

高品質鋼板を作り出す圧延機用 インバータドライブシステム

Application of Inverter-Fed AC Drive Systems to Rolling Mills for Producing
High-Quality Steel Plates

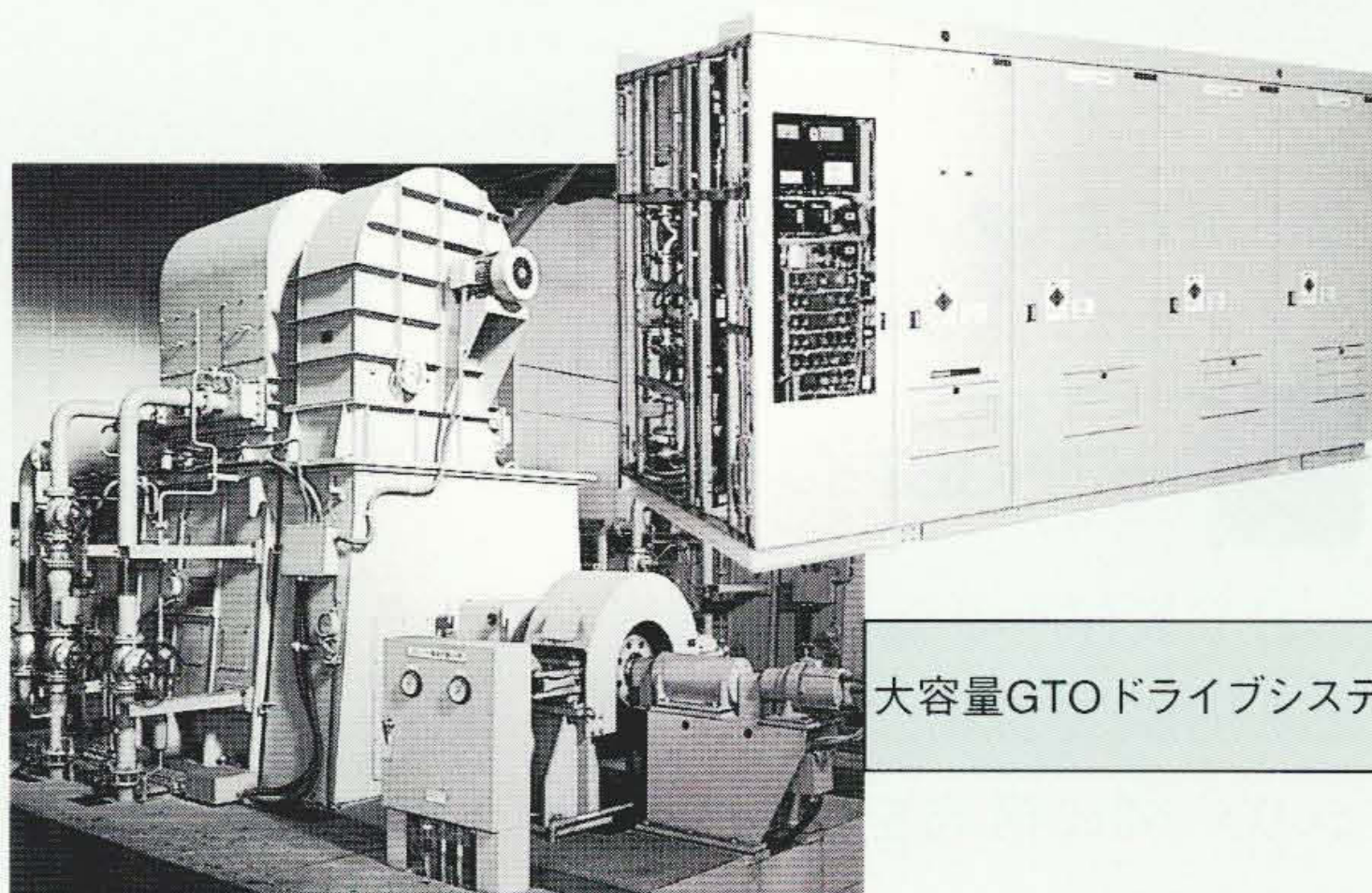
高橋潤一 Jun'ichi Takahashi

執行正謙 Masakane Shigyô

小林清隆 Kiyotaka Kobayashi

伊君高志 Takashi Ikimi

高品質鋼板を作り出す
日立製作所の圧延機用主機ドライブ



大容量GTOドライブシステム



大容量IGBTドライブシステム

注：略語説明

GTO (Gate Turn-off Thyristor)

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

圧延機主機用インバータドライブシステム

圧延機主機用大容量インバータドライブシステムは、GTO素子・IGBT素子を用いた高性能ドライブシステムである。熱延ラインや冷延ラインに適用できる。

大型設備を抱える鉄鋼業界では、設備の老朽化対策と生産性向上を目的に、主機電動機の更新が進められている。従来、主機電動機には主として直流機が使用されており、その更新には、設置スペースや電源容量などの制約が多い。さらに、生産計画の面からは、更新期間も重要なポイントとなっている。近年、パワーエレクトロニクスの技術進歩により、6 kV GTO (Gate Turn-off Thyristor) と3.3 kV IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が実用化された。これら素子の応用によって大容量インバータドライブシステムが製品化され、制御技術の高度化と相まって、高品質な鋼板を生産できるようになってきた。

日立製作所は、主機用ドライブシステムとして最大20 MVAのGTOドライブシステムと、8.8 MVA IGBTドライブシステムを製品化した。また、補機ドライブシステムについてはIGBTインバータでラインアップをそろえており、ユーザーのニーズにこたえる製品開発を進めている。

1 はじめに

鉄鋼プラントでは、交流機を可変速制御するインバータドライブシステム(ACドライブシステム)が早くから適用され、小容量機から大容量機まで拡大されている。これは製品の品質化・歩留り向上やプロセスの安定操業などのニーズと、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) やGTO (Gate Turn-off Thyristor) に代表され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たためであり、大きな効果が出ている¹⁾。一方、電源高調波の低減と、

老朽化設備更新時の高効率化へのニーズが高まっている。

日立製作所は、これらのニーズにこたえて、IGBT・GTOを用いた正弦波コンバータとインバータドライブシステムを、小容量機から大容量機まで製品化している。

ここでは、鉄鋼用インバータドライブシステムとしてシリーズ化した、小容量から大容量のIGBTインバータとGTOインバータドライブシステムの概要および特徴について述べる。

2 鉄鋼プラントでのACドライブシステムの適用

鉄鋼プラントで使用される電動機は、数キロワットの小容量機から数千キロワット～10,000 kW級の大容量機

まで、また、回転数が低速から高速までと広範囲にあり、各電動機容量・回転数に適した変換器方式が適用されている。

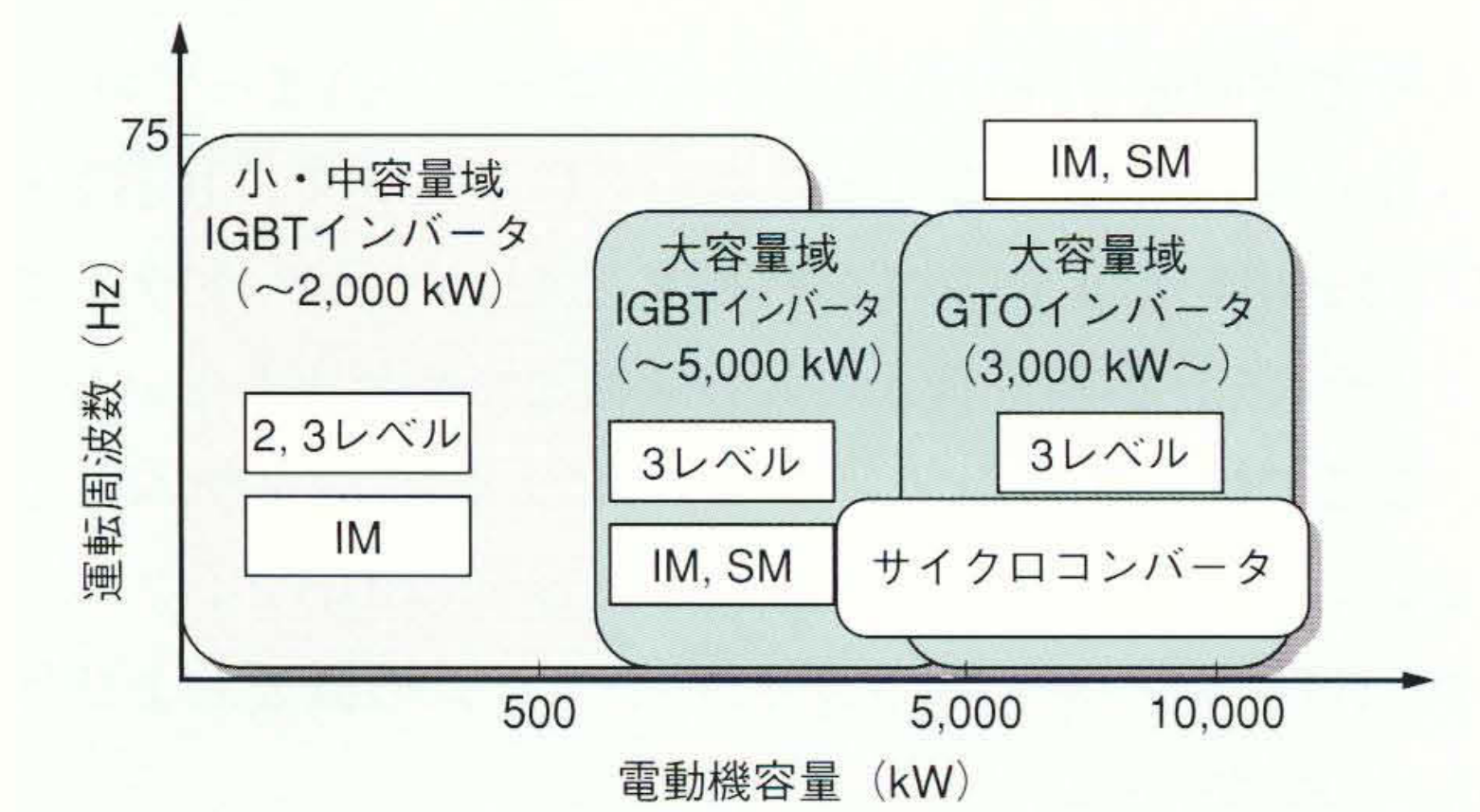
2.1 変換器方式による分類

最近のACドライブシステムの適用マップを図1に示す。これまでは、ACドライブの小・中容量域では2レベル※1)または3レベル※2) IGBTインバータを適用してきた。大容量域では3レベルGTOインバータやサイクロコンバータを主に適用してきたが、最近のIGBT素子の高圧・大容量化に伴い、約5,000 kWの大容量域まで3レベルIGBTインバータの適用を拡大している。また、サイクロコンバータ方式には出力周波数に制限があるため、主に低速機に適用している。

2.2 IM駆動方式とSM駆動方式

AC可変速電動機には、IM(誘導電動機)とSM(同期電動機)の2種類ある。小・中容量機のACドライブには主としてIMを、大容量機ではIMとSMの両方を採用している。大容量機駆動方式の比較を表1に示す。SM駆動方式の場合は、電動機力率を1.0に制御できることから、変換器容量をIM駆動方式に比べて小さくできる(0.8~0.9倍)。そのため、大容量の場合はSM駆動方式が有利である。一方、IM駆動方式では、かご形ロータが使用されるのでメンテナンスフリーである。SM駆動方式では、界磁変

※1) 2レベル：1相分を構成する素子が2直列で、+または-の相電圧を出力する方式
※2) 3レベル：1相分を4直列で構成し、+、0、-の相電圧を出力する方式



注：略語説明 IM (Induction Motor), SM (Synchronous Motor)

図1 ACドライブシステムの適用マップ

数千ワットから10,000 kWを超える容量の電動機には、それぞれに適した変換器方式を適用する。

表1 大容量機駆動方式の比較

大容量域での、IM駆動方式とSM駆動方式の比較を示す。

項 目		IM駆動方式 ドライブ装置	SM駆動方式 ドライブ装置
電 動 機	容 量	3,000 ~10,000 kW以上可能	
	力 率	0.88~0.93	1.0
	効 率	0.92~0.97	0.92~0.97
	ロ ー タ 形 状	かご形	突極形
	メンテナンス	メンテナンスフリー	スリップリング付き
駆 動 方 式	変 換 器 方 式	IGBT, GTOインバータ, サイクロコンバータ	
	変換器容量比	1.0	0.8~0.9
	界磁変換器	不要	要

換器が必要であり、界磁巻線用スリップリングとブラシのメンテナンスが必要となる。

3 補機IGBTインバータドライブシステム

日立製作所の小・中容量インバータでは、全シリーズともIGBTを採用している。小・中容量IGBTインバータシリーズの構成を表2に示す。変換器単機容量で5~2,100 kVAまで、2セット並列構成で4,200 kVAまでをそれぞれ製品化した。

3.1 小容量インバータ

5~120 kVAのインバータでは、主回路と制御回路を組み込んだユニットインバータを積み重ねる構造とした。盤1面に最大8台のユニットインバータが実装でき、設備に合わせて自由な組合せができる。200~800 kVAのインバータでは、3相分を1単位としたユニットを、インバータ容量に合わせて組み合わせて実装する構造とした。素子としては、1,200 V 1,000 A IGBTを採用している。また、800 kVAのインバータでは、400 kVAインバータ

表2 小・中容量IGBTインバータのシリーズ構成
小・中容量IGBTインバータの基本仕様を示す。

	小容量				中容量				
	変換器容量(kVA)	5~120	200	400	800	800	1,500	2,100	3,000 4,200
定格出力電圧	380 V (最大 410 V)				760 V (最大 820 V)				
定格出力電流(A)	7.5~182	305	610	1,215	610	1,130	1,610	2,260	3,220
過負荷仕様	150% 60 s								
構 造	ユニット 段積み				自立盤				
方 式	2レベル				3レベル				
電 動 機	3端子		6端子	3端子		6端子			

を2台並列運転し、電動機を2巻線並列構造(以下、6端子電動機と言う。)としている。

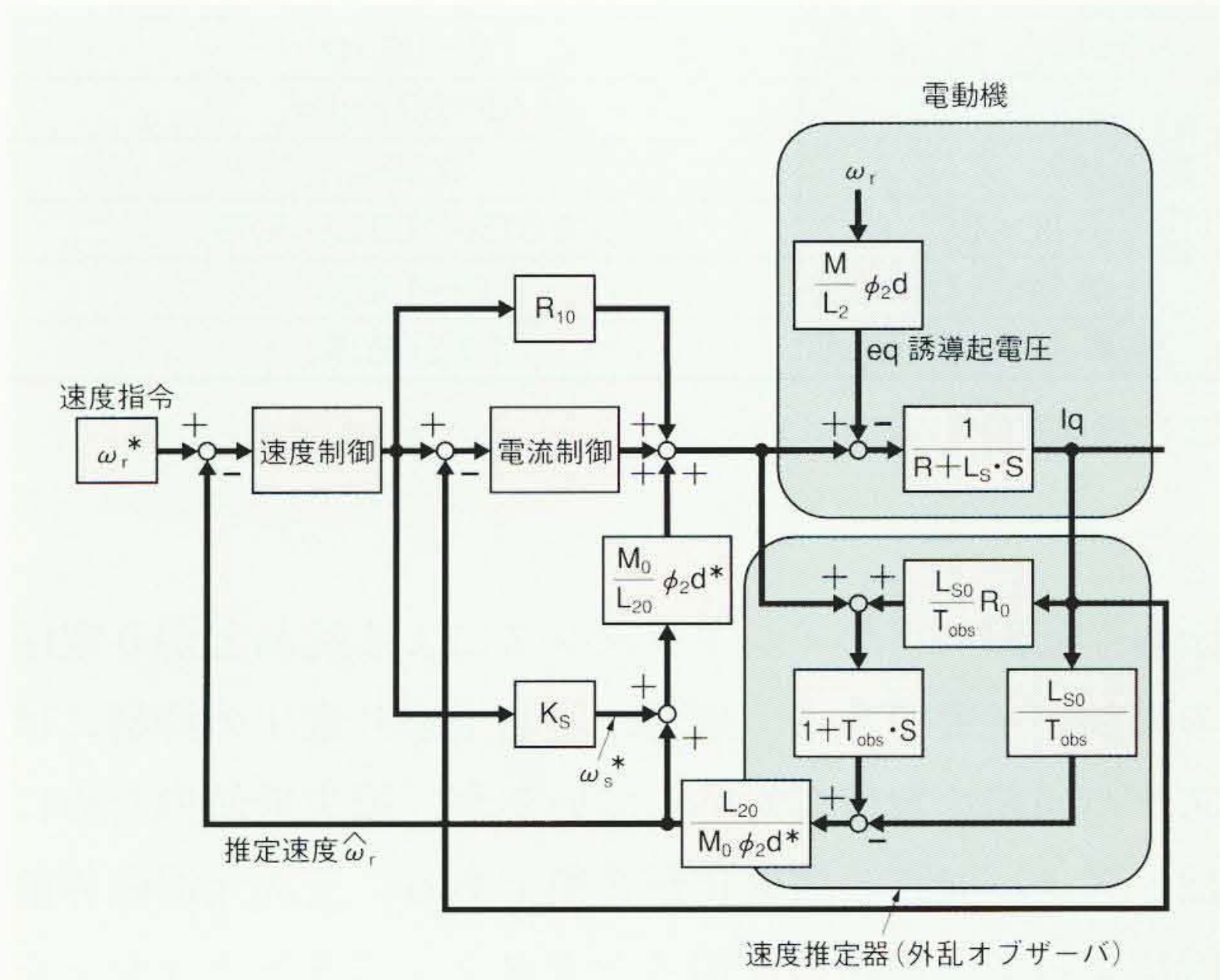
3.2 中容量インバータ

800~4,200 kVAのインバータでは、3レベルインバータ方式を採用している。IGBTユニットでは、8個の1,200 V 1,000 A IGBTを使用し、4直列×2並列の1相分を構成する。このユニットを並列に使用することにより、800~2,100 kVAインバータをシリーズ化した。3,000 kVAと4,200 kVAインバータは、1,500 kVAと2,100 kVAインバータを2セット並列構成にしたものであり、6端子電動機を駆動する。

3.3 速度センサレスベクトル制御の適用例

補機IGBTインバータドライブシステムでは、電動機の据付け環境が厳しい場合に、速度センサなしでベクトル制御を行う「センサレスベクトル制御」を適用している。速度センサレスベクトル制御の構成²⁾を図2に示す。

速度推定には外乱オブザーバを応用し、速度推定と制御系を分離することにより、高精度・高応答の制御を可能としている。また、これまでのセンサレスベクトル制御の課題であった低速域の不安定現象・トルク不足現象に対しては、零速度高トルク制御方式³⁾を適用することによって解決している。現在、連続焼鈍ラインのハース



注1：略語説明 R₁₀, R (一次抵抗), L_{S0}, L_S (一次漏れインダクタンス) L₂₀, L₂ (二次漏れインダクタンス), M₀, M (相互インダクタンス) (上記記号中, 前者は制御側の設定値を, 後者はモータ内の数値をそれぞれ指す。) K_S (すべり係数), T_{obs} (オブザーバ遅れ時定数) ω_r (モータ速度), ω_s (すべり周波数), eq (誘導起電圧) I_q (トルク電流), φ_{2d} (二次磁束)

注2：図中, 添字*は指令値を, ^は推定値を示す。

図2 速度センサレスベクトル制御の構成
外乱オブザーバを用いて、制御系と速度推定とを分離している。

ロールや熱延ホットランテーブルなど、インライン補機電動機への適用拡大を図っている。

4 主機インバータドライブシステム

2,000 kWを超える圧延主機電動機を駆動するドライブシステムとして、3.3 kV 1.2 kA IGBT素子を用いた大容量IGBTドライブシステムと、6 kV 6 kA GTO素子を用いた大容量GTOドライブシステムを製品化した。大容量高効率および小型化を目指すために、回路解析や電磁界解析、構造解析、制御解析などのシミュレーション技術を駆使し、最適設計を図った。

4.1 大容量GTOインバータドライブシステム

主機GTOドライブシステムの基本仕様を表3に示す。GTOドライブシステムは、約3,000~10,000 kWを超える大容量の圧延主機に適用される。GTO変換器には、単機容量10 MVAのインバータと、2セット並列構成の20 MVAインバータの2種類がある。主回路冷却には水冷を用い、装置の小型化を図っている。また、制御装置は、コンバータ制御とインバータ制御を1面で構成している。制御装置盤面のグラフィックパネルを用いてユーザーインタフェース機能を充実し、さらに、制御データトレースやPWM(Pulse Width Modulation)パルストレースなどのRAS(Reliability, Availability, Serviceability)機能により、保守性の向上を図っている。

4.2 主機IGBTインバータドライブシステム

4,400 kVA IGBTインバータの外観を図3に示す。インバータは、変換器盤と共通盤(制御回路・操作回路)で構

表3 主機GTOドライブシステムの基本仕様
GTOドライブシステムの変換器、制御性能の基本仕様を示す。

項目		仕様
変換器仕様	方式	3レベル
	定格出力容量	10,000 kVA
	定格出力電圧	AC 3,600 V
	定格出力電流	AC 1,600 A
	過負荷仕様	150% 60 s
	GTO定格	6 kV 6 kA
	効 率	約96%
制御仕様	電動機容量	5,000~6,400 kW*
	電 源 力 率	約1.0
	出力周波数	0~60 Hz
	速 度 応 答	40~60 rad/s**
	トルクリップ	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による。**機械系の構成による。

成する。高電圧回路と低電圧制御回路を分離することにより、ノイズ耐量の向上を図った。盤面にはグラフィックパネルを取り付けて、電動機の運転状態をリアルタイムに表示するとともに、起動時のインタロック表示、故障発生時の故障要因表示など、GTOインバータと同様にRAS機能の充実を図っている。

大容量IGBTドライブの基本仕様を表4に示す。変換器単機容量では1,300～4,400 kVAまで、2セット並列構成では8,800 kVAまでをそれぞれシリーズ化した。3.3 kV 1.2 kA IGBT素子を使用し、3レベル方式を採用している。4,400 kVAインバータを主機用IMに適用した場合、電動機容量は、「過負荷：175% 60秒」の条件で、約3,000 kWである。スナバ回路を簡素化し、IGBT素子のスイッチング周波数を適正化することにより、約98%の変換器効率を達成した。冷却方式には、冷却能力の高いヒートパイプを採用し、強制風冷冷却とした。その結果、特別な冷却装置を必要とせず、保守性の向上を図っている。

コンバータに正弦波PWM制御を採用することにより、約1.0の電源力率を実現し、かつ電源高調波を低減する機能を備えている。インバータには、ベクトル制御に加え、状態フィードバック制御(軸ねじれ振動制御)・フィードフォワード制御[揃(せん)速性制御]を採用し、圧延主機ドライブシステムとして必須な技術を備えている。

4.3 主機IGBTインバータの主要技術

4.3.1 並列盤間の電流バランス技術

主機IGBTインバータでは、変換器盤1面を基本容量とし、列盤構成で容量拡大を図っている。このため、列盤間の電流をバランスさせることが重要である。最適な電流バランスを実現するために、接続ブスバー構造をシミュレーション解析によって設計した。4列盤構成の接続ブスバーシミュレーション解析モデルを図4に示す。

解析にあたっては、IGBTスイッチング時のブスバー電流変化による磁束の影響を考慮する必要があるため、回路動作と三次元電磁界変化との連成解析を行った。シミュレーションによって決定したブスバー構造でIGBTをスイッチング動作させた場合の電流バランス実測波形を図5に示す。IGBT素子オフ時の電流アンバランス率は、±6%以下に抑えられている。列盤間の電流バランス技術により、異なる変換器容量でも同一のユニットが使用できる。

4.3.2 主回路配線インダクタンスの低減技術

IGBTは高速にスイッチング動作する素子であること



図3 主機 IGBTインバータ
主機IGBTインバータは、共通盤1面と、容量によって1面から最大4面の変換器盤で構成する。4面構成の4,400 kVA変換器盤を図に示す。

表4 大容量 IGBTインバータのシリーズ構成
IGBTドライブシステムの変換器、制御性能の基本仕様を示す。

項目		仕様					
変換器仕様	方 式	3レベル					
	定格出力容量(kVA)	1,300	2,400	3,400	4,400	6,800	8,800
	定格出力電圧	AC 2,090 V					
	定格出力電流(A)	350	660	930	1,220	1,860	2,440
	過 負 荷 仕 様	150% 60 s					
	I G B T 定 格	3.3 kV 1.2 kA					
	効 率	約98%					
	列 盤 構 成	1面	2面	3面	4面	3面×2	4面×2
	電 動 機	3端子				6端子	
制御仕様	出力周波数	0～60 Hz					
	速度応答	40～60 rad/s*					
	トルクリプル	0.30%					
	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：*機械系の構成による。

から、回路の寄生インダクタンスによる跳ね上がり電圧の抑制が重要である。通常、跳ね上がり電圧の抑制にはスナバ回路を設けて対応しているが、損失低減のためには、スナバ回路の簡素化が必須である。三次元電磁界解析によって主回路の配線インダクタンスをシミュレーションし、主回路ブスバー構造の最適化を図った。ラミネートブスバーの採用によって主回路低インダクタンス化を図ったIGBTユニットの外観を図6に示す。

5 主機ドライブシステムの制御技術

鉄鋼プラントの主機ドライブシステムには、(1) システムの高効率化や電源力率の改善、(2) 電源高調波抑制

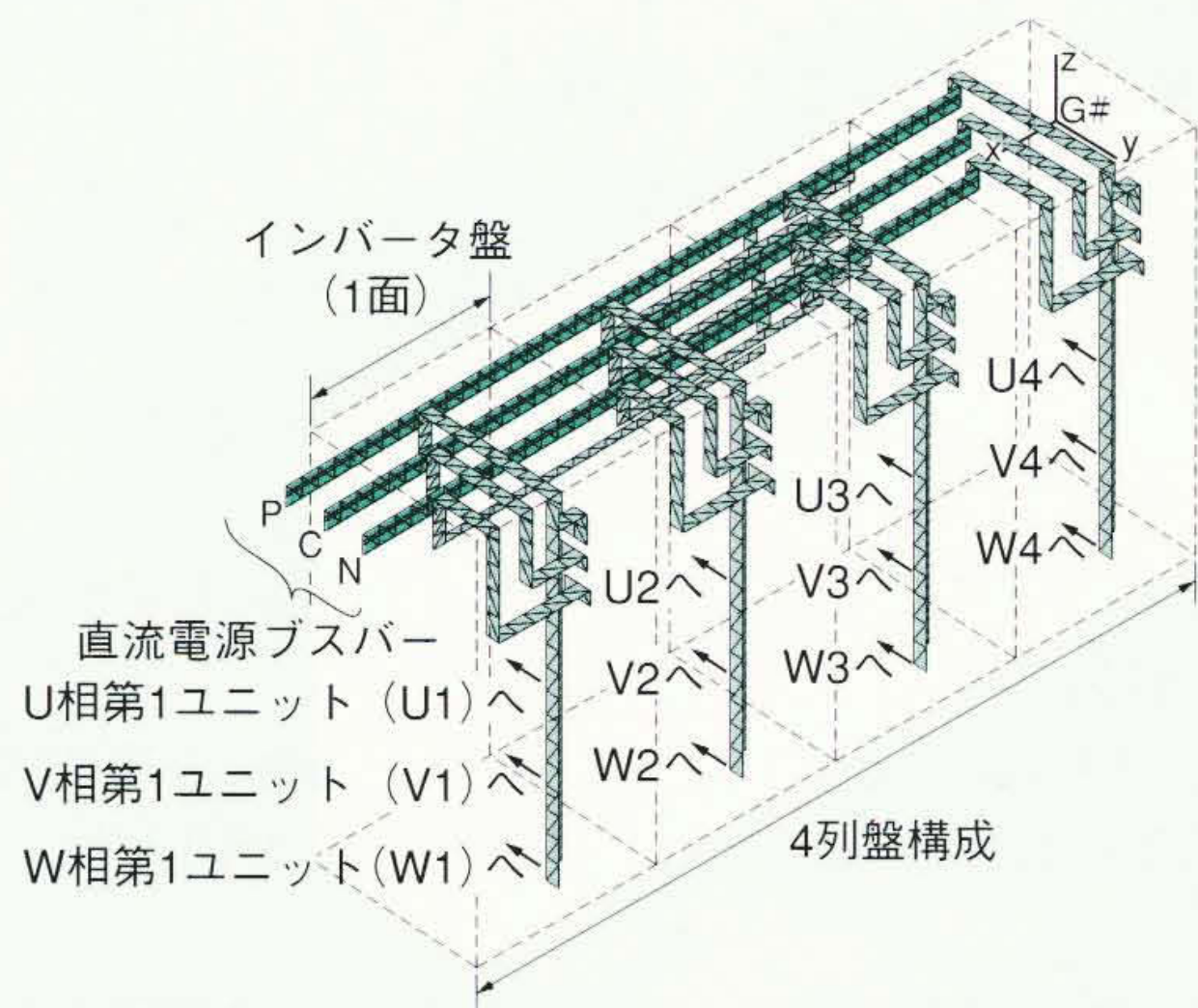


図4 盤間接続ブスバーのシミュレーション解析モデル
盤内のブスバーを三次元でモデル化し、各導体の電流によって発生する磁束の相互作用による電流バランスを解析した。

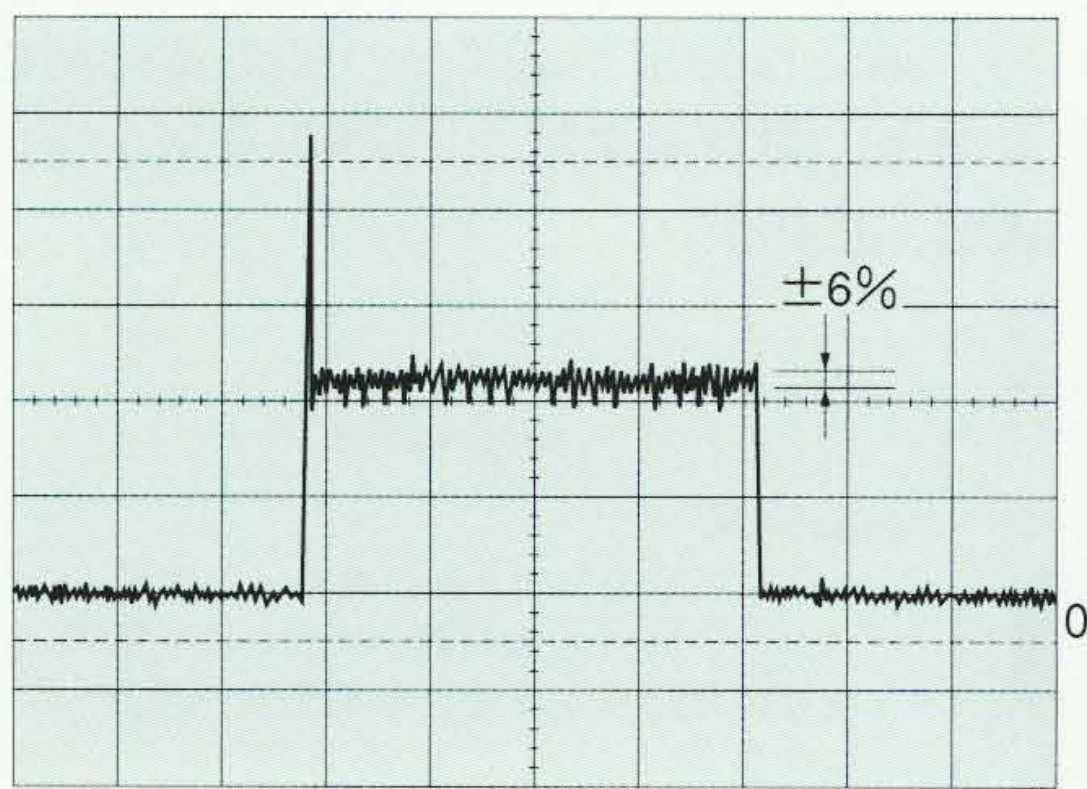


図5 IGBT素子電流バランスの実測波形
4並列接続したIGBT素子間の電流が±6%でバランスしている。

などの電源環境改善、(3) 機械系を含めたドライブシステム全体の高応答化が要求される。大容量ドライブシステムでは次のような制御を採用し、これらの課題を解決している。

5.1 変換器損失低減技術

PWM変換器の場合、変換器損失は、スイッチング周波数に大きく依存する。スイッチング周波数を低減することによって素子損失を低減できるが、電流リップルの増加による電流応答低下や、電流ビートによるトルク脈動の増加などが懸念される。これらの問題解決のため、三角波キャリア信号(以下、キャリアと言う。)を基準にして、電流検出や出力電圧を制御する手法を取り入れた。

電流リップル増加に対しては、キャリアに同期した平均値電流検出方式^④を採用し、また、電流ビートを抑制するためには、出力電圧誤差を補正する予見PWM制御方

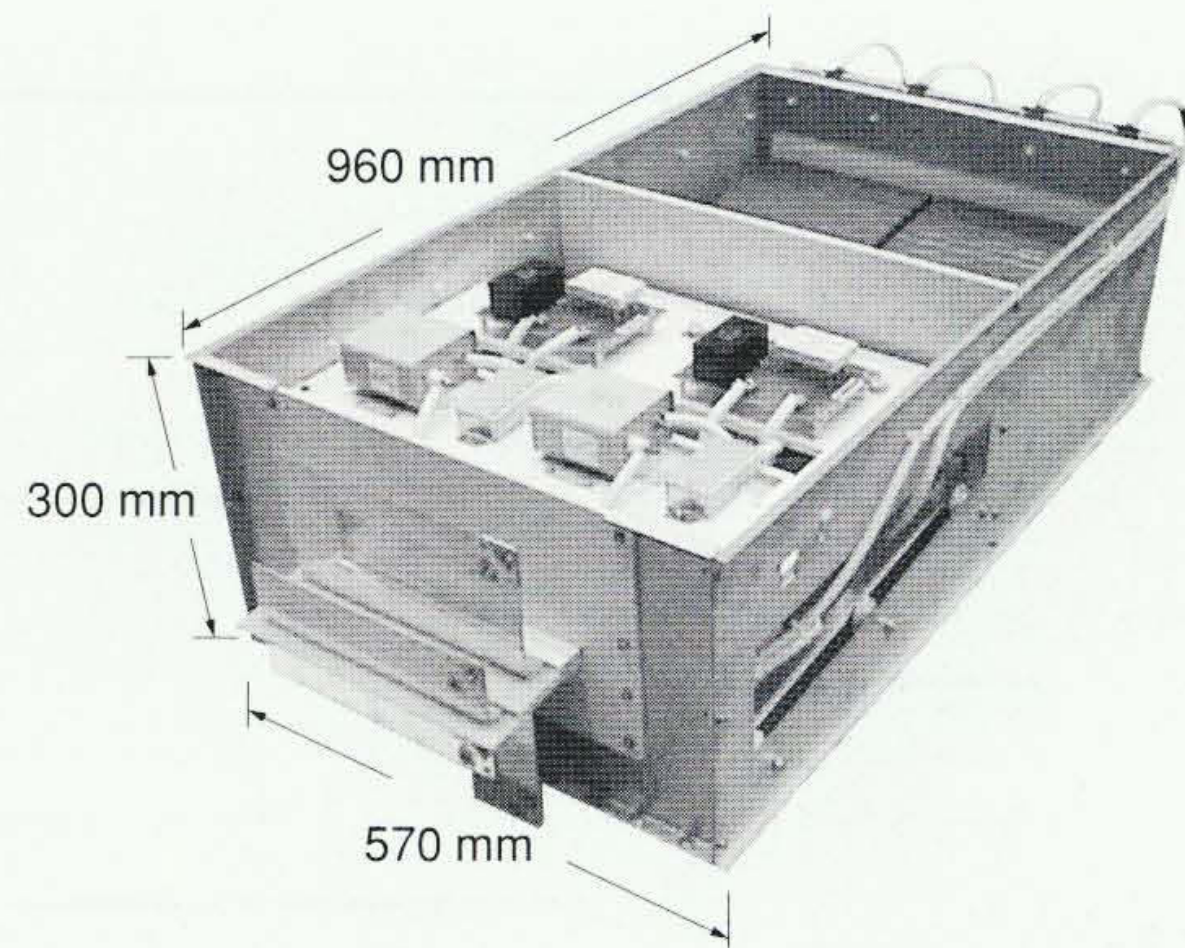


図6 大容量IGBTユニット
ラミネートブスバーの採用によって主回路インダクタンスを低減し、スナバ回路の簡素化を図った。

式^⑤を開発し、制御性能の低下を防止している。

5.2 高調波抑制技術

交流電源を直流電源に変換するコンバータでは、スイッチング周波数低減の影響が、電源に対する高調波成分の増加として現れる。この高調波を低減する対策として、PWMキャリア位相制御方式^⑥を採用している。これは、複数のコンバータを協調制御し、各コンバータのキャリアに位相差を持たせることにより、高調波電流を低減する方法である。

5.3 高応答化

板厚精度向上のために、ドライブシステムにも高応答が求められ、最近では、指令応答で「 $\omega_c = 40 \sim 45 \text{ rad/s}$ 」が標準化しつつある。鉄鋼プラントのドライブシステムは3慣性系で近似される共振機械系であり、圧延機では一次共振周波数が通常15 Hz程度になる。したがって、「 $\omega_c = 45 \text{ rad/s}$ (約7.2 Hz)」の応答を達成するためには、軸ねじれ振動抑制制御が必須である。日立製作所は、圧延ロール端の速度と軸ねじれ角度をオブザーバで推定し、極配置法に基づいて最適ゲインを決定する「軸ねじれ振動抑制制御」を採用している。これにより、指令応答、負荷外乱応答ともに優れた制御を実現している。また、この制御は機械・電気系を含めたシミュレーションによって事前検証が可能であり、実機運転での調整を短時間で行うことができる。

5.4 実機適用例

これらの制御を熱間仕上圧延機(10,000 kW SM駆動)に適用した結果を図7と図8に示す。

速度ステップ応答波形を図7に示す。軸ねじれ振動が抑制され、圧延ロール端速度推定値で「 $\omega_c = 45 \text{ rad/s}$ 」の

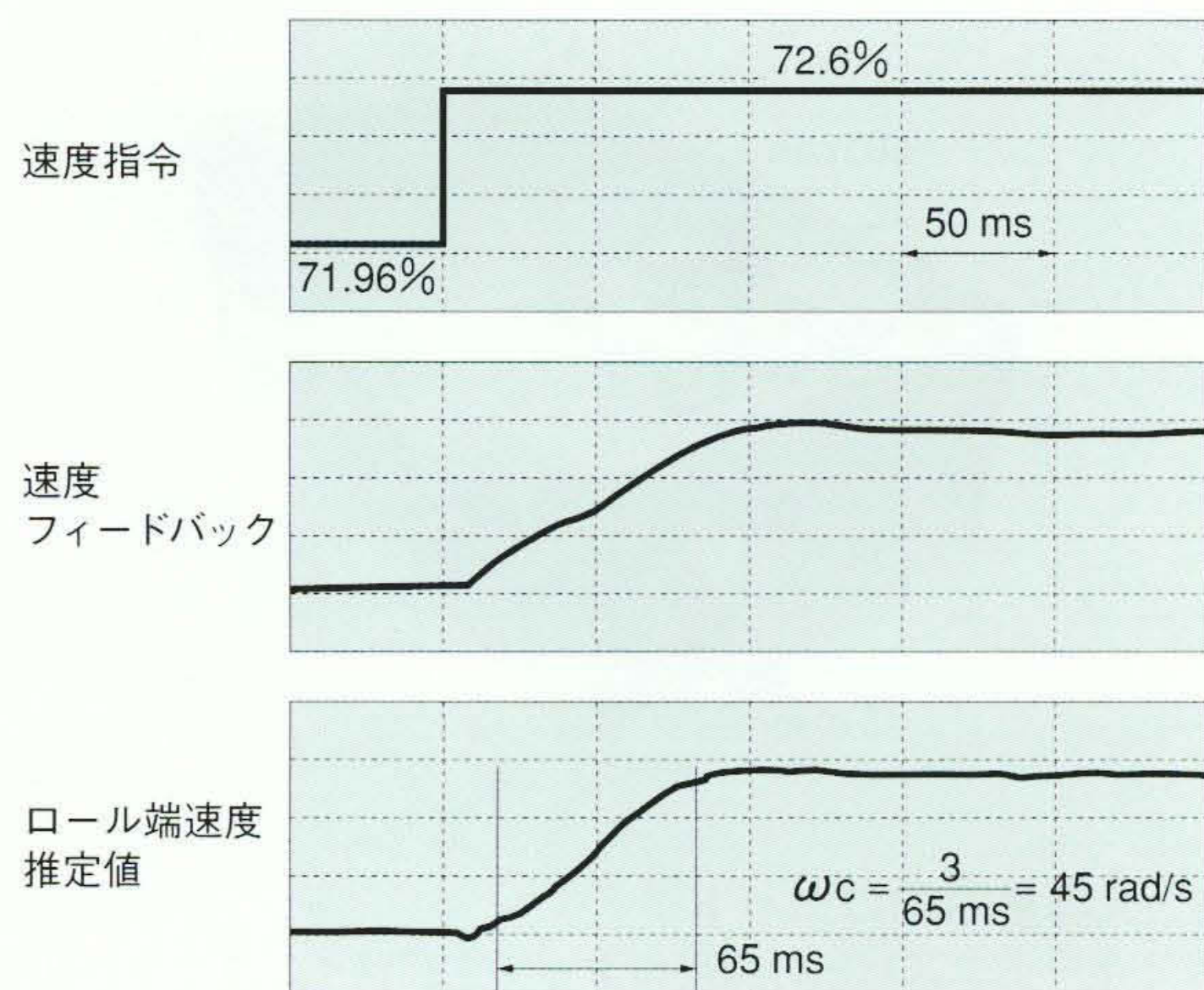


図7 速度ステップ応答

オブザーバによって圧延ローラ端速度を推定し、軸ねじれ振動を抑制する。「 ωc =約45 rad/s」の高応答を実現している。

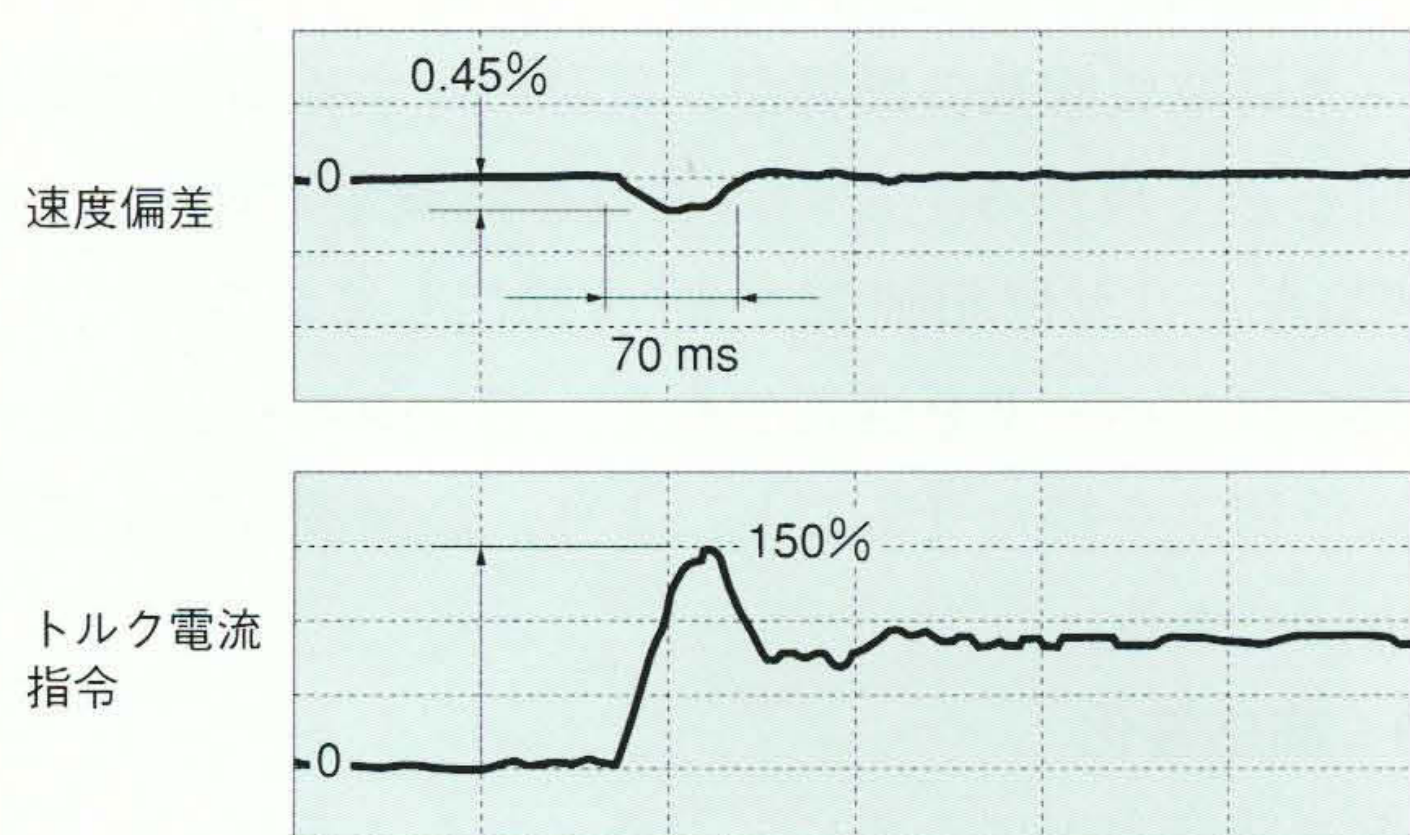


図8 インパクト負荷特性

圧延材料かみ込み時の軸ねじれ振動が抑制され、「速度ドロップ量=約0.45%」、「回復時間=70 ms」の高速で速度が回復している。

高応答を実現していることがわかる。実圧延での圧延材料かみ込み時のインパクト負荷特性を図8に示す。「速度ドロップ量=約0.45%」、「回復時間=約70 ms」の良好な特性を得ていることがわかる⁶⁾。

6 おわりに

ここでは、鉄鋼用インバータドライブシリーズとして小・中容量IGBTインバータと、主機ドライブ用としてIGBTインバータおよび大容量GTOインバータについて述べた。

日立製作所が製品化したこれらのドライブシステムは、電源環境の改善、高効率、省エネルギーなどで、設備のニーズに十分対応できるものと考えます。今後もドライブシステムのいっそうの高性能化、小型化を目指すと

ともに、ユーザーニーズに合ったドライブシステムの開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) 飛世, 外: 中・大容量鉄鋼用インバータドライブシステム, 日立評論, 78, 6, 457~462(平8-6)
- 2) 戸張, 外: 速度センサレスベクトル制御の高応答化の検討, 平成6年電気学会全国大会, [6]-26
- 3) 戸張, 外: 速度センサレスベクトル制御の零速度域における高トルク制御法, 平成10年電気学会全国大会, [4]-301
- 4) 梓沢, 外: 鉄鋼における高効率化と高調波抑制技術講演論文集, 平成10年電気学会産業応用部門全国大会, シンポジウムS4-2
- 5) Iwaji, et al.: A New PWM Method to Reduce Beat Phenomenon in Large-Capacity Inverters with Low Switching Frequency, IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 35, pp.606-613, May/June 1999
- 6) 秋田, 外: 適応型磁束オブザーバによる同期電動機のトルク精度向上, 講演論文集, 平成9年電気学会産業応用部門全国大会, P.8.90

執筆者紹介



高橋潤一

1972年日立製作所入社, 電力・電機グループ 情報制御システム事業部 電機制御システム設計部 所属
現在, 鉄鋼用ドライブシステムの設計・開発取りまとめに従事
電気学会会員
E-mail: j-takaha@omika.hitachi.co.jp



執行正謙

1990年日立製作所入社, 電力・電機グループ 情報制御システム事業部 電機制御システム設計部 所属
現在, 鉄鋼用ドライブシステムの設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: sigyo@omika.hitachi.co.jp



小林清隆

1983年日立製作所入社, 電力・電機グループ 情報制御システム事業部 電機制御システム設計部 所属
現在, ドライブシステムの設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: k-kobaya@omika.hitachi.co.jp



伊君高志

1987年日立製作所入社, 日立研究所 パワーエレクトロニクス第一研究部 所属
現在, 鉄鋼・産業用ドライブシステムの研究開発に従事
電気学会会員
E-mail: ikimi@hrl.hitachi.co.jp