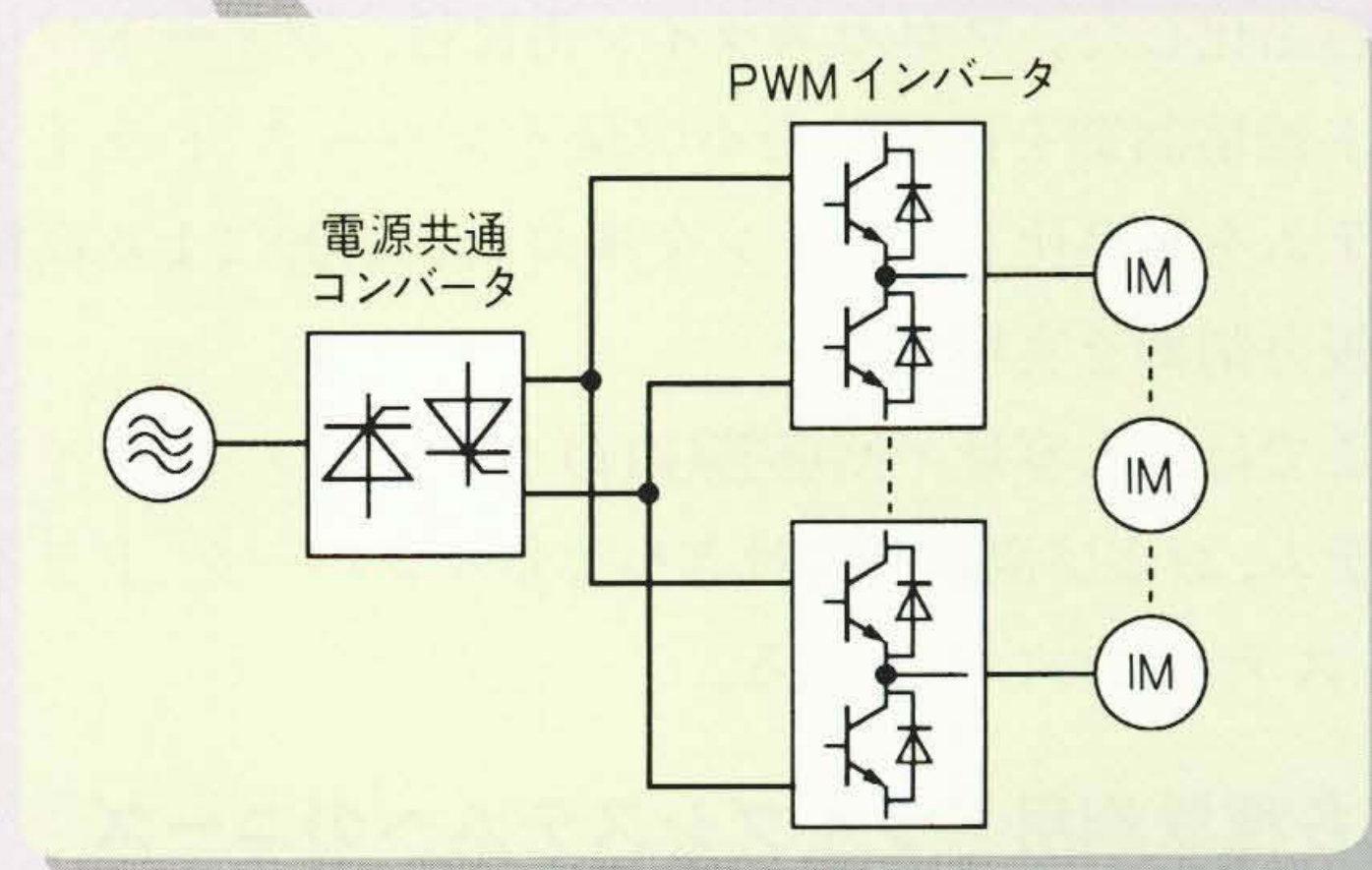
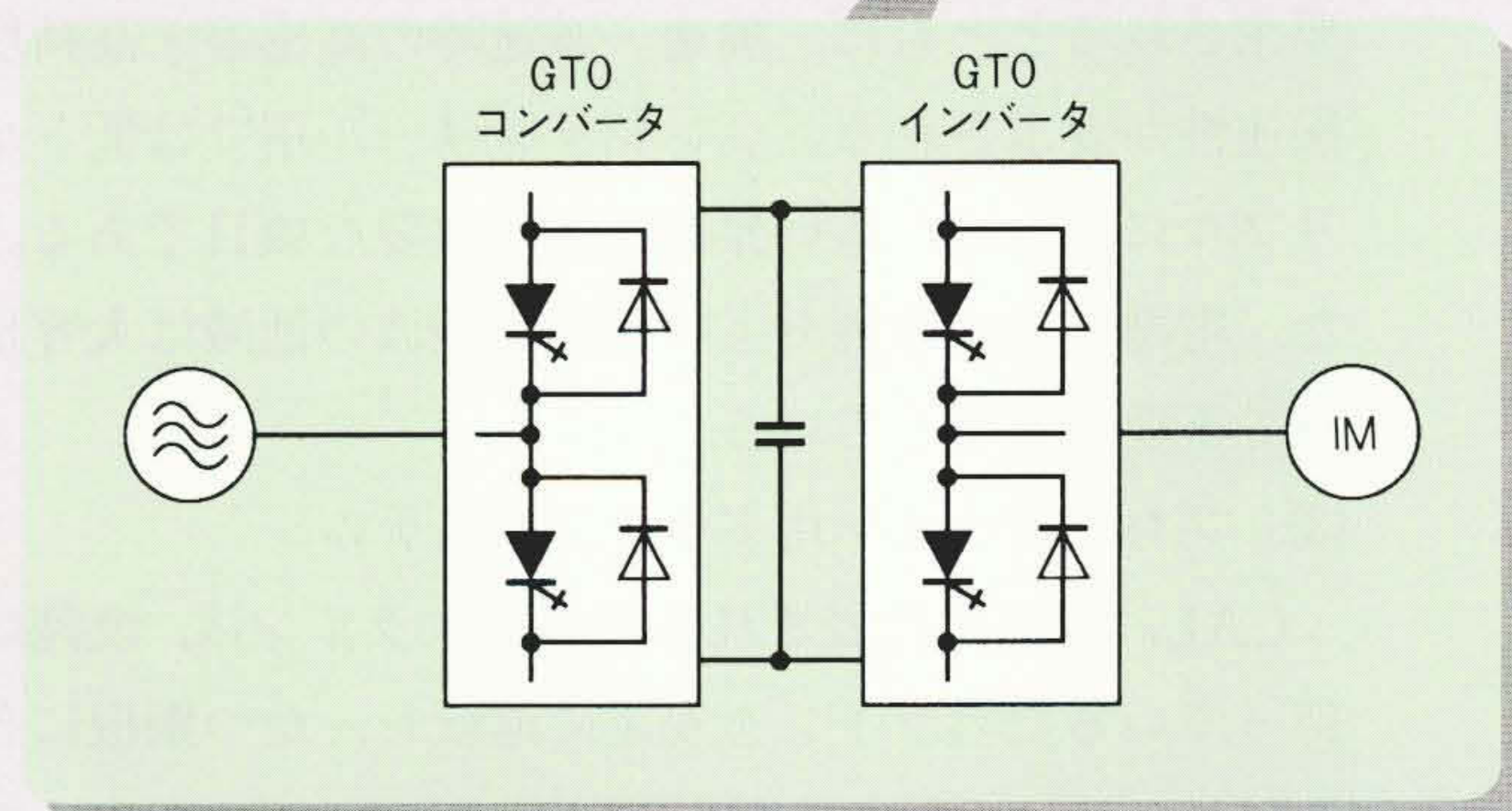
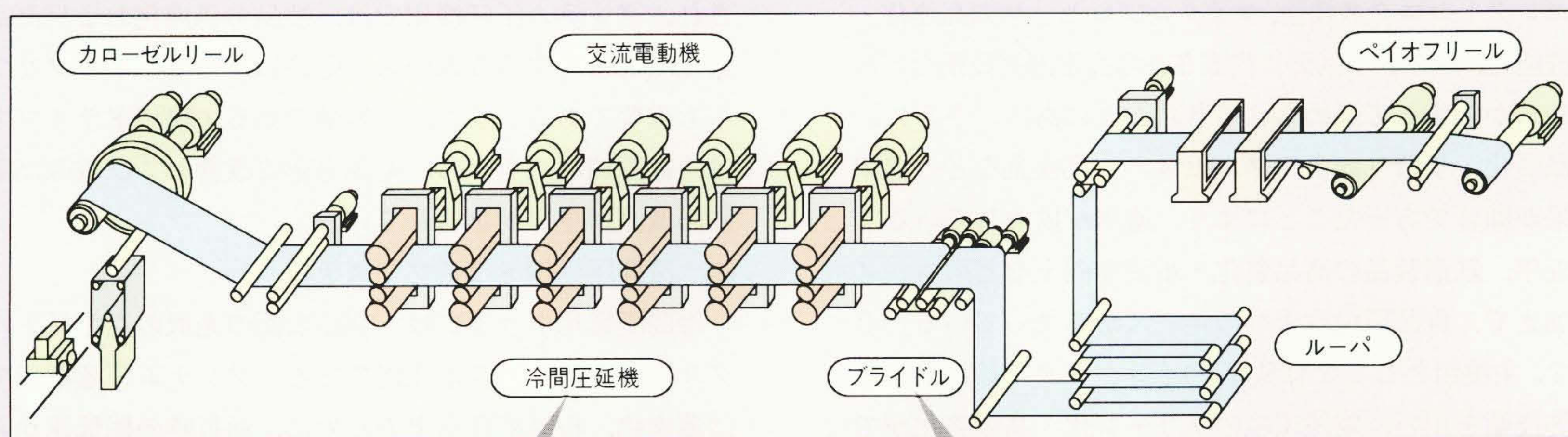


最新の鉄鋼用インバータドライブシステム

Inverter-Fed AC Drive Systems for Steel Rolling Mills

長南富雄*	Tomio Chōnan	梓沢 昇***	Noboru Azusawa
千野俊彦*	Toshihiko Chino	飛世正博***	Masahiro Tobise
佐々木征**	Mamoru Sasaki	松竹 貢****	Mitsugu Matsutake



注：略語説明 PWM (Pulse Width Modulation), IM (Induction Motor)

冷間圧延設備のインバータドライブシステム

鉄鋼製品の高品質化・歩留り向上、および電源環境改善へのニーズにこたえ、主機用GTO(Gate Turn-off Thyristor)インバータドライブシステムを製品化した。

インバータドライブシステムの鉄鋼プラントへの適用は他産業に先駆けて進められ、小容量機から大容量機まで拡大されている。インバータドライブ化による長所は、構造的には完全ブラシレス化と単機容量増大、性能的には高応答化と揃(せん)速性向上があげられる。用途によって要求性能は異なり、冷間タンデム圧延機用では連続化・板厚精度向上のため速度制御の高精度・高応答が要求され、プロセスライン用では鋼板にきずを入れないようにするため、特に過渡時を含めた高精度な揃速性が要求される。

また近年、電源力率・電源高調波に代表される電源環境改善へのニーズが高くなっている。

これらのニーズを踏まえ、主機用に大容量・高応答GTOインバータドライブシステムを製品化した。従来の交流可変速技術に加え、GTOインバータ・軸振動抑制制御技術を採用し、電源環境のクリーン化、高応答化を達成した。プロセスライン用には、フィードフォワード補償制御を採用したインバータドライブシステムを製品化し、ライン全体の協調制御による高精度の張力制御を実現した。

* 川崎製鉄株式会社 千葉製鉄所 ** 株式会社淀川製鋼所 呉工場 *** 日立製作所 大みか工場 **** 日立製作所 日立工場

1 はじめに

鉄鋼プラントでは、交流電動機を可変速制御するインバータドライブシステムが早くから適用されてきた。これは、鉄鋼製品の高品質化・歩留り向上やプロセスの安定操業などのニーズ、パワーデバイスをはじめとするパワーエレクトロニクス技術、マイクロプロセッサの高速化・高機能化、ベクトル制御に代表される高度制御技術などのシーズが相まって進められてきたことにある。さらに、高品質化・歩留り向上やプロセスの安定操業などの適用効果が顕著であったことにより、適用が拡大している¹⁾。

近年、鉄鋼製品の高品質化・歩留り向上などのニーズに加えて、電源環境改善へのニーズが高まっている。そこで、主機用として大容量GTOインバータ・軸振動抑制制御技術を用い、電源環境のクリーン化・高応答化ができる大容量・高応答GTOインバータドライブシステムを製品化した。プロセスライン用には、フィードフォワード補償制御を採用した小容量インバータドライブシステムを製品化し、ライン全体の協調制御による高精度の張力制御を実現した。

ここでは、大容量・高応答GTOインバータドライブシステム、および協調制御付き小容量インバータドライブシステムについて述べる。

2 各種鉄鋼用ドライブシステムへのニーズ

各種ミルドライブ応用で要求される主要項目をマップで表1に示す。用途によって要求される仕様、重要視さ

れる性能が異なる¹⁾。

(1) 熱間圧延用ドライブシステム

熱間圧延用としては粗圧延機、タンデム圧延機などの主機用と、補機用のドライブに分けられる。速度、容量の主な仕様は、大別すると表1に示すマップとなる。要求される性能としては、粗圧延機用では、応答が重要視され、タンデム圧延機用では、製品の薄肉化および高品質化圧延に対する要求から、応答ほか精度・トルクリプルも重要である。また、大容量である主機用ドライブでは、電源環境の点から、電源力率の改善および電源高調波の低減が重要度を増している。

(2) 冷間圧延用ドライブシステム

冷間圧延用ドライブは、製品表面の光沢の点で低トルクリプルが重要な要求性能である。タンデム圧延機用では薄肉化、板厚精度向上のために、通板時の極低速から通常圧延の高速までの全速度領域で高精度な速度制御が要求されるとともに、加速・減速時の高応答・高精度な揃速性が要求される。テンションリール用では低トルクリプルに加えて、広い界磁範囲が重要な項目である。また、電源力率の改善および電源高調波の低減は大容量の点で重要度を増している。

(3) プロセスライン用ドライブシステム

CAL、CGLに代表されるプロセスラインは、焼鈍炉を持っているためラインを安定に運転し、かつ鋼板にきずを付けないようにしなければならない。このため、プロセスライン用ドライブは、鋼板の張力変動を最小に抑える高精度の揃速性が要求される^{2),3)}。

表1 各種鉄鋼用ドライブシステムで要求される主要項目
用途によって要求される仕様や、重要視される性能項目が異なる。

項目 用途		仕 様						性 能				電 源 環 境	
		速 度			容 量			速 度		トルク リプル	界磁 範囲	電源 力率	電源 高調波
		低速	中速	高速	小容量	中容量	大容量	精度	応答				
熱間圧延	熱間粗圧延主機	○	—	—	—	—	○	—	V	—	—	*	*
	熱間タンデム圧延主機	—	○	○	—	—	○	V	V	V	—	*	*
	熱間圧延補機	—	○	○	○	○	—	—	V	—	—	—	—
冷間圧延	冷間シングル圧延主機	—	○	○	—	○	○	V	—	V	—	*	*
	冷間タンデム圧延主機	—	○	○	—	○	○	V	V	V	V	*	*
	テンションリール	—	○	○	—	○	○	—	V	V	V	*	*
	冷間圧延補機	—	○	○	○	○	—	—	V	—	—	—	—
プロセス	C A L	—	○	○	○	○	—	V	—	—	—	—	—
	C G L	—	○	○	○	○	—	V	—	—	—	—	—
	E G L	—	○	○	○	○	—	V	—	—	—	—	—

注：略語説明ほか
○(主仕様)、V(重要性能項目)、*(重要度の増す項目)
CAL(Continuous Annealing Line；連続焼鈍処理設備)、CGL(Continuous Galvanizing Line；連続溶融亜鉛メッキ設備)
EGL(Electrolytic Galvanizing Line)

3 大容量・高応答GTOインバータ ドライブシステム

圧延主機ドライブでも交流可変速化が進められ、すでに定着している。これは、交流可変速化が、

- (a) 直流電動機での整流子問題がないために、零速から高速までの高精度運転が行え、板破断、板厚変動のない運転が可能
- (b) 整流の問題がないこと、およびベクトル制御技術などにより、電流制御応答を一けた、速度応答も2倍以上の向上が可能
- (c) ブラシレス化、単機容量増大および界磁制御範囲の拡大による電動機のメンテナンスフリー化、コンパクト化が可能

など期待効果を持っているためである。

圧延主機ドライブの交流可変速化は、容量の関係からサイクロコンバータが適用されてきた。サイクロコンバータは電源転流のサイリスタ変換器で構成されているので、変換効率がよく、高圧・大容量化が容易という特長を持っている。しかし、商用周波数の交流電源から可変周波数・可変電圧の交流に電源転流を利用して直接変換するため、

- (a) 出力周波数が電源周波数の80%程度以下に制限される。
- (b) 電源効率が0.5程度と低く、力率改善が必要
- (c) 電源高調波周波数が出力周波数に左右され、かつ大きい。

という課題が残されていた⁴⁾。

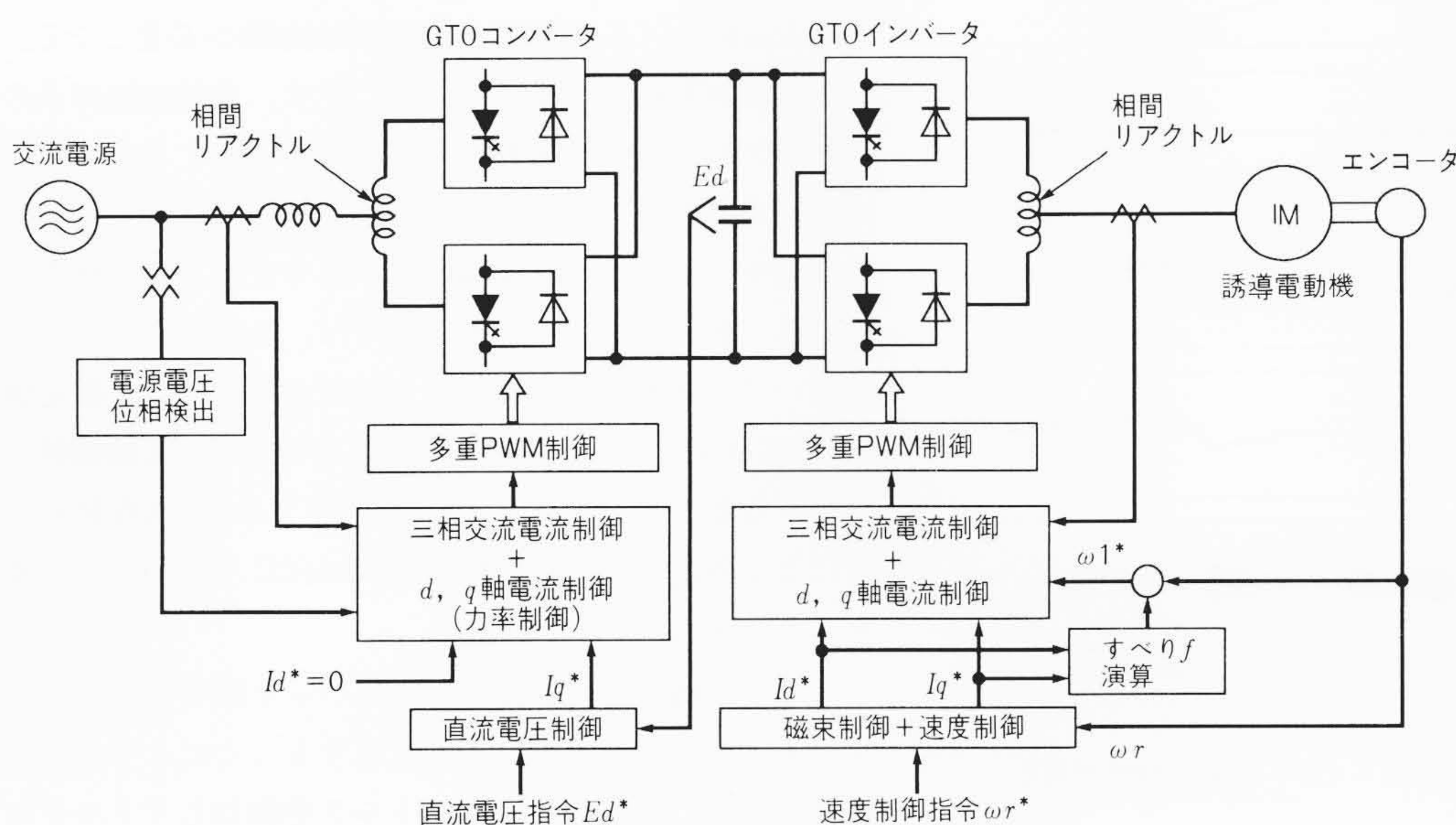
これらを解決するドライブシステムとして、大容量GTOインバータドライブシステムを製品化し、日立製作所は4,000 kW級のシステムを株式会社淀川製鋼所、および川崎製鉄株式会社に納入した⁵⁾。

3.1 GTOインバータ ドライブ システム構成

GTOインバータドライブシステムの構成を図1に示す。変換器部は二つの単位GTO変換器をリアクトルを介して並列接続し、多重PWM制御を行うGTOコンバータとGTOインバータで構成される。単位GTO変換器の並列接続・多重PWM制御により、大容量化や波形改善を行っている。コンバータ制御部は、直流回路電圧を一定とする電圧制御を行うとともに、電源電圧位相を基準として電源電流の無効成分電流(i_d)および有効成分電流(i_q)を検出し、それぞれを独立に制御し力率制御する d, q 軸電流制御ループおよび三相電流をバランス制御する三相交流制御ループで構成されるベクトル制御を採用している。インバータ制御部は、高分解能エンコーダからの信号により、高応答高精度速度制御する速度制御ループ、励磁電流(d 軸成分)とトルク電流(q 軸成分)をベクトル演算制御する d, q 軸電流制御ループ、および三相電流をバランス制御する三相交流制御ループで構成されるベクトル制御を採用している。そのため、四象限加減速特性(図2参照)に示されるようにサイクロコンバータと同じ高い性能が得られている。

(1) 電動機

電動機は信頼性および保守性に重点をおくため、堅ろうで信頼性が高く、保守性に優れている誘導電動機を採用した。これは、電動機の種類に左右されることなく、



注：*は指令を意味する。

図1 圧延主機用GTOコンバータ・インバータシステム
多重PWM制御を行うGTOコンバータとGTOインバータで構成し、大容量化・波形改善を行っている。また、ベクトル制御を行い、高応答・高精度化を図っている。

電源力率1.0を力率補償装置なしで達成できるためである。さらに、頻繁な負荷変動や衝撃トルクに耐えられるシャフトおよびコイルエンド構造にするとともに、インバータ駆動を考慮して、固定子巻線の絶縁体力を強化し、十分な信頼性を持つ電動機としている。

(2) GTO変換器

GTO変換器は、インバータ、コンバータともリアクトルを介して並列接続された二組の単位GTO変換器で構成される。単位GTO変換器は4.5 kV, 3 kA GTO素子を2個直列接続し高圧化を図っている。また、GTO変換器のスイッチング周波数は電流リップル低減のため数百ヘルツとしている。冷却は水冷方式を採用して冷却性能の向上を図り、スイッチング時に発生する損失を処理している。

(3) 制御装置

制御装置はコンバータ制御部とインバータ制御部で構成される。両制御部とも高速処理する必要があるので、デジタルコントローラは32ビット マイクロ プロセッサを用いたマルチプロセッサ構成とした。

3.2 電源環境のクリーン化

電源力率は、図1に示す d 、 q 軸電流制御ループでの電源電圧位相を基準とした電源電流の無効成分電流をゼロ

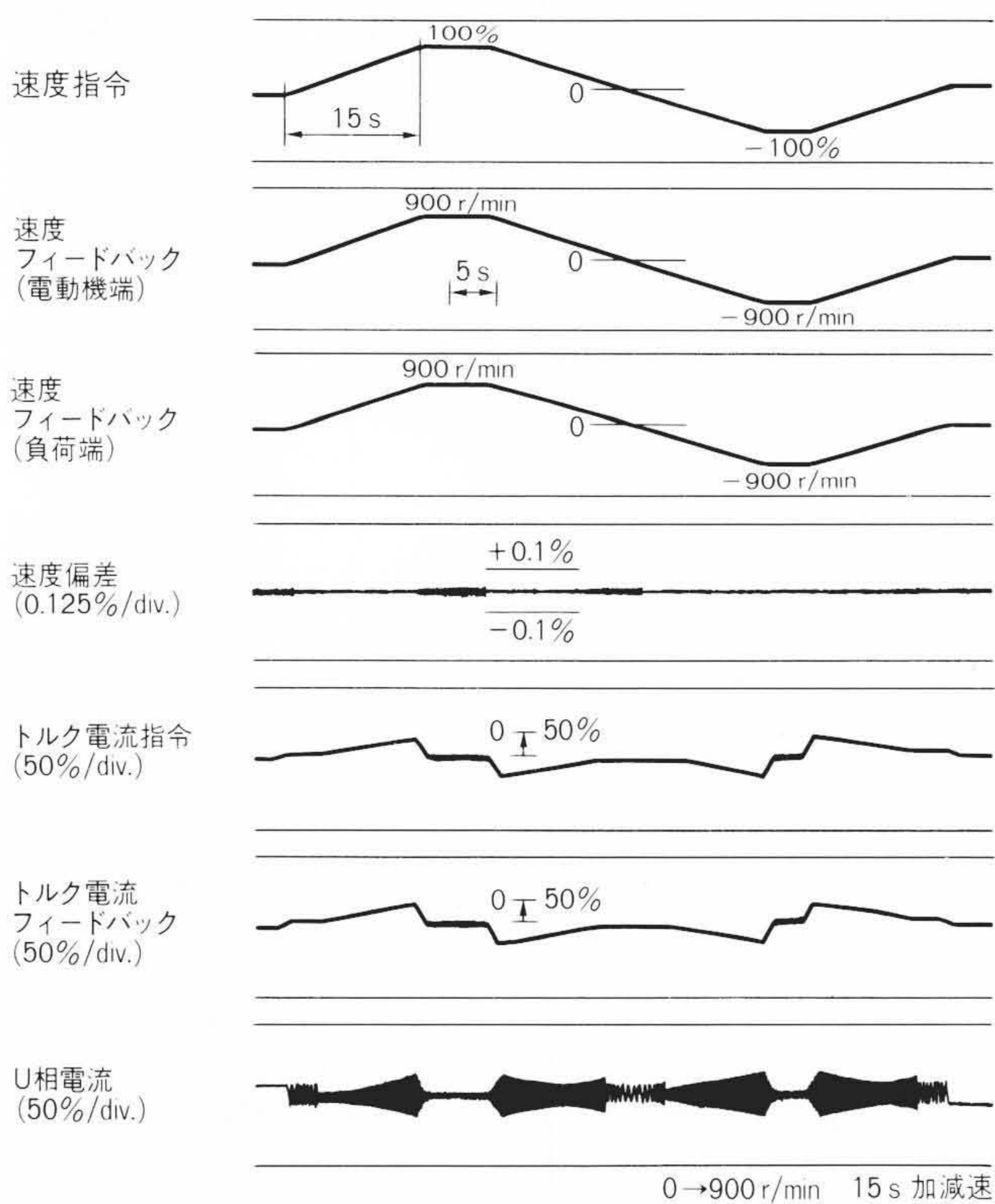


図2 四象限加減速特性

四象限加減速運転で速度偏差の非常に小さい良好な特性が得られた。

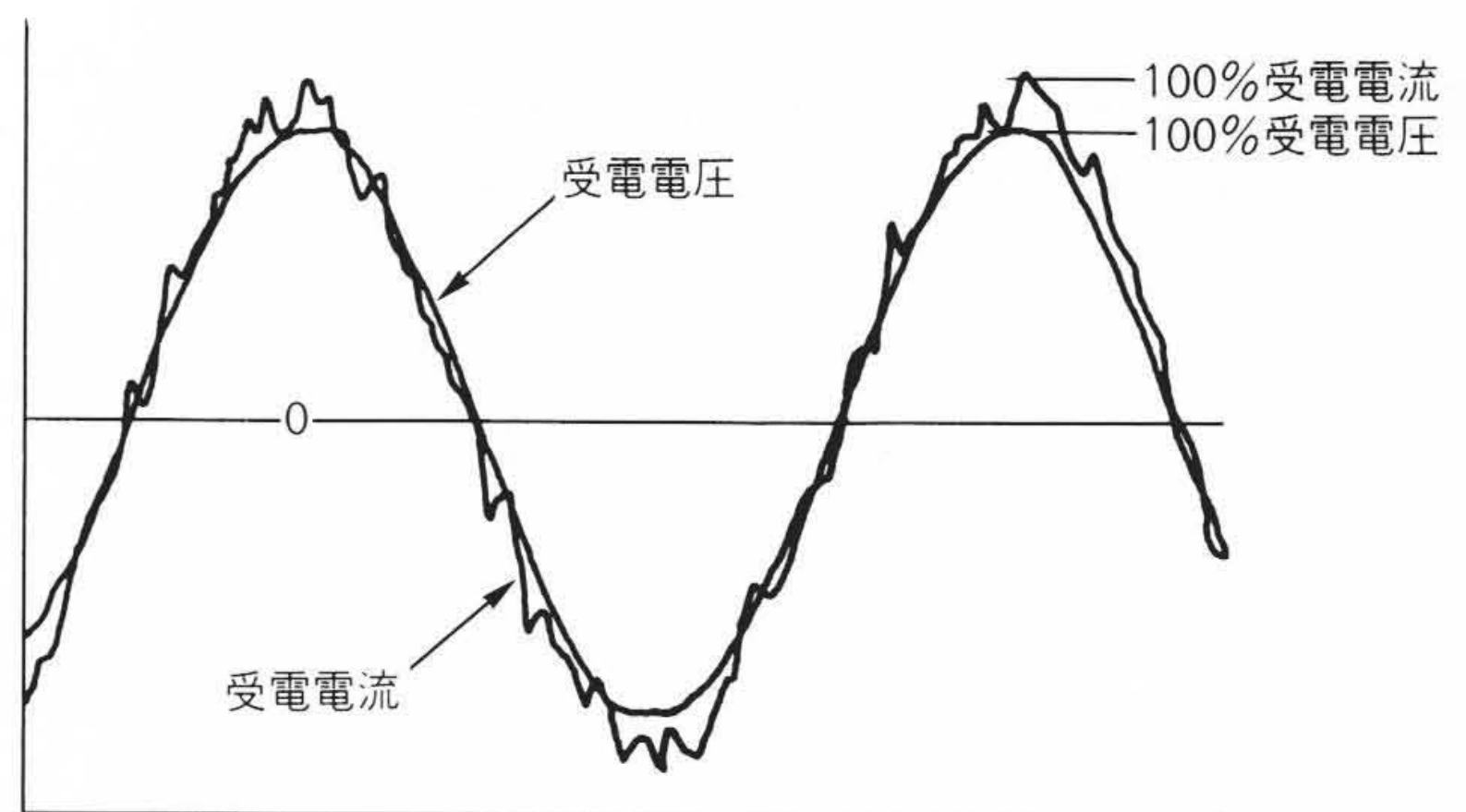


図3 電源電圧・電流波形

この波形から電源力率1.0運転が確認できる。また、電源電流も正弦波に近く制御されていることが確認できる。

($i_d = 0$)に制御することにより、力率補償装置なしで電源力率1.0を可能としている。

高調波電流の低減は、二つの単位GTO変換器をリアクトルを介して並列接続し、多重PWM制御を行うGTOコンバータによって行っている。多重PWM制御として、二つの単位GTO変換器のPWMパルス逆位相で制御し、かつ電圧指令の極性変化時に位相補正する方式を採用することによって低減を図っている。

受電電圧と受電電流波形を図3に示す。同図に示すように、電圧と電流の位相が一致していることにより、電源力率が1.0に制御されていることが確認できる。また、電源電流が正弦波に近く制御されており、高調波電流の低減を可能としていることが確認できる。

3.3 オブザーバによる振動抑制制御

速度制御系的高速応答化を達成するには、モータと機械負荷とが2慣性系の振動モードの振動を制御するだけでなく、機械駆動系の歯車やカップリングなどに起因する高次振動モードを補償した振動抑制制御が必要となる。

振動抑制制御系の構成を図4に示す。電動機機械系の振動モデルに基づく振動抑制制御系を構成するため、2慣性系の軸ねじり振動状態を推定する機能に加えて、高次振動モードによる外乱軸トルク成分を推定する機能を設ける。軸ねじりトルク推定器では、2慣性系モデルに基づいて、電動機と機械負荷との軸ねじりトルク推定値 τ_{se} を演算する。一方、軸トルク推定器では、電動機軸に作用する軸トルクの推定値 τ_{te} を演算する。高次振動モードによる外乱軸トルクの推定値 τ_{dme} は、 τ_{te} と τ_{se} との差として求まる。

ここで、軸トルク推定器の推定バンド幅を軸ねじりトルク推定器に対して十分高く設定することにより、軸トルク推定値に含まれる外乱軸トルクを軸ねじりトルクと

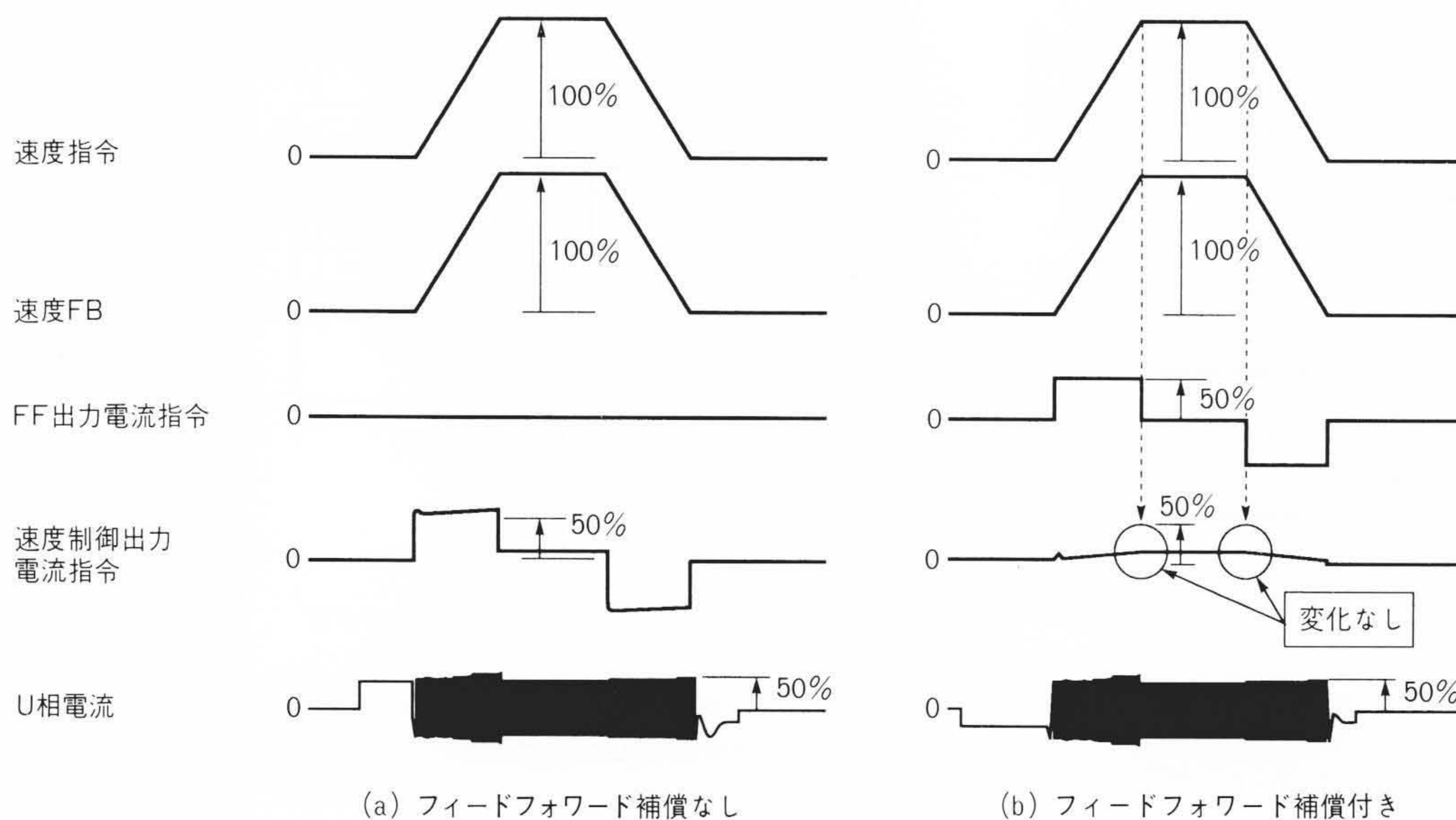


図7 フィードフォワード補償制御による機械直結時の加減速特性

フィードフォワード補償制御ではフィードフォワード補償出力で加減速分が補償され、速度変更時の速度制御出力が変化しない。

バータが力行モードだけでなく回生モードで運転されるため、共通コンバータ容量を低減できるという効果がある。

4.2 CALへのフィードフォワード補償制御

プロセスラインでは、極薄材を超高速で処理するうえで高精度の張力制御(ロール間の揃速性)が要求される。

この場合、張力変動は速度変更時に生じやすいが、その原因として、従来の制御法では、(1)加速トルクと負荷トルクが分離されないまま、速度制御系からの電流指令によって制御されるため、加速時ではこの加速指令分で指令値が不適切に変化し揃速性が劣化する、(2)加減速時に、銅板および非駆動ロールなどの慣性が駆動ロールに加わり、その電動機の手応答が変動するなどがある。これらを解決するため、図6に示すようなラインを制御する上位コントローラと組み合わせた張力制御方式を製品化した。

上記(1)に対しては、速度指令とモータに加わる慣性モーメントから加速トルクを演算し、電流指令に加算する

フィードフォワード補償、(2)に対しては、銅板や非駆動ロールなどの慣性を加味したASRおよびフィードフォワード補償の自動ゲイン調整をしている。機械直結時の加減速特性を図7に示す。同図(b)のようにフィードフォワード補償出力で加減速分が補償され、速度変更時にも速度制御出力が変化しないように制御されている。

5 おわりに

ここでは、高精度・高応答の性能を持ち、高力率・低高調波という、電源環境にクリーンな主機用GTOインバータドライブシステム、およびプロセス全体の協調制御を図るフィードフォワード補償型小容量インバータドライブシステムの製品化について述べた。

インバータドライブシステムは、今後もいっそうの小型化、高性能化、環境へのクリーン化が進められると考える。これらに加えて、使いやすく・人にやさしいシステムを目指して技術の開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) 橋爪, 外: 講演論文集, 平6 電気学会産業応用部門全国大会, シンポジウムS9-2(1994-8)
- 2) 千野, 外: 講演論文集, 平3 電気学会産業応用部門全国大会, 講演論文集p.137(1991-8)
- 3) 吉水, 外: 講演論文集, 平5 電気学会産業応用部門全国大会, シンポジウムS8-2(1993-8)
- 4) 奥山: 講演論文集, 平4 電気学会産業応用部門全国大会, シンポジウムS1-3(1992-8)
- 5) 長南, 外: 高力率・高調波低減を実現した大容量GTOドライブシステム, 日立評論, 75, 6, 415~418(平5-6)