

単機 9,000 kW 誘導加熱用周波数変換装置

9,000 kW Frequency Converter for Hot Bar Heater

伊藤 克郎

ITO H Katsuro

森浦 康友

MORIURA Yasutomo

土斐崎 哲嗣

DOIZAKI Tetsuji

鉄鋼の圧延ラインでは、省エネルギーの推進とともにより高品質な鉄材の製造のために、再加熱装置として大容量の誘導加熱装置に対するニーズがある。当社は、高周波かつ大容量の誘導加熱装置実現のため、その電源装置として、最新の回路解析技術やマイコン応用技術を適用し、1,000 Hz 帯では世界最大級の単機出力 1,500 Hz - 9,000 kW の誘導加熱装置用周波数変換装置を製品化した。

In the field of hot-strip mill facilities for steel, there is a need for large-capacity induction-heating equipment to save energy and raise product quality. Toshiba has commercialized a 9,000 kW frequency converter for induction-heating equipment with the world's largest-class rating. The latest circuit analysis techniques and microprocessor application control were applied in the commercial production of this equipment.

1 まえがき

導電体に交番磁界を与えると、导体内部には渦電流が誘起される。この渦電流と導電体の電気抵抗により発生するジュール熱を利用した加熱方法を誘導加熱と呼ぶ。誘導加熱を応用した身近な器具としては電磁調理器などがあるが、工業用としても長い歴史がある。

誘導加熱は火炎による加熱に比較し次の特長がある。

- (1) 直接加熱であるため加熱効率が高い。
- (2) 電気的なコントロールのため制御性が改善される。
- (3) 被加熱物のみ電氣的に加熱するので環境にやさしい。

このような特長を持つ誘導加熱を鉄鋼製造ラインの圧延ラインに適用し、粗バー(25 ~ 40 mm 程度の板厚の鉄板)をヒータ用コイルが発生する磁界中を通過させて加熱する装置が、粗バーヒータである(図1)。

粗バーヒータにより仕上げ圧延前の粗バーの温度を所定の温度に精度よく昇温することで、高品質な鉄材の製造が可能になる。

粗バーヒータは、“短時間”、“短ライン長”で粗バーを“均一加熱”することが材料の品質向上に寄与する。また、既設の圧延ラインに追加設備として設置されることが多く、スペース削減の目的から少ないヒータ台数で大出力が望まれ、単機大容量のヒータ及びその電源である大容量の周波数変換装置のニーズが高まっている。これに応えるため、単機容量では世界最大級の 1,500 Hz - 9,000 kW の周波数変換装置を製品化した。

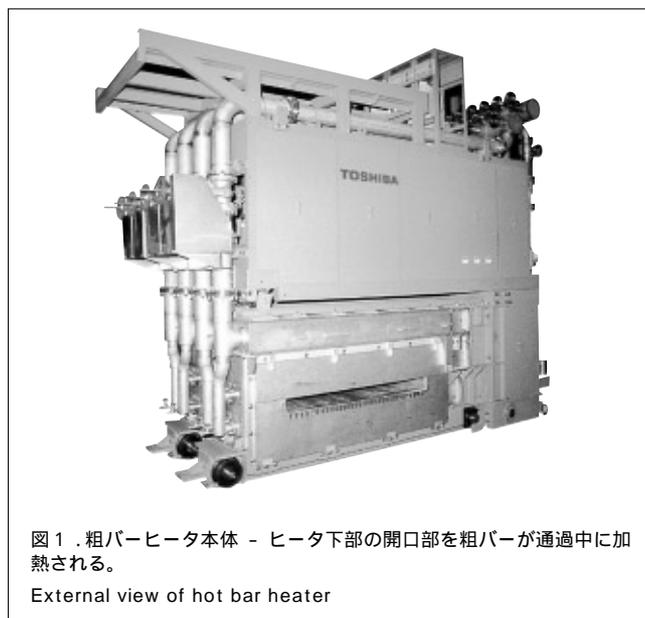


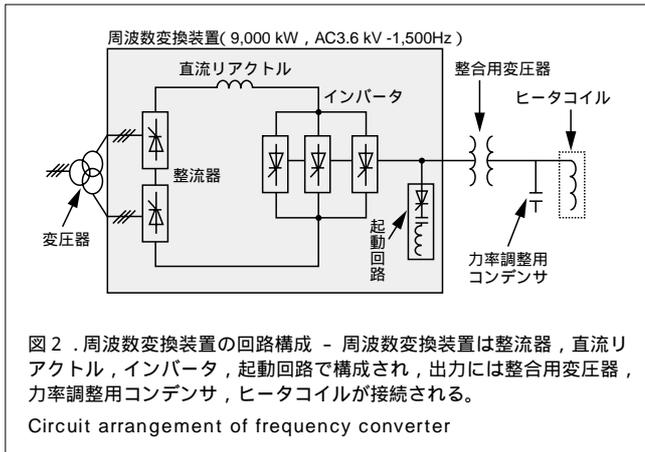
図1. 粗バーヒータ本体 - ヒータ下部の開口部を粗バーが通過中に加熱される。

External view of hot bar heater

2 粗バーヒータシステムの回路構成

粗バーヒータシステムは、ヒータ用コイル本体、力率調整用コンデンサ、整合用変圧器、及び周波数変換装置などで構成される(図2)。

粗バーの加熱には、1,500 Hz 近傍の周波数による加熱が効果的であるため、コイルのインダクタンスと力率調整用コンデンサの共振周波数は 1,500 Hz 近傍に設定する。この共振回路に、電力を商用周波数(50 Hz 又は 60 Hz)から 1,500 Hz に変換し供給する電源装置が周波数変換装置である。



3 周波数変換装置の主回路構成

周波数変換装置の主回路は整流器部, 直流リアクトル, インバータ部, 起動回路部で構成されている。大容量周波数変換装置の基本定格を表1に, またこの装置の外観を図3に示す。

表1 大容量周波数変換装置の定格
Ratings of 1,500 Hz - 9,000 kW frequency converter

項目	仕様
交流入力	三相, 1,010 V, 50/60 Hz
出力周波数	1,500 Hz
出力	9,000 kW
出力範囲	電力: 2.25 ~ 100 % 電圧: 30 ~ 100 % インピーダンス: 70 ~ 400 %
主回路方式	整流器部 12相整流 インバータ部 単相フルブリッジ
冷却方式	水冷(純水循環)



3.1 整流器部

整流器部は三相ブリッジをカスケード接続し, 12相整流とし低次高調波の低減を図った。

この装置の直流定格電流は4,300 Aという大電流である。そこで, 大容量高電圧サイリスタを採用することにより, ブリッジの1アームをサイリスタ1直列・1並列で構成し回路を単純化した。また, 冷却には効率の良い純水循環冷却方式を採用した。この装置は直流高電圧を扱うため, 純水冷却を適用するにあたっては電食に注意を払う必要がある。そこで, サイリスタ冷却用ヒートシンクやスナバ抵抗器などの水冷部品は, 当社の直流送電用サイリスタバルブなどの超高压技術を適用し信頼性を確保した。これはインバータ部も同様である。

また, サイリスタ及び周辺回路は後述のインバータと同様, モジュール構造とした。

3.2 インバータ部

高周波かつ大容量の出力を達成するために, インバータ回路は高電圧, 大電流の環境下で高速な動作を行う必要がある。高電圧・大電流装置ではサイリスタ1個でそのパワーを取り扱うことが不可能であり, 複数の高速サイリスタを直列及び並列接続し, インバータの1アームを構成しなければならない。このように複数のサイリスタで1アームを構成する場合, その電圧分担と電流分担の均一化が技術開発の重要なポイントである。1,500 Hzの高周波ではサイリスタに逆電圧が印加される時間が短いので, ターンオフ時の電圧分担が崩れた場合, 正常な運転が不可能になる。また, わずかなインダクタンスの差でも, 高周波においては大きなインピーダンスの差になり, 電流分担を悪化させる。

そこでサイリスタを直列接続にするにあたっては, 電圧分担を均一化するために, デジタルシミュレーションにより適切なスナバ回路を選定するとともに, 素子の特性管理を厳密に行い, 直列素子間の電圧分担の均一化を図った。

スイッチング時の電圧分担試験を行った際の波形を図4に示す。直列接続されたサイリスタの電圧分担が, ターンオン・ターンオフのダイナミックな動作中であっても均等化され, すべてのサイリスタが確実にターンオフしていることが確認できる。

また, 並列素子間の電流分担を均一化するために, 三次元構造を考慮した回路のインダクタンス解析などを実施し, プスワークの形状を決定した。これにより並列サイリスタ間のインダクタンスの適正化を図り, 電流分担の均等化を行うことができた。運転時における電流分担波形を図5に示す。高周波下においても電流分担の不均衡率は10%以下であり, 適切なインダクタンス分布であることを示している。

構造的には, サイリスタとスナバ回路及びゲート用パルストランスを一体化したモジュール構造を採用した(図6)。

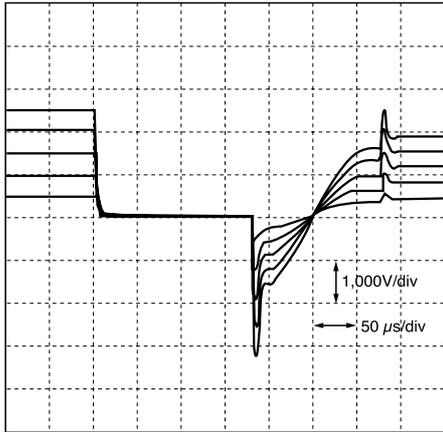


図4 .サイリスタ5直列間の電圧分担 - 実運転を想定したスイッチング試験で各サイリスタの良好な電圧分担を確認した。
Voltage waveforms of thyristors

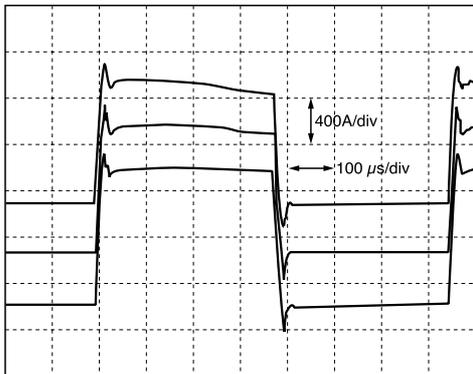


図5 .サイリスタ3並列間の電流分担 - 3個のサイリスタには、ほぼ均等な電流が流れている。
Current waveforms of thyristors

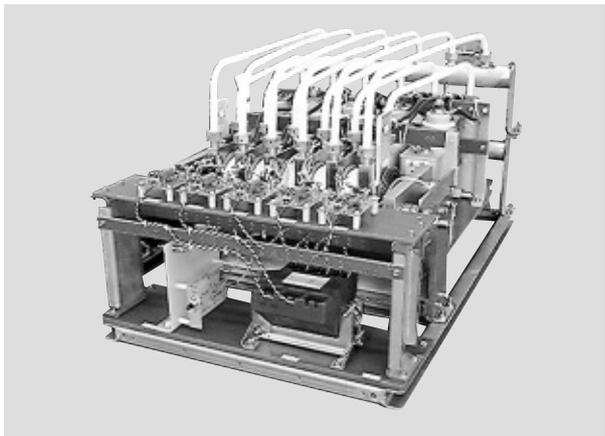


図6 .インバータ側サイリスタモジュール - サイリスタスタック, スナバコンデンサ, スナバ抵抗, ゲート回路を一括した構成体をサイリスタモジュールと呼ぶ。
Inverter-side thyristor module

フレームには非磁性材料であるステンレスを用い、インバータが発生する高周波磁界により過熱しないよう配慮した。

4 制御回路

4.1 多頻度起動及び広範囲負荷に対応できる制御

圧延ライン用加熱装置では、省エネルギーのため、粗バーが加熱コイルを通過中のみ周波数変換装置を起動させるので、周波数変換装置の起動停止は多頻度となる。そこで、起動停止にかかわる回路はすべてソリッドステートとし、多頻度動作に適した回路としている。

周波数変換装置から見た負荷側のインピーダンスは、コイル内の粗バーの有無及び種類によって大きく変動する。そこで、広範囲な加熱出力の調整及び負荷インピーダンスの変動に対応できる制御系を構築するため、デジタル+アナログの制御系を採用した。また、制御プログラムの作成にはCASE (Computer Aided Software Engineering) ツールを適用した(図7)。CASEの適用はソフトウェアの生産性を向上させるとともに、プログラムがブロック図で表現されるため、お客様の装置動作理解が容易になる。

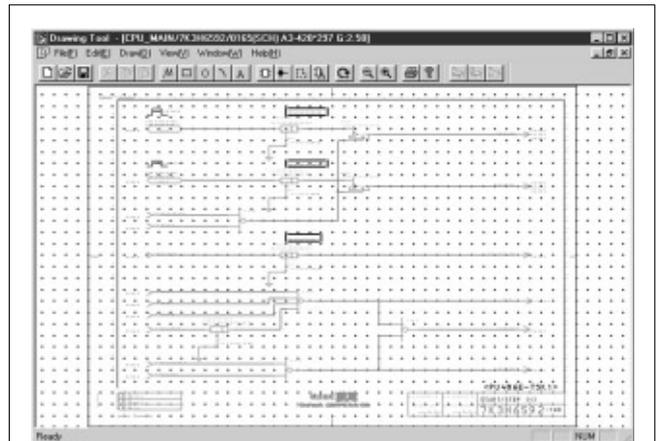


図7 .CASEツールによるプログラム作成例 - CADを用いて作成した制御ブロック図からプログラムが自動生成される。
Example of programming by computer aided software engineering (CASE) tool

更に、実機と同一の制御ブロック図を組み込んだデジタルシミュレーションにより、制御定数などの妥当性の検証を実施し、現地調整時間の削減を図った(図8)。

4.2 操作性の向上

表示機能の充実と、お客様の運用などの変更に応じて制御定数設定を容易に行えるよう、タッチパネルを採用し操作性を向上させた。

その一例を図9に示す。定期点検などにおける特殊な運転モードの設定なども、このパネルから容易に実現できるよ

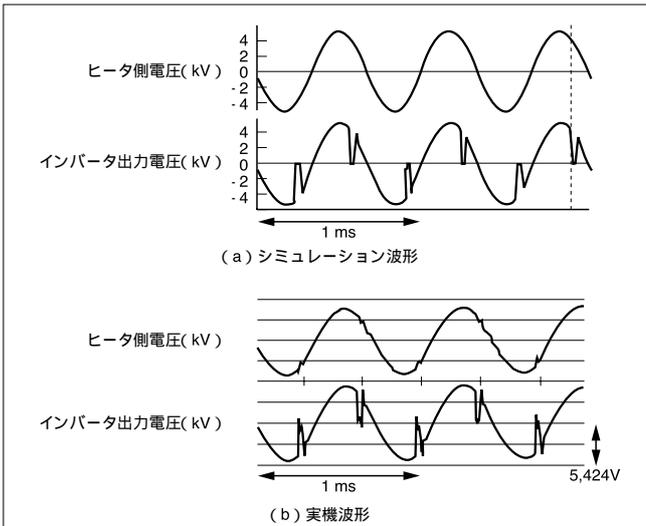


図8 デジタルシミュレーション波形と実運転時のインバータ出力波形 - 実回路及び制御回路を模擬したデジタルシミュレーションを実施した。インバータ出力波形などは、実機とよい一致を示している。
Digital simulation waveform and inverter output waveform in actual operation

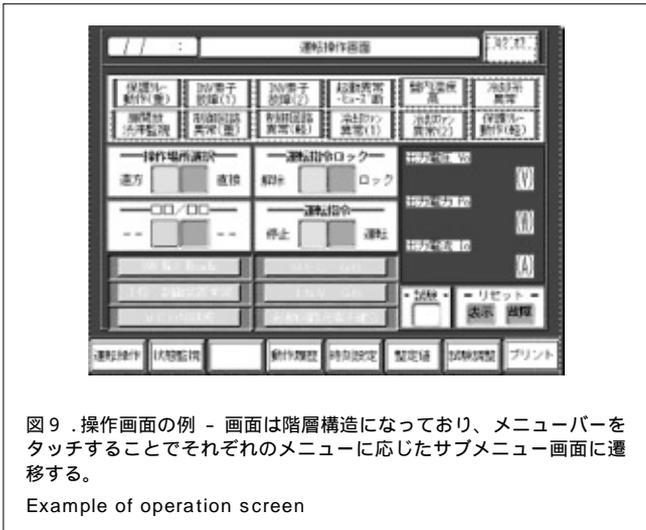


図9 操作画面の例 - 画面は階層構造になっており、メニューバーをタッチすることでそれぞれのメニューに応じたサブメニュー画面に遷移する。
Example of operation screen

うにして保守性の改善を図った。

4.3 保護回路

基本的な保護回路としては入力過電流,出力過電流,出力不足電圧である。これらに加え,この装置では多数のサイリスタを使用していることに配慮し,インバータにサイリスタ素子の故障検出回路を設けた。万一,故障が発生した場合には,図10のガイダンス画面で素子故障の発生したサイリスタモジュールの場所が表示され,迅速な復旧を支援する。

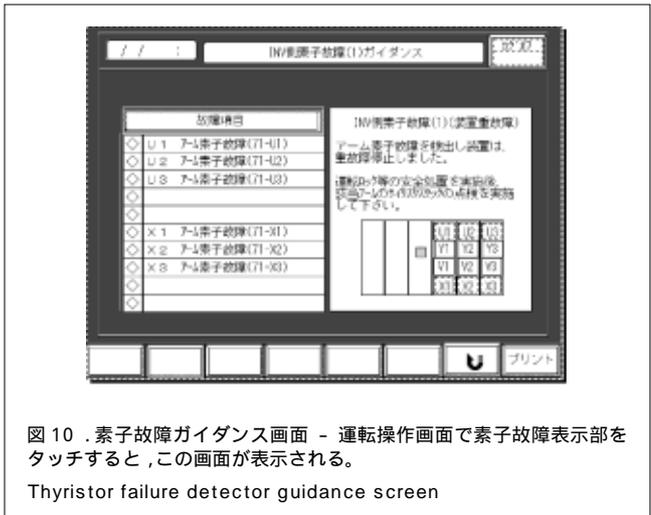


図10 素子故障ガイダンス画面 - 運転操作画面で素子故障表示部をタッチすると,この画面が表示される。
Thyristor failure detector guidance screen

5 あとがき

出力周波数 1,000 Hz 帯の単機容量としては世界最大級の,9,000 kW の誘導加熱用周波数変換装置を製品化した。この装置は単に大容量であるばかりでなく,最新の技術を適用し,従来に比べ操作性,保守性が改善された装置となっている。この装置は,1号機を2001年5月に工場出荷し,現在では5台が順調に稼働中である。

誘導加熱は,その良好な制御性や高加熱効率などの特長により,今後も適用分野が広がると考えられる。今後は,この装置をベースに,更なる大容量化とともに,より広範囲な運転範囲と操作性,保守性に優れた製品を提供し,お客さまの要望に応じていく所存である。



伊藤 克郎 ITOH Katsuro

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場
パワーエレクトロニクス部主査。他励式電力変換装置の開発・設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



森浦 康友 MORIURA Yasutomo

社会インフラシステム社 府中社会インフラシステム工場
パワーエレクトロニクス部主務。電力変換装置用制御装置の開発・設計に従事。電気学会会員。
Fuchu Operations - Social Infrastructure Systems



土斐崎 哲嗣 DOIZAKI Tetsuji

東芝GEオートメーションシステムズ(株) 重工システム
技術部主査。誘導加熱装置のシステム設計に従事。工業
炉協会委員。
Toshiba GE Automation Systems Corp.