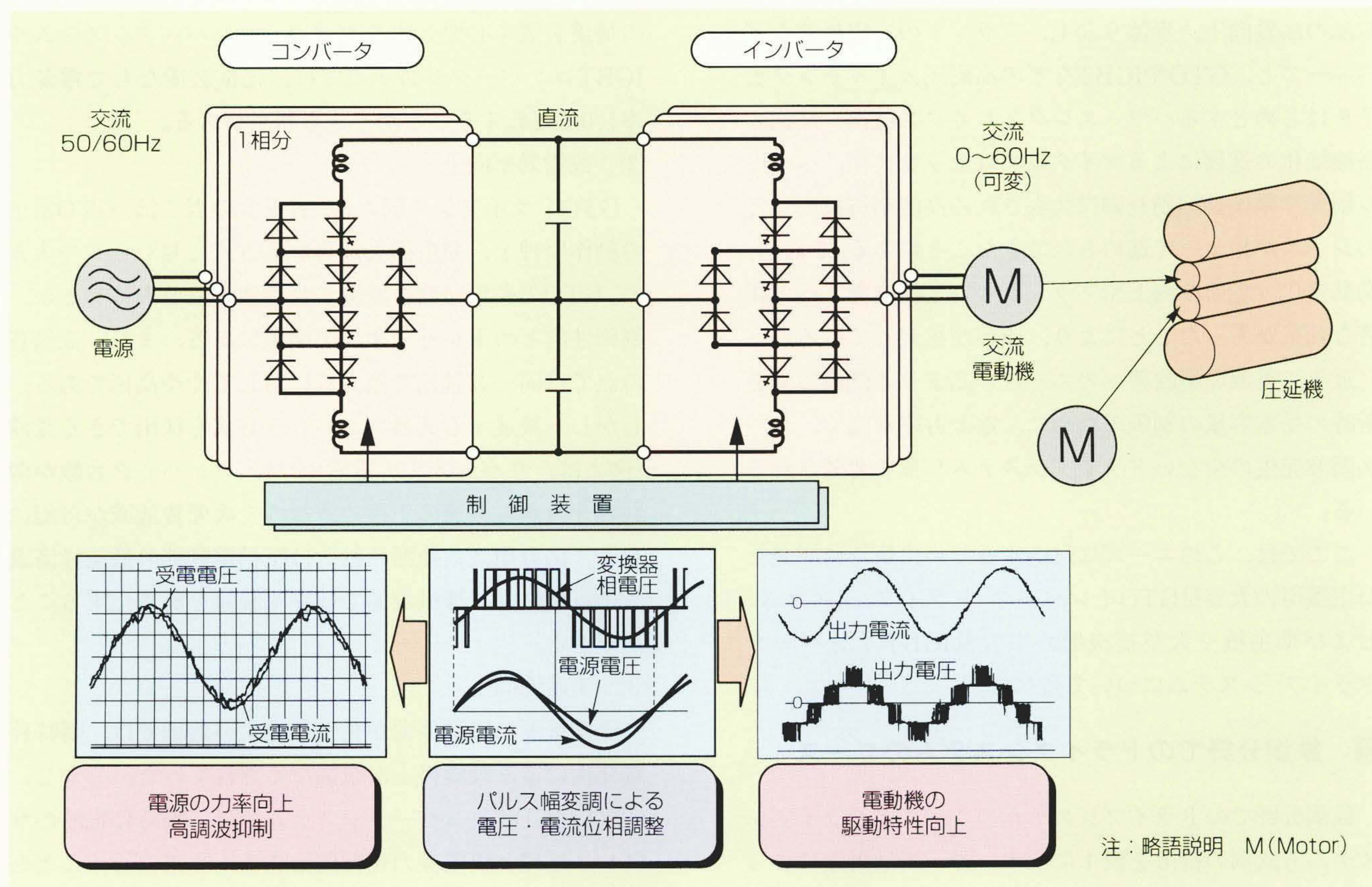


中・大容量鉄鋼用インバータ ドライブ システム

Inverter-Fed AC Drive Systems for Steel Rolling Mills

飛世正博* Masahiro Tobise 梶山 繁*** Shigeru Sugiyama
恩田謙一** Ken'ichi Onda 山品光則**** Mitsunori Yamashina



大容量GTO(Gate Turn-off Thyristor)変換器の構成

GTO変換器は、電源環境の改善(高力率、高調波抑制)を可能にするGTOコンバータと、電動機の駆動特性を改善するGTOインバータドライブシステムから成る。

鉄鋼業界ではインバータ ドライブ システムの鉄鋼プラントへの適用が、小容量機から大容量機までに拡大されている。このインバータドライブを支えるパワーデバイスが6 kV 6 kAのGTO素子で代表されるように、大容量化が進められている。これら素子の大容量化は中・大容量のインバータ ドライブ システムの小型化を可能とし、その適用範囲も電源環境ニーズと相まって拡大されている。

そのニーズにこたえるために日立製作所は、圧延主機用大容量GTOインバータ ドライブ システム

を世界に先駆けて製品化してきた。このたび、最新の大容量GTO素子(6 kV 6 kA)を用いた大容量GTOインバータ ドライブ システム(駆動可能電動機容量5,000~6,400 kWクラス)と、大容量IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)素子を用いた中容量IGBTインバータ ドライブ システム(駆動可能電動機容量約2,000 kW)を製品化した。

これらは、電源環境ニーズに対応した、電源力率が高く、高調波発生が少ないドライブシステムである。

* 日立製作所 大みか工場 ** 日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士 *** 日立製作所 大みか工場 技術士(電気・電子部門)
**** 日立製作所 日立工場

1 はじめに

鉄鋼プラントでは、直流電動機に代わって交流電動機を可変速運転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。これは交流電動機の保守性の良さ、製品の品質向上、歩留り向上、プラントの安定操業などのニーズと、GTOやIGBTなどの高耐圧スイッチング素子をはじめとするパワーエレクトロニクス技術、高速・高機能化の進展によるマイクロプロセッサ技術、ベクトル制御や軸振動抑制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・歩留り向上やプラントの安定操業などへの顕著な効果があったことにより、適用が拡大している。

近年、電源環境改善へのニーズの高まりと既設設備更新時の受電容量の制限のために、電源力率が高く、かつ高調波発生の少ないドライブシステムが強く要望されている。

ここでは、このニーズに対応するために新たに開発した主機用の大容量GTOインバータドライブシステム、および準主機や大型補機用の中容量IGBTインバータドライブシステムについて述べる。

2 鉄鋼分野でのドライブシステムのニーズ

鉄鋼分野でのドライブシステムのニーズとドライブシステム方式別の特徴を表1に示す。ニーズは用途によって優先度が異なるので、ドライブシステム方式の選定に

表1 鉄鋼分野でのドライブシステムのニーズとドライブシステム方式別の特徴
代表的なドライブシステムの特徴比較を示す。

ニーズ		ドライブシステム方式			
		GTO	無循環 Cyclo	循環 Cyclo	IGBT
電源環境改善	高力率	◎	△	△	○
	高調波低減	◎	△	△	○
設備効率向上	省電力(効率)	△	○	○	○
	設備費低減	○・◎*	◎	○	○・◎*
	出力周波数範囲	◎	△	○	◎
生産性向上	出力容量	◎	◎	◎	○
	瞬停対応	○・×**	×	×	○・×**
品質向上	速度応答	◎	○	◎	◎
	トルクリプル	○	○	◎	○

注：略語説明ほか
Cyclo (Cycloconverter)
◎(優), ○(良), △(可), ×(不可)
* 個別コンバータで「○」、共通コンバータで「◎」
** GTO/IGBTコンバータで「○」、サイリスタコンバータで「×」

あたっては各設備の状況を考慮して決定するのがよいと考える。

(1) 電源環境改善

サイクロコンバータシステムでは、遅れ力率でしか運転できない方式のため電源力率を1.0にするには何らかの補償装置を必要とするが、GTOコンバータシステムやIGBTコンバータシステムでは、補償装置なしで電源力率1.0で運転することができる利点がある。

(2) 設備効率向上

GTOドライブシステムは、省電力の点では、GTO素子の動作原理上、発生損失割合が他方式に対してやや大きい。GTOの動作回数を低減すれば他装置並みになるが、制御性能とのトレードオフの関係にある。また、設備費の点では同一容量比で他方式に対してやや高価である。しかし、後述する共通コンバータ方式を採用できる設備(例えば、リバーミル設備)では、コンバータ台数が個別の3台から共通の1台で済むので設備費低減が可能になる。出力周波数範囲の拡大は駆動電動機の最適経済設計を可能にし、機械設備ではギヤ装置を簡素化することができる。

(3) 生産性向上

受電電源に瞬時停電が発生しやすい地域では、瞬時停電発生による設備停止が余儀なくされていた。しかし、GTO・IGBTコンバータシステムでは、瞬時停電時のサプレス処理と復電後の運転開始をスムーズに行うことができるので、設備停止時間の低減が期待できる。

(4) 品質向上

製品の品質を左右する速度応答およびトルクリプルは各方式での差はほとんどない。どの方式でも設備の要求する性能を満足させることができる。

3 大容量GTOインバータドライブシステム

圧延主機ドライブの交流可変速化は、主にサイクロコンバータ方式によって進められている。交流可変速化では以下の効果が実現できるメリットがある。

(1) 直流電動機の整流子、ブラシの保守が不要

(2) 零速度から高速まで高精度・高応答の運転が行えるので、製品品質の向上や板破断回数の低減による操業効率が向上

(3) 単機容量の増大による設置スペースの縮小

特に、既設設備の能力増強時では、直流電動機の基礎を流用しながら電動機容量の増大が可能

サイクロコンバータドライブシステムは、電力用サ

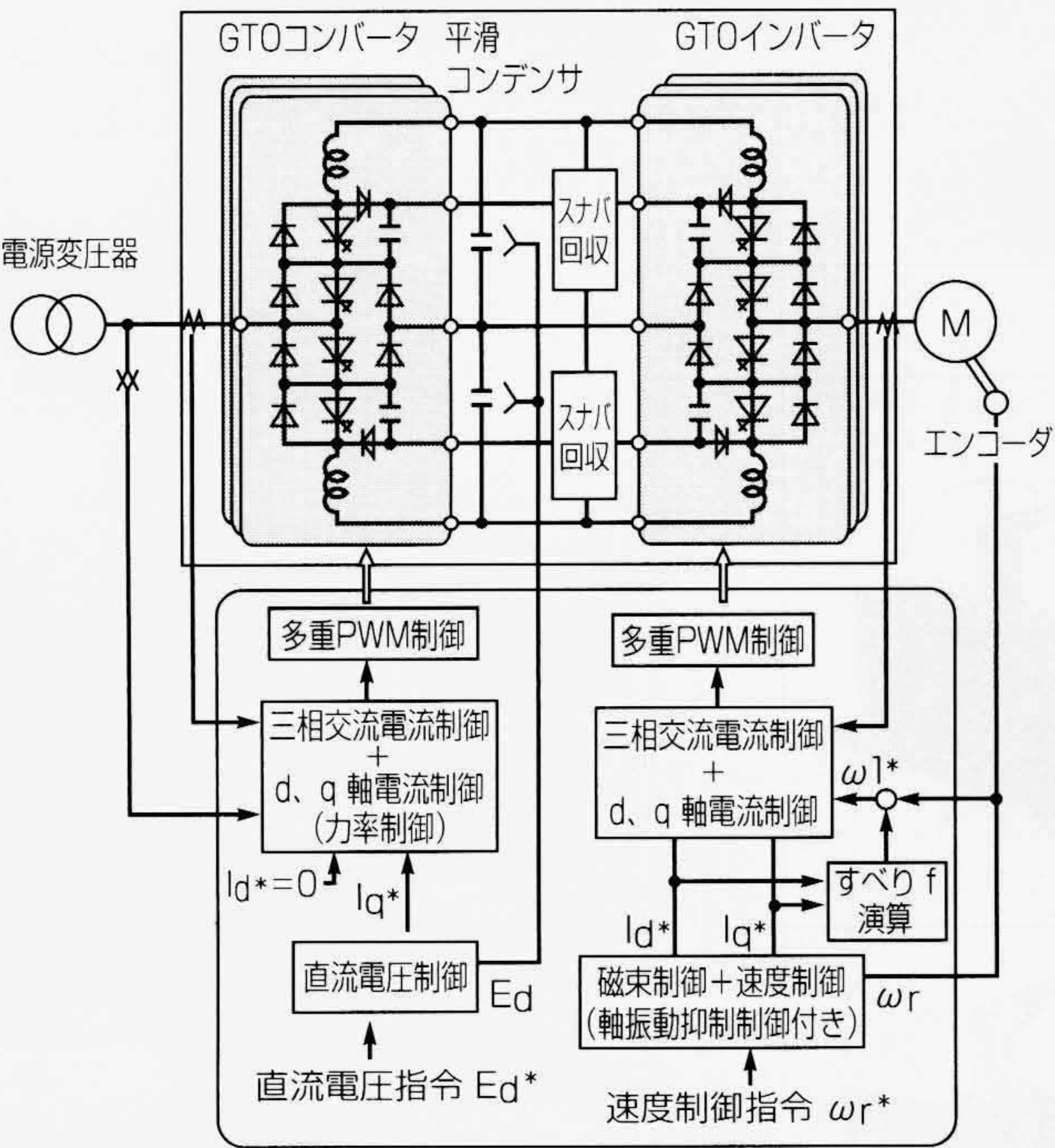
イリスタの大容量化に伴い、大容量の出力をコンパクトな盤寸法で実現できる優れた方式である。特に、過負荷仕様の大きな用途には有利である。しかし、電源環境の点では、商用周波数の交流電源から可変周波数・可変電圧の交流に電源転流を利用して直接変換するため、以下の課題が残されていた²⁾。

- (1) 電源力率が0.5程度と低く、力率改善設備を必要とする。
- (2) 電源高調波周波数が出力周波数に左右され、かつ大きい。このため、高調波低減設備が大型になる。
- (3) 出力周波数が電源周波数の80%程度以下に制限されるので、電動機の回転数に制限がある。

これらを解決するドライブシステムとして日立製作所は、圧延主機用大容量GTOインバータ ドライブ システムを世界に先駆けて製品化してきた^{3), 4)}。今回、さらに容量アップした製品を開発したので、以下に述べる。

3.1 GTOインバータ ドライブ システムの構成

GTOインバータ ドライブ システムの構成を図1に示す。変換器部は直列多重PWM制御を行うGTOコンバータとGTOインバータで構成する。直列多重方式は、GTO素子を4直列接続して出力交流相電圧を3レベルの可変周波数・可変電圧に制御する方式であり、GTO素



注：略語説明など
PMW(Pulse Width Modulation), *(指令)

図1 圧延主機用GTOドライブシステム
直列多重PWM制御でGTOコンバータとGTOインバータの波形を改善し、ベクトル制御で高応答・高精度化を図っている。

子の定格電圧が通常の2レベルインバータの約 $\frac{1}{2}$ で済むので高電圧化に適している。コンバータ制御部では、直流回路電圧を一定とする電圧制御を行うとともに、電源電流の有効電流成分(i_q)と無効電流成分(i_d)を検出し、直流電圧を一定にするための i_q^* と電源力率を1.0にするための $i_d^*=0.0$ の各指令に合わせる電流制御ループ、および三相電流をバランス制御する三相交流電流制御ループで構成するベクトル制御を採用している。インバータ制御部では、高分解能エンコーダからの信号により、高応答・高精度な速度制御を行う速度制御ループ、トルク電流(q 軸成分)と励磁電流(d 軸成分)をベクトル演算する q, d 軸電流制御ループ、および三相交流制御ループで構成するベクトル制御を採用している。

3.2 大容量GTOドライブシステムの基本仕様

大容量GTOドライブシステムの基本仕様を表2に示す。

(1) GTO変換器

GTO変換器では6インチGTO(6kV 6kA)を使用している。GTO変換器容量は最大15,000kVAであり、駆動可能電動機容量は圧延主機用の5,000~6,400kWクラスである。過負荷仕様や界磁レンジで駆動可能容量は変化する。効率を支配するGTOスナバ回路のエネルギー回生は4直列外側GTOスナバ回路のエネルギーを回生し、内側GTOのそれは抵抗で消費している。そこで、変換器の効率向上のため内側GTOのスイッチング回数を低減する制御アルゴリズムを導入し、GTO変換器効率約96%を

表2 大容量GTOドライブシステムの基本仕様
GTO変換器、制御性能の基本仕様を示す。

項目		仕様
変換器仕様	方式	直列多重(3レベル)
	出力容量	15,000kVA(最大)
	出力電圧	AC 3,600V(最大)
	出力電流	AC 2,400A(最大)
	GTO定格	6kV 6kA
	効率	約96%
	電動機容量	5,000~6,400kW*
制御仕様	電源力率	約1.0
	出力周波数	0~60Hz
	速度応答	40~60rad/s**
	トルクリプル	0.3%
	速度制御精度	±0.01%(100%速度時)
	速度制御範囲	0~100%
	界磁制御範囲	1:3(標準)

注： * 電動機の過負荷仕様で駆動可能電動機容量は変化する。
** 機械系の構成による。

達成している。

(2) 制御性能

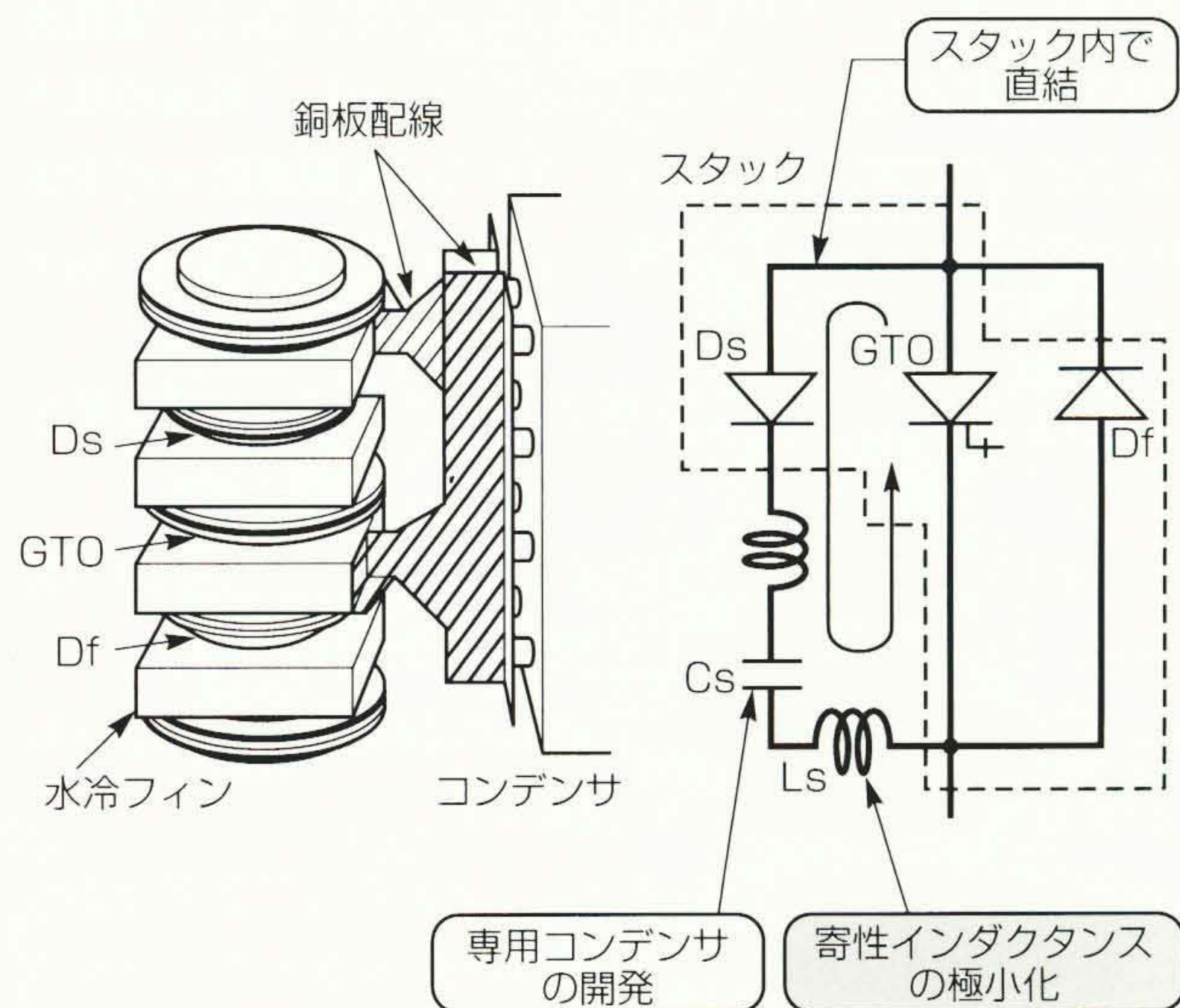
電源力率はGTOコンバータ制御によって力率約1.0を実現し、電動機の制御特性は軸振動抑制制御の採用により、機械直結状態での速度応答40~60 rad/sを実現している。速度応答は機械系の構成に左右されるので、設備計画時に速度応答達成可否を事前シミュレーションするのが望ましい。

(3) 電動機

かご形誘導電動機は、堅牢(ろう)で保守性に優れているが、変換器の必要容量が大きくなるという欠点がある。一方、同期電動機は電動機の力率を1.0とすることができるので変換器容量を小さくすることができる。このため、かご形誘導電動機と同期電動機を電動機容量に応じて選択する。電動機では、豊富な経験によって確立した技術を適用し、圧延機駆動用電動機として十分な強度を持つ回転子構造としている。また、GTOインバータで駆動されるため、固定子巻線の絶縁耐力を強化し、圧延機駆動用として十分な信頼性を持つ電動機としている。

3.3 低インダクタンス化シミュレーション技術

GTO変換器の性能では、回路の浮遊インダクタンスをいかに小さくするかが重要な課題である。代表的な部分はGTOのスナバ回路である。GTO変換器の1アーム分の回路を図2に示す。GTOの電流遮断性能を支配するスナバ回路(Ds, Cs)の配線インダクタンスの低減がGTO



注：略語説明

Ds(スナバダイオード), Df(フリーホイールダイオード)
Cs(スナバコンデンサ), Ls(寄生インダクタンス)

図2 GTOスナバ回路

GTO変換器の1アーム分のスナバ回路を示す。

変換器の性能を向上させる。スナバ配線材の構造による配線インダクタンスの差をシミュレーションした図を図3に示す。形状を変えることにより、インダクタンス値を約80%に低減することができる。このシミュレーション技術を用いて適切な裕度つき設計を行っている。

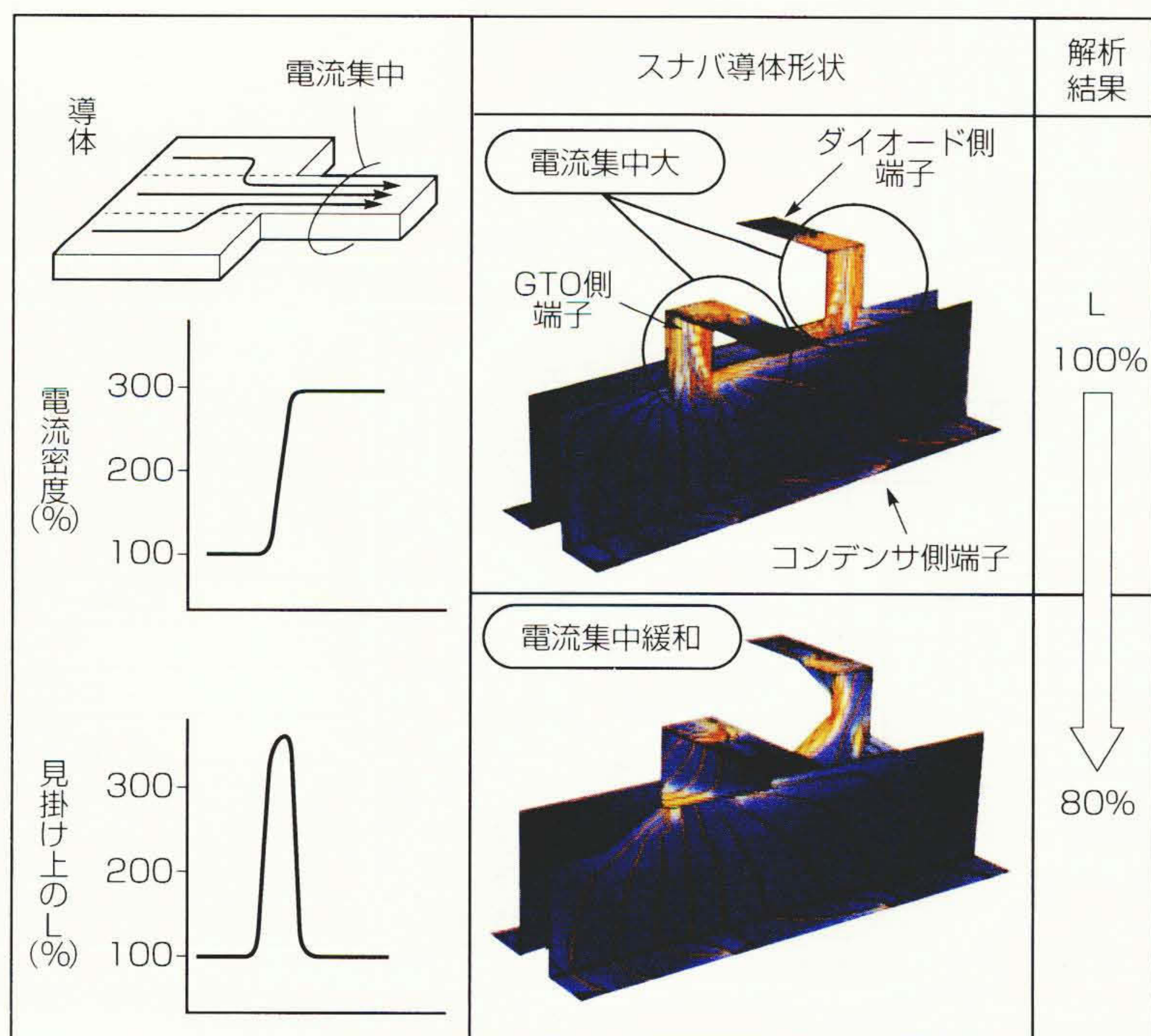


図3 スナバ導体の電流密度

スナバ導体の形状別の電流密度をシミュレーション比較したものである。形状の改善により、インダクタンス値を約80%に低減できる。

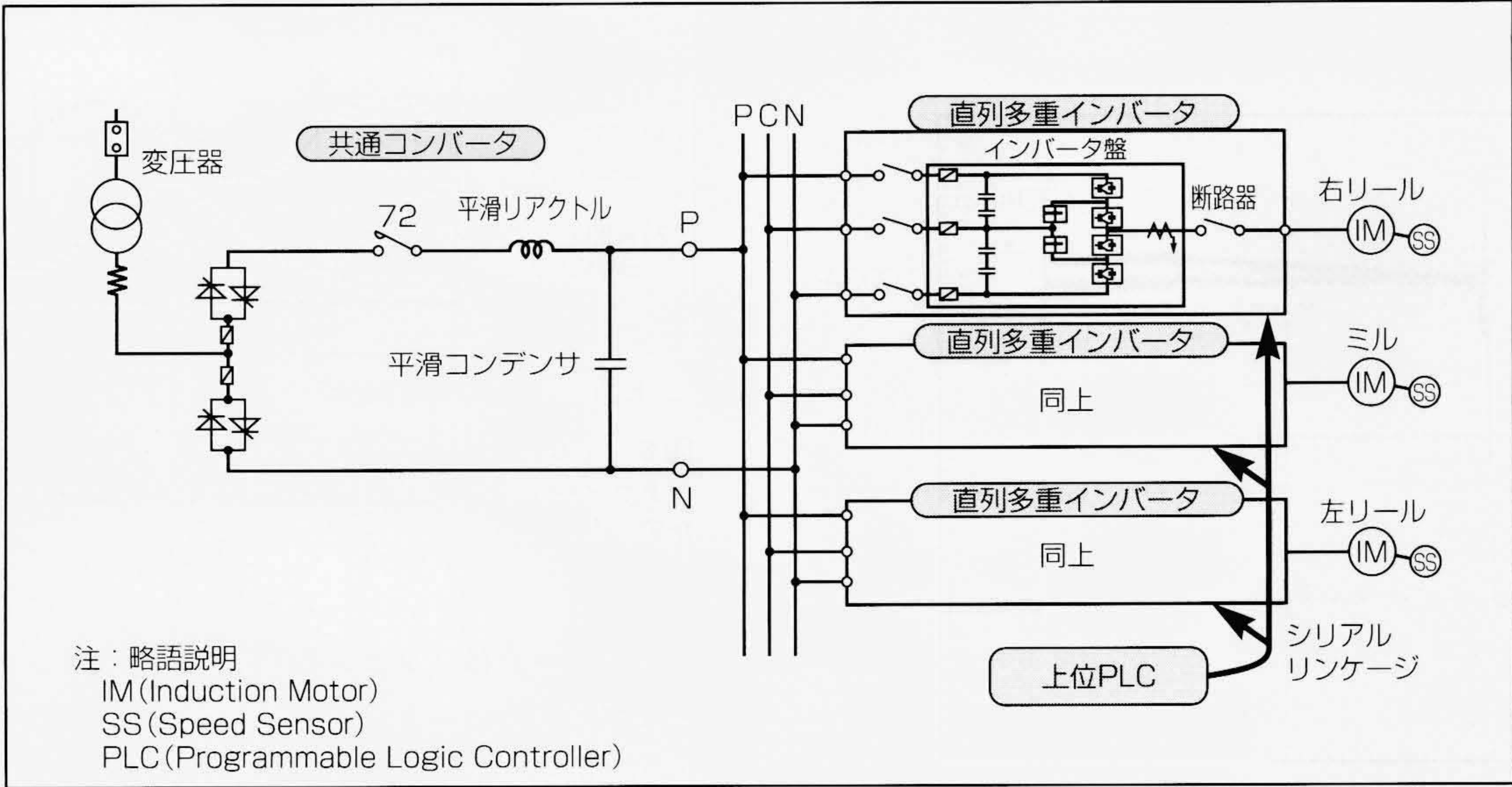


図4 中容量IGBTインバータ ドライブ システムの構成例
インバータ3台を共通コンバータ1台で駆動する場合の例を示す。電動・回生運転の関係にある左・右リールの電力を直流電源でキャンセルできるので、共通コンバータ容量が大幅に低減できる。

4 中容量IGBTインバータ ドライブ システム

4.1 構成・仕様

IGBT素子の容量アップにより、中容量クラスでのIGBTインバータドライブが可能になりつつある。直列多重(3レベル)技術の確立により、汎用の1,200 Vクラスの絶縁形モジュール素子の適用が可能となり、コスト的にも魅力のあるドライブシステムの構築が可能となった。直列多重IGBTインバータの特徴として、以下の点があげられる。

- (1) GTOインバータに比べて素子スイッチング周波数を高くすることが可能であり、出力波形をより正弦波に近づけることができる。
- (2) 素子損失が比較的少なく、装置の小型化が可能である。
- (3) 共通コンバータ化が容易である。

中容量IGBTインバータ ドライブ システムの構成例を図4に示す。共通コンバータを使用して、インバータ3台を共通直流母線に接続し、システムメリットを出した構成である。各インバータは上位PLCからの指令を受けて独立に制御される。上位PLCとはシリアルリンクを標準としており、送受信各4ワード(16ビット・ワード)構成である。

1,500 kVAインバータの基本仕様を表3に示す。標準適用電動機容量は、過負荷仕様150% 60秒、界磁レンジ1：3で約1,000 kWである(誘導電動機を適用した場

合)。速度検出器としてパルスジェネレータと高分解能エンコーダの2種類があり、用途に応じて選択可能としている。

かご形誘導電動機では電動機の巻線を2×3相として駆動電動機容量の拡大を図っており、1,500 kVA 2セットで駆動し、約2,000 kWまで駆動可能としている。また、IGBT素子の動作に起因する電圧の立ち上がり峻度

表3 1,500kVA IGBT インバータの基本仕様
IGBT 変換器、制御性能の基本仕様を示す。

項目		仕様
変換器仕様	方式	直列多重(3レベル)
	出力容量	1,500 kVA
	出力電圧	AC760 V
	出力電流	AC1,130 A
	定格	100%連続 150% 1 min
	IGBT定格	1.2 kV, 1 kA×4 並列
	効率	約97%
	電動機容量	1,000 kW*1
	出力周波数	0 ~ 75 Hz
	速度応答	40 ~ 60 rad/s*2
制御仕様	トルクリプル	0.5%
	速度制御精度	±0.05%(100%速度時)*3
		±0.01%(100%速度時)*4
	速度制御範囲	1 ~ 100%*3
		0 ~ 100%*4
	界磁制御範囲	1 : 3 (標準)

注：*1 電動機の過負荷仕様で駆動可能電動機容量は変化する。
*2 機械系の構成による。速度センサは*4の場合
*3 速度センサ；標準パルスジェネレータ使用の場合
*4 速度センサ；高分解能エンコーダ使用の場合

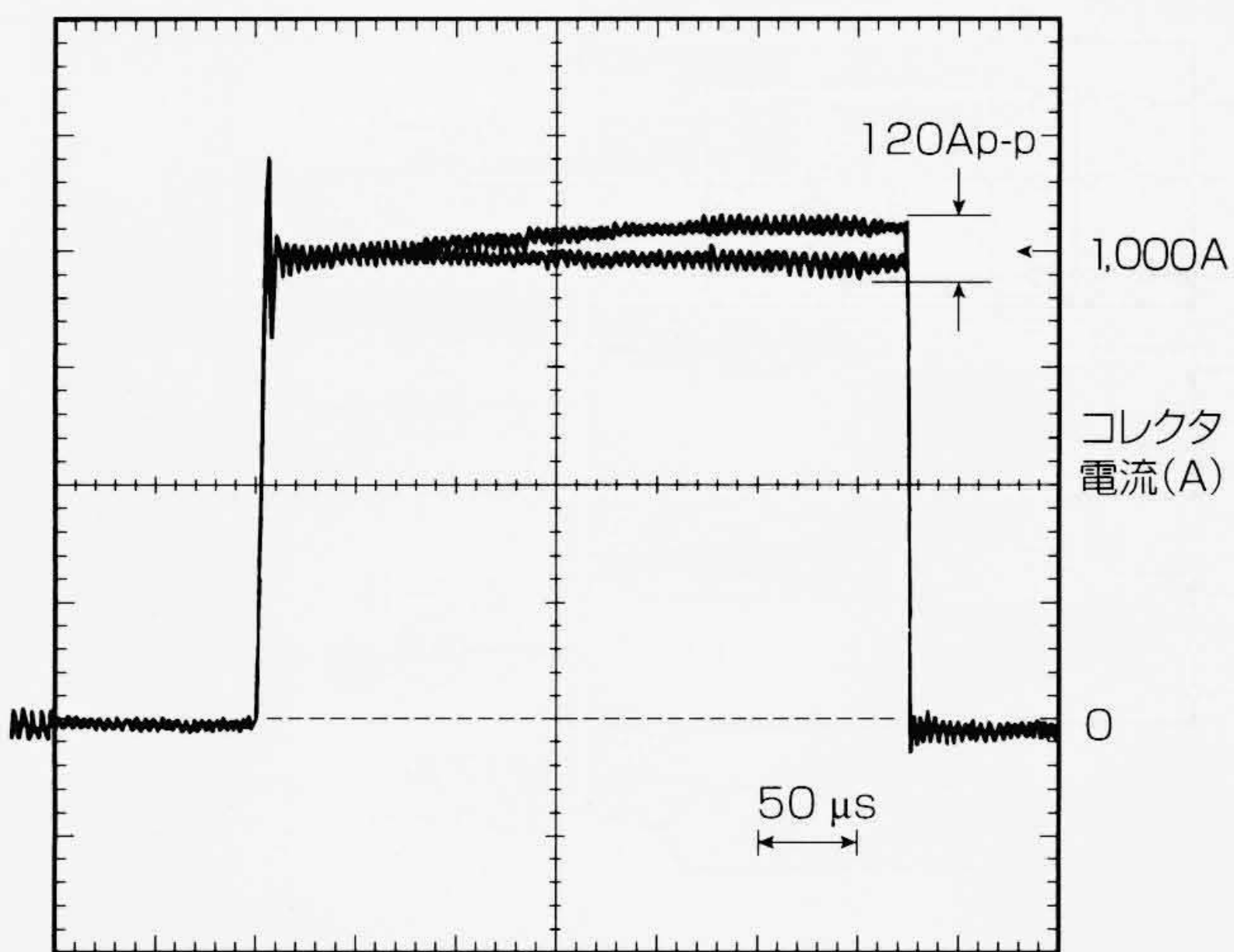


図5 IGBT電流遮断波形

4,000 A遮断時のIGBTコレクタ電流波形を示す。平均1,000 Aでアンバランスは120 Ap-pである。

(高 $\frac{dv}{dt}$)を考慮し、固定子巻線の絶縁耐力を強化して信頼性の高いIGBTインバータ駆動用電動機としている。

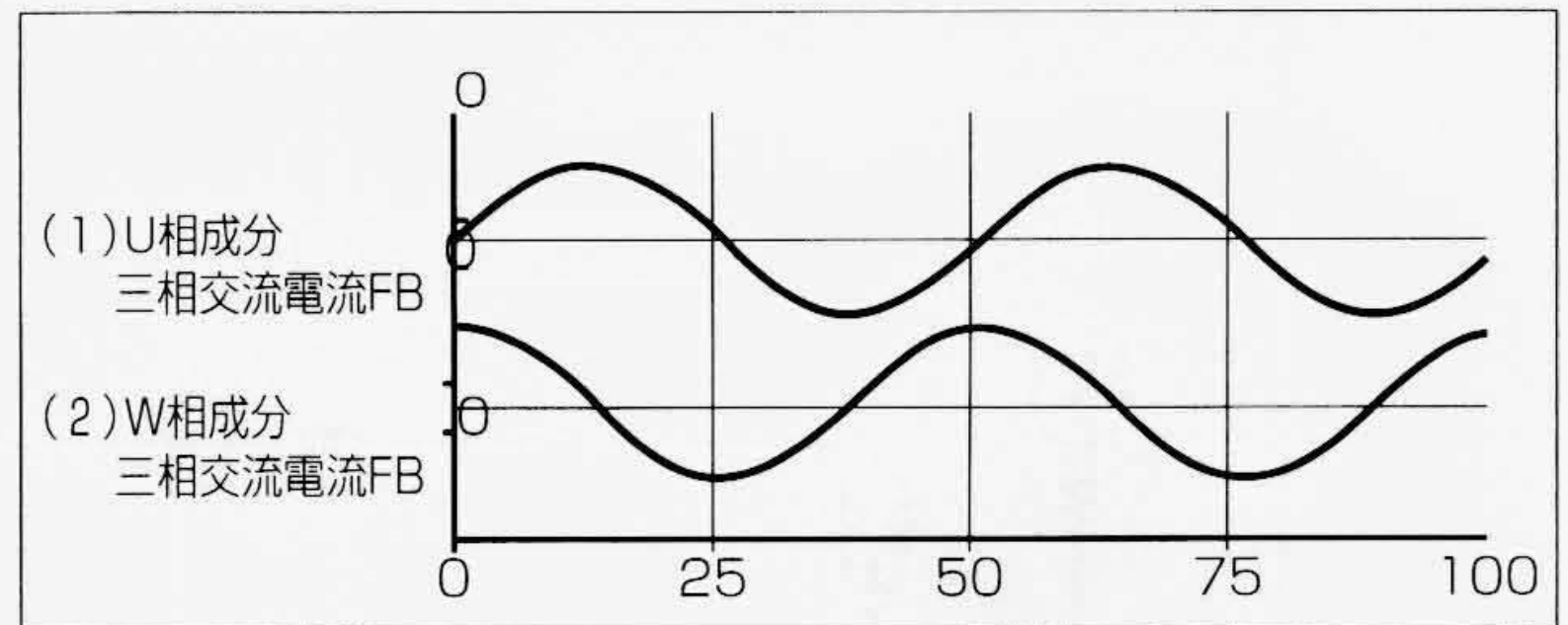
4.2 IGBT電流遮断波形

1,500 kVAインバータの各アームは、定格1.2 kV 1 kAのIGBTを4並列で構成している。この4並列間の電流バランスはIGBT素子の実装配置とIGBT間を接続するバーのインダクタンスに大きく左右される。そこで、シミュレーション技術を駆使してバー構造を設計した。4並列のIGBT間の電流バランスを±6%以内にできた実測結果を図5に示す。定格1 kAのIGBTの4並列で合計4,000 Aを遮断したIGBTコレクタ電流波形である。この4,000 Aは1,500 kVAインバータ定格電流1,130 Aの3.5倍であり十分な値である。

4.3 RAS機能

保守支援およびトラブルシューティング支援用の直列多重インバータのRAS(Reliability, Availability and Serviceability)機能として、(1) 運転データ表示、(2) 故障表示、(3) トレースバック、(4) マニュアル運転機能がある。

トレースバックデータの一例を図6に示す。トレース



注：略語説明 FB(Feed back)

図6 トレースバックデータの一例

トラブル発生時の運転状態を記憶しており、波形を作図することができる。

バックデータはパソコンを使用した専用メンテナンスツールでダウンロードされ、故障要因、出力速度・電流などの運転データ出力、および運転データを波形で出力することができる。また、メンテナンスツールからキー操作で電動機の各種の単独運転を可能としている。

4.4 制御盤構成

1,500 kVA直列多重IGBTインバータの制御盤では、冷却にヒートパイプ方式を採用し、シミュレーションを駆使した低インダクタンス構造のブスバーを用いたIGBT並列構成の各モジュールをユニット化して保守性の向上と小型化を図っている。ユニット化により、万一のトラブル時での復旧時間の短縮を図っている。

5 おわりに

ここでは、高力率・低高調波という、電源環境にクリーンな圧延主機用大容量GTOインバータドライブシステムと中容量IGBTインバータドライブシステムの製品化について述べた。

これらは、電源環境を重視する設備ニーズに十分対応できるものである。

日立製作所は、インバータドライブシステムのいっそうの高性能化、小型化を目指して、システムのコンパクト化のための新技術開発に今後も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, 平成6年度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) 奥山: 講演論文集, 平成4年度電気学会産業応用全国大会, シンポジウムS1-3(1992-8)
- 3) 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)
- 4) 長南, 外: 最新の鉄鋼用インバータドライブシステム, 日立評論, 77, 3, 239~244(平7-3)