

200 km/h級近郊型車両用主変換装置・補助電源装置一体水冷システムの開発

片桐 優 Katagiri Masaru
 西村 欣剛 Nishimura Yoshitaka
 前 健太郎 Mae Kentaro
 安田 陽介 Yasuda Yousuke
 山内 崇弘 Yamauchi Takahiro

200 km/h級近郊型車両は交流電車の場合が多く、交流電車は主変圧器を臙装する必要があるため、直流電車に比べて車両床下のスペースが限られている。特に編成長が短い場合、臙装スペースが限られるため小型化が必須

となる。そこで装置の小型化をめざし、パワー半導体素子の冷却に水冷を用いるシステムを開発した。このシステムを導入し、主変換装置と補助電源装置を一体構造としたシステムについて報告する。

1. はじめに

鉄道車両において、日本国内では主変換装置と補助電源装置をそれぞれ別装置で構成することが主流であるが、欧州市場では主変換装置と補助電源装置を一体で構成した小型な装置が一般的である。これらの背景から、主変換装置と補助電源装置を一体化した主変換・補助電源一体装置の開発に着手し、装置の小型軽量化、低コスト化をめざした。

本開発では、半導体素子冷却システムの冷却効率の向上や機器の高密度実装を実現するために、欧州で多く採用されている水冷システムを採用した。強制空冷方式と水冷方式の構成比較を図1に示す。水冷システムでは冷却水の循環により、半導体素子の熱を素子から離れたところまで効率よく輸送できるため、従来用いていた強制空冷方式よりも機器レイアウトの自由度が向上し、未使用スペースが低

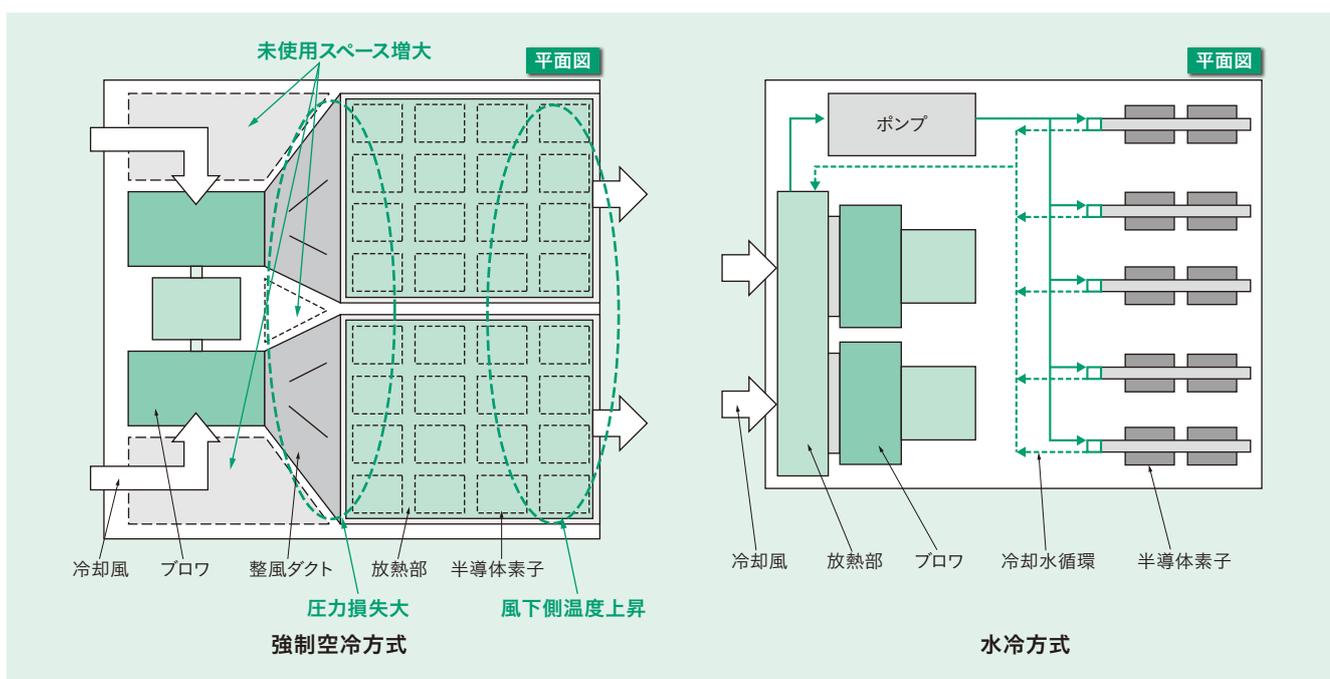


図1 強制空冷方式と水冷方式の構成比較

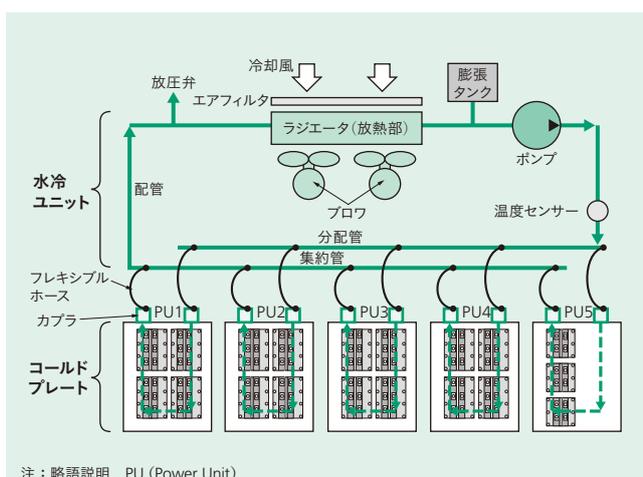
強制空冷方式は、整風ダクトの設置によって圧力損失が増大するためブロウを大型化する必要があるほか、未使用スペースが増大し、装置体積が大きくなるという課題がある。

減する。これにより、冷却効率の向上、冷却に必要な部品体積の低減、装置の小型化をねらった。しかし、水冷システムを採用することだけでは、グローバル市場において競争力のある装置体積、重量にすることは困難である。そこで、主変換装置と補助電源装置を一体化した場合に適した主回路構成を構築し、部品点数を削減して小型化を推進した。また、水冷システム用パワーユニットの実装構造を検討し、点検スペースの最小化を実現した。さらに、今までは個別に設けていた主変換装置、補助電源を制御する制御論理部についても一体化し、装置全体が小型化できる構造とした。

本稿では、水冷システム採用による小型化の効果と部品点数を削減するための主回路構成について述べる。

2. 水冷システムの構成

水冷システムの具体的な構成を図2に示す。水冷システムは、半導体素子からの熱を受け取る複数のコールドプレートと、コールドプレートに冷却水を供給して、冷却水が輸送する熱を外気に放熱する水冷ユニットで構成される。おのおのの外観を図3に示す。



注：略語説明 PU (Power Unit)

図2 | 水冷システムの構成

1つの冷却系統でパワーユニット (PU) 5台分の半導体素子を一括冷却するシステムを構築することで、各パワーユニットの温度の平準化や、冷却システムの部品点数削減を図った。

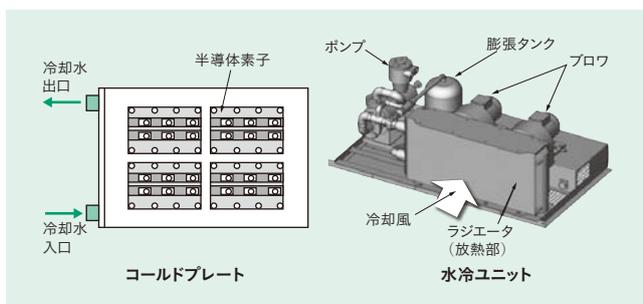


図3 | コールドプレート、水冷ユニットの外観

水冷システムは、半導体素子からの熱を受け取る複数のコールドプレートと、コールドプレートに冷却水を供給して、冷却水が輸送する熱を外気に放熱する水冷ユニットで構成される。

このシステムでは、2〜3両の短編成での運用でも機器故障時の冗長性を持たせるため、2個モータ制御×2群構成に対応する必要がある。そのため、主回路における半導体素子数を考慮して、コンバータ、インバータ用のコールドプレートには半導体素子を片面に4モジュール設置し、寸法制約の観点から半導体素子を両面実装する構成とした。また、補助電源に関してはコンバータ、インバータと比較して電流値が小さいため、1モジュールに上下アーム分の回路を実装した2in1半導体素子を、片面に3モジュールずつ両面実装する構成とした。以上より、コールドプレートの構成は、コンバータ2台、インバータ2台、補助電源1台の合計5台とした。

3. 水冷システム導入の効果

水冷システム導入による効果を図4に示す。グラフに示す冷却体積は、ブロワや放熱部など半導体素子冷却に必要な部品の合計体積を指しており、既存製品の冷却体積から、熱損失が変化した場合に必要な冷却体積を算出して冷却方式別にプロットしたものである。今回開発した水冷システムの冷却体積は、同等熱損失条件においてヒートパイプ+強制空冷の約70%と小型であり、冷却能力は平板フィン+強制空冷の約1.3倍となることが確認できている。

冷却体積小型化の内訳を図5に示す。今回開発した水冷システムではブロワと放熱部を水冷ユニットに集約し、これらの体積を69%に小型化した。また、未使用スペースをフレキシブルホースに置き換えることで、この部分の体積を78%に小型化した。その結果、冷却体積を約70%に小型化することができた。

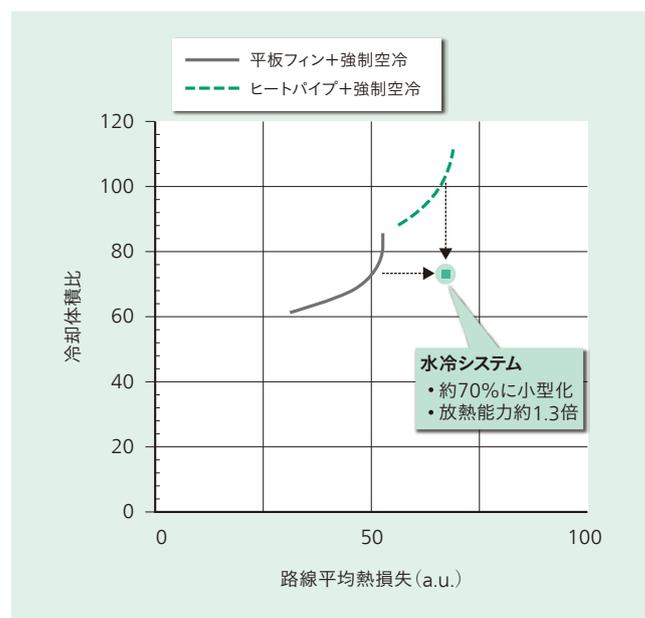


図4 | 水冷システム導入の効果

路線平均熱損失が大きければ水冷システムは冷却体積で有利となる。

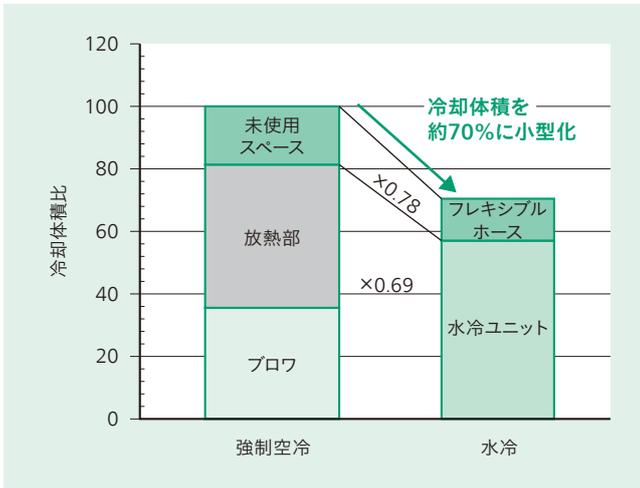


図5 | 水冷ユニット導入による小型化の内訳
今回の開発品では冷却体積を約70%に小型化することができた。

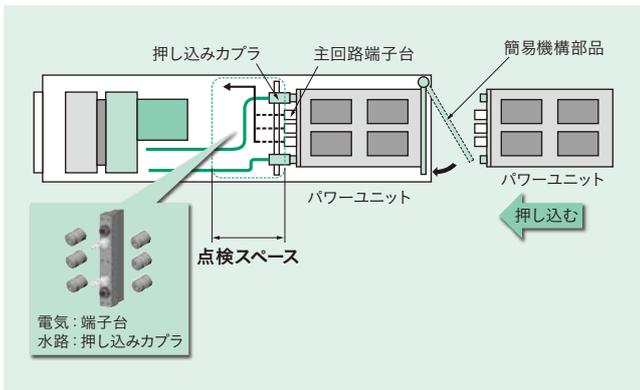


図6 | パワーユニット実装構造
各パワーユニットは、アルミフィンやヒートパイプなどの冷却器と一体化する必要がないため、強制空冷方式に比べて約50%軽量化でき、着脱などの作業性を向上した。

4. 水冷システム用パワーユニットの実装構造

パワーユニット実装構造装置側面図を図6に示す。水路のインターフェースには押し込み式カブラを用い、簡易機構部品によって押し込み、かつ押し込み状態を保持する構造であり、主回路の接続は端子台で行う。パワーユニット着脱とともに水路の着脱も行えるため、着脱作業性および点検スペースを確保しつつ、装置の小型化、低コスト化を実現している。

5. 主回路システム

主回路システムを図7に示す。パンタグラフよりAC (Alternating Current) 25 kV 50 Hzを取り込み、真空遮断器、主変圧器、真空接触器および充電用接触器、充電抵抗器を介してコンバータパワーユニットならびにインバータパワーユニットへと入力される。このシステムは、2~3両の短編成での運用でも機器故障時の冗長性を持たせるため、2個モータ制御×2群構成として台車単位で制御する方式となっている。

パワーユニットの半導体素子は、3.3 kV 800 Aおよび

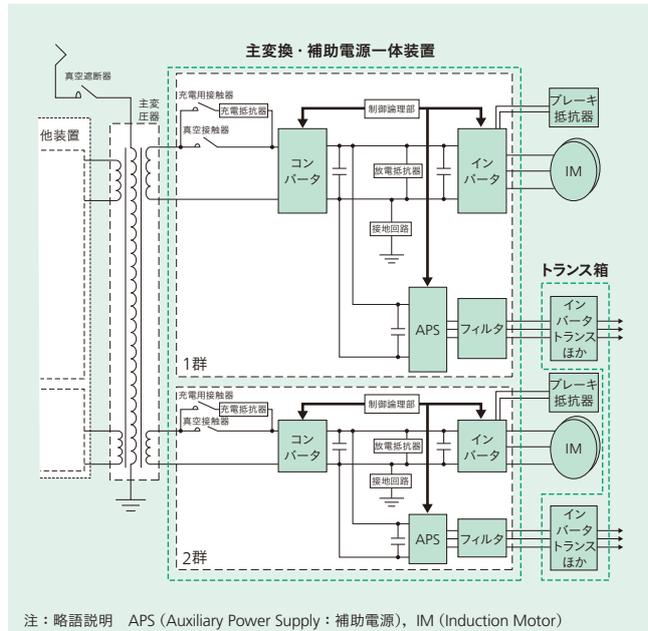


図7 | 主回路システム
主変換回路各群の直流ステージに補助電源用インバータ回路を接続させることで部品点数を削減した。

1,200 AのIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が実装でき、制御容量により使い分けが可能な構造となっている。また、2レベルスナバレス単相電圧型PWM (Pulse Width Modulation) コンバータと2レベルスナバレス3相電圧型PWMインバータの採用により、部品点数の削減を実現して信頼性の向上を図っている。

回生ブレーキ中に電車がセクションを通過した場合においても、衝撃のない連続したブレーキを可能とするために、ブレーキ時に発生する電力を架線の代わりにブレーキ抵抗器へと流し、電力を消費することでブレーキ力を確保する小容量のブレーキチョップ回路を備えている。

補助電源は主変換回路各群の直流ステージに補助電源用インバータ回路を接続させた方式とし、主変換回路から補助電源回路への配線引き回しを最短にして低インダクタンス化を図り、従来電流の振動を抑制するために実装していたフィルタリアクトルを廃止した。また、別装置で構成した場合に設けていた充電抵抗器、および単位スイッチ、放電抵抗器についても削除し、部品点数を削減した。

直流ステージに補助電源用インバータ回路を接続させた方式とすることにより、セクション通過時の架線電圧がなくなる状態においても、ブレーキで発生する電力を利用することで、補助電源が一時停電しないよう制御することが可能である。

6. 制御論理部

従来、主回路制御用、補助電源制御用としておのおの制御論理部を搭載していたが、機能が重複している基板の削



図8 | 主変換・補助電源一体装置の外観

水冷システムの搭載により、主変換装置・補助電源装置の小型一体化を実現した。顧客仕様に応じて2個モータ制御×2群、または4個モータ制御×1群のどちらの構成にも対応できる。



図9 | トランス箱の外観

トランス箱は、容量、電源電圧、周波数などのさまざまな顧客仕様に対応するため別箱構造としている。

除、アナログ入力基板とゲート基板の統合を行い、基板収納ラックを一体化して小型化を図った。また、主回路、補助電源回路を2群構成としているため、制御論理部についても2台搭載し、冗長性を確保している。

7. システムの装置構成

本システムの装置構成は、主変換・補助電源一体装置とトランス箱に分かれている（図8、図9参照）。

主変換・補助電源一体装置は、主として真空接触器、コンバータパワーユニットとインバータパワーユニットを各2台、1・2群一体型補助電源用パワーユニットを1台収納し、各パワーユニットを冷却する水冷ユニット、これらを制御する制御論理部で構成されている。

トランス箱には、主として補助電源回路のインバータトランス、バッテリー充電回路および電磁接触器を収納している。

8. おわりに

ここでは、主変換・補助電源一体装置の概要、水冷システム、電気システムについて述べた。



図10 | AT-200車両イメージ図

今回開発したシステムは日立の標準型近郊車両AT-200に搭載される。

このシステムは日立の標準型近郊車両AT-200に搭載され、その第一弾として英国スコットランド向け近郊電車（Class 385）に納入される（図10参照）。今後、グローバル市場での車両の多様なニーズに応えられる製品になるものと期待している。

執筆者紹介



片桐 優

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部 プロセス設計部 所属
現在、鉄道車両用電力変換装置の開発・設計に従事



西村 欣剛

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属
現在、鉄道車両用電力変換装置の開発・設計に従事



前 健太郎

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部 プロセス設計部 所属
現在、鉄道車両用電力変換装置の開発・設計に従事



安田 陽介

日立製作所 研究開発グループ 機械イノベーションセンタ 生活家電研究部 所属
現在、半導体パワーデバイス向け冷却技術の研究開発に従事
技術士（機械部門）
日本機械学会会員



山内 崇弘

日立製作所 鉄道ビジネスユニット 水戸交通システム本部 車両電気システム設計部 所属
現在、鉄道車両用電力変換装置の開発・設計に従事