

E235系の主回路システムの紹介

Description of propulsion system for series E235



加藤 洋子*



柴田 健*



横山 啓之*

Propulsion system for brand-new commuter EMU series E235 includes several advanced technologies, such as SiC power semiconductor, totally enclosed type traction motors and motor efficiency optimized control. Series E235 can reduce energy consumption and maintenance work costs, also provide higher operation stability. This paper describes the details of new propulsion system.

●キーワード：SiC 半導体素子、全閉型誘導電動機

1. はじめに

E235系量産先行車は、E231系、E233系に続く、次世代の新型通勤車両として製作されたものであり、これまでの研究開発成果を取り入れることにより、下記のコンセプトを実現している。

- ①お客さまサービスの向上
 - ・優先席の増設
 - ・車いすやベビーカーをご利用のお客さまに、より安心してご利用いただくための「フリースペース」を各車両に整備
 - ・車内情報提供装置の増設およびトレインネット環境を整備
- ②環境性能の向上
 - ・VVVFインバータ装置に次世代半導体素子 (SiC: シリコンカーバイド) を採用し、車両の消費電力をさらに抑制
- ③さらなる安全性・安定性の向上
 - ・車体強度の向上、改良型戸閉装置の採用。
 - ・車内、車外間の情報ネットワークを強化し、常に機器類の状態監視を実施

E235系の外観を図1に、仕様を表1に示す。

主回路システムとしては、上記に加え、独立M車方式の採用による編成構成の自由度の向上、全閉型誘導電動機の採用によるメンテナンス負荷の低減、よりエネルギー効率の良い条件で主電動機を動作させるため稼働主電動機数を制御する機能の採用など新機軸の導入を行っている。次項以降で、E235系主回路システムの各特長を中心に紹介する。



図1 E235系量産先行車外観

表1 E235系量産先行車仕様

項目	仕様
編成構成	11両編成 (6M5T)
最高速度	120km/h
車体	ステンレス製
制御方式	VVVFインバータ制御、回生ブレーキ
ユニット構成	独立M車方式 (1両に1台の制御装置)
主電動機	全閉外扇形誘導電動機 (熱交換で冷却)
主制御器	フルまたはハイブリッドSiC半導体素子 (VVVF)・1C4M制御
補助電源装置	二重系静止型インバータ装置 (片系が故障しても動作可能)
コンプレッサ	オイルフリーレシプロ式
列車情報管理装置	INTEROS (列車内通信速度従来TIMSの約10倍)
戸閉装置	改良型電気式 (ラック式)
照明装置	LED
情報提供装置	情報提供装置増設 (デジタルサイネージ)、トレインネット
車両状態監視機能	あり
地上設備状態監視機能	あり

2. 独立M車方式

E235系量産先行車では独立M車方式を採用している。これは、従来の2両ユニット方式では図2のように1台のVVVFインバータ装置を2群構成とし、各群で1両分4個ずつ、併せて2両分8個の主電動機を制御していたことに対し、図3のように全電動車にVVVFインバータ装置を搭載し、1台のVVVFインバータ装置で自車1両分4個の主電動機を制御する方式である。この方式の採用により、編成内の電動車の両数を奇数とすることが可能となり、投入線区の線路条件や走行条件に応じて、柔軟な編成構成を選択することができる。

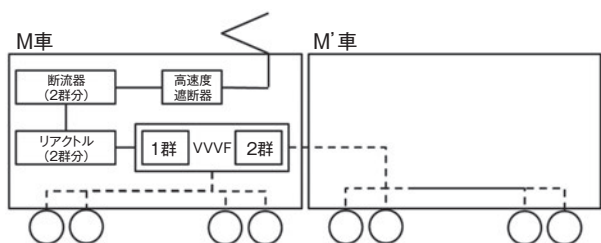


図2 従来の2両ユニット方式

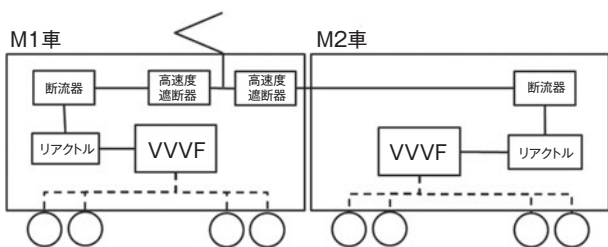


図3 E235系の独立M車方式

3. SiC 半導体素子を採用した VVVF インバータ装置

E235系量産先行車では、2レベルVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ方式を採用し、メーカーの異なる2種類のVVVFインバータ装置 (SC104形とSC105形) を搭載している。SC104、SC105形VVVFインバータ装置の外観を図4、5に示す。



図4 SC104形VVVFインバータ装置



図5 SC105形VVVFインバータ装置

これまで、電鉄向けパワー半導体として、スイッチング部にはSi (シリコン)-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、ダイオード部にはSi-Diodeが採用されてきたが、近年SiCを用いたパワー半導体が開発・製造されてきている。SiCはSiに比べ、高い絶縁破壊電界強度 (Siの約10倍) を有しているため、同じ素子耐圧でもSiに比べ素子の耐圧層を薄くすることができる。この結果、スイッチング部にSi-IGBTに代わってSiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を、ダイオード部にSiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を適用するフルSiC素子では、Si素子に比べ高速スイッチングと大幅な損失の低減が可能である。なお、スイッチング部にSi-IGBT、ダイオード部にSiC-SBDを適用するハイブリッドSiCにおいても、SiC-SBDによりリカバリ損失の低減が可能となる他、リカバリ電流の低減により、Si-IGBT自体も一部損失 (ターンオン損失) の低減が可能となる。それぞれの素子の構成を図6に示す。

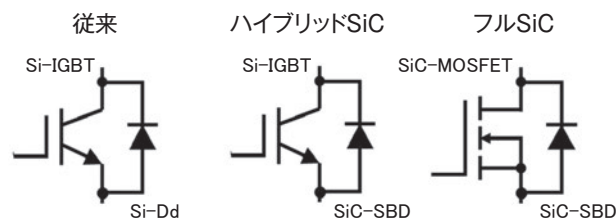


図6 SiC半導体素子

E235系量産先行車では、JR東日本の営業車両として初めてSiC半導体素子を採用し、SC104形はフルSiC素子、SC105形ではハイブリッドSiC素子を使用している。両形式とも素子定格は3300V、1500Aである。

SiC素子を適用することにより、E235系VVVFインバータ装置では以下の実現が可能となった。

(1) 消費電力の削減

従来のSi素子を使用するVVVFインバータ装置では、素子のスイッチング周波数、および装置冷却性能と半導体素子損失の制約から、高速域では1パルスPWMモードへ切替を行うため、主電動機電流の波形が歪み、主電動機の高調波損失が大きくなっていた。一方、SiC素子は素子の損

失低減によりスイッチング周波数を向上できることから、全速度域多パルスのPWM出力が可能となる。その結果、モータ電流の歪みが小さくなり、モータの高調波損失を低減することができる。また、素子の発熱制約が軽減されるため、図7のように定トルク領域を拡大し中速域以上での回生ブレーキ特性を向上させることができる¹⁾。これらにより、回生エネルギーを増加させ、消費エネルギー削減を実現できる。

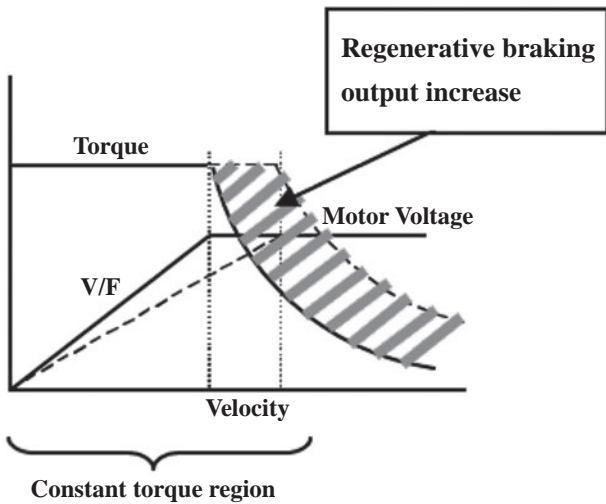


図7 定トルク領域拡大による回生ブレーキ特性¹⁾

E235系では回生ブレーキ特性の向上により、山手線で運用中のE231系500代と比較して、編成当たり約3%の省エネ効果を試算している。E235系はE231系と比較すると編成重量が約15%増加しているため、単位重量あたりの省エネ効果としては約16%となる。

また、E235系においては、パンタグラフの最大電流の制限により、入力電流の上限が制限されるため、回生ブレーキ特性の向上が制約されている。今後、さらに回生ブレーキ特性を向上し、省エネルギーを進めるためには、入力電流の上限を向上させるべく、上流の機器（パンタグラフやフィルタリアクトル等）の最大電流向上等も検討する必要がある。

(2) 小型軽量化

SiC素子の低損失特性により、半導体冷却フィンを小型化することができ、従来車両と比較し、機器の小型化が実現した。E233系VVVFインバータ装置の1群分と比較すると約20%の小型化となっている。

(3) 信頼性向上

SiC素子の適用により、温度マージンが拡大し、信頼性向上が図れる。

4. 全閉型誘導電動機

車両駆動用電動機として、JR東日本の営業車両として初めてとなる全閉外扇型誘導電動機を採用した。E235系の主電動機MT79形の外観を図8、仕様を表2に示す。要目を最適化することにより、高効率化を図っており、効率94.5%となっている。



図8 MT79形主電動機

表2 MT79形誘導電動機仕様

項目	定格(1時間)
出力(kW)	140
線間電圧(V)	1050
相電流(A)	108
定格回転速度(min ⁻¹)	2380
周波数(Hz)	80
効率(%)	94.5
力率(%)	75.5
すべり(%)	0.7

従来車両で使用している開放型誘導電動機は、外気を内部に取り込んで固定子、回転子の冷却を行うため、外気取り入れ口にフィルターが設置されており、定期的なフィルター交換が必要であった。また、外気とともに周囲の塵埃も吸い込んでしまうため、定期検査の際には、電動機を分解し、内部の清掃を行う必要があった。

図9に示すように、外気は主電動機の負荷側、反負荷側から吸気され、各軸受を冷却した後、内部に取り込むことなく、仕切円盤を介しての熱交換により主電動機内部を冷却し排気される。このため、フィルターは不要となり、定期的な内部の清掃も不要となる。また、仕切円盤により発熱部と軸受部を断熱することにより軸受部の温度上昇を抑える構造となっている。

軸受交換時には、回転子を抜き出すことなく、軸受の交換が可能な構造となっているため、定期検査時の回転子の分解が不要となりメンテナンス負荷の低減が実現できる。

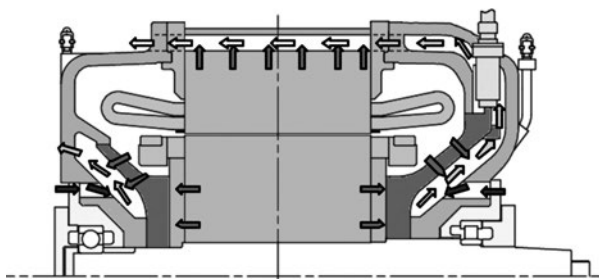


図9 全閉型誘導電動機の冷却方式

5. M車選択運転機能

車両駆動用電動機はその使用用途により、周波数、トルクを一定範囲の中で変化させながら使用される。そのため、効率も一定ではなく使用条件により変動することとなる。E235系量産先行車では主電動機をより効率の良い条件で使用できるように、速度条件や必要トルクにより、動作させる主電動機数を制御する「M車選択運転機能」を導入した。本機能は、当社の研究開発センターにおいてMUE-Trainで研究・開発を行ってきたものである。具体的な動作としては、低トルクで主電動機効率が低下した状態で運転している場合に、稼働M車数を減少させ、主電動機1台あたりの負担トルクを増加させることで、主電動機を効率の高い条件で駆動し、消費電力の低減を図る制御となる。この制御は力行時および定速力行時に適用される。

本機能を実現するために、E235系量産先行車では、従来VVVF制御装置で行っていたトルク演算機能を列車情報管理装置（INTEROS）に移管している。これにより、VVVF制御装置がノッチ指令を受けて自車分のトルク演算を行うのではなく、INTEROSが各車のトルク演算を行い、VVVF制御装置に引張り指令値を出力している。INTEROSは「M車選択運転」の条件が成立しているか否かの判断を行い、条件が成立している場合には、休止M車には休止指令を、稼働M車には図10のように休止M車負担分を増加させた引張り指令値を送信する。

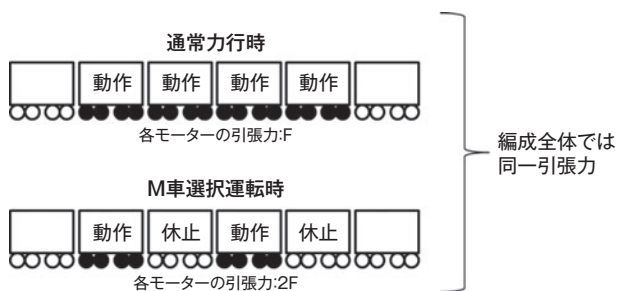


図10 M車選択運転の概要

「M車選択運転機能」による省エネ効果は、線区条件や走行条件により変動するため、量産先行車において、線区条件による導入効果を確認し、今後の導入を検討していく予定である。

6. おわりに

本稿では山手線新型車両E235系量産先行車の主回路システムに取り入れた新機軸を中心にその概要を紹介した。本車両については現在、各種走行試験を実施中であり、2015年秋頃に営業に投入する予定である。今後の本線走行試験等で今回導入した新技術の効果の検証を行い、更なる安全、安定性向上、省エネの推進に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 白木、近藤、「誘導電動機の出力密度最大化法の検討」、平成25年度電気学会全国大会、5-118,2013-3