

最近の電動機デジタル制御

Recent Microprocessor-Based Control for Motor Drives

マイクロプロセッサを用いたパワーエレクトロニクス駆動電動機的全デジタル速度制御装置の実用化は、製鉄プラントを中心に、高精度・高性能化、信頼性向上などのニーズを背景として進歩発展してきた。

日立製作所は、昭和56年10月世界に先駆け全デジタル速度制御装置を実用化して以来、コールドタンデムミル、ホットタンデムミル、プロセッシングラインなど、製鉄プラント全体に多数の納入実績をもち、プラント操業効率の向上、製品品質及び歩留まり向上に大きく貢献している。

本論文では、製鉄プラントにデジタル化駆動システムを適用した場合の効果を中心に述べるとともに、更に、高性能化・高信頼化を目的とした新制御アルゴリズム、光ケーブル化による新リンケージシステム、交流可変速装置のデジタル化など新しい特徴的技術について述べる。

鮎川 隆* *Takashi Sukegawa*

宮原養治侶* *Youjirô Miyahara*

河野行弘* *Yukihiro Kawano*

飛世正博* *Masahiro Tobise*

松井孝行** *Takayuki Matsui*

1 緒 言

近年の製鉄業や製紙業のプラント操業の全自動化は、操業の安全性、歩留まり向上、製品品質の向上、監視機能の充実、保守性向上などをねらった各機器のデジタル化により急速に進歩している。プラントの全デジタル化を推進する上で、電動機的全デジタル速度制御装置も例外でなく、日立製作所では世界に先駆けて全デジタル速度制御装置を実用化し、1号機を昭和56年10月に稼動させた。マイクロプロセッサを用いたこれらの装置は、既に300セット以上稼動しており、新設設備及びリプレース設備共にデジタル化の特徴を十分に発揮し、プラント操業に多大な貢献をしている^{1)~3)}。また、交流可変速用でも既に開発が完了し、実用化の段階に入っている。

以下、ここではプラント操業に貢献している電動機的全デジタル制御装置の効果と、サイリスタレオナード及び交流可変速装置での高性能化、保守性の向上などを実現する新制御方式、自動チューニングなどについて述べる。

2 背景と対応技術

2.1 背 景

製鉄業や製紙業などのプラントでの電動機の可変速制御システムは、プラント操業の原動力であり製品を左右する重要なポイントに位置づけられている。この中でも複数台の可変速制御システムを用いて製品を生産するプラントでは、個々の精度及び応答も重要であるが、それ以上に複数台間の速度協調をとることが操業効率を向上させ、かつ歩留まり向上や製品品質向上などに直接寄与するため、極めて重要である。この観点に立ち従来から種々改善が行われてきており、日立製作所はプラント操業の向上により貢献できる高性能な可変速制御システムの開発及び実用化を推進している。

2.2 対応技術

アナログ速度制御装置に応答性で劣ることなく、経済的にメリットが出てかつアナログ速度制御装置で困難とされていた高精度や故障診断などの高機能なデジタル速度制御装置の実用化⁴⁾により、表1³⁾に示す高精度を達成し、後述する製

品品質や経済性などに大きな効果を出している。この中でも、プラント設備の主機部分を更新することなく制御部分だけを設備更新するリプレース設備でも同様の効果の出るデジタル化技術を確立した。

3 全デジタル制御システムの効果

図1に、タンデムミルでのプラント操業上の要望事項と、それを達成したデジタル速度制御装置の性能と効果を示す。特に、製鉄所でのタンデム圧延プラントでは、(1)通板時の板切れ回数の減少や通板時間の減少、一気加速運転での加速時間の減少などによる操業効率向上、(2)通板時のオフゲージ長の減少や極低速運転での板表面きずチェックなどによる歩留まり向上や製品品質の向上、(3)ドリフト調整不要や故障検出・監視向上によるダウンタイムの減少などによる保守・点検向上というように、要望事項を大幅に達成した全デジタル制御システムは、同図に示すように十分満足できる効果を挙げている。その中でも、タンデム圧延機で注目されているレオナード装置のせん速性が向上したため、レオナード装置からAGC(自動板厚制御)に与える外乱が減少しており、図2はその外乱の少なさを示すもので、AGCやATC(自動張力制御)が「切」状態でも加減速時のスタンド間張力が非常に安定していることがよく分かる。

図3は、デジタルレオナード装置のせん速性の良さを表わす運転オシログラムである。加減速時でもスタンド間の速度偏差が±0.1%以下という良好な運転を行なっている。

表1 アナログ制御とデジタル制御の性能比較 アナログ制御とデジタル制御の主な性能比較(実測値)を示す。

項 目		アナログ制御	デジタル制御
速度 検出器 誤 差	100%速度時	±0.3%	±0.014%
	1%速度時	±0.3%	±0.0088%
総 合 精 度		±0.7%	±0.02%

注：パーセントは、定格値に対する値である。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立研究所

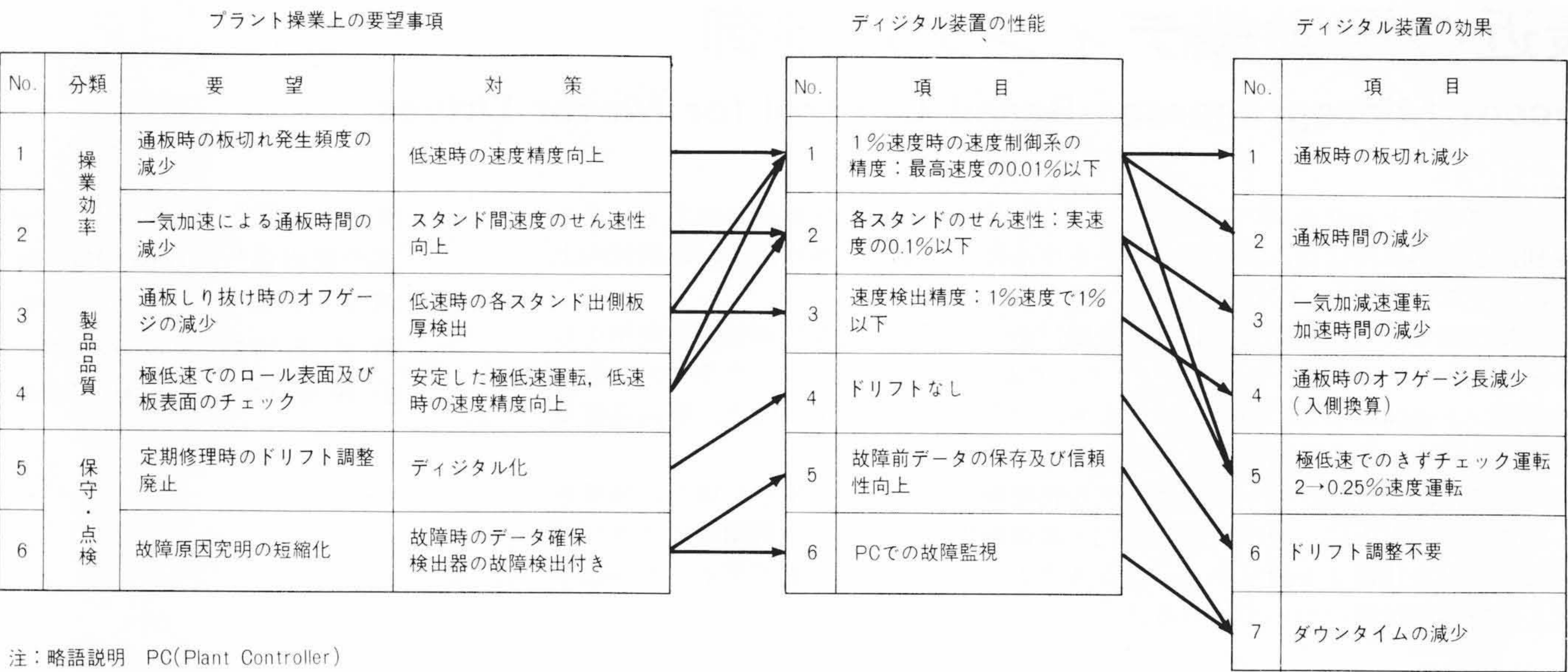
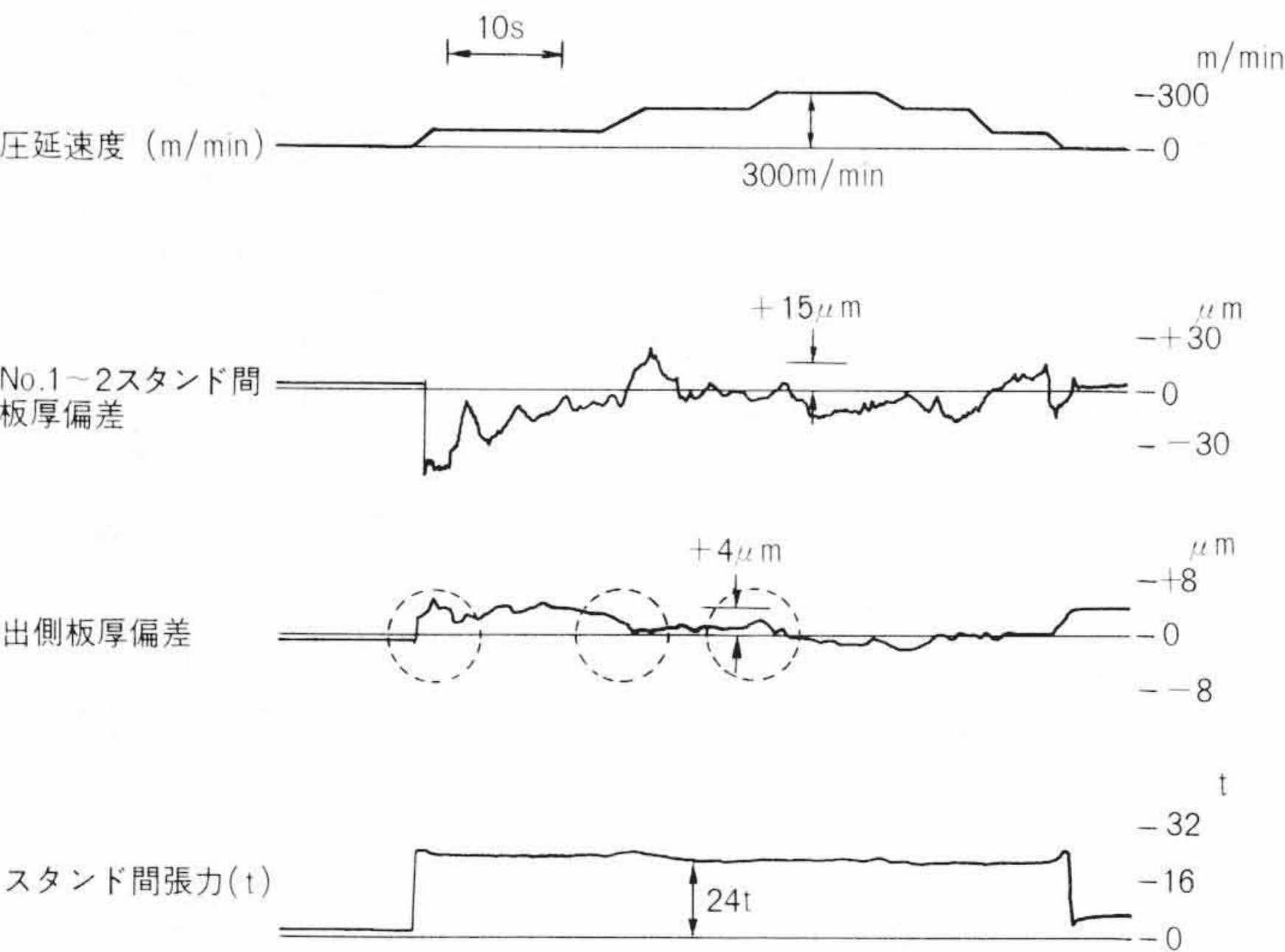


図1 デジタル速度制御装置の効果 タンデムコールドミルでのプラント操作上の要望事項と、デジタル装置化したときの主な効果例を示す。

以上に示すデジタル化技術は新設設備だけでなくリプレース設備にも十分対応でき、これについてもデジタル化技術を確立した。図4は、リプレース設備でのM-G(電動発電機)方式を全デジタル化した装置の構成図と運転オシログラムの一例を比較したものである。デジタルレオナード装置を適用した運転オシログラム例では、AGC「切」で加速過程での板厚変動が少なく良好な結果が得られている。

これらのことをコールドタンデムミルの一般的性質から考察すると、あるスタンドの速度偏差が出側板厚に与える影響は、特にNo.1スタンド及び最終スタンドが大きく、その速度



圧延条件		
1	バックアップロール	ローラベアリング
2	入側板厚	2.8mm
3	出側板厚	0.8mm
4	板 幅	1,005mm
5	AGC(自動板厚制御)	切
6	ATR(自動張力制御)	切
7	圧 下	定位(手動介入なし)

図2 デジタル速度制御装置のせん速性(I) 板厚制御、張力制御共に「切」状態での張力の安定性を示す。

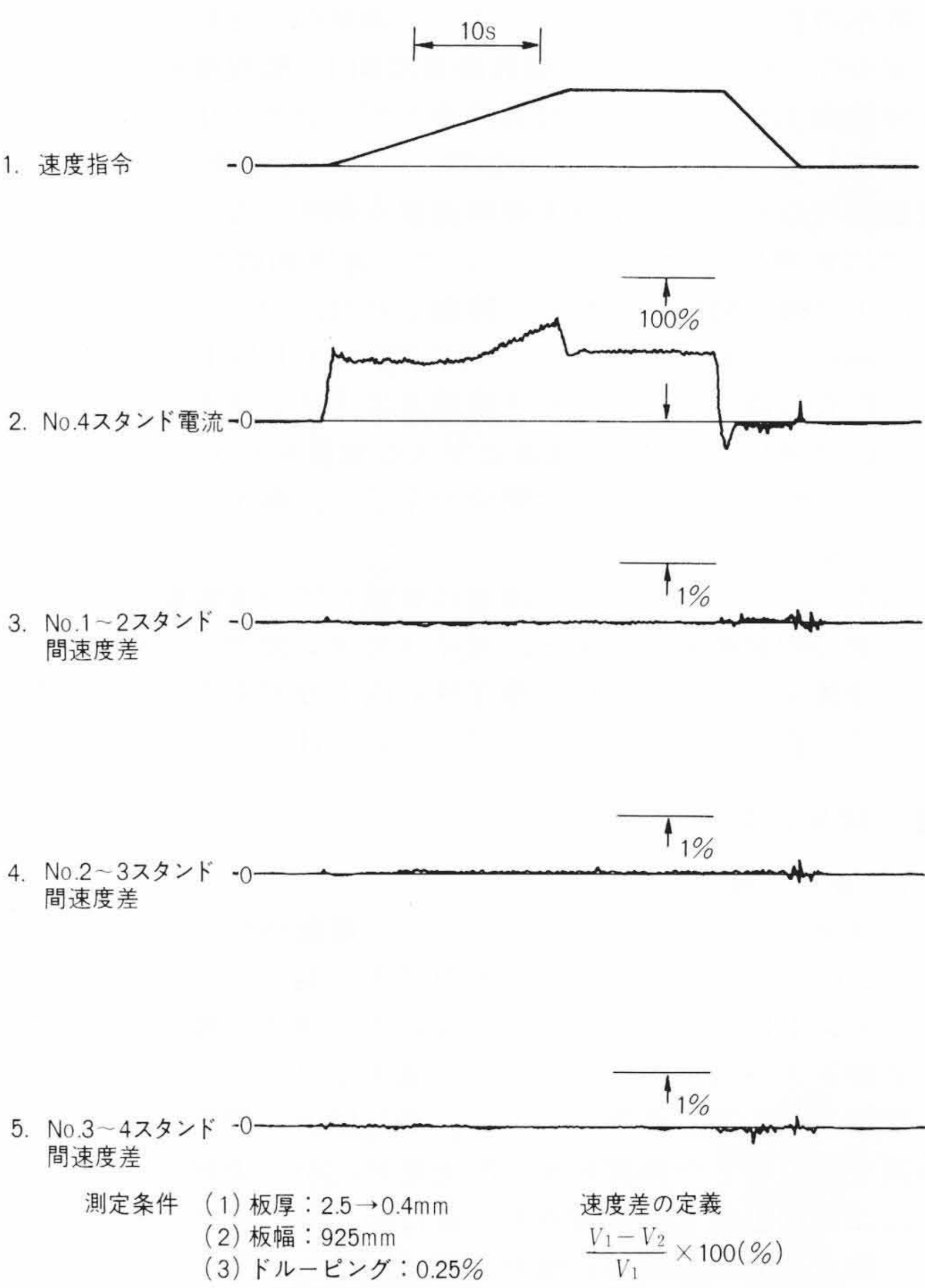


図3 デジタル速度制御装置のせん速性(2) 4 タンデムコールドミルの実圧延のせん速データを示す。

偏差率が出側板厚偏差率となって現われるので、速度偏差率を低減することが直接製品品質の向上となる。したがって、ミル加減速時で前記スタンドの速度偏差が、表1及び図1に示すように、アナログ方式で±0.7%、デジタル方式で±0.1%であるので、ミル出側板厚偏差はおよそ40%改善されることを示しており、大幅な歩留まりの向上が可能となった³⁾。

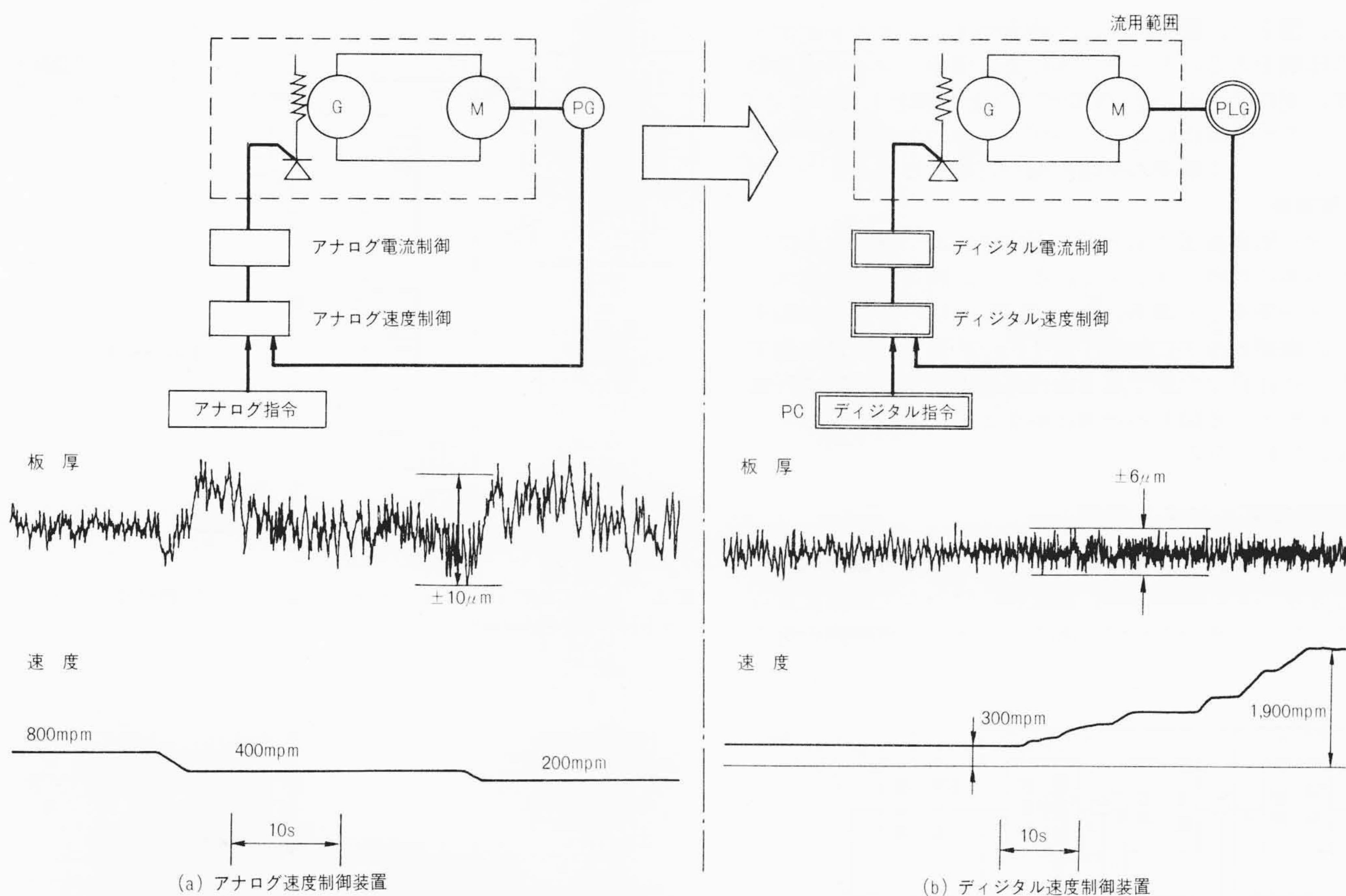


図4 M-G方式のデジタル速度制御装置適用例 M-G(電動発電機)方式のアナログ速度制御装置をデジタル化した適用例と運転オシログラムを示す。

4 新制御方式

全デジタル化レオナード装置は、既に300セット以上の稼働実績があり、これらの装置は前章で示すように、プラント操業の要望事項を十分満足しており、各サイトで良好な運転を続けている。これらを支える数々のデジタル化技術(電流制御技術、高精度・高応答速度検出技術、故障診断技術など)については、既に公表⁴⁾しているもので、ここでは、更に高性能化した新制御方式について述べる。

4.1 新電流制御方式

速度制御系の高応答化を実現するためには、トルク発生時の制御系、すなわち電流制御系の高応答化を実現する必要がある。一般に、サンプリング制御系ではサンプリングピッチを短縮すれば高応答化が可能であるが、その反面、装置の価格

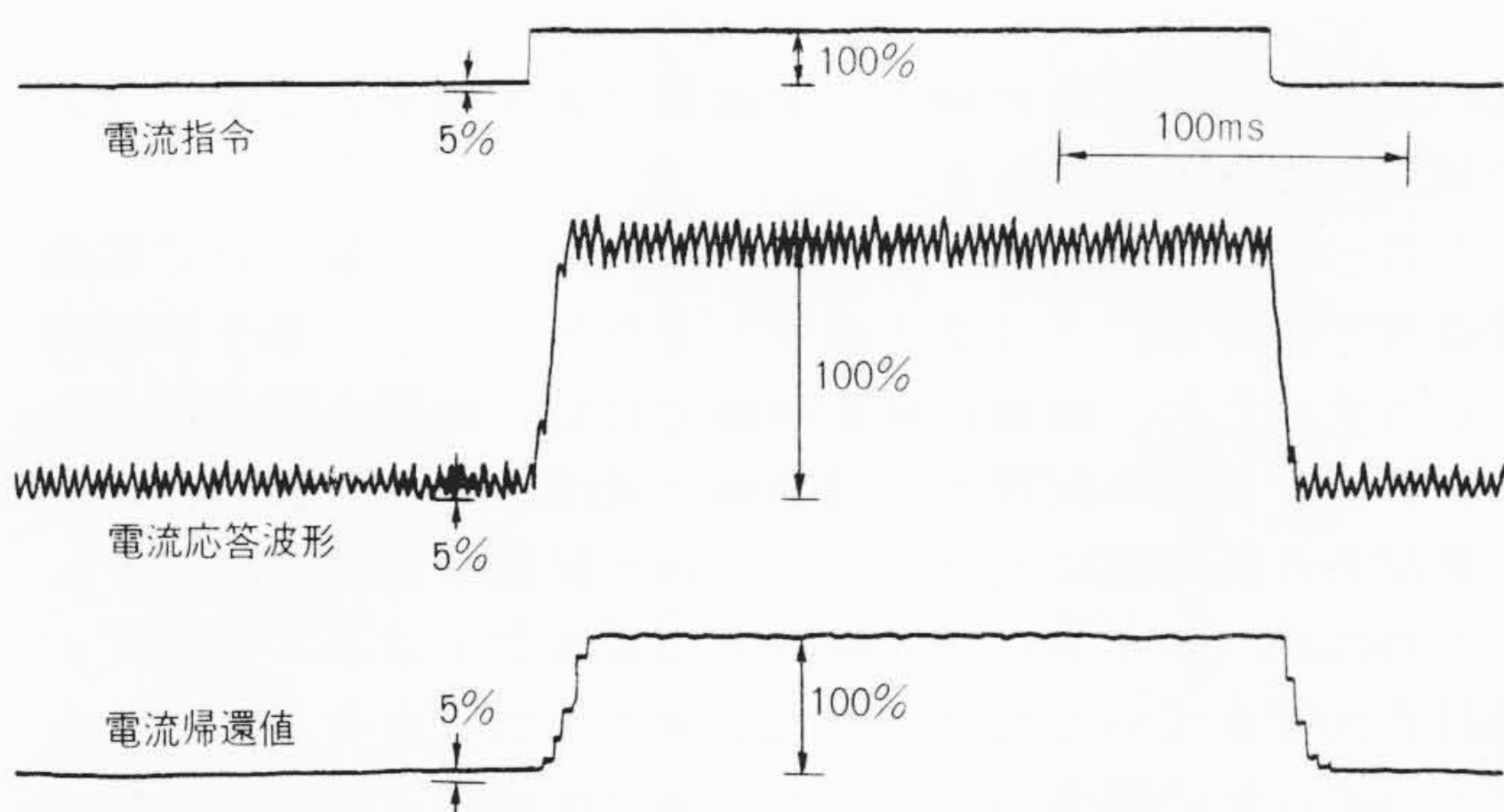


図5 電流ステップ応答波形例 新電流制御方式を用いた電流ステップ応答オシログラムを示す。

が上昇するという欠点がある。そこで新電流制御方式では、このサンプリングピッチを短縮することなく高応答化を実現する新制御アルゴリズムを開発し、従来方式の約2倍の応答遮断角周波数を達成した。図5は、高応答化を達成した電流ステップ応答波形例で、オーバシュートのない安定な応答波形である。

この新制御方式のアルゴリズムは、点弧パルス発生ごとに行なわれる電流制御処理に、サンプリングむだ時間を減少させる補償処理を付加したものである。サンプリングむだ時間を減少させることにより、制御系の位相余裕が確保しやすくなり高応答を達成できる。図6はデジタルレオナード装置の制御ブロック図で、点弧パルス発生時点から補償処理、電流制御、電流変化率制御の演算処理を行なう。

4.2 新速度制御方式

4.1と同様に、速度制御系でもサンプリングピッチを短縮させることなく高応答化を実現した新速度制御方式を開発した。図7は従来の約2倍の高応答化を達成した速度ステップ応答オシログラムである。

新速度制御方式は、制御系の位相余裕を確保しやすくするために従来の一定周期サンプリング方式にサンプリングむだ時間を消去する予測演算を付加したものの(図6の予測演算部)である。なお、4.1~4.2に示す高応答を実現するためには従来以上のフォーシング電圧を必要とすることや、電動機の整流耐量が十分あることが条件となる。

4.3 信号リンケージ

図8は上位PC(Plant Controller)とデジタルレオナード装置との接続構成を示したもので、情報は光ケーブルを用いたシリアル伝送を採用し、かつ本シリアル伝送信号はマルチドロップ方式により最大4台までのレオナード装置に接続可

能である。図9は、図8に示した構成のデジタルレオナード装置の外観である。光ケーブルによる信号リンクは耐ノイズ性に優れているので、専用ダクトを必要としないこと、また、シリアル伝送化によるケーブル本数の大幅削減ができることによって、工事費の大幅削減が可能となった。

4.4 故障診断

デジタル制御装置の故障診断機能⁴⁾により種々のトラブル要因が容易に判明できるようになった。例えば、過電流・過負荷などが発生した場合、(1)上位PCからの指令に起因するもの、(2)負荷トルクに起因するもの、(3)制御装置に起因するものなどに容易に分離できるため原因追求が短時間で可能となり、結果として図1の効果に示すように平均ダウンタイムを大幅に短縮できる。

5 交流機のデジタル制御

最近、高性能交流可変速制御方式として、直流機と同等の速応性をもつベクトル制御が、直流機に代わる交流可変速方式としてしだいに適用されつつある⁵⁾。これは、誘導機の保守

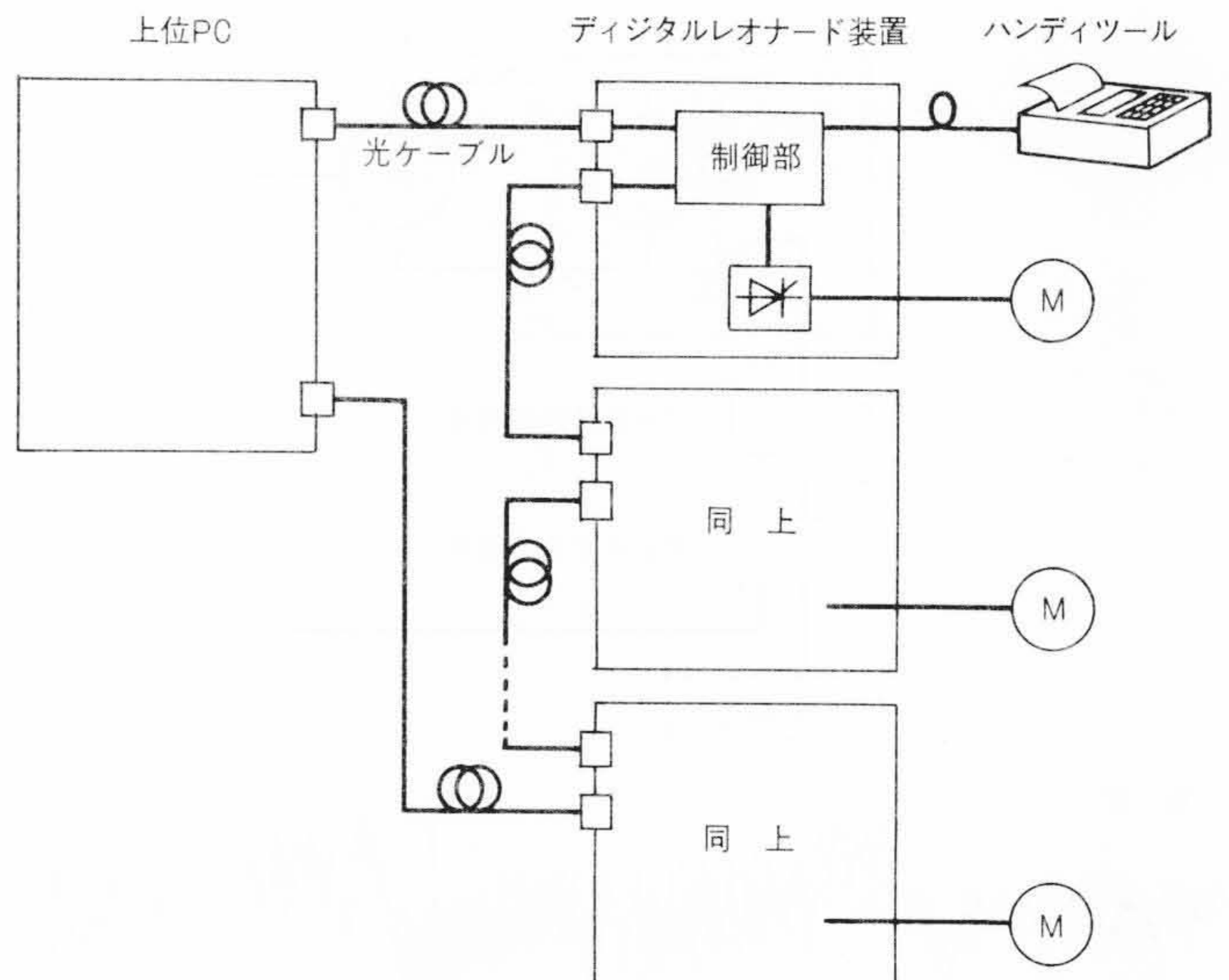


図8 上位PC-デジタルレオナード装置との接続構成 光ケーブルを用いた接続構成例を示す。

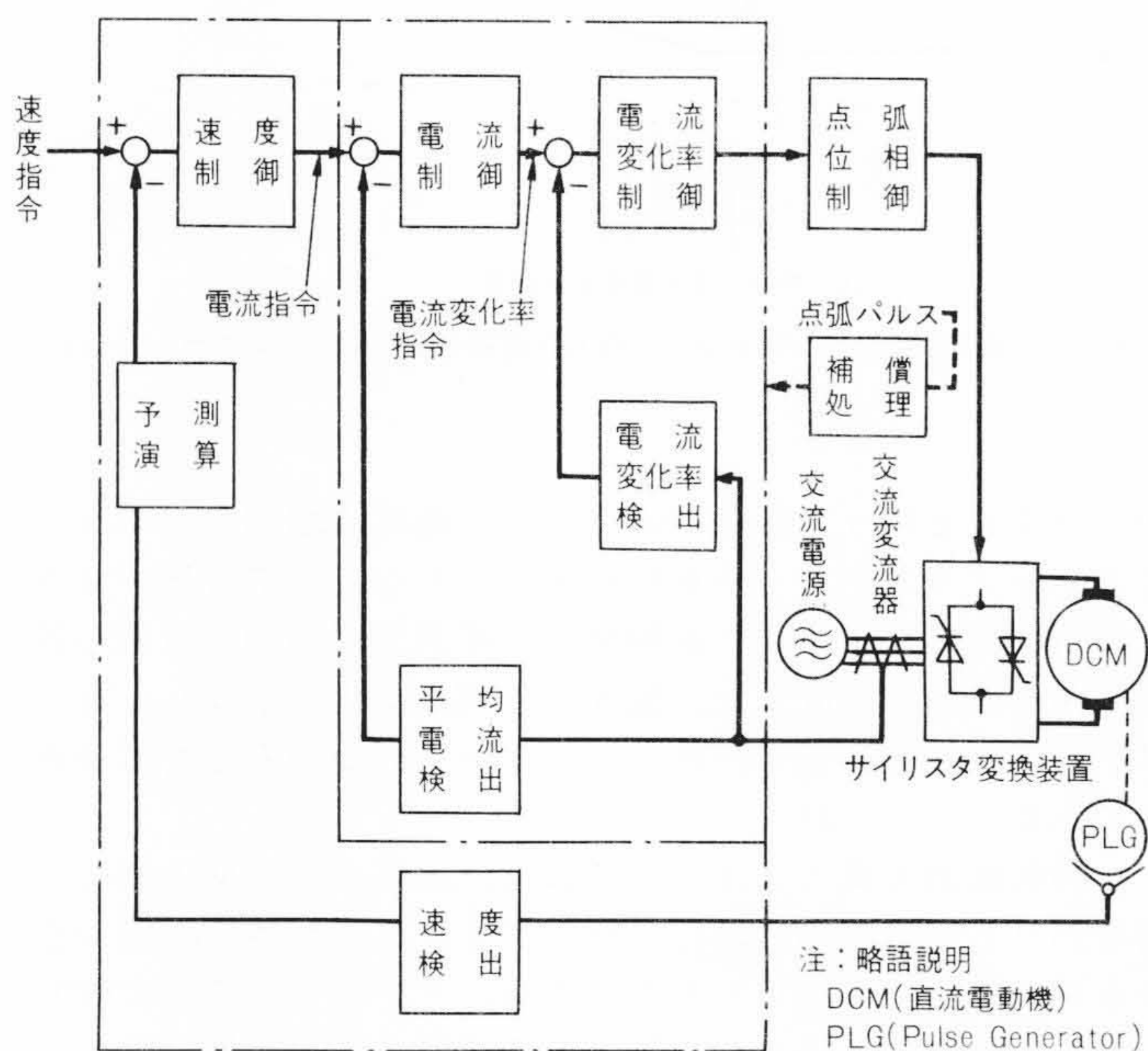


図6 デジタルレオナード装置の制御ブロック図 新制御アルゴリズムを付加した制御ブロック図を示す。

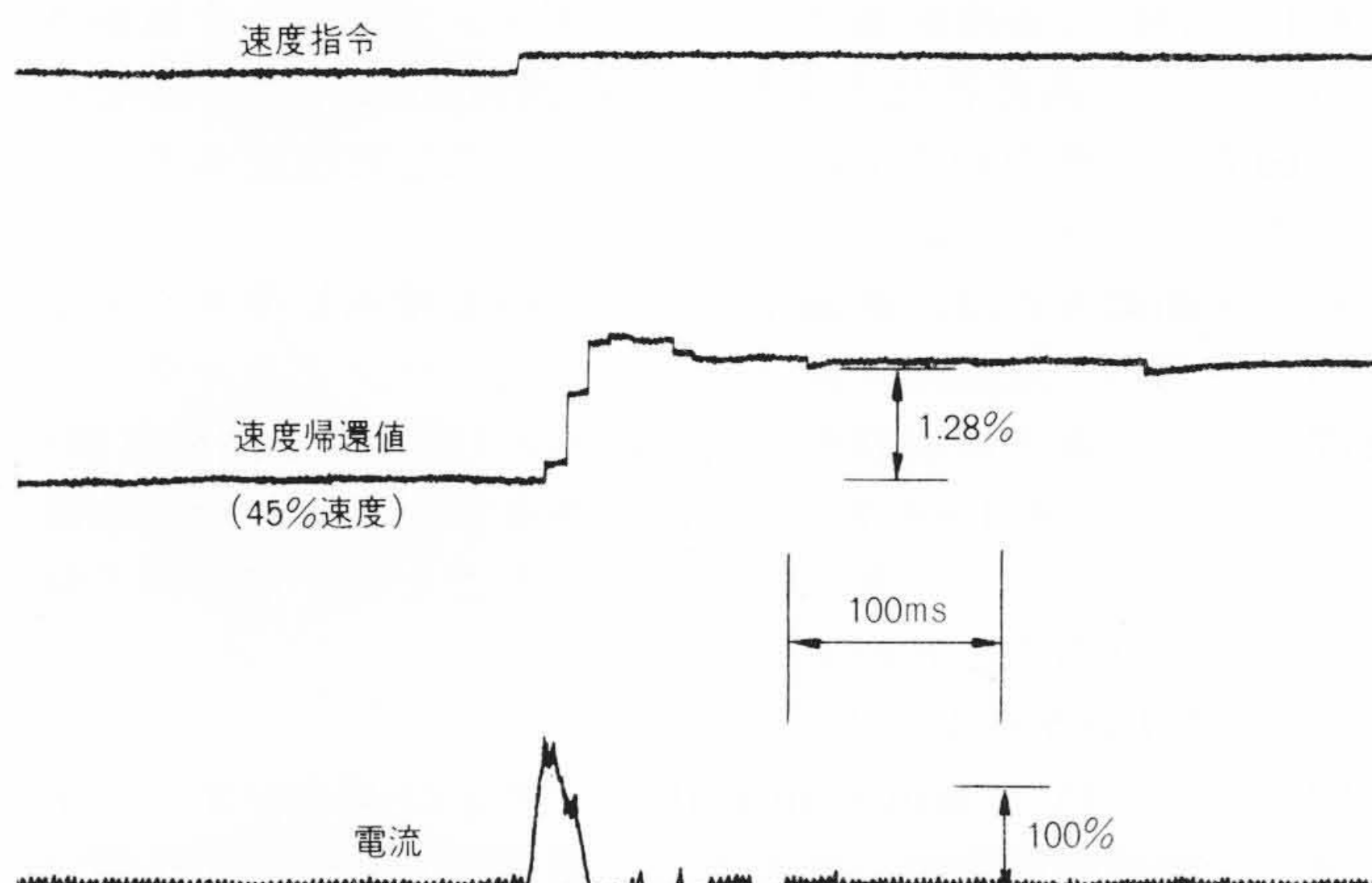


図7 速度ステップ応答波形例 新速度制御方式を用いた速度ステップ応答オシログラムを示す。



図9 デジタルレオナード装置の外観 図8に示した構成のデジタルレオナード装置の外観である(盤高さ寸法:2,300mm)。

性の良さ、耐環境性の強さ、直流機に比べ軽量になる、などの利点によるものである。

このベクトル制御は、電動機の制御モデルに基づいて電動機磁束を推定し、トルクと磁束を各指令に応じて非干渉制御する方式のため、制御回路が複雑で調整に時間を要するなどメンテナンス性の問題と、誘導機に速度センサを取り付ける必要があり汎用性に欠けているという問題があった。

このため、マイクロプロセッサによるデジタル制御化が検討されてきていた⁶⁾。ここでは、マイクロプロセッサによるデジタル化の特徴の一つである高付加機能を容易に追加できる利点を応用した例として、自動チューニング機能付きデジタルベクトル制御と、圧延主機駆動機などの大形交流可

変速システムに適用される全デジタルサイクロコンバータ方式ベクトル制御について述べる。

5.1 自動チューニング機能付きベクトル制御

自動チューニング機能付き速度センサレスベクトル制御の制御構成を図10に示す。これは、保守性の向上、汎用電動機のベクトル制御による可変速化、電動機周りの信頼性・耐環境性の向上などを目的に開発された。

自動チューニングは、インバータを電動機定数観測器として機能させ、測定結果に基づいて制御定数を自動設定させるものであり、この方式により調整が不要となる。また、速度センサレスベクトル制御は、誘導機に速度センサを取り付ける必要がなく、センサのトラブルから解放されるなどの特長がある。

図11に、自動チューニングのフローチャートを示す。同図の自動測定1では、停止状態でインバータから電動機に電流を流し、そのときの検出電圧及び通電電流から誘導機の一次及び二次の抵抗と漏れインダクタンス(r_1+r_2 , l_1+l_2)を測定し、ベクトル制御が行なえる条件を設定する。次に、無負荷運転を行ない自動測定2で、励磁インダクタンス M と電動機二次時定数 T_2 を測定し、更に加減速を行ない慣性モーメント J を測定する。これらの測定値から速度制御系の定数を自動設定する方法となっている。

速度センサレスベクトル制御は、電動機電圧から基本波成分を検出し、回転速度を演算検出する方式のため、速度センサが不要となる。また、電動機の誘導起電力を位相基準として、励磁電流とトルク電流を独立に制御する電圧基準新ベクトル制御方式の採用により、速度センサを用いない V/f 制御方式と比較して高応答の速度制御が行なえる。

図12(a)は、自動チューニング後、速度センサレス方式で加減速させた例を、同図(b)は、速度ステップ応答特性を示す。いずれも速度センサ付きベクトル制御と同様の応答特性が得られていることが分かる。なお、同方式で速度精度 $\pm 1\%$ (速度範囲1:10)が確認されている。

自動チューニング付き速度センサレス方式では、(1)既設電動機の可変速化が容易、(2)速度センサ取付けが困難な用途でも、ベクトル制御による可変速化が可能、(3)容量、回転数の異なる電動機でも切り換えが容易(調整不要)などの特長があり、今後自動チューニング機能付きベクトル制御の適用拡大が期待される。

5.2 圧延主機駆動機の交流機化

圧延主機駆動用電動機は、大きな過負荷耐量と急しゅんなインパクト負荷がかかること、急速可逆転運転や高精度で広範囲の可変速制御が必要なことなど、過酷で厳しい制御性能が要求されるため、ほとんど直流レオナード装置が使用されてきた。

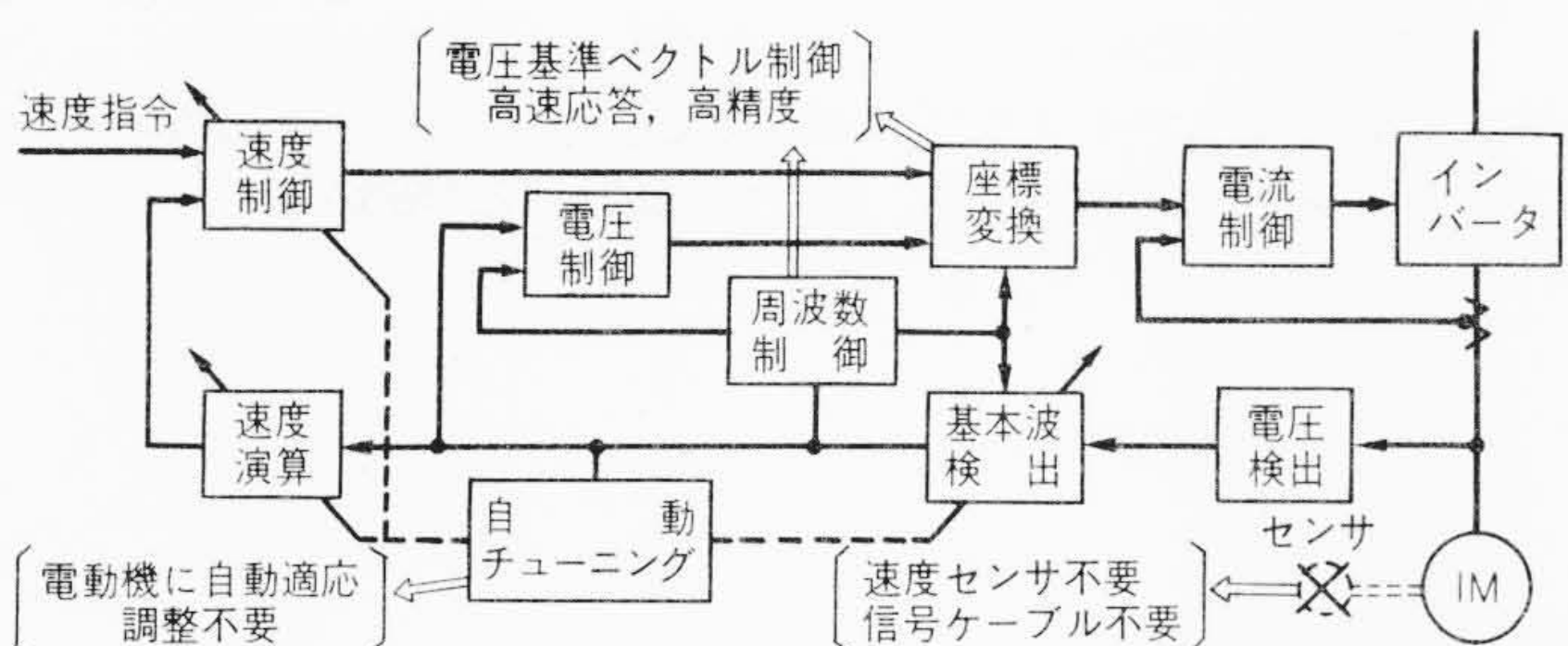
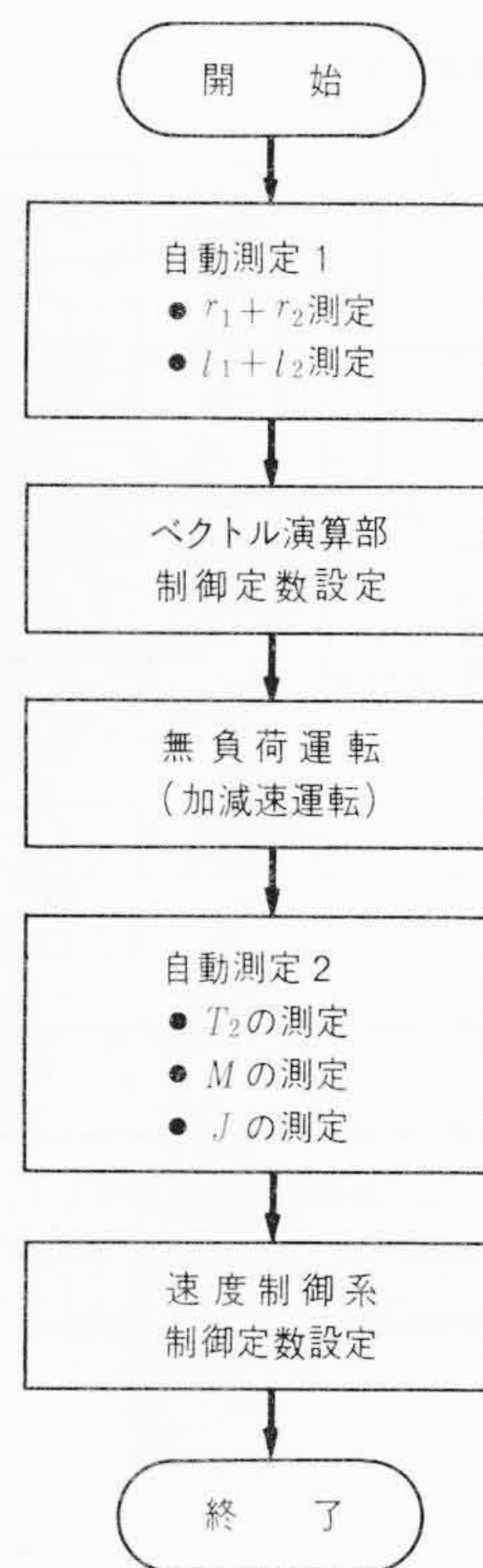
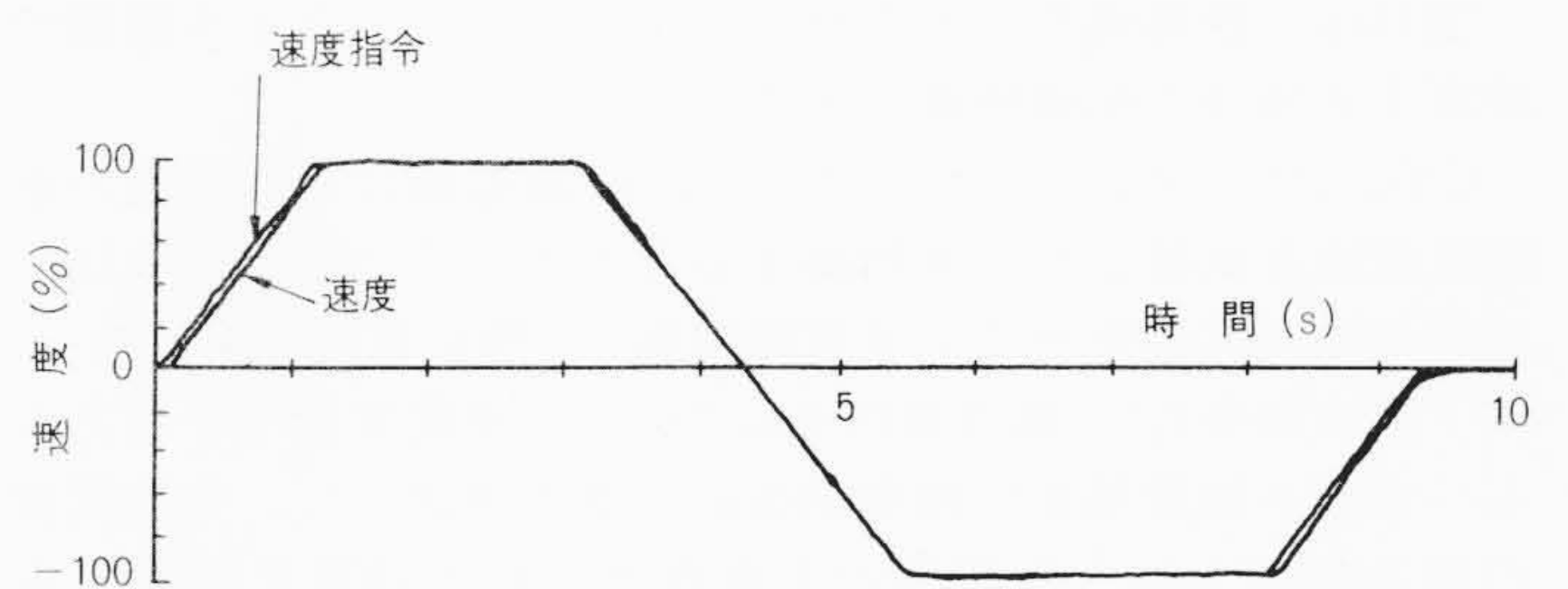


図10 自動チューニング機能付きベクトル制御構成図 電流、電圧から電動機定数を求め、各部制御定数が自動設定される。

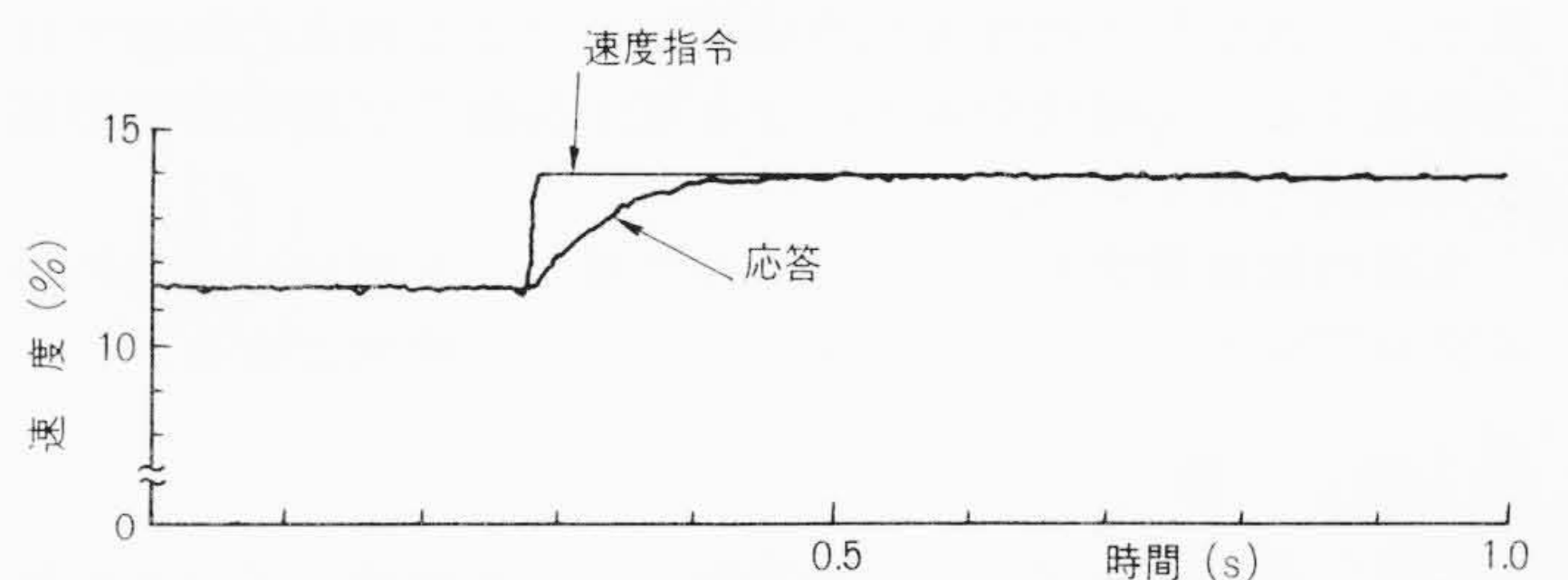


注： r_1+r_2 誘導電動機の一次及び二次抵抗
 l_1+l_2 一次及び二次漏れインダクタンス
 M 励磁インダクタンス
 T_2 二次時定数
 J 慣性モーメント

図11 自動チューニング方法フローチャート 停止状態で、誘導機の漏れインピーダンスを測定後、一度無負荷運転することにより、すべての定数が測定できる。



(a) 加減速特性



(b) 速度応答特性

図12 速度センサレス方式加減速及び速度応答特性 自動チューニング後、速度センサレス方式による応答特性を示す。センサ付きと同様の特性が得られている。

一方、直流機は整流子とブラシをもっており、これが電動機の単機大容量化や高速化、保守の簡単化などに制約を与えている。そこで、これらの制約をもたない交流可変速制御システムの適用検討が以前から進められてきた。

前述の制御性能を満足する方式として、全デジタルサイクロコンバータ方式ベクトル制御が考えられる。この交流駆動システムは、最近の誘導機高性能可変速制御方式として実用化されたベクトル制御の技術、サイリスタレオナードで多数の実績があるマイクロプロセッサ適用によるデジタル制御技術、サイクロコンバータの力率改善制御技術などの進歩

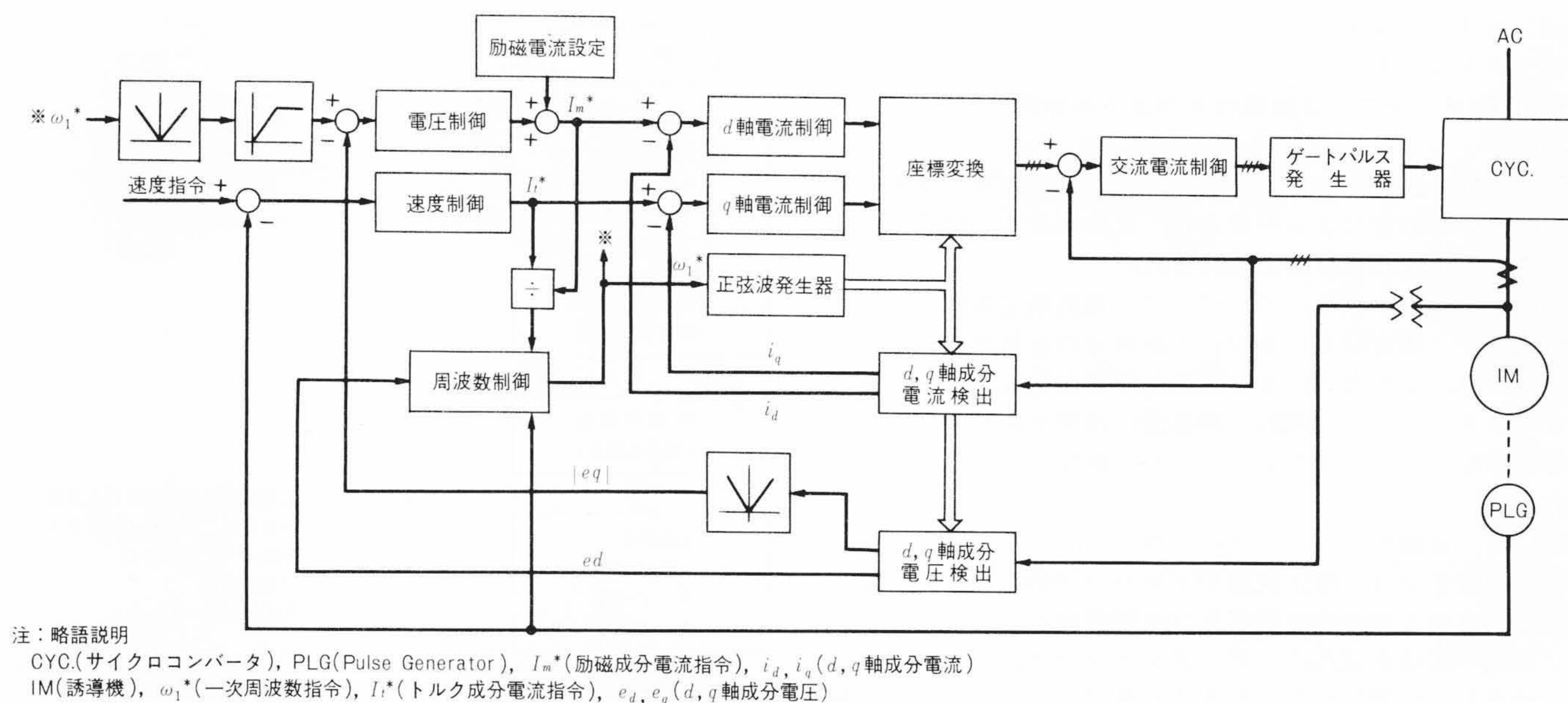


図13 サイクロコンバータ方式ベクトル制御構成図 d, q 軸電流、電圧制御回路により、電流、磁束の大きさ及び位相のずれが補正され、直流レオナードと同等の制御特性が得られる。

があいまって、応答性・経済性の面で、直流機システムと十分対抗できる段階に達している。

図13は、誘導機をサイクロコンバータ方式ベクトル制御で駆動する場合の制御構成を示す。

CYC.(サイクロコンバータ)により、誘導機に可変周波の正弦波電流を供給し可変速制御するもので、その制御構成は、三相正弦波電流を流す交流電流制御と、励磁電流指令 I_m^* 、トルク電流指令 I_t^* 、周波数指令 ω_1^* から交流電流指令を出力するベクトル演算部及び速度制御部を基本構成とし、交流電流の周波数増大による電流の大きさと位相の誤差を補正する d, q 軸成分電流制御と、誘導機の制御モデルから推定した磁束が、二次抵抗の温度変化や磁気飽和による磁束の位相ずれを補正する d, q 軸成分電圧による電圧制御及び周波数制御部から構成されている。

上述の制御構成を全デジタルで構成する場合、複数のマイクロプロセッサをもったマルチシステム構成となる。

6 結 言

以上、マイクロプロセッサ適用による電動機デジタル制御の最近の状況について述べた。

直流可変速制御の分野では、製鉄プラントに300セット以上適用した実績結果として、操業効率向上や製品品質・歩留まり向上などに、開発当初予想した以上の大きな効果がでてい。また、既設M-G方式のデジタル化でも、前述のように大きな効果を挙げていることに注目したい。今後、新設設備はもちろん、既設設備のデジタル化更新による高性能化がいつそう進展するものと思われる。

一方、交流可変速制御の分野でも実用化の段階に入ってお

り、今後適用拡大が期待される。

電動機制御のデジタル化により、プラント全体の完全デジタル化が達成された現在、電動機制御分野では、更にデジタルの特徴を生かした機能、例えば、予測演算自動チューニング、力率改善制御、高調波低減、高効率運転制御などの実用化が進み、高付加機能による高性能化、保守の簡素化、高効率・省エネルギー化などの効果が期待できる。また、マイクロプロセッサ及び周辺LSIの進歩や、現代制御理論の適用などにより、性能・機能が今後ますます高度化すると考えている。

日立製作所では、今後とも顧客の期待にこたえるような新製品、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) K. Saito, et al.: Application of Fully Digital Speed Regulators to Tandem Cold Mills; IEEE Trans. Ind. Appl., IA-16, pp.785~794, July/August 1984
- 2) K. Saito, et al.: Application of Fully Digital Speed Regulators to Steel Processing Lines; IEE 234 Power Electronics and Variable-Speed Drives, pp. 210~213, May. 1984
- 3) 土井, 外: 冷間タンデムミルの全デジタル速度制御, 川崎製鉄技報, 15, 1, 37~44(昭58-1)
- 4) 梓沢, 外: 電動機の全デジタル速度制御, 日立評論, 65, 2, 153~158(昭58-2)
- 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)
- 6) 大前, 外: マイクロプロセッサによるインバータの直接デジタル制御, 日立評論, 65, 4, 267~272(昭58-4)