

# 誘導加熱用 MOSFET 式高周波インバータ

藤井 正昭(ふじい まさあき)

中村 清和(なかむら きよかず)

野村 年弘(のむら としひろ)

## 1 まえがき

誘導加熱とは、導電性の被加熱物に交番磁界を印加し、誘起される渦電流によって被加熱物を自己発熱させて加熱するものである。この原理を応用した誘導加熱装置は、高効率、自動化、省力化、温度制御の容易さ、急速加熱が可能、作業環境の改善などの利点があるため、鋳鍛造、鉄鋼業界をはじめとして広く普及している。また、最近では新素材関連産業でも製品の高級化、高品質化を実現する手段として活発に導入されている。

表1 MOSFET式インバータの標準系列と仕様

項目		標準仕様				
交流入力	電 壓	200V または 220V ±10%				
	周 波 数	50Hz または 60Hz ± 5%				
	相 数	三相3線				
交流出力	定格周波数	20kHz	30kHz	50kHz	75kHz	100kHz
	10kW	○	○	○	○	○
	20kW	○	○	○	○	○
	30kW	○	○	○	○	○
	50kW	○	○	○	○	○
	100kW	○	○	○	○	○
	200kW	○	○	○	○	○
	300kW	○	○	○	○	
	400kW	○	○	○	○	
	500kW	○	○	○		
	定格電圧	135V または 270V (方形波ピーク)				
	相 数	単相2線				
制御	出力制御	電力制御 (過電流制限付き)				
	出力調整範囲	5~100%				
	周波数	自制式				
冷却	冷却方式	水冷式				
	冷却水	5~35°C 結露なきこと (冷却水は純水使用)				
負荷回路構成		直列共振回路				
標準塗装色		マンセル 5Y7/1				

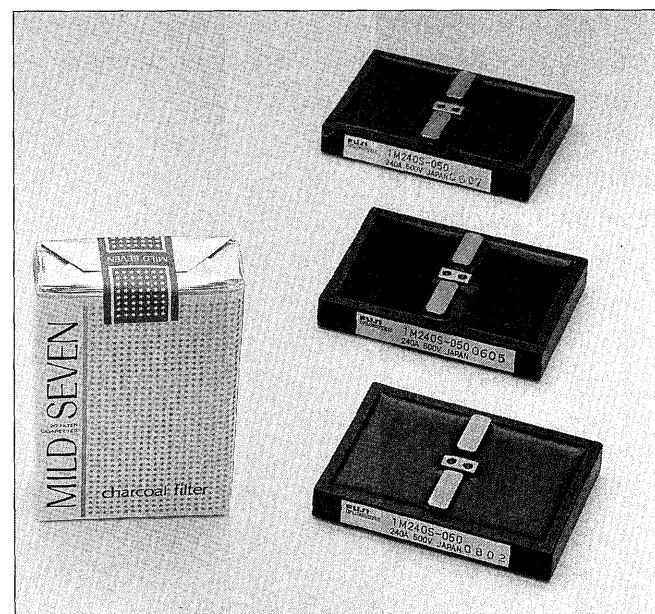
誘導加熱装置の中で重要な構成機器の一つである高周波インバータには被加熱物の材質、形状、加熱温度、温度分布などの加熱条件や時間あたりの処理量の違いにより種々の周波数および出力が要求されるが、これに対して半導体デバイスの進歩に伴いサイリスタ、パワートランジスタ、SITなどを使用した各種インバータが製作してきた。富士電機では従来、サイリスタおよびパワートランジスタを使用して周波数 0.5~50kHz、出力 20~4,000kWまでの高周波インバータを系列化してきたが、今回スイッチング素子としてパワー MOSFET を用いた高周波インバータを開発し、新たに 20~100kHz、10~500kW の標準系列を完成した。本稿ではその仕様、特長、回路構成、構造を述べ、また応用例を紹介する。

## 2 仕様と特長

### 2.1 標準系列と仕様

表1にMOSFET式高周波インバータの標準系列と仕

図1 平形MOSFETの外観



藤井 正昭

昭和57年入社。誘導加熱用高周波インバータの設計・開発に従事。現在、鈴鹿電機製作所工業電熱部課長補佐。



中村 清和

昭和48年入社。誘導加熱用高周波インバータの設計・開発に従事。現在、鈴鹿電機製作所工業電熱部課長補佐。



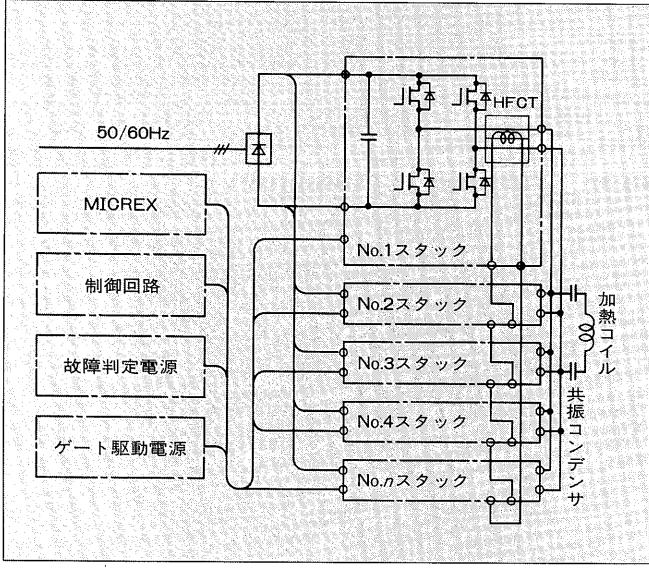
野村 年弘

昭和36年入社。パワーエレクトロニクス製品の設計、開発、研究に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発本部電力変換技術開発部主席。

表2 平形MOSFETの特性

項目	記号	定格値	単位
ドレイン-ソース電圧	$V_{DS}$	500	V
ドレイン電流	$I_D$	240	A
最大電力損失	$P_D$	2,000	W
ゲート-ソース電圧	$V_{GS}$	$\pm 25$	V
チャネル部温度	$T_{ch}$	150	°C
オン抵抗	$R_{DS(on)}$	30 (最大値)	$m\Omega$

図2 フルブリッジインバータの回路構成



様を示す。

## 2.2 特長

### 2.2.1 小形インバータスタック

スイッチング素子として適用した平形MOSFETの外観を図1に、その特性を表2に示す。形状が従来のパワーモジュールと異なり薄い方形板状で内部インダクタンスがきわめて小さくなるよう工夫されたMOSFET素子であり、これを加圧接触による並列接続でインバータスタックを構成しているためきわめて小形、薄形の構造である。また、このスタックの並列接続により高周波の大出力が可能となっている。

### 2.2.2 広範囲の安定動作

負荷回路の特性周波数に同期して動作する直列共振形自制式インバータであり、被加熱物の温度や形状による負荷回路の特性周波数やインピーダンスの大幅な変動に対して安定な動作が可能である。

### 2.2.3 定電力制御と高速応答

制御方式はインバータの負荷インピーダンスがある範囲内では電力が一定になるよう出力電流を制御し、電流が制限値に達すると定電力制御に優先して電流制限を動作させる電流制限付定電力制御方式を採用している。定電力制御は電源電圧変動による加熱特性の変化がないため、温度制御を基本とする誘導加熱に最適のものである。また、電

図3 インバータスタックの内部接続

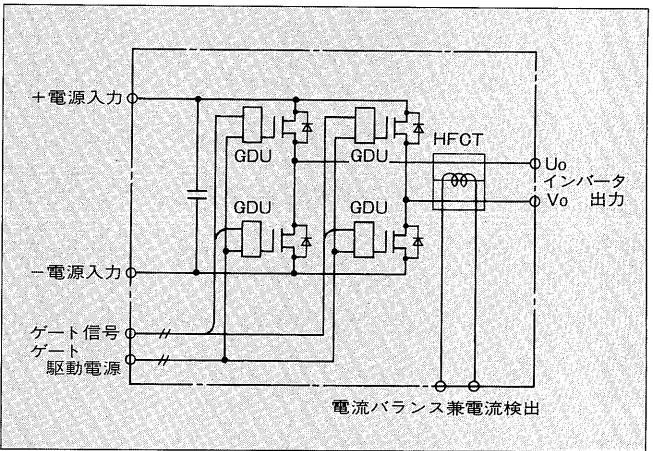
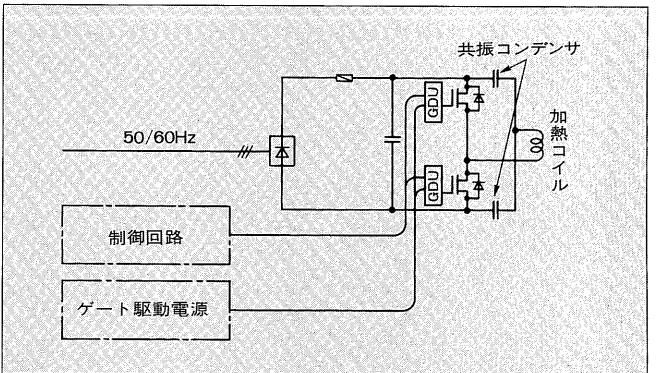


図4 プッシュプルインバータの回路構成



流の制御はインバータ出力側での位相制御のため、高速制御応答と起動停止が瞬時にしかも頻繁に行うことが可能であり、加熱モードの多様化に対応できる。

### 2.2.4 保護回路の充実による高信頼性

インバータの負荷側短絡や接地などの事故に際し、高速で検出して瞬時にゲート遮断するため素子の保護が確実で信頼性が高い。

### 2.2.5 インバータスタックの自己診断機能

2ユニット以上のインバータスタックを並列接続する装置では、インバータスタックに異常がないかモード別のチェックを自動的に行い、不良のインバータスタックおよびアーム別に素子の不良位置を判別して表示する機能を内蔵させている。この機能により故障箇所を事前に発見し、被害の拡大防止と故障の程度や原因の推定が可能である。

## 3 回路構成と構造

### 3.1 回路構成

図2に大容量機用の回路構成図を示す。整流器はダイオードの三相純ブリッジ結線であり、インバータ部は内部接続を図3に示すように平形MOSFETを用いて単相ブリッジ結線で構成した1ユニット100kW出力のインバータスタックを複数台並列接続している。特にインバータスタックの高周波出力側はラミネートブスバーにより並列接続して配線インダクタンスを除去し、負荷の共振コンデン

図 5 インバータの動作原理図

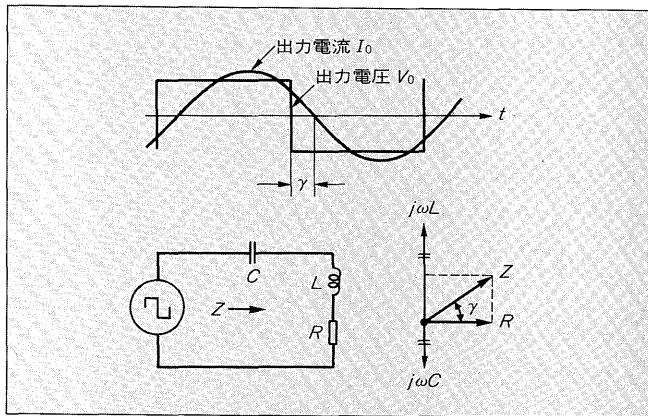
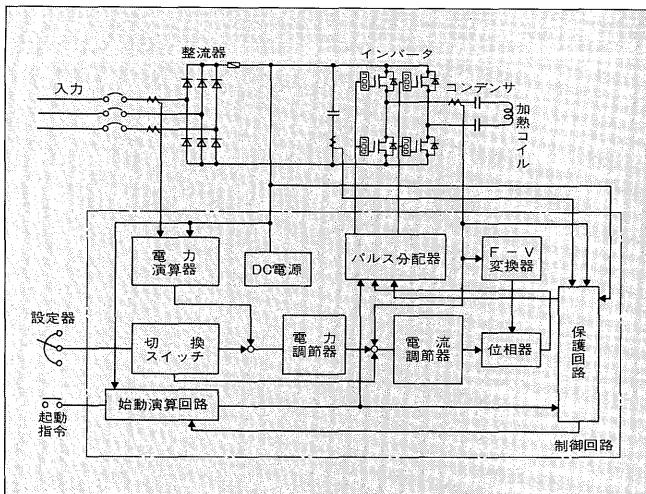


図 6 制御回路ブロック図



サと加熱コイルの直列回路に接続する。また、このほかにも小容量機用として図 4 に示す回路構成を採用しており、構造的に単相ブリッジ結線に比べてさらに小形薄形化を可能としている。

### 3.2 インバータ制御回路

インバータの動作原理図を図 5 に示すが、制御方式はインバータの出力電流が電圧に対して常に遅れ位相で運転する  $\gamma$  制御方式である。これは平形 MOSFET の逆並列ダイオードのリカバリ電流によるアーム短絡を防止するうえで有効である。インバータの出力調整はこの遅れ位相角  $\gamma$  を制御して行うため負荷の急変などがあってもきわめて安定な制御方式である。図 6 に高周波インバータの制御回路ブロック図を示す。また、出力 200kW にて運転中の出力波形例を図 7 に示す。

### 3.3 電流バランス

大容量機で並列接続される各インバータスタックの出力電流バランスは、各インバータスタックに組み込まれた HFCT を利用し、それらの二次側を直列接続することによって行っている（特許出願中）。バランス状態を図 8 に示すが、おのおののスタックの出力電流はほぼ均等になっていることが分かる。

図 7 出力波形例

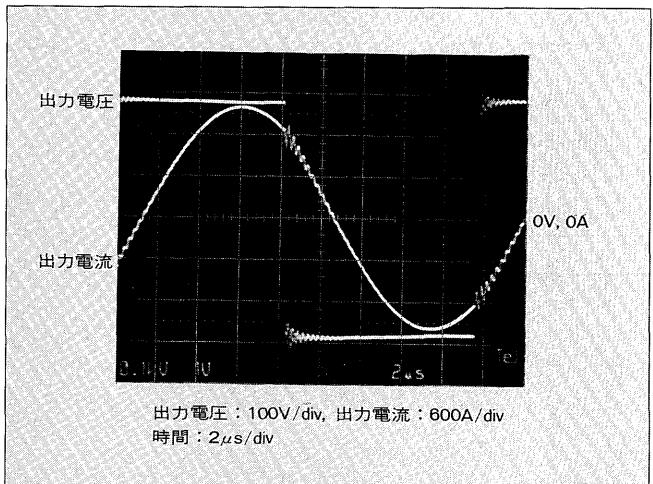
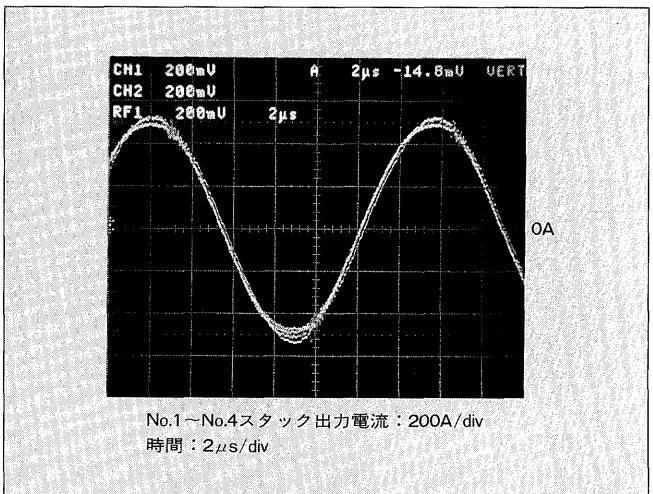


図 8 スタック間電流バランス波形



### 3.4 ゲートドライブユニット (GDU)

平形 MOSFET 素子を高速で駆動する専用の電流源駆動方式ゲート駆動回路を開発した（特許出願中）。本駆動回路は、ゲート駆動電圧よりも十分に高い電圧源と高速半導体スイッチと直列インダクタンスとから出力される電流源によって複数の平形 MOSFET のゲートを駆動するもので、ゲート電圧を  $-5\text{ V}$ （オフ）と  $+10\text{ V}$ （オン）の間で高速かつ安定して振らせることが可能であり、オンオフ指令入力時点からスイッチング完了まで  $0.3\text{ μs}$  の高速動作を得ている。

### 3.5 内部構造

図 3 に示した内部接続をもつインバータスタックの外観を図 9 に示す。複数の平形 MOSFET とスナバコンデンサ、低インダクタンスのフィルムコンデンサ、HFCT を密に組み込んでラミネート構造とし、さらに直近にゲートドライブユニットを配置して一体化し、内部を水冷することによってインバータスタックをきわめて薄くコンパクトな構造としている。このインバータスタックを収納し、上部にゲートドライブ電源とアーム短絡検出回路を配置し

図9 インバータスタック (100kW, 50kg) の外観

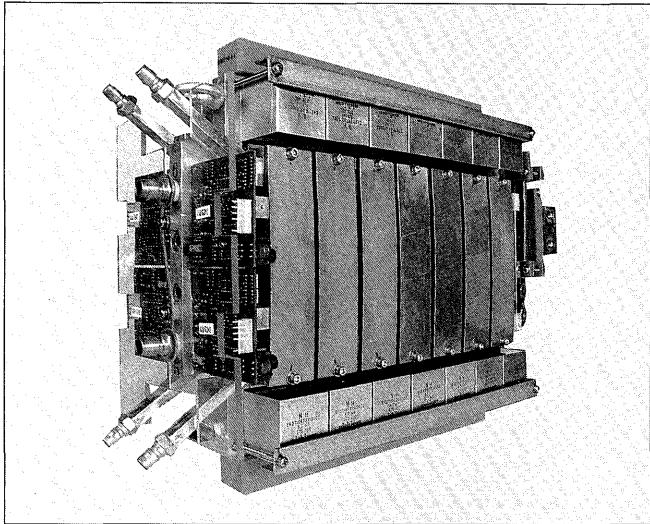
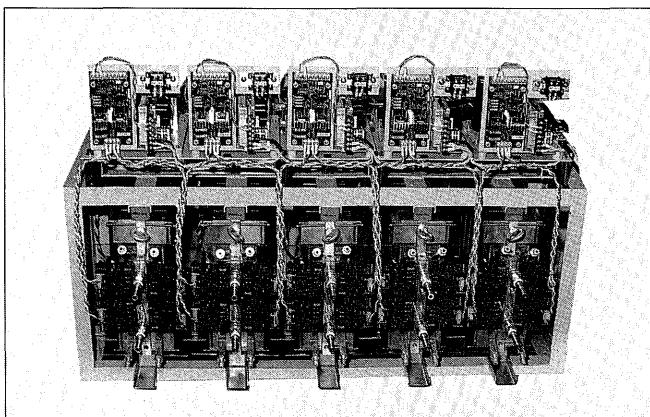


図10 インバータユニット (500kW, 300kg) の外観



たインバータユニットを図10に示す。スタックは簡単に抜き差しが可能なブロックビルト方式として構成しており、種々の定格出力に対して容易に対応することができる。

### 3.6 外観および外形寸法

図11にインバータユニット、ダイオードスタック、制御装置ユニット、盤内冷却ファンなどのインバータ構成機器を内蔵させた大容量インバータ盤の外観を示す。また、図12に小形薄形にまとめた小容量インバータ盤の外観を示す。図13は容量別の外形寸法と所要冷却水量である。

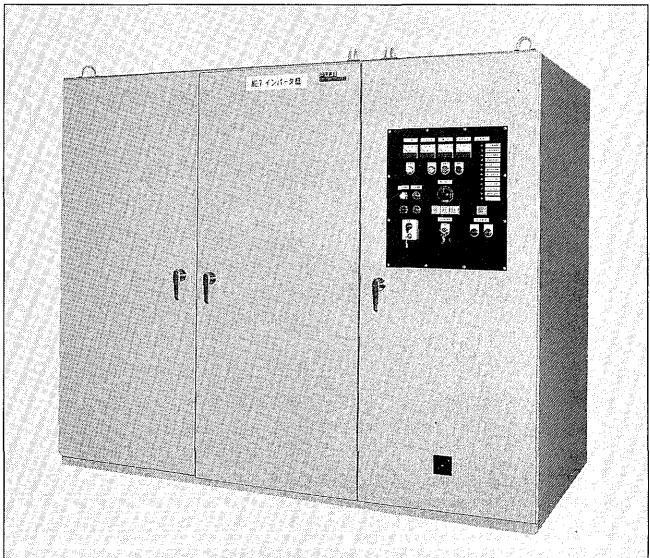
## 4 応用例

MOSFET式高周波インバータを適用した新しい応用例を紹介する。

### 4.1 薄鋼板加熱装置

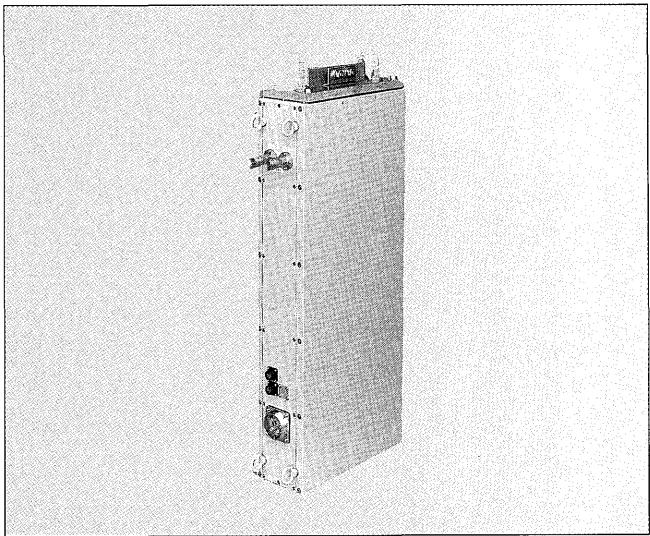
板厚0.5mm以下、板幅1,000mm以下の薄鋼板用熱処理設備の一部に400kW、50kHz以上の高周波インバータを複数台使用して大容量化したシステムである。周波数を従来より高めたことなどにより加熱炉長がきわめて短く構成できている。また制御システムは、操業パターンの多様化

図11 インバータ盤 (500kW) の外観



N89-6060-4

図12 小形薄形インバータ盤 (20kW) の外観



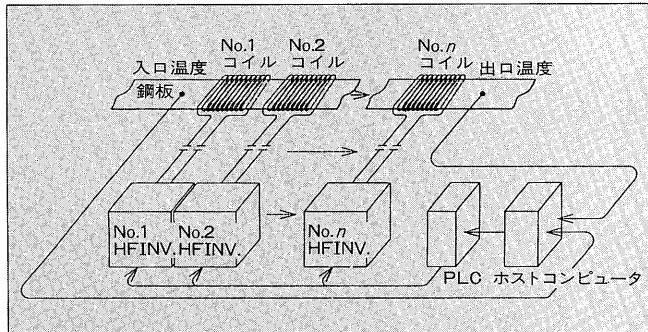
N89-6060-12

図13 容量別外形寸法と所要冷却水量

 A technical diagram showing a side view of an inverter cabinet with dimensions labeled: height H, width W, and depth D. Below the diagram is a table showing the required cooling water volume (l/min) for different power capacities (kW).
 

容量(kW) 区分	10	20	30	50	100	200	300	400	500
W (mm)	150	150	450	450	1,200	1,600	2,100	2,200	2,400
H (mm)	400	400	500	500	1,700	1,750	1,750	1,750	1,750
D (mm)	800	900	1,200	1,200	1,300	1,300	1,300	1,300	1,300
冷却水 (l/min)	10	20	20	25	50	75	100	125	150

図14 薄鋼板加熱装置



に対応できる諸機能を有している。図14に概要を示す。

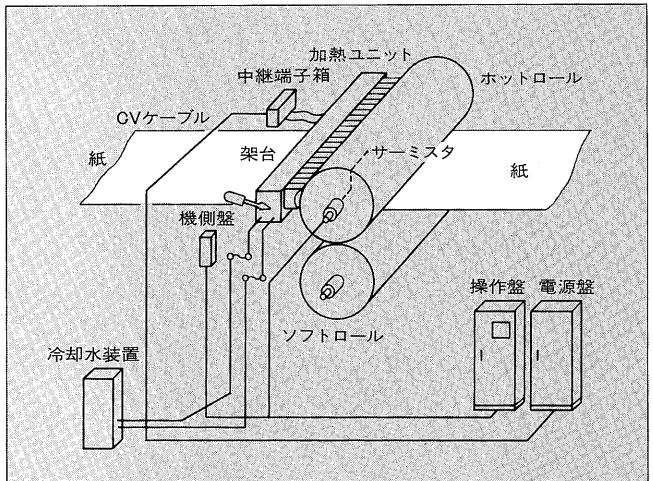
#### 4.2 ソフトカレンダ誘導加熱装置

20kW, 50kHz 高周波インバータと加熱コイルからなる加熱ユニットを等間隔に複数台配置して製紙用抄紙機の最終仕上げ工程のソフトカレンダロールの温度制御を行い、光沢度、平滑度などコート紙の品質向上を実現した。図15に全体構成を示す。これまでの加熱方式ではロール軸方向に熱媒体を流す方式が一般的であったが、従来にない超小形薄形ユニットに高周波インバータをまとめることにより誘導加熱方式の適用を可能とした。

#### 5 あとがき

パワー MOSFET を使用した高周波大容量の誘導加熱用インバータの概要を紹介した。今後さらにパワー MOSFET の高周波スイッチング性能を生かして数百 kHz, 数

図15 ソフトカレンダ誘導加熱装置の全体構成



百 kW 領域まで機種拡大を行う予定である。また、複雑化する誘導加熱システムにおいて高周波インバータには通信機能を含めた高機能化が要求されるため、デジタル化を推進し、信頼性の高い電源装置へと展開してゆく考えである。関係各位の一層のご指導、ご協力をお願いする次第である。

#### 参考文献

- (1) 野村年弘ほか：MOSFET 式誘導加熱用インバータ、電気学会講演論文集, p.5-56~5-57 (1992)
- (2) 藤井正昭ほか：誘導加熱用高周波インバータ、富士時報, Vol.61, No.5, p.364-368 (1988)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。