

# 鉄道車両駆動用電力変換装置と主電動機制御の技術の変遷と 今後の動向に関する調査

千葉大学大学院 工学研究科 人工システム科学専攻 電気電子系コース 准教授  
近藤圭一郎

## 1. 調査研究の背景と目的

インバータによる交流電動機駆動技術が本格的に適用されて以来、パワー半導体デバイスの性能は制御性、耐圧、損失の面で大きく向上し、鉄道車両駆動用主回路の小型軽量化および高効率化が行なわれた。また、同時期にエレクトロニクス技術も発展し、マイコンや DSP 等の高性能化が図られ、鉄道車両駆動分野にもベクトル制御のような高精度なトルク制御技術が導入された。その結果、前記のパワーエレクトロニクス技術の進歩と相俟って、空転再粘着制御や軽負荷回生ブレーキ制御等の高性能化が図られ、乗り心地の向上や省エネルギー化等が進んだ。さらに、希土類永久磁石の登場により、小型軽量・高効率な永久磁石同期電動機も登場している。

本報告では、これまでの鉄道車両駆動用電力変換装置と主電動機制御の技術の発展の歴史を振り返り、パワー半導体デバイスの発展が、鉄道車両駆動分野におけるパワーエレクトロニクス技術の発展を牽引してきたことを示す。またこれらの経緯を踏まえ、将来のパワー半導体デバイスとして期待が集まるシリコンカーバイド (SiC) を用いたパワー半導体デバイスが、鉄道車両駆動用電力変換装置と主電動機制御の技術にどのような影響をもたらすかを調査した。

## 2. 鉄道車両駆動用電力変換装置と主電動機制御方式の変遷とその技術的本質

図 1 に我が国における車両駆動用電力変換回路の変遷を示す。1980 年代半ばから、サイリスタに自己消弧機能を付加した Gate Turn off Thyristor (GTO) の大容量化が進み、直流 1.5kV 用のインバータへの適用が始まった。GTO インバータは、大容量化（1 インバータで 4 個以上の誘導電動機を駆動）しても十分床下搭載が可能であることから、通勤電車から高速鉄道まで我が国の動力分散車両への適用が進んだ。しかし、GTO インバータでも、スイッチング周波数向上や、装置の小形化など、改良の余地が残されていた。これらの点では、電界の作用によりスイッチングを行う MOSFET のようなゲート構造が適していた。しかし、MOSFET はユニポーラ素子であることから順電圧降下が大きく、導通損失のトレードオフから実用的な耐圧は 600V であった。そこで、GTO の低い導通損失と、MOSFET のスイッチングの速さを兼ね備えた Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) の適用が 90 年代の初め頃から始まった。当初は 1.7kV-400A の素子で、直流 1.5 k V 架線用電車の 1 インバータ 1 個モータ駆動方式のインバータが実用化された。その後、IGBT 素子の高耐圧化と大電流量化が進み、2000 年頃までには直流 1.5kV の通勤電車用等では 1 インバータ 4 個モータ駆動が標準的となった。IGBT インバータは高速スイッチングと電圧駆動による小型軽量のゲート回路により、GTO インバータに比べて、質量も寸法も数分の一に低減されている。2000 年頃以降、6.5kV 耐圧の IGBT も実用化され、直流 3.0kV 電化区間の発達した欧州の機関車では実用化が進んでいる。

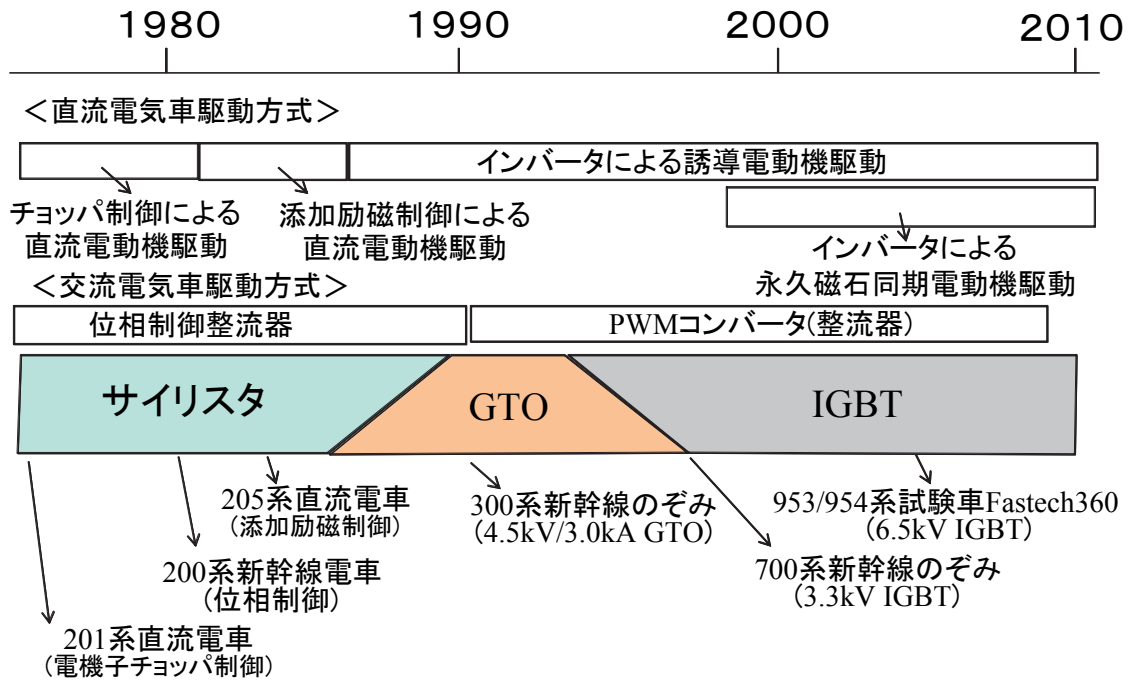


図1 車両駆動用電力変換回路方式の変遷<sup>(3)</sup>

### 3. 今後の技術動向

#### 3.1 SiC パワー半導体デバイスの現状

シリコン (Si) を用いたパワー半導体デバイスに代わり、バンドギャップの広いシリコンカーバイド (SiC) を用いたパワー半導体デバイスの開発が進められている。SiC デバイスは、Si デバイスに比べ、大幅な損失低減が期待されている。また、高温動作が可能であるという特長を有する。そのため、SiC デバイスを車両駆動用電力変換装置に用いることで、冷却装置の大幅な小型軽量化が期待できる。現在、日本で車両駆動用インバータへの SiC の応用動向としては、図2<sup>(1)</sup> に示すような、SiC ショットキーバリアダイオード (SBD) と従来通りのシリコン (Si) IGBT による、ハイブリッドモジュールを用いたインバータの試験が各社で行われている状況である<sup>(1),(2)</sup>。SBD は金属と N 型半導体を接合させた際のショットキーバリアによる整流作用を利用したダイオードである。シリコンによる N 型半導体と P 型半導体によって構成されたダイオードに比べ、ターン・オフ時に導通に関与していたキャリアである電子やホールが、それぞれ P 型半導体から N 型半導体へ、N 型半導体から P 型半導体へ戻る過程で生じるリカバリー電流が小さいという特徴がある。これは、SBD の導通に関与しているのは、N 型半導体中の少数キャリア (ホール) によるものであることから、導通に関与するホールが少ないことによる。しかし、通常の Si を用いた SBD では順バイアス時のもれ電流が大きく、逆耐圧もそれほど高くできないという課題があった。これに対し

て SiC を用いることで、前記の問題を解決し、高

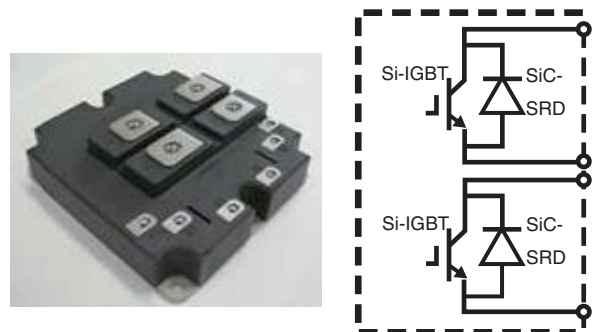


図2 1.7kV-1.2kA SiC ハイブリッドモジュール<sup>(1)</sup>

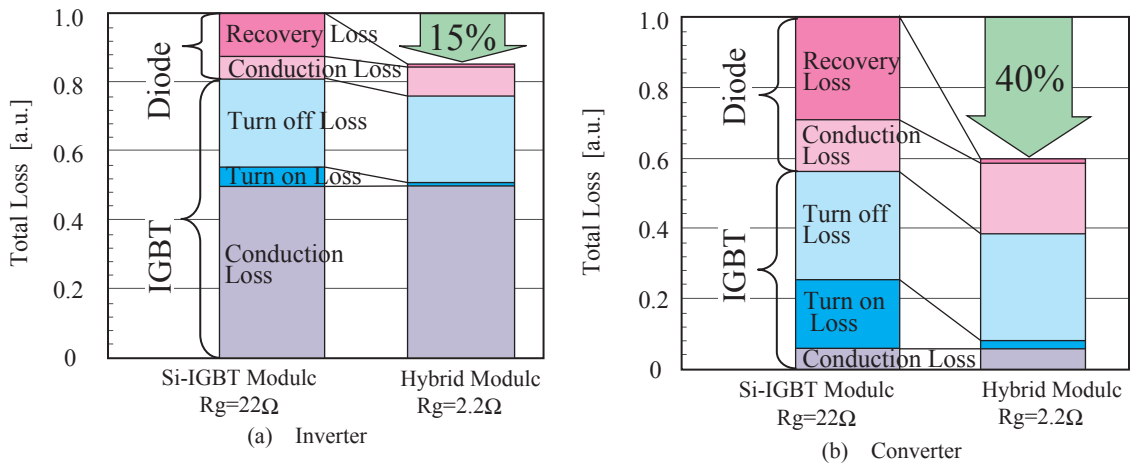


図3 Si-IGBT/SiC-SBD モジュールのインバータとコンバータでの損失測定結果比較<sup>(2)</sup>

耐圧でリカバリー電流の少ない、すなわち低損失なスイッチングが可能となる。

1.7kV-1.2kA 定格のハイブリッドモジュールを用いたインバータを、DC750V 電の地下鉄車両に搭載して行った実証試験結果が報告されている<sup>(3)</sup>。電圧が 750V であれば、1.7kV 耐圧の素子で 2 レベルインバータの構成が可能であることから、地下鉄車両が選ばれたものと考えられる。SiC-SBD を適用したことで損失低減され、スイッチング周波数の高い定トルク領域を高速側に拡大することが行われている。この結果、回生電力の向上を図られ、30%の省エネルギー効果が得られたと報告されている<sup>(1)</sup>。

3.3kV 耐圧のハイブリッドモジュールで 180kW のモータを駆動した報告もある<sup>(2)</sup>。図 3 の波形はその試験結果である。このモジュールを用いた試験では、図 3 に示すように、高周波スイッチングを行う非同期 PWM の時間が相対的に短いインバータへ適用した場合には 15%、連続的に非同期 PWM でスイッチング周波数 1kHz 程度のスイッチングを行う PWM 整流器の場合には 40%の損失低減効果がそれぞれ報告されている<sup>(2)</sup>。この効果は、ダイオードの逆回復損失と、IGBT のターン ON の損失が、全損失から見るとほとんど 0 になる効果によるものである。

### 3.2 SiC の適用効果が期待される新たな回路方式

交流電気車の場合には、変圧器や DC リンクコンデンサは電力変換を行う上で役割は重要ではあるが、付加的な機器である。そこで、これらの一部も電力変換回路の機能で代用し、主回路の小型軽量化、高効率化を目指した交流電気車用主回路の研究が行われている

#### (1) 中周波数変圧器回路方式。

ドイツ・スイス・オーストラリアのいわゆるドイツ語圏の鉄道は、歴史的に駆動用電動機に交流整流子電動機を用いていたため、電圧は 15kV-16.7Hz の単相交流である。そのため、この電化区間用車両の変圧器は、25kV-50Hz 電化区間用のものと比べると、鉄心断面積増加により大型・重量化が避けられない。そこで、変圧器を中周波数と呼ばれる 1 ~ 2kHz の周波数で動作させる主回路構成が提案されている<sup>(4)(5)</sup>。図 4 に提案されている回路構成を示す<sup>(5)</sup>。このような回路構成とすることで、変圧器の磁束量が減るため、鉄心の使用量が減少し、小型軽量化が図られるメリットが期待できる。

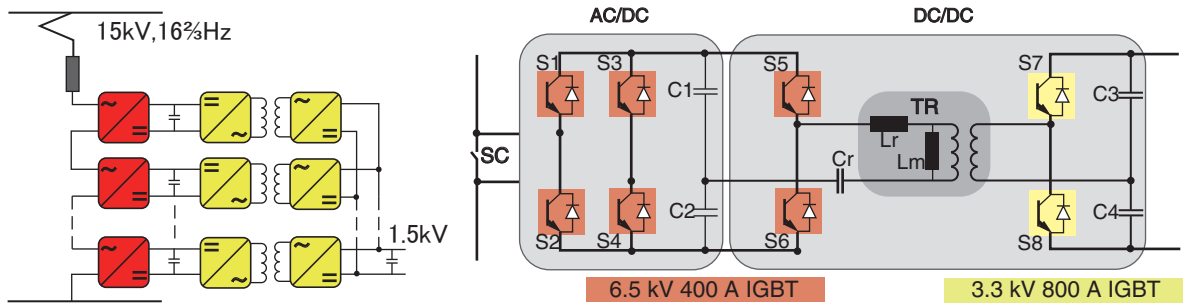


図4 中周波数変圧器回路方式の構成例<sup>(4)</sup>

一方で半導体スイッチ数増加による信頼性低下、コストアップ、および機器の大型化のデメリットもある。そのため、25kV-50/60Hz に比べて変圧器鉄心磁束が強い 15kV- 16.7Hz 区間用電車での採用に期待が寄せられている。25kV-50/60Hz 用の主回路の場合は、相対的にデメリットが大きくなる恐れがある。しかし、今後、SiC パワー半導体デバイスの普及等により、前記デメリットが相対的に小さくなる場合には、25kV-50/60Hz の我が国の新幹線車両などでも十分に適用の可能性が出てくると期待できる。

(2) マトリックスコンバータ

図5は単相-三相マトリックスコンバータ<sup>(6)</sup>を交流電気車駆動した場合のメリットをまとめたものである。大きなメリットは、導通素子数低減による低損失化と小型軽量化、および単相脈動補償コンデンサの小型軽量化である。高耐圧 SiC パワー半導体デバイスの登場により、導通損失・スイッチング損失のいずれも小さい素子によりマトリックスコンバータの実用化が促進されることが期待される。

期待するメリットと目標

主変換装置の小型軽量高効率化

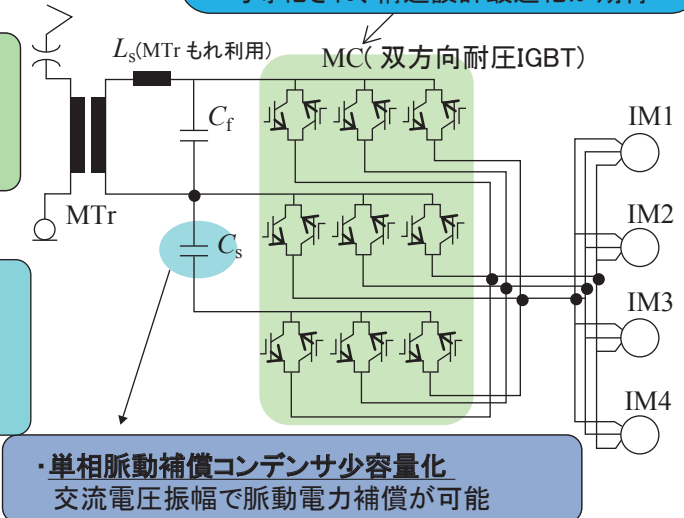
冷却設計最適化による小型軽量化

- ・導通素子数は常時3個となるので低損失化が期待
- ・素子配置と責務が均等であるため冷却設計最適化

脈動電力補償コンデンサの小型軽量化

- ・電圧型間接変換器では、コンデンサは直流バッファと脈動補償と両方担うため、10mF以上必要(DCリンク電圧5%で脈動吸収)
- ・MCでは交流振幅すべてで脈動吸収

- ・導通素子数低減(3個)  
電圧型ではCNV2個+INV3個が導通
- ・パワーユニット配置の適正化  
中間リンクによる構造制約なく、発熱も均等化され、構造設計最適化が期待



- ・単相脈動補償コンデンサ少容量化  
交流電圧振幅で脈動電力補償が可能

図5 単相 - 三相マトリックスコンバータの交流電気車駆動適用時のメリット

### (3) SiC パワー半導体デバイスの適用による新たな要素技術の普及

永久磁石同期電動機 (PMSM) は、誘導電動機 (IM) に比べて小型軽量・高効率であることから、電気自動車、エレベータ、家電製品の駆動用電動機として一般的になりつつある。鉄道車両駆動用永久磁石同期電動機の制御システムもいくつかが提案されている<sup>(3)(7)</sup>。複数の電動機で駆動される鉄道車両では、PMSM は電動機毎にインバータが必要なことからインバータの個数が増加し、コストや電力変換装置の質量寸法の面で、1 台のインバータで複数の電動機を駆動できる IM に比べ不利であった。

また、電池や電気二重層コンデンサを用いたハイブリッドディーゼル車の検討や営業運転が行われている<sup>(8)(9)</sup>。さらにはディーゼルエンジンに代わり、燃料電池と蓄電装置を組み合わせて燃料電池ハイブリッド車の検討も行われている<sup>(10)</sup>。これらの蓄電システムを搭載したハイブリッド車は、車両駆動用インバータに加え、ディーゼル発電機や燃料電池の出力制御用電力変換装置や、場合によっては蓄電装置の充放電用チョッパ装置などが必要であり、主回路機器が大型化する課題がある。

このような課題に対して、SiC パワー半導体デバイスを用いた電力変換回路を適用することで、機器の小型・軽量化が図られ、PMSM 駆動およびハイブリッド駆動システムの適用促進が期待できる。すなわち、この場合も、前述の例と同様、インバータの個数の増加に伴う課題を SiC パワー半導体デバイスが軽減することが期待できる。

## 4. まとめ

本報告では、これまでの鉄道車両駆動用電力変換装置と主電動機制御の技術の発展の歴史を振り返り、パワー半導体デバイスの発展が、鉄道車両駆動分野におけるパワーエレクトロニクス技術の発展を牽引してきたことを示した。それを通して、将来のパワー半導体デバイスとして期待が集まるシリコンカーバイド (SiC) を用いたパワー半導体デバイスが、鉄道車両駆動用電力変換装置と主電動機制御の技術にどのような影響をもたらすかを調査した。その結果、SiC の適用は、直接的には電力変換装置の小型軽量化や低損失化という形でメリットが生じるが、それに起因して電力変換回路や装置の個数が増加するアプリケーションでもメリットが期待できる。今後は新たな技術の適用促進が期待される。

## 参考文献

- (1) 山下 良範、草野 健一、小林 智宏、中嶋 幸夫、金子 健太、生方 伸幸、深澤 真吾、山野井 秀明 “SiC パワーモジュール適用鉄道車両用インバータインバータシステムの省エネルギー運転について,” 平成 24 年電気学会全国大会講演論文集 (CD-ROM)、No.5-078, pp.128-129, 2012.3
- (2) Katsumi Ishikawa, Kazutoshi Ogawa, Hidekatsu Onose, Norifumi Kameshiro, and Masahiro Nagasu “Traction Inverter that Applies Hybrid Module Using 3-kV SiC-SBDs”, Conference record of The 2010 International Power Electronics Conference, (IPEC 2010), (CD-ROM,) pp.3266 – 3270, 2010.6
- (3) 近藤 圭一郎、秦 広、結城 和明、長沼 克範、松岡 孝一、長谷部 寿郎、“軌間可変電車駆動用永久磁石同期電動機制御システムの開発,” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 125-D, No. 4,

pp.348-354, 2005.4

- (4) Drazen Dujic, Akos Mester, Toufann Chaudhuri, Antonio Coccial, Francisco Canales1, Juergen K. Steinke2 “Laboratory Scale Prototype of a Power Electronic Transformer for Traction Applications,” The 14th European Conf. on Power Electronics and Applications – EPE, Birmingham, England, 2011, CD-ROM, No.0023, 9pages, 2011.9
- (5) Chuanhong Zhao, Silvia Lewdeni-Schmid, Juergen K. Steinke, Michael Weiss, Toufann Chaudhuri, Marc Pellerin, Joseph Duron, Philippe Stefanutti “Design, Implementation and Performance of a Modular Power Electronic Transformer (PET) for Railway Application,” The 14th European Conf. on Power Electronics and Applications – EPE, Birmingham, England, 2011, CD-ROM, No.0214, 10 pages, 2011.9
- (6) 飯野 和幸、福間 徹、近藤 圭一郎、佐藤 之彦、“単相ノ三相マトリックスコンバータにおける仮想間接制御法の検討,” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 130-D, No. 6 pp.793-801, 2010.6
- (7) 近藤 圭一郎、米山 崇、谷口 峻、望月 伸亮、若尾 真治 “鉄道車両駆動用永久磁石同期電動機の回転角速度センサレス制御に関する考察 - シンプルかつ高性能な制御システム -,” 電気学会リニアドライブ・半導体電力変換合同研究会資料、LD-06-67, SPC-06-185, pp.1-7, 2006.12
- (8) 白木 直樹, 近藤 圭一郎、“ディーゼルエンジン-リチウムイオン電池ハイブリッド気動車のエンジン・電池容量設計法とその評価,” pp.178-184, 2012.2
- (9) H. Shibuya, K. Kondo, “Designing Methods of Capacitance and Control System for a Diesel Engine and EDLC Hybrid Powered Railway Traction System,” IEEE Transactions on, Vol.58, No.9, pp.4232-4240, 2011.9
- (10) 瀧澤 建治、近藤 圭一郎 “燃料電池・EDLC ハイブリッド鉄道車両の電源容量決定法” 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 132-D, No. 3, pp.133-139, 2011.2