

次世代車両制御システム (INTEROS) に対応した車両機器の開発



河野 洋一*



佐藤 真哉*



川崎 淳司*

従来より大容量かつ汎用の伝送方式である100Mbpsイーサネット (Ethernet) を採用した次世代車両制御システム (INTEROS) の開発に合わせ、車両に搭載される機器においても、100Mbpsイーサネット伝送に対応するための開発を行った。

車両機器のうち車両の走行に直接関わる主回路装置およびブレーキ制御装置については100Mbpsイーサネット伝送に対応するだけでなく、編成としての機能再構築を行い、また、大容量伝送を活かす機能開発を行った。本稿では、INTEROSに対応した主回路装置およびブレーキ制御装置の特徴とその試験結果について報告する。

●キーワード:100Mbps イーサネット、INTEROS、VVVF インバータ装置、補助電源装置 (SIV)、ブレーキ制御装置 (BCU)

1. はじめに

当社では、基幹伝送路 (車両を引き通す伝送路) にアーケネット (Arcnet) を、機器接続伝送路 (車両機器に対する伝送路) にRS485を用いた、TIMS (Train Information Management System) をすでに実用化し、首都圏の通勤電車などに適用している¹⁾。近年、主回路装置を初めとする各車両機器の高機能化、乗客へのサービス向上を目的とした高機能化、多様化に伴い伝送路の情報量は年々増加し、すでにTIMS内の情報伝送量は限界レベルにまで到達しようとしている。そこで、より大容量、高速の伝送方式であるイーサネット (Ethernet) を基幹伝送方式および機器接続方式とした次世代車両制御システム (以下、INTEROS: INtegrated Train control / communication networks for Evolvable Railway Operation Systemという) を開発している^{2) 3) 4)}。

今回の各車両機器の開発においては、通信機能の100Mbpsイーサネット伝送への対応を図った。また、INTEROSにおいては拡張性・信頼性を向上するために、新たに状態監視系を設けた。これにより、従来、各車両機器において保存されていた大容量の状態データを状態監視系を介してINTEROSに伝送し、INTEROSからWiMAXを活用した汎用無線通信で地上システムに伝送するというコンセプトで各車両機器の機能も開発した。

今回、INTEROS対応の車両機器の開発は、209系試験電車 (MUE-Train) において実施した⁵⁾。本稿では開発したINTEROS対応主回路装置 (以下、主回路装置とは、VVVF インバータ装置および補助電源装置のことをいう) およびブレーキ制御装置の特徴とその試験結果について報告する。

※ 「イーサネット」、「Ethernet」は、富士ゼロックス (株) の登録商標である。

2. INTEROSのシステム構成

2.1 システム構成概要

INTEROSでは、信頼性向上のため、システムのハードウェアを極力削減することを前提にシステム構成を検討し、「集中方式 (A方式)」、「自律分散方式 (C方式)」という2つの方式で開発を行なった⁶⁾。集中方式では、データの伝送制御は中央装置 (先頭車) が一括管理する。演算機能は、即時性を必要とする電空協調制御は端末装置 (制御単位ごと (3両~5両) に1台設置) で行い、その他の機能は中央装置に集約した。このシステム構成により、従来のTIMS方式を踏襲しながらハードウェアを削減することができる。

一方、自律分散方式では、演算機能を中央装置 (先頭車) に集約し、伝送機能は、各車に一つ配置するルータに委ねて単純化している。伝送タイミングは非同期方式としている。この構成により、自律分散方式では接続する車両機器がネットワーク内で自律して動作することが可能である。

INTEROS対応の主回路装置、ブレーキ制御装置などの車両機器は上記のA方式およびC方式それぞれに対応し、図1に示すシステムを構成している。

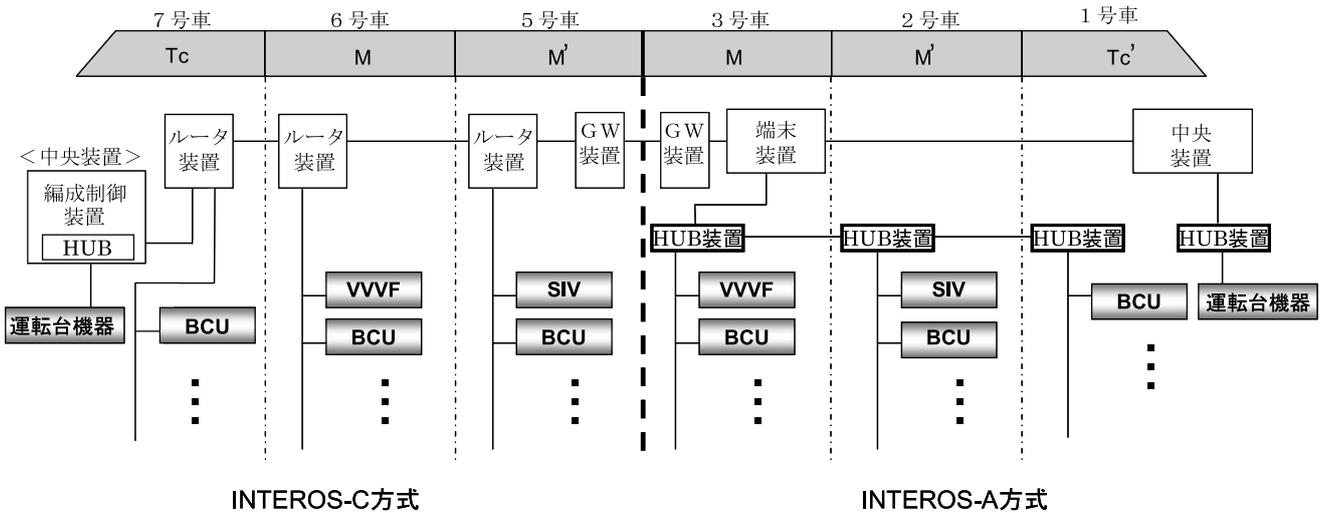


図1 MUE-TrainにおけるINTEROSシステム構成 (制御系)

2.2 イーサネット伝送基本仕様

イーサネット伝送の主な仕様を表1に示す。ネットワークは、制御1系・制御2系・状態監視系の3系統の構成で、主回路装置およびブレーキ制御装置は各々のネットワークに接続するためのイーサネット伝送ポートを設けている。

表1 イーサネット伝送の主な仕様

項目	仕様
物理層	Ethernet 準拠
データリンク	Ethernet 100BASE-TX 全二重通信 ポイント・トゥ・ポイント接続
機器側通信ポート数	3 (制御1系、制御2系及び状態監視系)
MACアドレス	グローバルアドレス
ネットワーク層 トランスポート層	IP Ver.4、ARP、ICMP、UDP、TCP



図2 VVVFインバータ装置 (A方式)



図3 VVVFインバータ装置 (C方式)

3. VVVFインバータ装置の開発

3.1 開発の概要

主電動機出力トルク量演算のINTEROSへの移管、機器の自動開放やモニタリング機能などを実現したA方式⁷⁾およびC方式向け⁸⁾ VVVFインバータ装置を開発した (図2および図3)。

また、主電動機速度センサ (PGセンサ) を使用せず、VVVFインバータ装置内の無接点制御装置にて推定した速度推定値にてモータトルク制御する「PGセンサレス制御」を実施している。

3.2 制御系機能

3.2.1 トルク量演算のINTEROSへの移管

従来のVVVFインバータ装置における主電動機出力トルク量の演算は、TIMSより伝送される荷重信号 (乗客数に比例する信号) によりVVVFインバータ装置側で実施していた。この時TIMSより伝送される荷重信号は、編成全体の総荷重量に対するVVVFインバータ装置が搭載されている号車の荷重量に応じて指示される。

今回、INTEROSではこの主電動機出力トルク量の演算を図4に示すように車両システム側 (INTEROS) に移管した。移管するメリットとしては、従来の方式においては、荷重量に応じて各VVVFインバータ装置が演算していた主電動機出力トルク量を、INTEROS、つまりシステムの最上流で一括管理することである。一括管理することにより、編成としての必要トルク量の中で、外的要因、例えば勾配条件、天候などにより編成内の特定の車両に主電動機出力トルクをより多く配分するような編成内トルク最適分配制御が可能となり、空転、

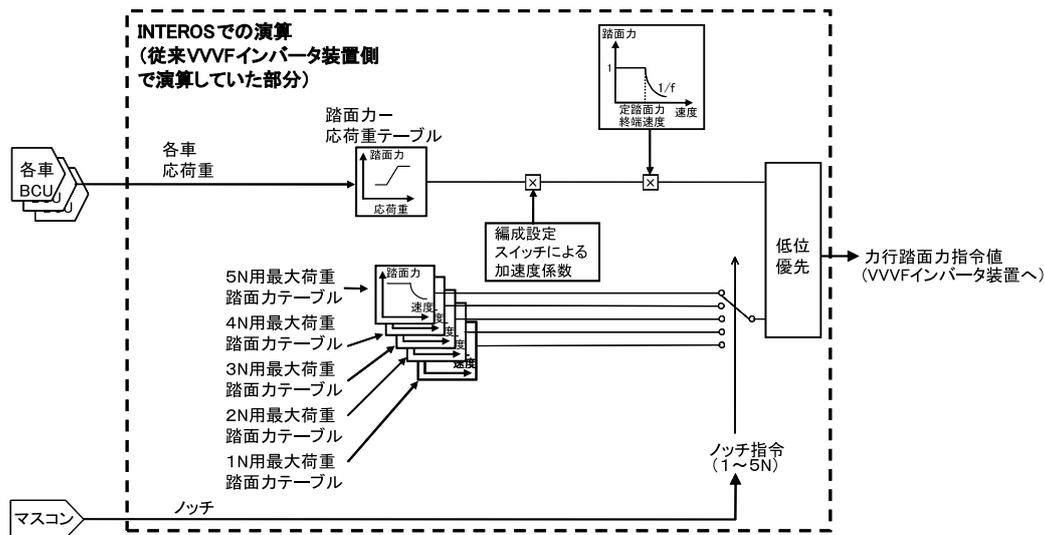


図4 VVVFインバータ装置からINTEROSに移管したトルク演算機能

滑走時の最適トルク配分や、省エネ、群開放時のトルク配分制御などの制御機能向上が可能となる。

3.2.2 故障時の自動開放機能

VVVFインバータ装置側に故障時の自動開放・リセットシーケンスを構築し、VVVFインバータ装置故障時に乗務員の開放・リセット操作によらず、INTEROSが自動的に故障したVVVFインバータ装置を開放する機能を構築している。

3.3 状態監視系機能

3.3.1 モニタリング機能

従来のTIMSでは、各機器内蔵の電圧センサなどの検出器で検出したコンデンサ電圧、主電動機電流といった状態信号（以下、SD：ステータスデータという）をVVVFインバータ装置よりTIMSに送信し、乗務員モニタ画面への表示などを実施している。

今回、INTEROSに対しては、その大容量性を活かし、従来と同じ状態信号のほか、各機器でその状態信号から演算した演算値（一例として、推定フィルタコンデンサ容量値）をSDとして送信している。送信するSDは、乗務員モニタ画面などへの表示に使用するとともに、INTEROS側のデータサーバに保存し、動的監視に使用できる。ここでいう動的監視とは、上記の各機器から送信されるSDをリアルタイムに動的監視アルゴリズムを適用し、予防保全に活用することである。

3.3.2 故障部位診断機能

故障発生時に、故障項目から故障部位を推定し、INTEROSに通知する機能を構築した。なお、故障原因が複数推定される場合は可能性の高いもの最大3点を通知することとしている。この機能により、故障部位を絞り込むことができる

ため、メンテナンス社員による故障箇所の特定制が容易となる。

3.3.3 トレースデータのリアルタイム送信

故障トレースデータ（以下、TDという）はデータ量が多いため、従来は列車運転中にTDをTIMSに送信することが困難であった。INTEROSでは100Mbps伝送の高速性、大容量性を活かしてリアルタイムにTDをINTEROS側に送信する。TD伝送は、列車の制御に使用する制御系と独立した状態監視系を用いて伝送する。従来はTDの記録件数が装置側のメモリ容量で制約を受けていたが、INTEROSではリアルタイムに払い出すため、この制約が無くなると考える。

3.4 試験結果

工場内主電動機組合せ試験ならびにMUE-Trainでの走行試験で以下を確認している。

- (1) 主電動機出力トルク量が、INTEROSで演算してイーサネット伝送経路で指示した値と一致し、正常に主電動機制御が可能であることを確認した。
- (2) 規定したSDがVVVFインバータ装置からINTEROSへ正常に伝送され、乗務員モニタ画面への表示など、問題ないことを確認した。予防保全への活用については、SDがデータサーバへ正常に格納されることを確認した。
- (3) 故障時の自動開放機能については、VVVFインバータ装置で模擬故障を発生させ、INTEROSの指令どおりに開放あるいは復帰することを、工場内の組合せ試験にて確認した。
- (4) 速度センサレス制御の制御性能が良好であることを確認した。工場内の組合せ試験において、ノッチオフの惰行中は速度推定値がゼロとなるため、再起動時に速度推定を正確に実施し、滑らかに再起動できることを確認

した。なお、確認にあたっては、速度センサレス制御における速度推定値と実際に主電動機に取り付けられた速度センサ出力との比較を実施し、両者間でよく一致していることを確認した。また、MUE-Trainに搭載後も特に問題なく走行できており、制御性能に問題ないことを確認した。

4. 補助電源装置 (SIV) の開発

4.1 開発の概要

補助電源装置は、A方式向け装置 (図5) ⁷⁾ とC方式向け装置 (図6) ⁸⁾ で異なるものを開発しているが、自動リセット機能、自動延長給電対応、モニタリング機能、イーサネット伝送対応など、それぞれの持つ機能面での特徴は共通したものである。また、以下の特徴を有する。

(1) メンテナンス性の向上

従来の補助電源装置では、箱枠に各部品を搭載していたことから、メンテナンスをする際は狭いスペースでの部品ごとの取外し作業となっていた。

そこで、構成部品を機能単位でモジュール化し、これを箱枠に収納する構造とした。これにより、故障復旧時間の短縮とメンテナンス性の向上を図った。

(2) 高効率化

主回路素子には新型のIGBT素子、低損失な3レベルインバータ方式を採用することで、96%の高効率を実現している。

(3) 小型軽量化

リーケージインダクタンス付トランスを採用し、小型軽量化を図った。

(4) 制御の高速化

無接点制御装置は、制御をオールデジタル化することにより信頼性、メンテナンス性の向上と高速応答性の両立を実現した。



図5 補助電源装置 (A方式)



図6 補助電源装置 (C方式)

4.2 制御系機能

4.2.1 自動リセット機能

INTEROSにおいて自動リセットシーケンスを構築しており、補助電源装置故障発生時には、INTEROSからの指令により自動的にリセットを行う機能を備える。

4.2.2 自動延長給電対応

INTEROSにおいて自動延長給電シーケンスを構築しており、運転士の扱いによらない自動延長給電を行うことができる。

補助電源装置としては自動延長給電の制御に必要な「ゲートスタート信号」および「3phMK」情報をINTEROSに送信している (図7)。

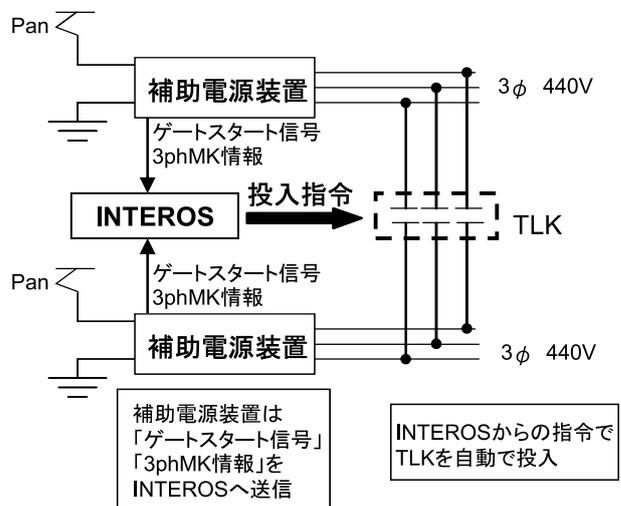


図7 自動延長給電フロー

4.3 状態監視系機能

4.3.1 モニタリング機能

フィルタコンデンサの容量や接触器動作回数などを常時モニタリングすることで劣化診断、予防保全へ活用することを可能としている。

4.3.2 故障部位診断機能

故障発生時に、故障項目から故障部位を推定する機能であり、故障原因が複数推定される場合は最大3点まで故障部位推定コードをINTEROSに送信して通知することとしている。

4.3.3 消費電力量演算機能

VVVFインバータ装置では従来から電力量演算を実施していたが、補助回路の電力量は演算していなかった。また、近年はVVVFインバータ装置の効率が向上したことによって補助回路の消費エネルギーが大きなウエイトを占めるようになってきた。

そこで、補助電源装置においても電力量を算出する機能

を持たせた。VVVFインバータ装置と同じく「(入力電流)×(入力電圧)」の演算を行い、1kWhごとにINTEROSへ信号を送信する仕組みである。

4.4 試験結果

工場内組合せ試験で以下を確認している。

- (1) 起動・停止、負荷変動などの特性試験を実施し、正常に運転できることを確認した。
- (2) INTEROSとの組合せ試験を実施し、規定のSD伝送が行われ、データが乗務員モニタ画面に正常に表示すること、TD伝送が行われ、INTEROS側に正常に格納されることを確認した。

また、MUE Trainに搭載後も正常に動作していることを確認するとともに、編成に2台あるうちの1台を停止させ、INTEROSによって自動延長給電が実施されることも確認した。

5. ブレーキ制御装置(BCU)の開発

5.1 開発の概要

ブレーキ制御装置は、一部弁類の制御電圧DC100V化を図ったことを特徴とするA方式向け装置(図8)¹⁰⁾と、既存車で十分実績のある弁類を使用してメンテナンス性に十分配慮したことを特徴とするC方式向け装置(図9)を開発した。

従来の装置と同様、INTEROSからの必要ブレーキ力に対応し、電空ブレンディング制御についても、INTEROSからの空制減算指令に対応している。また、乗車状態によらずブレーキ性能が一定となる応荷重制御付となっている。



図8 ブレーキ制御装置
(A方式)



図9 ブレーキ制御装置
(C方式)

5.2 イーサネット伝送対応

イーサネット伝送対応CPUを搭載し、制御系・状態監視系との接続を図った。なお、イーサネット伝送によるブレーキ指令は、常用ブレーキ(各ブレーキノッチと応荷重に応じた必要ブレーキ力)、抑速ブレーキおよび耐雪ブレーキとし、非常ブレーキおよび直通予備ブレーキは従来どおりメタルワイヤ指

令としている。

また、イーサネット伝送を行うにあたって、電磁弁などからのノイズによりインピーダンス整合が乱れることを防ぐために、イーサネット対応コネクタを搭載した。

5.3 状態監視系機能

5.3.1 モニタリング機能

ブレーキ制御装置内の故障などを未然に防ぐために、下記のモニタリング機能を開発した。

(1) BCU基板温度上昇値の把握

温度センサICにより基板上温度上昇値を把握している。

(2) 圧力センサの出力値(オフセット値)のモニタリング

AC圧センサやBC圧センサなどのオフセット値をモニタリングし、規定値以上に達した場合にセンサの交換を促し、予防保全に活用する。

(3) 圧力センサによる各空制品(応荷重弁・中継弁など)のモニタリング

BC圧の目標値と実測値との差分や、BC圧力の応答時間などをモニタリングし、規定値よりも大きくなった場合に中継弁などの空制部品の交換を促し、予防保全に活用する。

(4) 各電磁弁の動作回数のモニタリング

各電磁弁などの動作回数をモニタリングし、動作保証されている回数に達した場合に当該部品の交換を促し、予防保全に活用する。

5.3.2 故障部位診断機能

BCU内で異常が生じた場合、故障部位を推定するため、自己診断機能を新規搭載した。自己診断を行っている主な回路は、下記のとおりである。

(1) 速度入力回路

(2) アナログ入力回路

(3) 電源回路

(4) CPU周辺回路

この機能により、故障発生時に故障コードと故障部位推定コードをINTEROSに送信する。故障部位推定コードには、基板単位や電磁弁単位のコードを割り当てており、故障発生時には、これらのコードをINTEROSに通知する。メンテナンス社員は、故障コードと故障部位推定コードの情報を元に、故障原因を容易に特定することが可能である。

5.4 試験結果

5.4.1 INTEROS との組合せ試験

INTEROSとブレーキ制御装置を組み合わせ、イーサネット伝送の等価配線を組み、伝送品質の評価を実施した。その結果、伝送速度やCPU負荷などに問題ないことを確認し、また、伝送波形よりインピーダンス整合が取れていることを確認した。

5.4.2 ブレーキ性能の確認

本線での走行試験時においては、非常ブレーキおよび常用ブレーキの両方においてブレーキ距離および減速度が仕様を満足していることを確認した。常用ブレーキにおいては、INTEROSからの指令による制御性能を減速度などの測定項目で確認し伝送遅れのないこと、回生ブレーキ併用時の空制減算指令に対してもBC圧の立下り遅れなく電空ブレンディング制御をしていることを確認した。また、ブレーキ制御装置と滑走防止弁装置の動作が良好であることを確認するため散水状態でブレーキ試験を実施し、滑走再粘着制御が問題ないことを確認した。

6. おわりに

今回、大容量、高速の伝送方式である100Mbpsイーサネットを採用した次世代車両制御システム対応の主回路装置およびブレーキ制御装置の開発を行い、工場内試験および現車試験によってイーサネットの伝送状態と主回路性能およびブレーキ制御性能において問題ないことを確認した。今後、引き続き100Mbpsイーサネットにより可能となる大容量伝送を活かしたさまざまな機能開発に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 新井、白樫:「列車情報管理装置 (TIMS) の10年と今後の取り組み」、サイバネティクス、Vol.12 -No.1、pp.25-32、2007.
- 2) 中村:「首都圏鉄道システムの革新」、JR East Technical Review、No.28 (夏号) http://www.jreast.co.jp/development/tech/pdf_28/Tech-28-03-06.pdf
- 3) 川崎、飯田、星野、杉山、祖父江:「車両制御システムにおけるイーサネット伝送路特性実験」日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2009講演論文集、pp.97-100、2009.
- 4) 田淵、内山、川崎、甲村、中西、向井、橋口:「次世代鉄道車両制御システムにおけるイーサネット伝送路特性実験」、平成22年電気学会全国大会 講演論文集、pp.109-110、2010.
- 5) 田村、川崎:「209系試験電車 (MUE-Train) の概要」、鉄道車両工業、No.455、pp.28~31、2010
- 6) 川崎、祖父江、星野、佐藤、綾部、宮内、甲村:「イーサネットを用いた車両制御システムにおけるネットワークの構築」、日本機械学会第17回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2010講演論文集、pp.207-210、2010.
- 7) 川崎、水口、石田、奥田、堀井:「次世代車両制御システム対応主回路装置の開発」、第47回サイバネティクスシンポジウム論文集、2010
- 8) 福間、金子、川崎、水口:「次世代車両制御システムに対応した多目的試験車 (MUE Train) 用VVVFインバータ装置の開発」、平成22年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集、p39、2010
- 9) 吉川、尾谷:「次期SIVの開発およびMUE-Trainへの適用」、東芝レビュー Vol.66 No.6、pp.53-56
- 10) 川崎、菅谷、中村、角南、板野、松山:「次世代車両制御システム対応ブレーキ制御装置 (BCU) の開発-ブレーキ制御へのEthernet伝送の適用-」、第47回サイバネティクスシンポジウム論文集、2010