

欧州市場向けシリーズハイブリッド機関車と省エネを実現する主要電気品

Series Hybrid Locomotive Equipped with Energy-Saving Electrical Equipment for European Market

木下 裕安 KINOSHITA Hiroyasu 小川 幸太郎 OGAWA Kotaro

温室効果ガスの排出量を2050年までに実質ゼロ化するカーボンニュートラルの目標が、世界各国で掲げられている。

東芝インフラシステムズ(株)は、鉄道車両の省エネ及び低排出ガスを実現する手段として、主に国内市場向けにディーゼルエンジン発電機とリチウムイオン電池を動力源としたハイブリッドシステムの技術開発を進めてきた。その技術を生かし、環境意識の高い欧州市場向けにシリーズハイブリッド機関車を投入するため、主要電気品のバッテリー装置、主変換装置、及び主電動機などを開発している。主電動機には高効率で省メンテナンスの永久磁石同期電動機(PMSM)を採用し、パワーユニットとの組み合わせ試験の結果、97.4%という高い実測効率を確認した。

Japan and other countries have set a target of reducing greenhouse gas emissions to net zero by 2050, that is, carbon neutrality by 2050.

Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corporation has been engaged in the development of technologies for hybrid locomotives equipped with both a diesel engine generator and lithium-ion batteries as a power source, in order to realize rolling stock with improved energy saving and reduced exhaust gas emissions for the Japanese market. Taking advantage of our accumulated experience in this field, we are responding to the need for further emission reductions worldwide by developing key technologies for energy-saving electrical equipment, including a traction battery system, a power conversion cubicle, and a traction motor, with the aim of introducing series hybrid locomotives to the European market, which is characterized by a high level of environmental consciousness. We have applied a highly efficient, easy-to-maintain permanent magnet synchronous motor (PMSM) as the traction motor. Tests on the traction motor in combination with the power unit have verified that it achieves a high efficiency of 97.4%.

1. まえがき

新技術の導入による省エネや低排出ガスの実現は、我が国だけでなく欧州地域においても、従来に増して重要になっている。鉄道業界では、架線がない区間でも走行できる車両として、長年にわたりディーゼルエンジンを動力源とした機関車が使用されてきた。しかし、近年、自動車業界でハイブリッド化が進んできたのと同様に、ディーゼルエンジンを動力源とする機関車の省エネを目的とした研究・開発が進められている。

東芝インフラシステムズ(株)は、省エネや低排出ガスの実現手段として、ディーゼルエンジン発電機とリチウムイオン電池を動力源とするハイブリッド機関車の開発を進めてきた。既に、日本貨物鉄道(株)と共同で開発したHD300形式ハイブリッド機関車を納入しており、環境負荷低減に貢献している⁽¹⁾。また、欧州では、既存の液体変速式ディーゼル機関車BR294を、ハイブリッド機関車BR1094に改造するHELMS (Hybrid Electro-Mechanical Shunter) プロジェクトにも取り組み、バッテリー装置や主変換装置などの主要電気品を納めてきた。

ここでは、欧州地域向けに現在開発中のシリーズハイブリッド機関車と、それに使われている省エネを実現する主要電気品の特長について、欧州規格(EN)にも触れながら述べる。

2. 欧州向けハイブリッド機関車の概要と開発目標

当社は、ドイツ鉄道(Deutsche Bahn AG)の貨物鉄道子会社である欧州最大の鉄道貨物運営会社DB Cargo AGによるDEHLo (Diesel-Electric Hybrid Locomotive) プロジェクトの一環として、ハイブリッド機関車Toshiba HDB 800 (以下、T-HDB 800) の設計・製造を受注した。T-HDB 800は、DB Cargo AGで現在運用中のディーゼル機関車に比べて、燃費を30%以上低減することを目標として開発をスタートした。出力は750 kWで、バッテリー装置には東芝が独自に開発したリチウムイオン二次電池SCiB™を搭載する。主電動機には高効率と省メンテナンスを実現できるPMSMを採用した⁽²⁾。

T-HDB 800の完成予定外観を図1に、主回路システムの構成を図2に示す。故障時にも運行ができる冗長性を確保するため、エンジンと主発電機を2台ずつ搭載した2群構



図1. T-HDB 800完成予定図

従来のディーゼル機関車に比べて、燃費を30%以上低減することを目標としている。

Rendering of T-HDB 800 hybrid locomotive

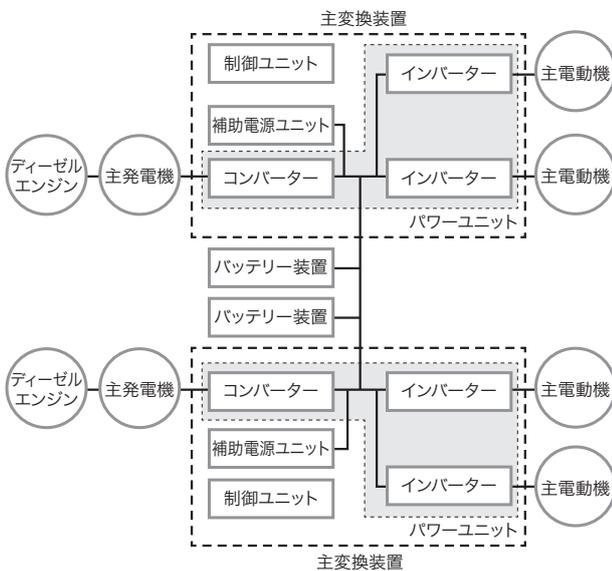


図2. T-HDB 800主回路システムの構成

エンジンは主発電機による発電に用い、発電した電力で主電動機を駆動し、状況に応じてバッテリー装置を充放電する、シリーズハイブリッド方式を採用した。

Configuration of main circuit system of T-HDB 800

成とした。また、四つの主電動機は、インバーター4回路による個別制御としている。

ハイブリッドシステムには、大きく分けてパラレル(並列)方式とシリーズ(直列)方式の二つがある。T-HDB 800では、HD300形ハイブリッド機関車でも採用したシリーズ方式の駆動システムを採用した。シリーズ方式は、エンジンを主発電機で発電するためだけに利用し、車両の駆動は主電動機で行う。パラレル方式に比べて、変速機や推進軸が不要になるため、小型化や軽量化がしやすく、部品点数の削減で故障率低減にもつながる。

T-HDB 800の主な運用目的は、貨物ヤードにて貨車を行き先別に仕分ける貨物入れ換え作業である。欧州地域で

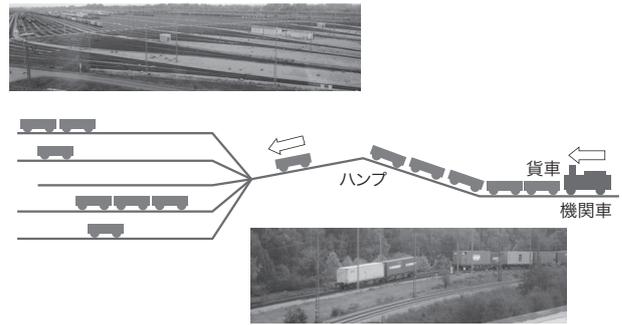


図3. 貨物ヤードでの入れ換え作業

勾配のある区間で貨車を低速で押し上げ続けるため、主電動機に対する負荷が大きい。

Shunting operation in freight yard

は、図3のように機関車で貨車を後方から低速で押し、ハンプと呼ばれる丘の上で貨車を切り離して、無動力で所定の線路に振り分ける作業がある。このとき、入れ換え作業の中で主電動機への負荷が最も大きい。

また、各貨物ヤード間を行き来するため、短距離の本線走行もできるようにした。ハイブリッドシステムでの省エネ効果を発揮するのは、特にヤード内での入れ換え作業時である。この作業では、力行/ブレーキの切り替えを繰り返すため、力行時はエンジンが不得意な急加速をバッテリーの電気エネルギーで補い、ブレーキ時は電気ブレーキを掛けた際の回生エネルギーを電力に変換してバッテリーに蓄えることで、省エネ化できる。

貨物入れ換え作業と本線走行のどちらもできる機関車は、速度が遅い区間と速い区間の両方で連続使用が可能な定格が必要であり、従来は損失による主電動機の発熱が大きかったが、低損失材料を採用することなどで発熱問題を低減した。

3. 主要電気品の概要・開発コンセプト・特長

主要電気品は国内での開発とし、特に高い安全性が求められるバッテリー装置は、図4のように、EN 50126, EN 50129におけるシステムの安全性能を表す尺度であるSIL 4 (Safety Integrity Level 4) の認定証を取得したSCiB™バッテリーモジュール及びその周辺機器を採用した⁽³⁾。

3.1 SCiB™を使ったバッテリー装置

SCiB™は、負極にチタン酸リチウムを採用している。リチウムイオン電池に分類されるが、安全性、長寿命、低温性能、急速充電、高入出力、及び広い実効SOC (State of Charge) レンジに特長があり、T-HDB 800に採用した。

T-HDB 800のバッテリー装置は、故障が発生した場合に



図4. SIL4認定証

SCiB™及びその周辺機器の優れた安全性が、第三者認証機関であるTÜV Rheinlandにより、確認された。

Safety Integrity Level 4 (SIL4) certified by TÜV Rheinland

異常を検知し、その異常箇所を確実に切り離しできる構成にした。SCiB™バッテリーモジュール56個を直列につないだものを2群構成として、120 kWhの容量を保有する。冷却方式は、主変換装置と同様に水冷を採用し、バッテリー温度の上昇を抑えて、長寿命化を図った。

3.2 主電動機 (PMSM)

主電動機が搭載される台車周りの強度評価について定めたEN 13749に従い、図5に示すモデルを用いて強度解析を実施した。ドイツで広く用いられているFKMガイドライン(破壊力学に基づく強度評価法)に沿った安全率を適用することで、製造時のばらつきを考慮した十分な安全性を確保している。

3.3 主変換装置

主発電機からの電気エネルギーで、主電動機を駆動する主変換装置(図6)には、電力変換のためのインバーターやコンバーターを搭載したパワーユニットや、それを制御する制御ユニット、補助電源ユニットなどが組み込まれている。主変換装置の特長は、次のとおりである。

- (1) 故障が発生した場合も機関車運用に支障がないように、主変換装置を2台搭載した。また、インバーター

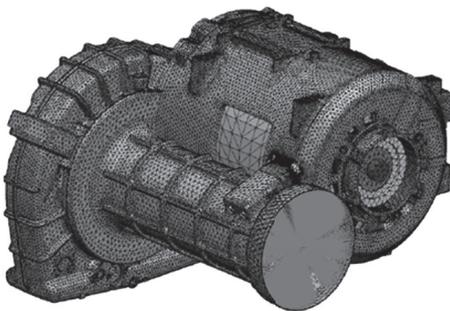


図5. PMSM解析モデル

EN 13749やFKMガイドラインに基づいた強度解析を実施した。

Finite element method (FEM) analysis model of PMSM

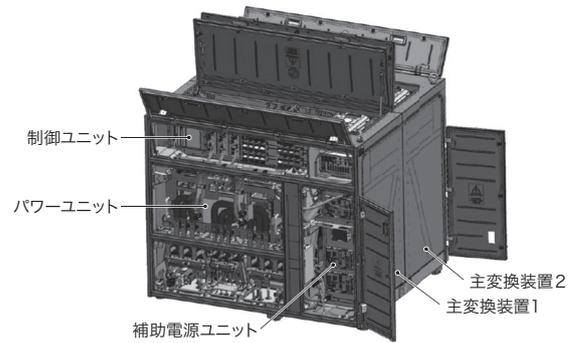


図6. 主変換装置

同一の装置を2台、背中合わせて配置している。

Power conversion cubicle

は、主電動機ごとに1台ずつ搭載し、個別に切り離せる構成にした。

- (2) 冷却水による強制冷却方式を採用し、装置の小型化を図った。
- (3) インバーター1回路で主電動機1台を駆動する個別制御(図2)においても、主変換装置を小型化できるように、制御機能を制御ユニット側とパワーユニット側に最適分散することにより、一つの制御ユニットでコンバーター1回路とインバーター2回路を制御できるようにした。
- (4) 将来、架線からの電源供給が必要になった場合に備えて、パワーユニットにIGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスター)素子を追加できるスペースを確保した。

4. ハイブリッド制御とそのシミュレーション技術

ハイブリッド機関車で省エネ・低燃費を実現させるためには、ディーゼルエンジンを効率が良い条件で極力使用することが重要である。そのエンジン制御方式として、車両要求パワーに応じてエンジンパワーを連続的に変化させるエンジン連続制御と、車両要求パワーによらずバッテリー最大充放電出力範囲内のエンジン効率が高いポイントで動作させるエンジン離散制御がある。

当社は、今までの経験も生かして最適制御を導入するためのシミュレーション技術も磨いている。車両の走行パターン(時速何キロでどこ部分を走行するのかの情報)を基に、燃料消費が最小になるバッテリーとエンジンの負担割合を導き出す。また、バッテリーセル温度だけでなく、バッテリーの劣化進度をシミュレートできる技術も保有しており、設計手戻りリスクの低減に貢献している。

ハイブリッド制御方式の選定にあたっては、シミュレーション

と実際の効率測定を進め、その結果から総合的に判断する。

5. 試験内容とその評価

5.1 形式試験と組み合わせ試験の結果

T-HDB 800に搭載する、パワーユニットと主電動機の形式試験、及びそれらの組み合わせ試験を実施した。これらの試験では、振動試験、効率測定、及び温度上昇試験を実施し、仕様どおりの結果になっているかどうかを評価した。欧州向け電気品には、ENに準拠した試験実施が必要である。ハイブリッドシステムを適用した電気品や車両の試験に関するENの体系を、図7に示す。各部品単体から機関車レベルまで段階的に厳しくかつ漏れなく、試験項目や条件が定義されている。

試験は問題なく完了し、主電動機及びパワーユニットの効率測定の結果、主電動機定格負荷試験で、設計値の96.0%に対して97.4%という高い実測効率を達成した。これは、従来使用していた開放型誘導電動機に比べて、約5%の効率向上になる。

5.2 今後の試験計画

現在は、当社内で機器の効率測定を行っているが、今後は納入先の欧州地域で、ディーゼルエンジン発電機やバッテリー装置を含めた機関車システム全体での組み合わせ試験を実施し、ハイブリッド制御の最適化調整や、各種試験、総合効率の測定などを行う計画である。

当社は、ドイツの現地法人として、東芝鉄道システム欧州社 (TRG : Toshiba Railway Europe GmbH) を設立した。現地における車体設計や、車両システム設計、車体組



図7. ハイブリッド機関車の主な試験規格体系

ハイブリッド機関車特有の規格はEN 62864-1とEN 62928であり、それ以外はバッテリー装置を搭載しない車両にも適用される。

Main test standards system for hybrid locomotives

立、各種試験の統括指揮などは、TRGが中心となって実施する。

また、欧州での機関車実運用には、第三者機関によるホモロゲーション(型式認証)の取得が必須である。ホモロゲーション取得のためには、主に①EMC(電磁両立性)試験、②機能安全試験、③ブレーキ試験、④騒音試験を実施し、その結果の審査を受ける。ホモロゲーション取得は、欧州メーカーにとっても難しい。当社は、HELMSプロジェクトでの経験を活用しながら、DEHLoプロジェクトを進めている。

6. 新たなハイブリッド機関車のコンセプト

3.3節で述べたとおり、当社は架線電源への対応も視野に入れて、T-HDB 800の開発を進めている。欧州地域では、機関車の使い勝手を高め、かつ更なる低排出ガス化を目指すため、架線がある路線ではディーゼルエンジンを使わず架線からの電力で運行することが望まれている。そのためには、架線電源、ディーゼルエンジン発電機、及びバッテリー装置の3電源に対応できる機関車(トリプルハイブリッド機関車)が必要である(図8)。

トリプルハイブリッド機関車を実現するには、必要な機器を搭載する車両上のスペース確保や、制御切り替え技術の確立など、多くの課題がある。各機器の省スペース化を図

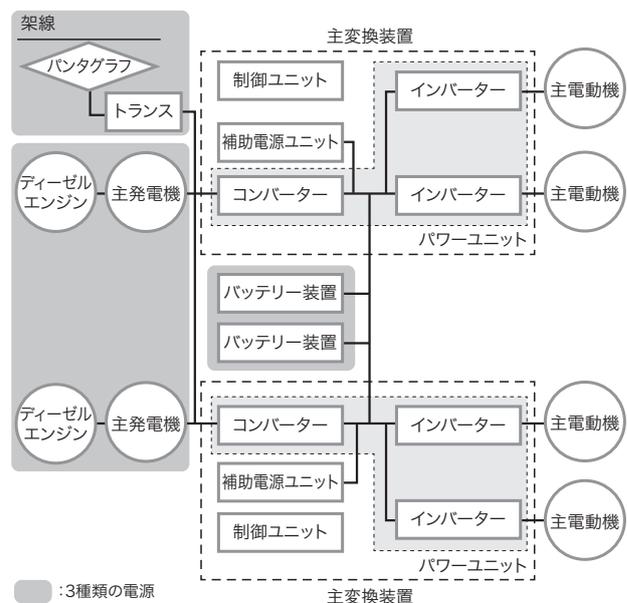


図8. トリプルハイブリッド機関車の主回路システムの構成

T-HDB 800の主回路構成に、架線からパンタグラフとトランスを介して給電する回路を追加した。

Configuration of main circuit system of triple hybrid locomotive with additional power supply from overhead wire

るとともに、各電源の運用状況に合わせた最適負担割合を求め、機器の必要容量を最小化し、小型軽量化も目指していく。

例えば、機関車の運用パターンによっては、ディーゼルエンジン発電の目的を非常時の走行エネルギーとして割り切り、小型のディーゼルエンジン発電機を1台だけ搭載するようにして、架線電源対応に必要な機器やバッテリー装置の搭載スペースを確保することも、一つのアイデアとして検討している。

7. あとがき

ここでは、開発中のT-HDB 800の、主要電気品の特長や開発状況を主に報告した。今後は、開発の中心が欧州地域に移っていくが、引き続き30%以上の燃費低減を目指していく。

また、顧客からの更なる燃費低減の要請に応えるために、今回開発した電気品は、架線からの電源供給にも最小限の改造で対応できるようにしてきた。当社は、早期にトリプルハイブリッド機関車を実現するための技術開発を継続し、環境負荷の低減に貢献していく。

文 献

- (1) 加藤 仁, 山田真広. ハイブリッド機関車の開発における東芝の取組み. 東芝レビュー. 2013, **68**, 4, p.31-34.
- (2) 門岡昇平. 省エネ性能を追求した鉄道車両用主回路システム. 東芝レビュー. 2016, **71**, 4, p.8-11. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2016/04/71_04pdf/a03.pdf>. (参照2021-04-02).
- (3) 黒田和人, ほか. RAMS規格の安全度水準SIL 4に適合したSCiB™蓄電池システム. 東芝レビュー. 2018, **73**, 5, p.86-89. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2018/05/73_05pdf/f06.pdf>. (参照2021-04-02).



木下 裕安 KINOSHITA Hiroyasu
東芝インフラシステムズ(株)
鉄道システム事業部 海外鉄道システム技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.



小川 幸太郎 OGAWA Kotaro
東芝インフラシステムズ(株)
鉄道システム事業部 海外鉄道システム技術部
Toshiba Infrastructure Systems & Solutions Corp.