

鉄道輸送を支える海外向け大容量電気機関車システム

High-Power Locomotive Systems Supporting Overseas Railway Transportation

平原 明 金井 利喜 八田 衛明

■ HIRAHARA Akira ■ KANAI Toshinobu ■ HATTA Moriaki

世界的な環境意識の高まりに伴い、近年鉄道輸送への期待が高まっており、海外では重量貨物車の長大編成をけん引するため大容量の電気機関車を運用する例も多い。また鉄道輸送の使命として安全性、高信頼性、高効率性が求められる。

東芝は、大容量電気機関車を実現するため、主変換装置の冷却用に吸熱効果の高い強制循環水冷方式を確立するとともに、標準軌1,435 mmだけでなく、狭軌1,067 mmにも対応する大容量の主電動機を開発した。そのほか、高機能かつ高信頼性の機関車制御システムを実現し、海外、特に中国や南アフリカ共和国に電気機関車システムを供給している。

The recent enhancement of awareness regarding the importance of global warming prevention has led to growing demand for railway transportation. In overseas markets, electric locomotives with high output power are commonly used to pull long, heavy-haul freight trains. These electric locomotives supporting railway transportation must provide not only high power but also high safety, high reliability, and high efficiency.

To realize electric locomotives with higher output power, Toshiba has developed both a forced-circulation type water cooling system with high heat absorption for power conversion units and a high-output-power traction motor for not only 1,435 standard-gauge railways but also 1,067 narrow-gauge railways. We have also developed a train control and monitoring system (TCMS) with high performance and high reliability.

We have delivered these high-output-power electric locomotive systems to China and South Africa.

1 まえがき

世界的な環境意識の高まりに伴い、近年鉄道輸送への期待が高まっている。電気機関車は使用目的や路線に応じて、出力容量や電気システム、軸配置が異なる。日本国内では軸重が17 t以下の電気機関車を使用しているが、海外では重量貨物車の長大編成をけん引するため、軸重20～30 tクラスの大容量の電気機関車を運用する例も多い。鉄道輸送を支えるこれらの電気機関車には大容量出力だけでなく、安全性、高信頼性、高効率性が求められる。

東芝は、日本国内向け及び海外向けに、それぞれ最適な電気機関車を供給してきた⁽¹⁾。ここでは特に、海外向けの大容量電気機関車システムについて述べる。具体的には、中国鉄道部に納入した出力7,200 kWのHX_D3形交流電気機関車と、南アフリカ共和国国営鉄道から受注した出力3,000 kWの19E形交直両用電気機関車及び出力4,500 kWの15E形交流電気機関車について述べる。

2 中国鉄道部納入 HX_D3形 交流電気機関車システム

2.1 概要

中国では、高度経済成長が続き貨物輸送の需要も高い伸び率を示してきたことから、貨物輸送能力の大幅な増強が行われている。それに伴い当社は、2004年から4両の完成機関



図1. HXD₃形 交流電気機関車 — 機関車踏面出力7,200 kWの大容量機関車である。

Class HXD₃ AC electric locomotive

車、12両の現地組立て機関車、44両分の現地国産化機関車用電気品、及び580両分の電気品用の部材を受注し、納入してきた。既に600両を超えるHX_D3形機関車が主要幹線での営業運転に投入されている。

2.2 機関車の仕様

機関車の外観を図1に、主な仕様を以下に示す。

- | | |
|-------------------------|------------------|
| (1) 架線電圧 | 交流 25 kV, 50 Hz |
| (2) 軌間 | 1,435 mm |
| (3) 軸配置 ^(注1) | Co-Co |
| (4) 軸重 ^(注2) | 23 t及び25 tの変換が可能 |
| (5) 最高速度 | 120 km/h |
| (6) 主電動機総出力 | 1,250 kW × 6 |

- (7) 起動けん引力 520 kN (軸重 23 t時)
570 kN (軸重 25 t時)
- (8) 環境温度 -40 ~ +40 °C

2.3 主回路システム

主変圧器2次巻線、コンバータ、インバータ、及び主電動機を一つの駆動単位とした6群構成としている。

電力は、パンタグラフからVCB (真空遮断器) を経由して主変圧器に供給される。主変圧器の2次側は6巻線で構成されており、それぞれが主変換装置のPWM (パルス幅変調) コンバータに接続されている。主変圧器2次巻線の単相交流電力はコンバータで直流電力に変換され、更に後段のインバータに供給される。インバータはVVVF (可変電圧可変周波数) 制御で三相交流電力を生成して主電動機を駆動する。一つの駆動単位はそれぞれ個別に制御され、単機運用を前提とした冗長性の高いシステムである。

2.4 補助回路システム

主変圧器の3次巻線からの交流電力をPWMコンバータで直流電力に変換し、更にインバータで三相交流電力に変換して負荷に供給している。

補助電源装置は1両の機関車に2セット搭載されており、それぞれVVVF制御とCVCF (定電圧定周波数) 制御の両方の機能と全負荷に供給可能な出力容量を持つ。通常時は、一方をVVVF運転して出力容量の大きな冷却用電動送風機の駆動用とし、起動時の安定化と、停車時の周波数半減による低騒音・省電力化を図っている。また他方をCVCF制御としてそのほかの補助負荷に電力を供給している。一方の補助電源装置が故障した場合は、もう一方の健全なセットをVVVF起動、CVCF運転して全負荷に電力供給することができるようにして冗長性を確保している。

2.5 主変換装置

主変換装置の主な仕様を以下に示す。3群の主回路用コンバータ及びインバータと補助電源装置を一つの主変換装置に収納している。

- (1) 制御容量 1装置当たり1,250 kW主電動機×3台
- (2) けん引用変換機 PWMコンバータ・インバータ
- (3) 制御方式 各軸個別ベクトル制御方式
- (4) 半導体素子 4,500 V, 900 A IEGT (注入促進型絶縁ゲートトランジスタ)⁽²⁾
- (5) 補助電源 230 kVA, 三相, 380 V, 50 Hz

(注1) 機関車の動軸 (主電動機が付いている車軸) の配置のことをいう。A, B, Cは動軸の数を表し、Aは1軸、Bは2軸、Cは3軸である。
・Co-Co: 機関車1両に台車が2台あり、各々の台車には動軸が3軸ずつある。
・Bo-Bo: 機関車1両に台車が2台あり、各々の台車には動軸が2軸ずつある。

(注2) 機関車の車軸1軸が支える機関車の質量。大きいほど大きなけん引力が得られるが、軌道設備の強度との兼ね合いで制約を受ける。機関車の重要な仕様の一つである。

- (6) 冷却方式
- (a) 主回路用コンバータ・インバータ 循環水冷方式
- (b) 補助電源用コンバータ・インバータ 強制風冷方式
- 主変換装置のIEGT素子の冷媒には-40 °Cの環境温度に対応するため水系不凍液を採用している。

2.6 主電動機

主電動機の主な仕様を以下に示し、外観を図2に示す。

- (1) 電動機種別 4極かご型三相誘導電動機
- (2) 連続定格 1,250 kW, 1,360 min⁻¹
- (3) 冷却方式 強制風冷方式

主電動機は、小型軽量化を図るためフレームレス構造を採用した。冷却方式は強制風冷方式で、温度こう配を低減するため入気側の空気を高温となる排気側へバイパスする構造としている。



図2. HX₀3形用主電動機 SEA-107 — かご型三相誘導電動機で、フレームレス構造を採用し、冷却は強制風冷方式である。

Traction motor for HX₀3

2.7 TCMS

TCMS (Train Control and Monitoring System: 車両制御情報システム) は、指令伝送とシーケンス制御により機関車全体の制御を行う。最大4重連^(注3)までの総括制御を前提としている。

3 南アフリカ共和国国営鉄道納入 19E形 交直両用電気機関車システム⁽³⁾

3.1 概要

世界的な鉱物資源の需要の増大に伴い、資源国の南アフリカ共和国では、鉱物資源の増産が計画され鉱物資源の輸送力増強が国家的な要請となっている。

当社は、石炭輸送用途の19E形交直両用電気機関車に搭載する電気機器110両分を受注した。車体製造は同国のThe UCW Partnershipが担当し、機関車システムの取りまめは当社が担当している。19E形は現在試験運転中である。

3.2 機関車の仕様

機関車の主な仕様を以下に示し、外観を図3に示す。

(注3) 機関車の連結運用のこと。



図3. 19E形 交直両用電気機関車 — 交流 25 kV 及び直流 3 kV の2種類の架線電圧に対応している。

Class 19E dual-voltage electric locomotive

- | | |
|-------------|---------------------------|
| (1) 架線電圧 | 交流 25 kV, 50 Hz / 直流 3 kV |
| (2) 軌間 | 1,067 mm |
| (3) 軸配置 | Bo-Bo |
| (4) 軸重 | 25 t |
| (5) 最高速度 | 120 km/h |
| (6) 主電動機総出力 | 750 kW × 4 |
| (7) 起動けん引力 | 392 kN |
| (8) 環境温度 | -10 ~ +45 °C |

3.3 主回路システム

主変圧器2次巻線、コンバータ、インバータ、及び主電動機2台を一つの駆動単位とした2群構成としている。コンバータとインバータは、補助電源装置とともに主変換装置に収められている。

直流区間では、パンタグラフで集電された直流電力は、交直切換器及びHSCB（高速度遮断器）を介して主変換装置内のインバータへ供給される。

交流区間では、パンタグラフで集電された電力は、VCBを介して主変圧器に供給され主変圧器で降圧されて、更にコンバータで直流電力に変換されてインバータへ供給される。

直流区間、交流区間とも、インバータに供給された直流電力は、VVVF制御で三相交流に変換され主電動機を駆動する。

3.4 補助回路システム

主変換装置の直流リンクから補助電源用のインバータへ直流電力が供給され、補助電源用インバータで三相交流電力に変換されて負荷に供給される。

補助電源装置は2セット搭載されており、1セットが車両すべての負荷に供給可能な出力容量を持ち、CVCF制御で運転される。通常時は1セットだけ運転し、他方は待機している。運転中の1セットが故障した場合は待機中の補助電源に切り替えて運転を継続する。このようにして高い冗長度を持たせ、機関車システムとしての信頼性を高めている。

3.5 主変換装置

主変換装置の主な仕様を以下に示す。

- | | |
|-------------|--|
| (1) 制御容量 | 1装置当たり750 kW主電動機×2台 |
| (2) けん引用変換機 | PWMコンバータ・インバータ |
| (3) 制御方式 | 台車別ベクトル制御方式 |
| (4) 半導体素子 | 6,500 V, 600 A IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ） |
| (5) 補助電源 | 250 kVA, 主変換装置に内蔵 |
| (6) 冷却方式 | 循環水冷方式 |

3.6 主電動機

主電動機の主な仕様を以下に示す。

- | | |
|-----------|-------------------------------|
| (1) 電動機種別 | 6極かご型三相誘導電動機 |
| (2) 連続定格 | 750 kW, 980 min ⁻¹ |
| (3) 冷却方式 | 強制風冷方式 |

主電動機は、当社が南アフリカ共和国国営鉄道に既に納入している10E形及び10E2形機関車の高信頼性を踏襲し、狭軌でありながら大トルク及び高出力の誘導電動機を実現した。

登りこう配での低速バランス運転や高地での冷却性能低下などの厳しい条件を考慮し、ステータコイルの耐熱クラスを200として十分な耐熱性を確保し、更に損失低減化と内部冷却構造の最適化を行った。

3.7 TCMS

TCMSは、HSCBやVCBほか各機器の制御、及び駆動制御装置への指令の伝達など機関車制御の中核である。高い安全性と信頼性を要求されるため、ハードウェアは冗長性を持たせた待機二重系の構成としている。

同一編成内の連結された機関車どうしの通信では、国内外で実績のある高速伝送方式TEBus (Train Ethernet Bus)⁽⁴⁾を採用した。また伝送システムも二重化し信頼性を高めている。

4 南アフリカ共和国国営鉄道納入 15E形 交流電気機関車システム

4.1 概要

南アフリカ共和国では、石炭と同様に鉄鉱石の増産が計画され、その輸送力増強も急がれている。当社は、鉄鉱石輸送用途の15E形交流電気機関車に搭載する電気機器44両分を受注した。19E形と同様に車体製造は同国のThe UCW Partnershipが担当し、機関車システムの取りまとは当社が担当している。既に、電気機器の出荷を開始し、現在、機関車を製造中である。

4.2 機関車の仕様

機関車の主な仕様を以下に示す。

- | | |
|----------|-----------------|
| (1) 架線電圧 | 交流 50 kV, 50 Hz |
| (2) 軌間 | 1,067 mm |
| (3) 軸配置 | Co-Co |
| (4) 軸重 | 30 t |
| (5) 最高速度 | 90 km/h |

- (6) 主電動機総出力 750 kW × 6
- (7) 起動けん引力 588 kN
- (8) 環境温度 -10 ~ +45 °C

4.3 主回路システム

主変圧器2次巻線、コンバータ、インバータ、及び主電動機1台を一つの駆動単位とした6群構成としている。

中国向けHX_D3形機関車システムと同様に、一つの駆動単位はそれぞれ個別に制御され、単機運用を前提とした冗長性の高いシステムである。

4.4 補助回路システム

主変換装置内の1群のコンバータとインバータの直流リンクから補助電源用のインバータへ直流電力が供給され、補助電源用インバータが三相交流電力に変換して負荷に供給している。

補助電源装置は、1両の機関車に2セット搭載されており、19E形と同様の構成及び運用により冗長性を持たせ、高い信頼性を確保している。

4.5 主変換装置

3群のコンバータ及びインバータ補助電源用インバータを一つの主変換装置に収納している。主変換装置の主な仕様を以下に示し、外観を図4に示す。

- (1) 制御容量 1台当たり750 kW主電動機×3台
- (2) けん引用変換機 PWMコンバータ・インバータ
- (3) 制御方式 各軸個別ベクトル制御方式
- (4) 半導体素子 4,500 V, 900 A IGBT
- (5) 補助電源 300 kVA, 主変換装置に内蔵
- (6) 冷却方式 循環水冷方式

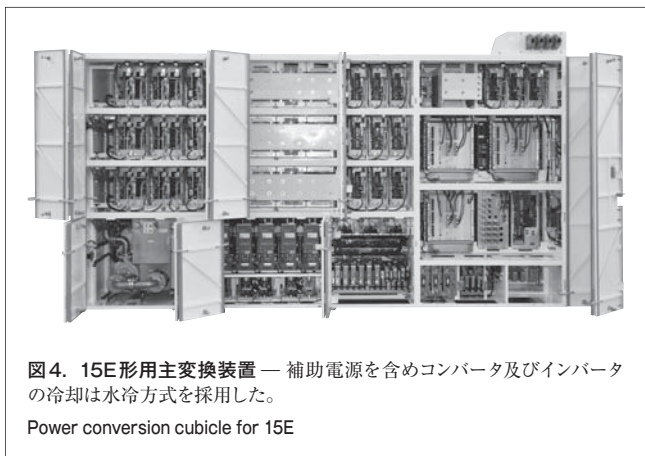


図4. 15E形用主変換装置 — 補助電源を含めコンバータ及びインバータの冷却は水冷方式を採用した。

Power conversion cubicle for 15E

4.6 主電動機

主電動機の主な仕様を以下に示す。

- (1) 電動機種別 6極かご型三相誘導電動機
- (2) 連続定格 750 kW, 980 min⁻¹
- (3) 冷却方式 強制風冷方式

主電動機は、19E形用の主電動機をベースとし更に内部冷却構造の最適化を行った。

4.7 TCMS

19E形のTCMSをベースとして、6軸Co-Coの各軸個別制御方式に対応させた。また、長大編成の先頭だけでなく、中間部や後尾に機関車を連結して運用する際、先頭機関車からそれらの機関車を無線システムを介して遠隔制御できるようにしている。更に、既存のディーゼル機関車を連結した場合も、先頭機関車からの総括制御を可能にしている。

5 あとがき

海外では大容量機関車の需要も多く、ここでは当社の大容量機関車システムとして、中国鉄道部納入 HX_D3形、南アフリカ共和国国営鉄道納入 19E形及び15E形を述べた。

大容量機関車を実現するためには主変換装置の効率的な冷却が不可欠であり、当社は吸熱効果の高い強制循環水冷方式を確立した。また、標準軌だけでなく狭軌に対応する大容量の主電動機も開発した。

また、補助電源システムには冗長性を持たせ、TCMSも二重化構成とするとともに、伝送方式には高速伝送可能なTEBusを採用することで、高機能かつ高信頼性の機関車制御システムを実現した。

今後も新しい技術を盛り込んだ機関車システムを開発し、更に大容量の機関車システムを実現するなど、鉄道輸送のニーズに応え続けたい。

文 献

- (1) 山本城二, ほか. 近代的な物流を支える機関車及び貨物電車システム. 東芝レビュー. 61, 9, 2006, p.15-19.
- (2) 中沢洋介, ほか. IEGT適用による鉄道車両用主変換装置の小型・軽量・高効率化. 東芝レビュー. 63, 11, 2008, p.15-20.
- (3) 平原 明, ほか. 南アフリカ共和国 石炭線の電気機関車用電気機器及び装置. 東芝レビュー. 63, 9, 2008, p.42-45.
- (4) 鎌田恵一. 鉄道車両用次世代伝送技術の国際規格化. 東芝レビュー. 64, 2, 2009, p.43-46.



平原 明 HIRAHARA Akira

電力流通・産業システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部主務。海外鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会, 情報処理学会会員。
Transportation Systems Div.



金井 利喜 KANAI Toshinobu

電力流通・産業システム社 交通システム事業部 交通車両システム技術部主務。海外鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会, 応用物理学会会員。
Transportation Systems Div.



八田 衛明 HATTA Moriaki

電力流通・産業システム社 交通システム事業部参事。海外鉄道車両システムのマネジメント及びエンジニアリング業務に従事。
Transportation Systems Div.