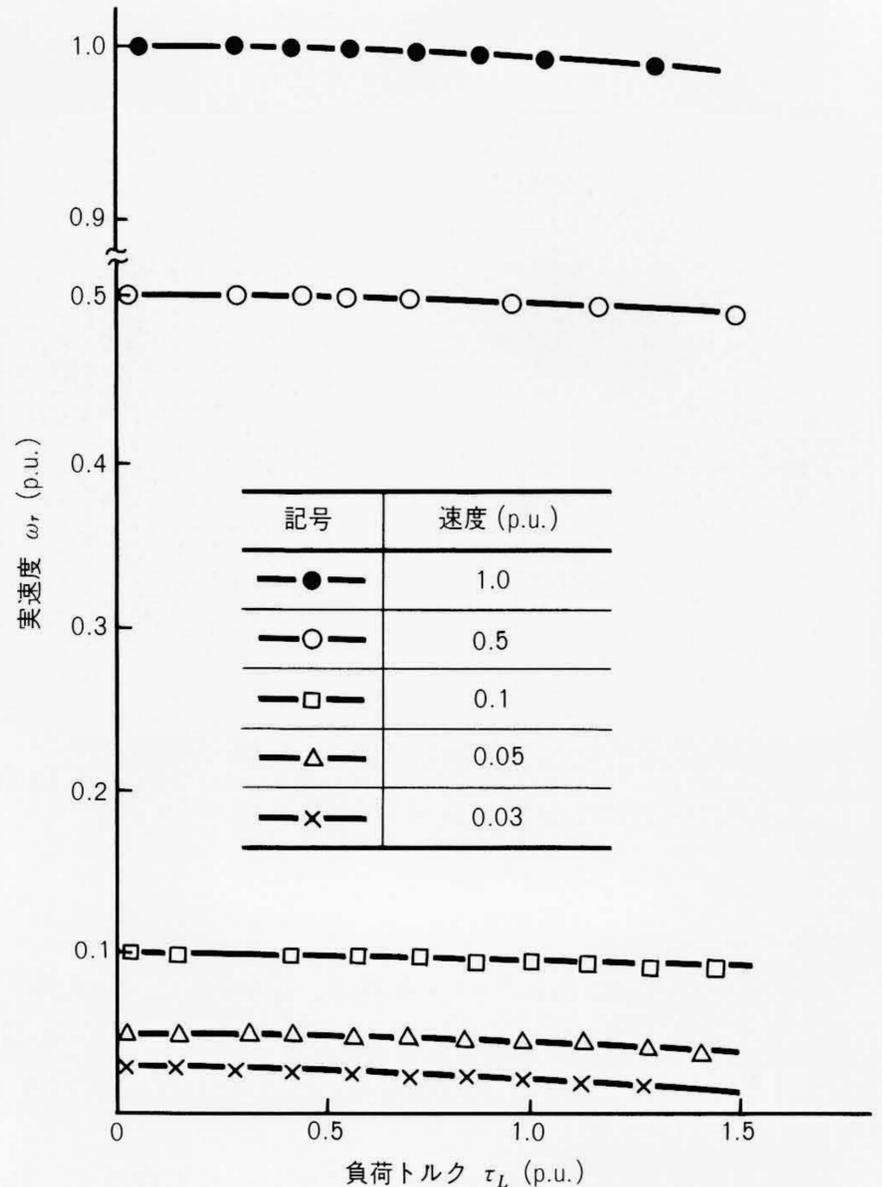


図6 速度センサレス方式の速度制御特性 速度対トルク特性の実測結果を示す。

による全デジタル化及びマンマシンツールのインテリジェント化によって、実機適用が可能となった。

4.2 速度センサレス³⁾

滑り周波数制御形ベクトル制御では、電動機に高精度速度センサを取り付けることが不可欠であった。しかし、プロセッシングラインのように小容量の誘導電動機を多数使用するシステムでは、信頼性及びコスト面から速度センサレスのニーズがあった。今回、速度センサレスベクトル制御方式を開発した。本装置のハードウェア回路は速度センサ付きと同一

であり、ソフトウェア(ROM: Read Only Memory)プログラムだけ変えている。図6に速度対トルク特性の実測結果を示す。低速から定格速度までの範囲で、速度は指令に対してほぼ一定に制御され、速度制御精度は±1%以内である。図7に正逆転加減速特性を示す。起動時から正逆転全範囲で、加速及び減速が円滑に行われている。

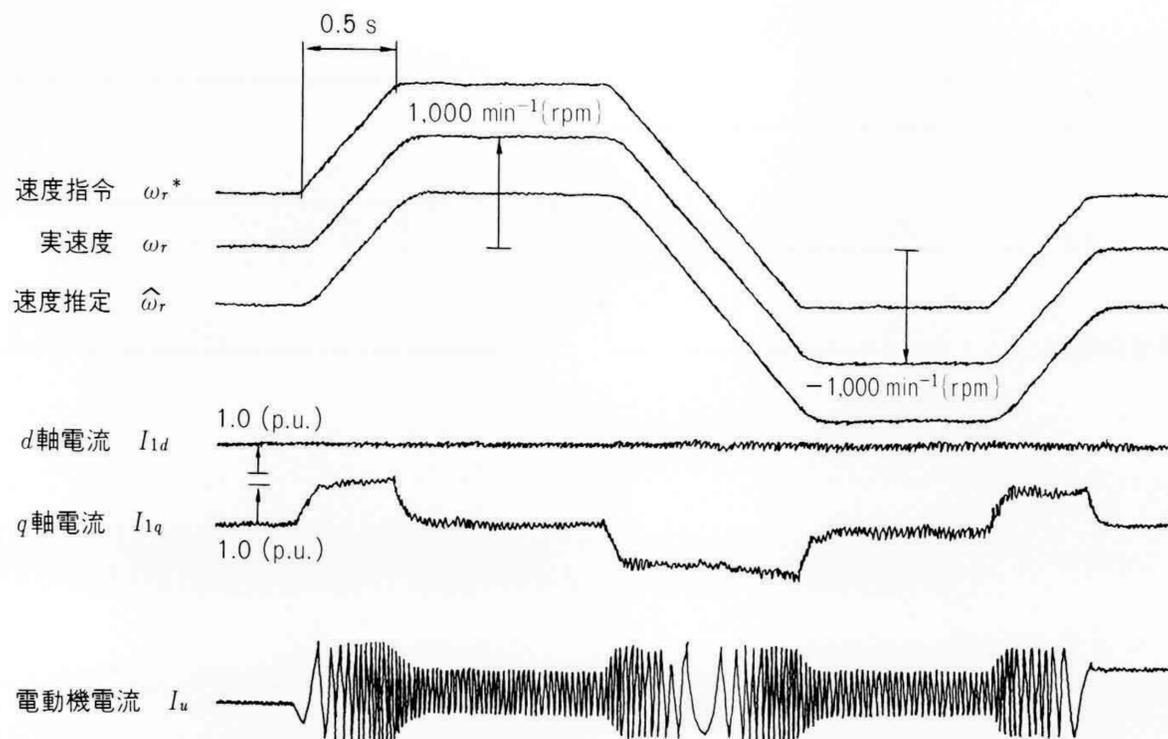


図7 速度センサレス方式の正逆転加減速特性 起動から正逆転全範囲にわたって、加減速が円滑に行われている。

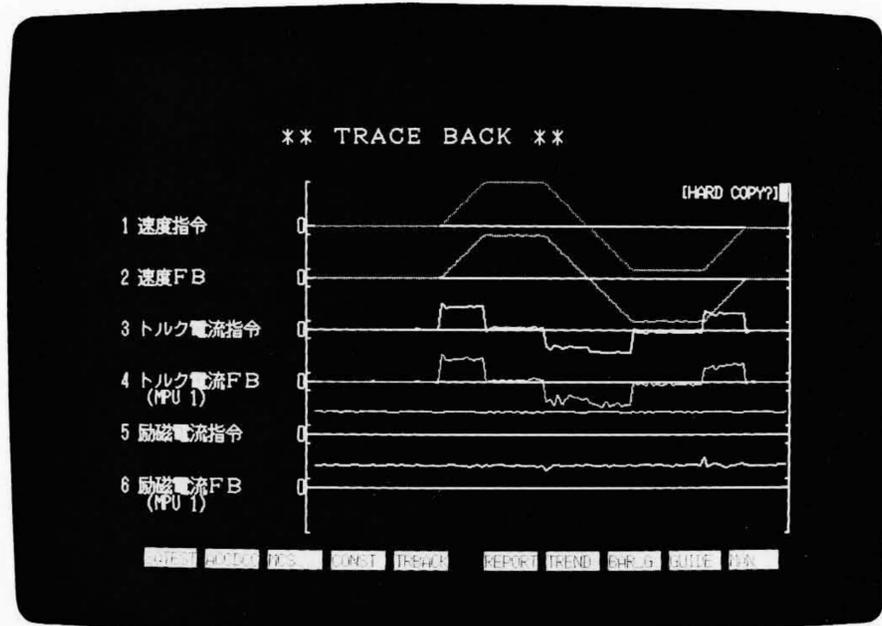


図8 メンテナンスツールによる波形出力 トレースバック機能で運転状態を出力した波形を示す。

これらから、速度センサレス方式は、速度制御精度に関しては速度センサ付き(精度 $\pm 0.05\%$)に比較して劣るが、応答性に関しては速度センサ付きと同等の加減速特性が得られる。

4.3 メンテナンスツール

メンテナンスツールでもマイクロプロセッサを搭載し、次に述べるような機能を持たせ使い勝手の向上を図っている。

(1) 単独手動運転

ツールから制御装置単独で運転・調整ができる機能(例:ステップ応答測定)

(2) 制御定数の設定

制御装置内に持っている各種制御定数を書き替える機能(ブロック図表示による設定も可能)

(3) 運転状態の監視

速度・電流などの運転状態をバーグラフ表示やブロック図表示で監視する機能

(4) トレースバック機能

故障発生時、運転状態の各種信号を波形としてトレンド表示又は数値表示が可能である。図8にトレースバック機能で運転状態を出力させた例を示す。

(5) 電動機定数の自動測定

4.1節のオートチューニングを行わせる機能

5 結 言

圧延機用AC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プロセッサ技術の進歩とともに急速に適用拡大してきている。今回、マイクロプロセッサ応用によって、小容量電圧形インバータで電流検出方法やPWMパルス出力方法の技術的課題を解決し、全デジタル化を実現した。また、オートチューニング、速度センサレス技術を確立することができ、保守・調整が容易で、かつ使い勝手を考慮したドライブシステムを実現できた。

今後、高性能化とともに、保守性の大幅改善、システム構成の容易さなど付加機能の多様化にこたえるべく、技術の向上を図り高品質、高信頼性ドライブシステムを提供していく考えである。

参考文献

- 1) 佐藤, 外: 圧延機用ACドライブシステム, 日立評論, 68, 8, 619~624(昭61-8)
- 2) T. Matsui, et al.: A High Accuracy Current Component Detection Method For Fully Digital Vector-Controlled PWM, VSI-FED AC Drives, PESC '88, VB-6(1988)
- 3) 奥山, 外: 誘導電動機の世界・電圧センサレス・ベクトル制御法, 電気学会論文誌D, 107, 2, 191~198(昭62-2)
- 4) 藤本, 外: ベクトル制御のオートチューニング, 回転機研究会, RM-85-26, p.61~70(1985)
- 5) 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)