

feature article

次世代小型高性能インバータ技術

Technologies of Small and High-performance Traction Inverter for Next Generation

栗原 直樹 Naoki Kurihara

立原 周一 Shuichi Tachihara

南出 健八郎 Kenhachiro Minamide

山口 智司 Satoshi Yamaguchi

鉄道用VVVFインバータには、社会インフラとしての高い安全性および信頼性と、省エネルギー・省メンテナンスによる経済性が求められる。

また、近年の環境意識の高まりから、環境性能も大切な要素となっている。

日立グループは、これらの要求に応えるため、次世代小型高性能インバータを新たに開発した。

開発のキーワードは次世代技術への対応と環境性能の向上である。

次世代車上传送方式対応のためのイーサネット[※]の採用や、

高効率モータも駆動できる新しいベクトル制御方式の採用、スナバレス化による小型・軽量化などを行った。

開発の要所では、解析ツールを用いた解析主導型設計手法を採用した。

1. はじめに

VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ制御による電車が日本に初めて登場してから約30年になる。この間、鉄道用VVVFインバータ(以下、インバータと記す。)はとどまることなく進歩してきた。この進歩の原動力となってきたのが、社会インフラに求められる高い安全性および信頼性と、省エネルギーおよび省メンテナンスによる経済性の追求である。さらに近年は地球環境保護意識の高まりから、環境性能の向上がさらなる進歩の原動力となっている。

このような背景の中、日立グループは、時代の要求に適應するインバータを開発した。

ここでは、日立グループが新たに開発した次世代小型高性能インバータについて述べる(図1参照)。

2. 開発コンセプト

鉄道車両用インバータには、高い環境性、信頼性、経済性が求められている。次世代小型高性能インバータは、これらの性能向上を図るため、以下に示すコンセプトに基づいて開発を推進した(表1参照)。

2.1 環境負荷の低減

環境負荷の低減については、小型・軽量化、高効率化、有害物質の排除に重点を置いた。

小型・軽量化のために、新型HiGT [High Conductivity



図1 次世代小型高性能インバータ
新技術の採用により、小型・軽量を実現した鉄道用VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータを示す。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)] モジュールやアクティブゲート制御技術による損失低減とノイズ抑制を両立させ、部品の削減や小型化を図った。また、新しいベクトル制御方式と高性能MPU (Micro Processing Unit) の採用により、トルク指令に対する応答を高速化し、高効率モータ制御対応、粘着率向上、軽負荷時の回生性能向上によって高効率化を実現した。

有害物質の排除については、電子部品実装に鉛フリーはんだを使用し、装置の無鉛化推進に取り組んだ。

2.2 信頼性の向上

信頼性の向上という課題に対しては、省部品化、解析主導型設計に重点を置いた。

省部品化による信頼性の向上を図るため、高性能MPUを採用して、MPUの使用数を削減した。

主回路の解析主導型設計では、シミュレーション連成技

※) イーサネットは、富士ゼロックス株式会社の登録商標である。

表1 開発コンセプトと対応技術

環境負荷の低減、信頼性の向上、ライフサイクルコストの低減をコンセプトに開発した。

開発コンセプト	開発ポイント	対応技術
環境負荷の低減	小型・軽量化	スナバレス主回路
		新型IGBTの採用
	高効率・高応答化	アクティブゲート制御
		カスケードベクトル制御
信頼性の向上	有害物質の排除	鉛フリー化の推進
	省部品化	高性能MPUの採用
	解析主導型設計	プログラム自動生成ツールの適用 ECTAS*による連成解析
ライフサイクルコストの低減	省メンテナンス化	冷却ファンの撤廃
		バッテリーの撤廃
	長寿命化	低消費電力電子部品の採用
		電解コンデンサの置き換え

注：略語説明など IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MPU (Micro Processing Unit), ECTAS (Eddy Current Calculation Code on Three-dimensional Arbitrary Surfaces)
* 日立オリジナルの電磁界解析ツール

術によってシミュレーション精度を向上し、設計段階からの品質向上を図った。

ソフトウェア設計では、日立オリジナルの組込みソフトウェア開発統合環境を使用した。処理仕様書によるシミュレーション・ソースコードの自動生成が可能なソフトウェア設計支援ツールを使用し、上流設計段階での徹底した品質の作り込みと、ソースコード自動生成によるヒューマンエラーの排除を実現した。

2.3 ライフサイクルコストの低減

ライフサイクルコストの低減については、長寿命化とメンテナンス作業の低減に重点を置いた。

長寿命化のため、有寿命部品を代替品に変更し、低消費電力の電子部品を採用して発熱を抑制した。また、メンテナンス作業の低減を図るため、冷却ファン、バッテリーなど、定期交換が必要な部品を撤廃、または長寿命部品に変更するなどの工夫を行った。

3. パワーユニット部

高電圧・大電流を制御するパワーユニット部は、新型IGBTやアクティブゲート制御による低損失・低ノイズの両立と、解析主導型設計による設計上流段階からの高品質化を図った。

3.1 大電流HiGTモジュール

パワーユニット部のキーデバイスであるIGBTには、Planar HiGT構造による導通損失低減と、LiPT (Low Injection Punch Through) 構造によるスイッチング損失低減、およびノイズを低減するソフトスイッチング特性を実現した新型HiGTモジュール¹⁾を搭載した。HiGTモジュールを制御するゲートドライバには、動作状態をリア

ルタイムに監視しながら、最適なスイッチング制御を行うアクティブゲート制御技術を組み込んだ。

このように、低オン損失型HiGTとアクティブゲート制御を組み合わせ、損失低減とノイズ低減を実現した。さらに、後述する解析主導設計技術により、導体バーの低インダクタンス化と電流分布の最適化を図っており、IGBTターンオフ時のサージ電圧を抑制して、スナバレス化を実現している。

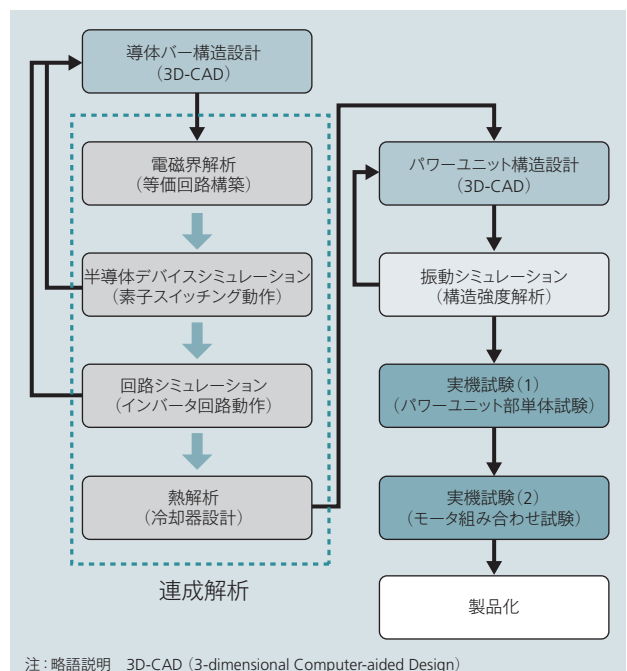
IGBTの損失低減と冷却器の性能向上により、冷却器も小型・軽量化しており、スナバレス化と合わせ、パワーユニット部の重量当たりの出力は大幅に向上した。

3.2 解析主導型設計

パワーユニット部の設計にあたっては、シミュレーション連成解析技術を活用し、導体バーの構造設計から回路動作解析、冷却器の熱解析までを連携して実施し、解析精度の向上と開発期間の短縮を図った。

シミュレーション連成解析のフローを図2に示す。

独自の電磁界解析ツールであるECTAS (Eddy Current Calculation Code on Three-dimensional Arbitrary Surfaces) を使い、3D-CAD (3-dimensional Computer-aided Design) により作成した導体バーモデルなどのインダクタンスや電流分布を求め、等価回路を構築する。次に、この等価回路を使って半導体デバイスシミュレーション、回路シミュレーションを実施する。また、回路シミュレーションで求めた損失を熱解析シミュレーションに入力し、冷却器の設計を行っている。



注：略語説明 3D-CAD (3-dimensional Computer-aided Design)

図2 シミュレーション連成解析を用いた設計フロー
3D-CADで作成したモデルを基に熱解析までを一連の作業で行う。

これにより、解析精度アップによる設計品質のいっそうの向上と、開発期間の短縮を実現した。

4. 制御論理部

パワーユニット部をコントロールする制御論理部は、鉛フリー化の推進による環境負荷の低減、回路構成のスリム化による信頼性の向上、長寿命化によるライフサイクルコストの低減を図った。

4.1 高性能MPUの採用

各種機能ごとにMPUを持っていた構成を見直し、高性能MPUを採用することで1MPU化を実現した。1MPU化により、MPU間通信処理が不要になり、ソフトウェアのさらなる信頼性の向上につながった。

4.2 冷却ファンレス構成での長寿命化

制御論理部の長寿命化を達成するため、部品の見直しと温度上昇の抑制に取り組んだ。メンテナンスが必要だったバッテリーと電解コンデンサを電気二重層コンデンサと高積層セラミックスコンデンサに置き換え、また低消費電力の電子部品を採用して基板温度上昇を抑制したことで、冷却ファンレス構成での長寿命化を実現した。

4.3 次世代車上传送方式への対応

次世代の車上传送方式として期待されているイーサネットを伝送方式に採用した。イーサネットを採用したことで、モニターデータの読み出しやソフトウェアの書込み速度が大幅に向上した。また、従来機器との互換性を考慮し、既存の通信方式にも柔軟に対応できる設計とした。

5. 制御ソフトウェア技術

5.1 高効率モータ駆動に適したベクトル制御

現在、鉄道車両の分野では、複数台の誘導モータをPWM (Pulse Width Modulation) インバータで一括駆動する方式が広く採用されている。また、誘導モータの制御方式としては、従来のV/f一定制御に代わってトルク制御の高応答化、高精度化が可能なベクトル制御が主流となっている。

日立グループは、鉄道車両用ベクトル制御²⁾を開発し、1990年代中ごろからすべての鉄道車両用インバータに適用してきた(図3参照)。この制御方式は、励磁電流をフィードフォワード制御とすることで、次の特長を有しており、鉄道車両の乗り心地向上などに貢献してきた。

(1) モータ定数の変動を自動的に補償しトルク変動を抑制する。

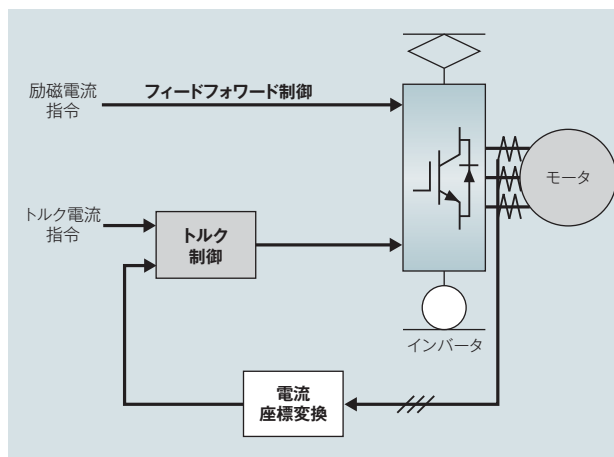


図3 鉄道車両用のベクトル制御

励磁電流をフィードフォワード制御とすることで、モータ定数の変動を自動的に補償しトルクの変動を抑制でき、多パルスモードから1パルスモードまで制御系を切り替えることなくモータ駆動が可能である。

(2) 多パルスモードから1パルスモードまで制御系を切り替えることなく、モータ駆動が可能である。

一方で、誘導モータのさらなる高効率化のため、モータの低すべり化によって駆動時の損失を低減することで、消費電力を低減した高効率モータが普及しつつある。高効率モータは発熱が少ないため、全閉構造が可能となり、モータの低騒音化、省メンテナンス化も実現できる。

しかしながら、高効率モータは損失を低減するために回転子や固定子の抵抗値を小さく設計しており、モータ内部で生じる磁束の干渉の影響を受けやすい。このため制御系が不安定になりやすい傾向がある。そこで、このような特徴を持つ高効率モータ駆動に適した制御方式として、カスケードベクトル制御³⁾を鉄道車両用の誘導モータ駆動制御に初めて応用展開した(図4参照)。

カスケードベクトル制御では、励磁電流およびトルク電流の双方に電流制御を実装し、電流制御の出力段にモータ内部の磁束の干渉をモデル化したモータモデルを配置することで非干渉制御を行うものである。

図3の制御方式においても電流指令に基づく非干渉制御を行うが、カスケードベクトル制御のように電流制御の出力に基づいて非干渉制御を行うことで、実際のモータ駆動状態に応じた非干渉制御が可能となる。これにより、既存の誘導モータだけでなく高効率モータも安定して駆動することが可能となり、鉄道車両の省エネルギー化に貢献できる。

さらに、励磁電流およびトルク電流の双方に電流制御を実装することで、図3の制御方式に比べてさらなるトルク制御の高応答化、高精度化が可能となり、空転再粘着制御や軽負荷回生制御などの性能向上が期待できる。

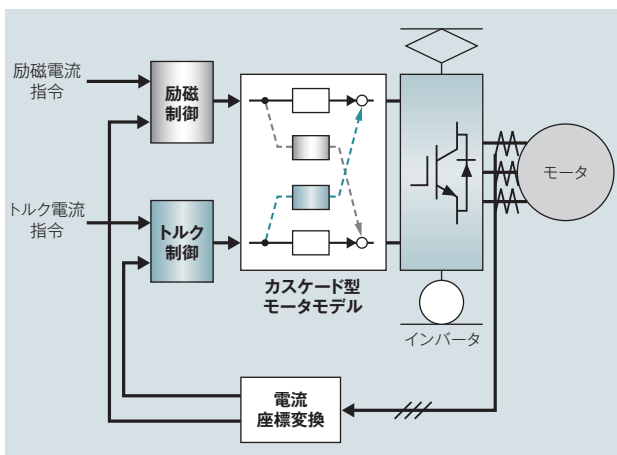


図4 高効率モータ駆動に適したベクトル制御

電流制御の出力段にモータモデルを配置したカスケードベクトル制御により、モータの実動作状態に応じた非干渉制御を実現し、高効率モータ駆動においても安定した制御が可能となる。

5.2 プログラム自動生成ツール

鉄道車両用インバータ制御ソフトウェアの信頼性を向上させるため、ブロック線図からプログラムソースコードを自動生成できるツールを適用してきた(図5参照)。処理仕様書からプログラムを自動生成でき、ソフトウェアの可読性を高め、プログラム作成時の人的ミスを低減することができる。また、処理仕様書レベルでのシミュレーション機能により、机上デバッグの精度を高め、後戻り作業を低減し、生産性向上につながっている。

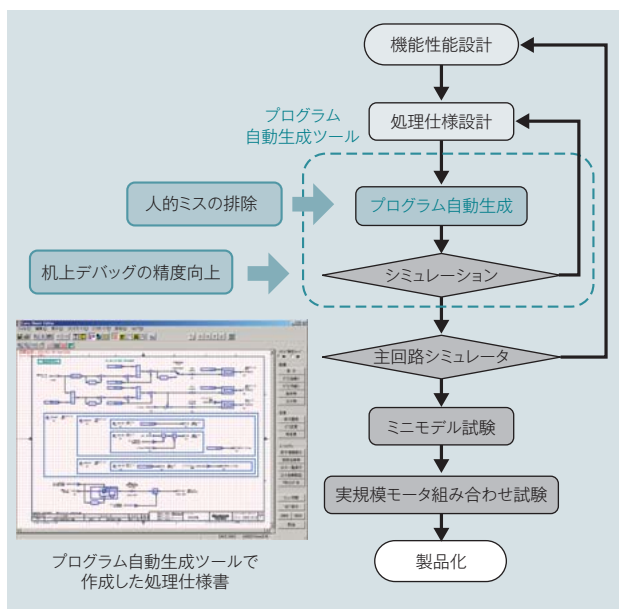


図5 プログラム自動生成ツールを用いた設計手法

機能仕様書からプログラムを自動生成する機能とシミュレーション機能により、信頼性と生産性を向上している。

6. おわりに

ここでは、日立グループが新たに開発した次世代小型高性能インバータについて述べた。

環境性能向上の要求はインバータも例外ではない。日立グループは、さらなる省エネルギー化と高効率化を追求したインバータの開発を引き続き行っていく。

参考文献

- 1) 齊藤, 外: 低損失, 高耐圧, 大電流HIGTモジュール, 日立評論, 90, 12, 1018~1021 (2008.12)
- 2) 安田, 外: 単一制御系で全PWMモードに対応する車両駆動用インバータのベクトル制御, 平成10年電気学会産業応用部門大会, 74 (1998)
- 3) 戸張, 外: 高速用永久磁石同期モータの新ベクトル制御方式の検討, 平成15年電気学会産業応用部門大会, 1-130 (2003)

執筆者紹介



栗原 直樹

2007年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 水戸交通システム本部 交通システム開発センタ 所属
現在, 鉄道車両用インバータの開発に従事



立原 周一

2003年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 水戸交通システム本部 交通システム開発センタ 所属
現在, 鉄道車両用インバータの開発に従事
電気学会会員



南出 健八郎

2006年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 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, 鉄道車両用インバータの設計に従事



山口 智司

2006年日立製作所入社, 社会・産業インフラシステム社 交通システム事業部 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, 鉄道車両用インバータの設計に従事