

水冷大容量高圧インバータ「FRENIC4800VM5」

FRENIC4800VM5, a Water-Cooled High Capacity, High Voltage Inverter

木谷 昌史 MOKUTANI Masafumi

花澤 昌彦 HANAZAWA Masahiko

安達 昭夫 ADACHI Akio

鉄鋼・非鉄圧延主機や、大型ブロウ・コンプレッサなどの駆動用として使用される高圧インバータは、設備の大規模化に伴い、大容量化と盤寸法の小型化が要求されている。富士電機では、それらの要求に対応するため水冷技術と小型化技術を研究している。解析と実験での検討を積み重ねて、水冷技術による冷却性能と信頼性の向上を図り、水冷大容量高圧インバータ「FRENIC4800VM5」を製品化した。当社従来比 2.4 倍の大容量出力と、当社従来比 1/3 のコンパクトな盤外形寸法を実現している。

High-voltage inverters used to drive main rolling mills for steel and non-ferrous metal materials, large blowers and compressors are seeing increased demands for higher capacities and reduced size of board dimensions as facilities increase in scale. Fuji Electric is conducting researches in the water cooling and miniaturization technologies needed to meet these requests. Through repeated analysis and testing, we aimed to improve cooling performance and reliability through water cooling technology and as a result released the FRENIC4800VM5, a water-cooled, high-capacity, and high-voltage inverter, which has 2.4 times more output capacity and 1/3 smaller panel dimension compared to our previous models.

1 まえがき

鉄鋼・非鉄の圧延主機や、大型ブロウ・コンプレッサなどの駆動に使用される高圧インバータは、設備の大規模化と設置面積の狭小化のため、大容量化と盤寸法の小型化に対する要求が高まっている。

本稿では、これらの要求に同時に応える水冷大容量高圧インバータ「FRENIC4800VM5」とその適用事例を紹介する。

2 水冷大容量高圧インバータ

高圧インバータの大容量化と盤寸法の小型化を同時に実現するには、大電流を制御することに伴う変換装置の損失熱による温度上昇を放熱によって抑えることが必要である。



図1 「FRENIC4800VM5」の盤

近年、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは高圧かつ大容量化が進んでおり、従来は平型素子を使用していた高圧の範囲のインバータを低損失なモジュールで構成できるようになってきた。

FRENIC4800VM5 の盤外観を図1に、電気仕様を表1に示す。

富士電機は、FRENIC4800VM5 を製品化するに当たり、変換回路から発生する損失熱による温度上昇を抑えるため高圧 IGBT モジュールの水冷方式を採用した。この方式は従来の空冷式よりも大幅に冷却効率が向上している。この製品は、高圧インバータの大容量化と盤寸法の小型化に加え、鉄鋼・非鉄圧延主機に必要な高機能も搭載している。特徴を次に示す。

- (1) 当社従来比 2.4 倍の大容量出力⁽¹⁾
 - 単機容量 6.2 MVA, 最大容量 4 多重 24.8 MVA まで構成可能 (過負荷耐量 150% 1 分間)
- (2) 当社従来比 1/3 のコンパクトな盤外形寸法⁽¹⁾
 - 単機 6.2 MVA
 - W2,800×D1,650×H2,400 (mm) (水冷装置を除く)
- (3) コンバータ、インバータとも 3 レベル PWM 制御を採用

表1 「FRENIC4800VM5」の電気仕様

項目	仕様			
	単機	2多重	3多重	4多重
構成 (多重)				
コンバータ容量 (MW)	5.2	10.4	15.6	20.8
インバータ容量 (MVA)	6.2	12.4	18.6	24.8
電圧	入力3kV 3φ 50/60Hz, 出力3.1kV			
過負荷耐量	150% 1分間			
駆動電動機	誘導機, 同期機			

- フル回生の4象限運転が可能
- 電源効率≒1
- (4) 各種伝送方式に対応
PROFIBUS-DP, SXバス, Tリンクなど
- (5) 高速パルストレース機能を搭載
 - μsオーダーの時間分解能でインバータのゲート出力指令信号とIGBTのオン・オフ状態信号を採取・保存
 - 不具合発生時の迅速な原因解析が可能

③ 水冷技術

高圧インバータを含む大容量パワーエレクトロニクス(パワエレ)機器では、小型、軽量、低価格の要求が極めて高い。この要求に対応するため、高性能で高信頼の水冷技術を構築し、製品設計を進めている。

これまで解析と実験での検討を積み重ねて、冷却性能と信頼性の向上を図っている。水冷技術の主なポイントは次のとおりである。

- (a) 高性能なヒートシンク
- (b) 分流バランスの良い冷却配管
- (c) シンプルな盤内冷却構造
- (d) 十分な寿命と耐食性を持つ水冷ヒートシンク

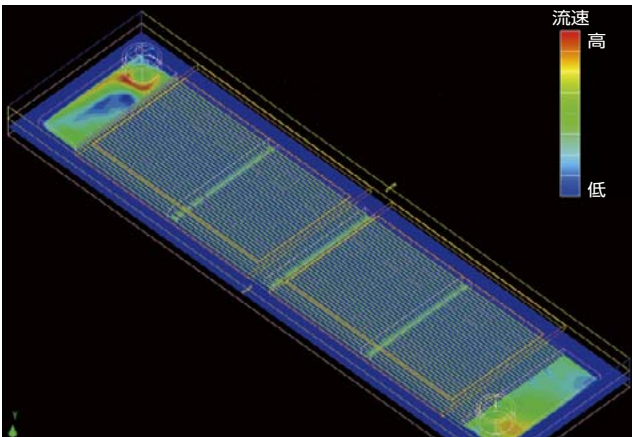


図2 水冷ヒートシンクの内部流速分布

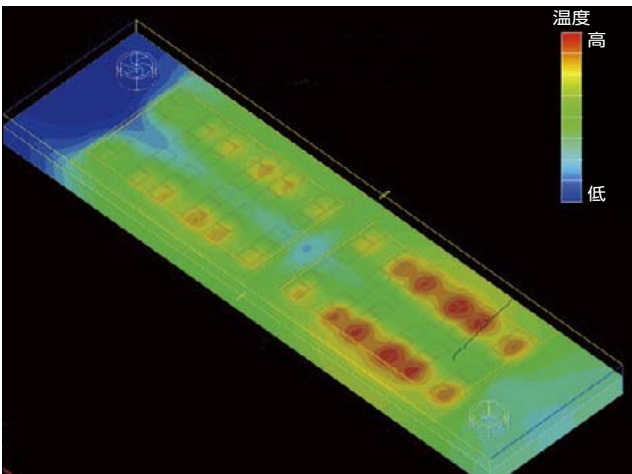


図3 水冷ヒートシンクの表面温度分布

3.1 ヒートシンク設計

水冷大容量高圧インバータでは、定格出力で約100kWの損失、すなわち熱が発生する。主回路のパワーデバイスでは、約1cm角の半導体チップに100Wレベルの発熱が生じる。高密度発熱をパワーデバイスと冷却水間の低い温度差でも冷却できる高性能な水冷ヒートシンクが必要であり、次の工夫を行った。

- (a) 接液面積を拡大するため、狭流路を並列配置した内部フィン構造を採用
- (b) 乱流による熱伝達促進を促進するため、流れ方向を分割した内部フィン構造を採用
- (c) 並列流路間の流量バランスを均一化するため、垂直流入ヘッダ構造を採用

図2に水冷ヒートシンクの内部流速分布を、図3に表面温度分布を示す。これらから分かるように良好な冷却性能が得られている。

3.2 冷却配管設計

水冷大容量高圧インバータでは、図4に示す冷却配管の構成が一般的である。ポンプ、タンク、流量調整バルブ、イオン交換器および屋外水冷装置との熱交換器などの水冷装置と、インバータ盤とコンバータ盤を構成する複数のパワースタックに多数設置される水冷ヒートシンクを接続した並列配管により構成する。

水冷大容量高圧インバータでは、水冷ヒートシンクを合計30個並列に接続しても、冷却水の分流バランスがとれるように主管、分岐管、枝管など配管形状の適切な組合せを工夫する必要がある。

そこで、多くの構成部品と各種配管の組合せとなる冷却配管各部の流量や圧力損失を精度良く設計するため、管路抵抗網法を適用し高精度な設計を行った。

図5に、水冷ヒートシンクを6並列に構成した場合の管路抵抗網の解析モデル例を示す。主管内径と分岐管内径の適切な組合せで流量のアンバランスを約5%以内に抑えたことにより、ヒートシンク流路ごとのバルブ調整が不要に

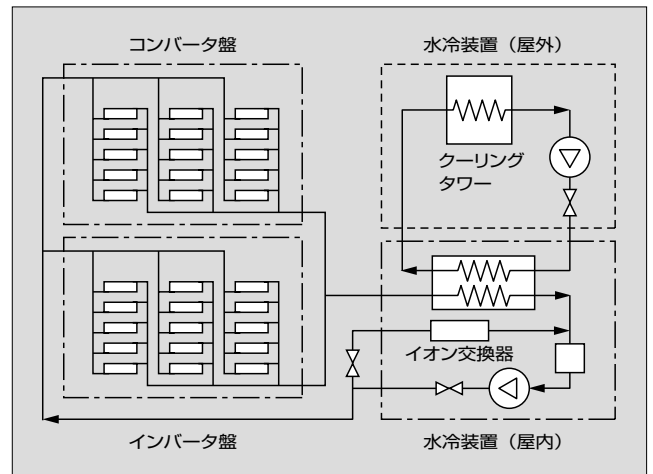


図4 冷却配管の構成

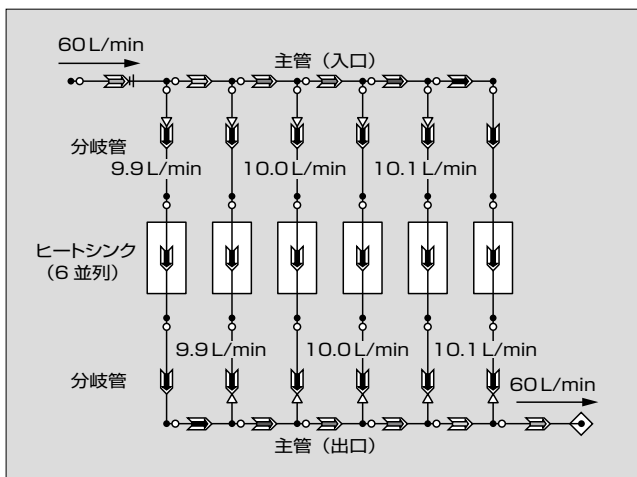


図5 管路抵抗網の解析モデル例

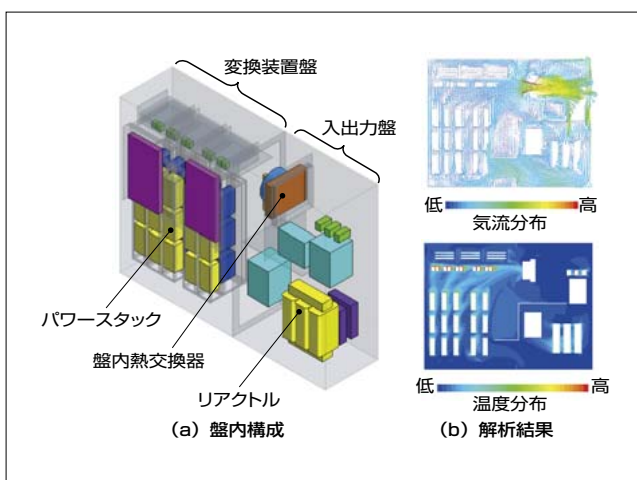


図6 盤内冷却構造設計

なった。また、実機配管でノード数が数百規模でも数秒以内で計算結果が得られることから、使用する配管径・長さ、ヒートシンク、継手類の形状に関する比較計算が極めて短時間になり、圧力損失の最小化などの検討が精度良く机上で行えるようになった。

3.3 盤内冷却構造設計

大容量パワエレ機器においては、パワーデバイス以外にリアクトル、コンデンサ、コンタクタ、制御装置などの発熱部品を高密度に組み込むため、効果的な盤内冷却が必要となる。部品形状や発熱密度によって異なるが、水冷あるいは空冷による冷却を行う。

図6に、パワースタック部のコンデンサやリアクトルおよび制御装置の冷却の様子を示す。水冷の熱交換器で冷却した空気を盤内に循環させることで冷却を行う空冷方式を採用している。部品配置や仕切板設置などを最適化したシンプルな構造のファン送風経路で、盤内の気流循環がバランス良く行えるようにした。

3.4 耐食性評価と寿命設計

銅、アルミニウムと2種類の水について耐食性評価を実

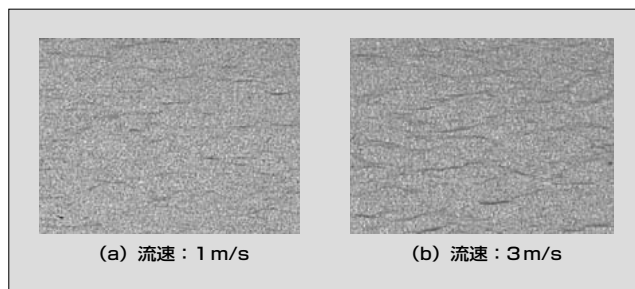


図7 アルミニウムと脱イオン水の耐食評価後の表面状態

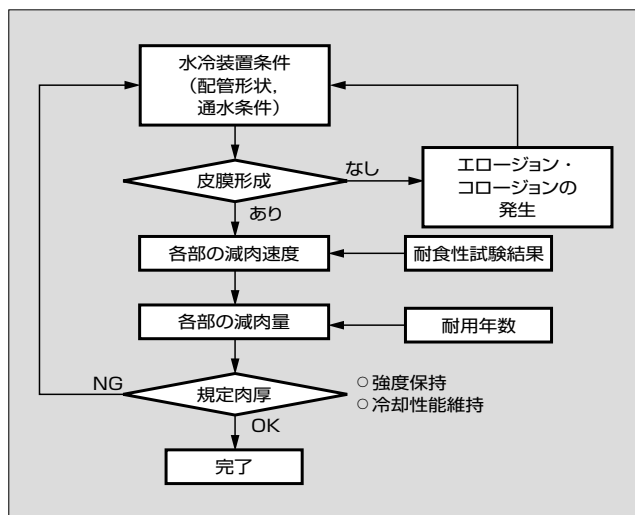


図8 耐食性評価と寿命設計方法の概要

施し、寿命設計の検討を行った。

耐食性評価では、銅と脱イオン水、アルミニウムと脱イオン水、アルミニウムと不凍液を組み合わせた循環流水試験を約5,000時間実施し、サンプルの表面(図7)と断面の観察および減肉量の測定により、次の知見を得た。

- (a) 接液面には不動態皮膜が形成される。
- (b) 試験初期に質量減少(腐食進行)するが、約500時間以降ではほぼ変化がなくなる。
- (c) 流速1~3m/sでは、局部腐食は発生しない。

これらを基に、寿命設計方法をまとめた。図8に概要を示す。この他に、材質および水質管理基準を別途定めている。

4 高圧・大容量化・小型化技術

4.1 高圧・大容量化技術

水冷大容量高圧インバータでは、図9に示すNPC(Neutral Point Clamped)3レベル変換回路の回路構成を採用し、出力電圧の高圧化と高調波の低減を図っている。主回路素子には、高圧・大電流化が進む高圧モジュール型IGBT素子を採用し、構造の簡素化と組立の容易化を図っている。また、IGBTモジュールを並列接続すること、および図章で紹介した水冷化技術によって、単機容量として当社従来比2.4倍の6.2MVA(3.1kV)の高圧・大容量化を実現している。

4.2 小型化技術

電流遮断時に生じる過渡的な高電圧を抑制するスナバ回路は、装置の大型化を招く。インダクタンスを低減することができれば、スナバ回路を使用せずに電流遮断時のIGBTの跳ね上がり電圧を抑制することができる。インダクタンスを低減するために、次のような改善を行った。

- (a) IGBT スタック内部の主回路導体と絶縁板に低インダクタンス化が可能なラミネートブスバーを適用した。
- (b) 電流の流れる方向が異なる導体を重ね合わせて磁束を打ち消すことによりインダクタンスを低減した。
- (c) 内部インダクタンスが小さい高圧フィルムコンデンサを直流中間回路に適用した。
- (d) ラミネートブスバーの設計にインダクタンスを算出するシミュレーションツールを使用し、インダクタンスの低減と IGBT モジュール間の良好な電流分担を両立させる最適な導体構造を設計した (図 10)。

主回路部の盤を小型化するために IGBT スタックの横幅を縮める必要があり、次のような改善を行った。

- (a) 直流中間回路に使用する高圧フィルムコンデンサを薄型にした。
- (b) ラミネートブスバー、IGBT モジュール、水冷ヒートシンクおよび水冷配管の配置を最適化 (特許出願中) した。
- (c) 3章で紹介した水冷技術により、水冷ヒートシンク流路ごとの調整用バルブを用いずに流量を良好に分担できるようにした。

これらの改善の結果、主回路 IGBT スタック 3 台を盤幅 1,000 mm に収納できた。

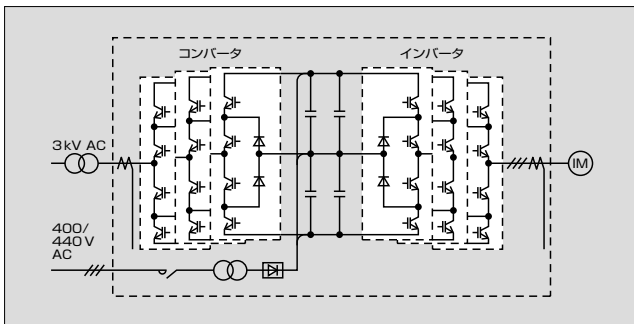


図 9 NPC3 レベル変換回路の構成

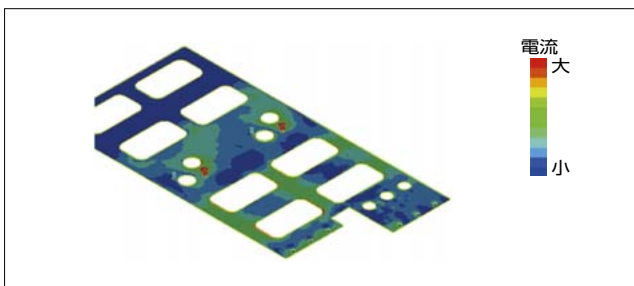


図 10 ラミネートブスバーの電流分布シミュレーション結果

5 水冷大容量高圧インバータの適用事例

ツインドライブ可逆圧延機への適用事例を紹介する。この圧延機では、図 11 に示すように 2 台の電動機で上下ロールを個別に駆動する。電動機には、同期電動機 (図 12) を採用し、それぞれの電動機を 6.2 MVA の FRENIC4800VM5 の 2 多重構成で駆動する (図 13)。FRENIC4800VM5 の採用で盤寸法が大幅に小さくなった

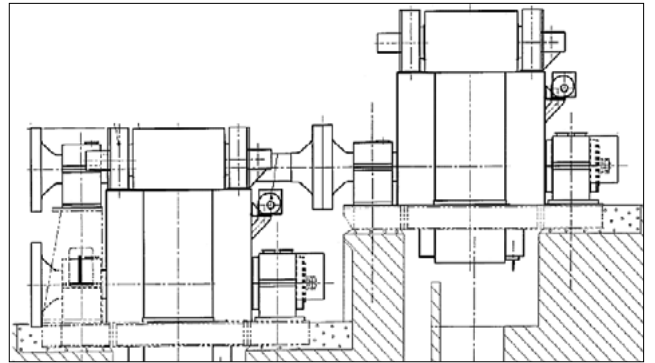


図 11 ツインドライブ電動機レイアウトの例



図 12 圧延主機用同期電動機の例

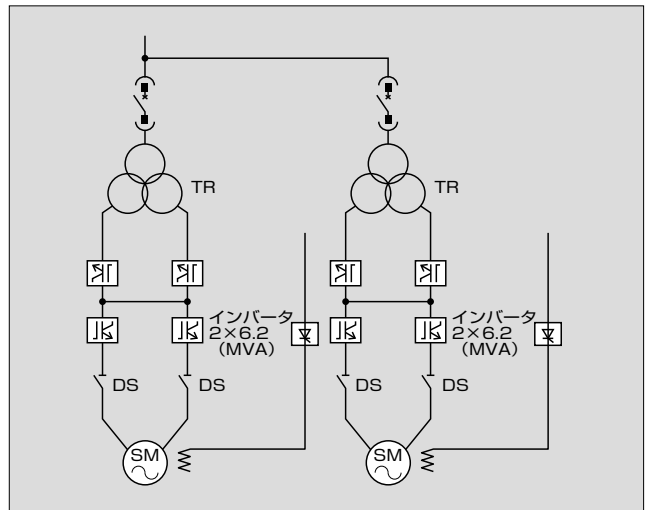


図 13 ツインドライブ可逆圧延機の単線系統図の例

ことにより、既存の電気室にインバータ盤を設置できた。

6 あとがき

水冷大容量高圧インバータ「FRENIC4800VM5」はフル回生が可能なことから、圧延主機だけでなく風洞試験設備や大型コンベヤなどにおいても活躍が期待できる。これらの分野への適用拡大を図っていくとともに、本稿の水冷技術や大容量化・小型化技術を、他のパワーエレクトロニクス機器へ展開していく所存である。

参考文献

- (1) 西郷宏治ほか. 産業・社会ソリューションにおけるドライブ・電源技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.2, p.114-119.



木谷 昌史

電動応用プラントのエンジニアリングに従事。現在、富士電機株式会社産業インフラ事業本部産業プラント事業部技術第一部課長。



花澤 昌彦

産業用インバータの製品開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター製品技術開発部マネージャー。



安達 昭夫

パワーエレクトロニクス機器の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワエレ技術開発センター応用技術開発部マネージャー。





*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。