

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

IEGT Devices to Realize Small, Lightweight, and High-Efficiency Power Converters for Rolling Stock

中沢 洋介 青山 育也 安岡 育雄

■ NAKAZAWA Yosuke ■ AOYAMA Ikuya ■ YASUOKA Ikuo

鉄道車両の駆動システムにVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ駆動の誘導電動機システムが適用されて以降、大電力パワーデバイスのスイッチング特性の進歩に合わせて、主変換装置の小型・軽量化開発が進められてきた。

東芝は、飽和電圧が低く、スイッチング特性に優れたIEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) を開発し、その特性を最大限に生かした高パワー密度で高効率の主変換装置を開発し実用化してきた。IEGTの適用により、機関車では世界トップレベルの高パワー密度化、新幹線では初めての走行風冷却方式の実現、通勤電車では200 kW 超容量の電動機4台を一括で駆動できるインバータの実現などを達成した。

Since the introduction of inverter-controlled induction motor drives to rolling stock drive systems, smaller and lighter main converters have been developed accompanying the advances made in the switching characteristics of power devices.

Toshiba has been developing injection enhanced gate transistors (IEGTs) with low loss characteristics for main converters with both high power density and high efficiency. We have released a variety of equipment applying these IEGTs, including main converters with world's top-level power density for locomotives, main converters for Shinkansen trains featuring a natural-ventilation cooling system for the first time, and inverters for commuter trains that make it possible to drive four motors of more than 200 kW capacity.

1 まえがき

鉄道車両の駆動システムにVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ駆動の誘導電動機システムが適用されて以降、キーデバイスである半導体スイッチング素子性能の飛躍的進歩とともに、主変換装置の小型・軽量化開発が進められてきた。実用化初期にはGTO (Gate Turn-off Thyristor) 用いられたが、MOS (Metal Oxide Semiconductor) ゲート駆動のIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が登場し、高耐圧・大容量化が進んだことにより、新幹線や機関車まで、新製車両のすべてに用いられるようになった。

更に東芝は、いっそうの低損失特性を持つIEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) を開発し、低損失特性を生かした特徴のある主変換装置を開発し実用化してきた⁽¹⁾。ここでは、機関車用及び電車用の主変換装置に関して、大電力パワーデバイス適用設計の考え方を述べる。

2 鉄道車両用 主変換装置の 大電力パワーデバイス技術

2.1 機種別適用状況

主変換装置で駆動する電動機の定格容量につき、直流リンク電圧をパラメータとして、機関車、新幹線、及び通勤電車の用途別に、これまでの適用範囲を図1に示す。また、機関車

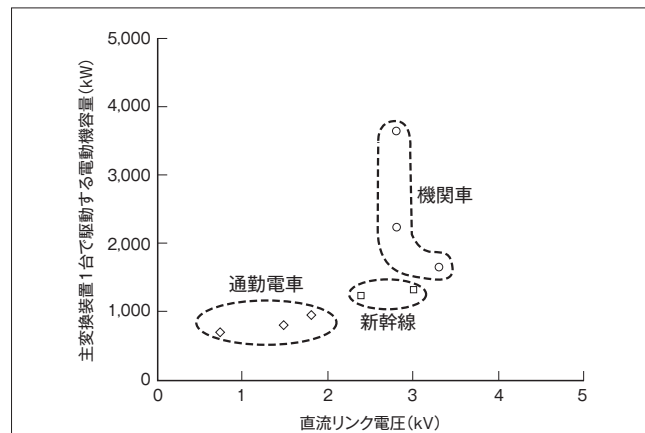


図1. 鉄道駆動システムと主変換装置容量 — 通勤電車、新幹線、機関車の鉄道駆動システムにより駆動主電動機の容量が異なる特徴がある。大容量主電動機を駆動するシステムほど、直流リンク電圧を増加して設計されてきた。
Relationship between DC link voltage and capacity of power converter

あるいは電車用として主変換装置が使われる条件 (架線電圧, 直流リンク電圧, 容量) に応じた、IEGT及びIGBTの適用マップを表1に示す。主変換装置容量の増減に対しては、適用IEGT, IGBTの並列接続数を調整することで対応し、標準化を図っている。

2.2 モジュール型と圧接型

IEGT のラインアップとしてモジュール型と圧接型がある。前者は冷却フィンとの絶縁が容易であり、後者は3 kA 級の大

表1. 主変換装置の標準化区分

Standardization of power converters and power devices

架線電圧			主変換装置容量 (kVA)	IGBT・IEGT 定格 (モジュール型)			
直流リンク電圧	用途	1.7 kV-1.2 kA IGBT		3.3 kV-1.2 kA IEGT	4.5 kV-0.9 kA IEGT	6.5 kV-0.6 kA IGBT	
DC750 V	EMU		○				
DC1.5 kV	EMU			○			
DC3 kV (4 kV Max)	EMU					○	
	EL	2,400					
AC20 kV	DC1.8 kV EMU	1,400		○			
	DC2.8 kV EL	4,500			○		
AC25 kV	DC3 kV EMU	1,750		○*			

DC: 直流 AC: 交流
 EMU (Electric Multiple Unit) : 新幹線, 通勤電車, 地下鉄 ほか
 EL (Electric Locomotive) : 電気機関車
 *: 正, 負, ゼロの三つの出力電圧が出せる3レベル変換器構成で実現

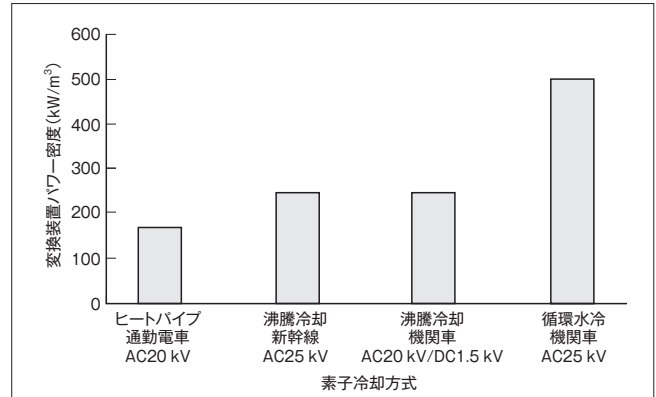


図3. 素子冷却方式と変換装置のパワー密度 — 小型化が特に要求される鉄道用主変換装置を評価する尺度として, パワー密度がある。大容量機関車に適用される循環水冷方式は, パワー密度向上に有効な冷却方式である。

Relationship between cooling system and power density

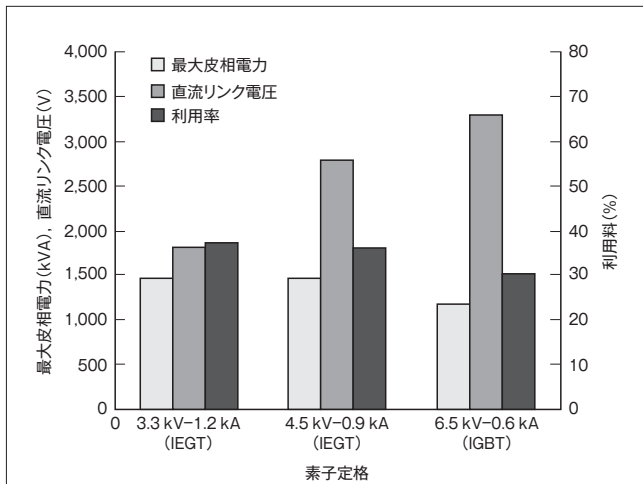


図2. 素子定格ごとの適用装置の最大電力 — IEGT (IGBT) 素子の電圧・電流定格を主変換装置設計に最大限利用できているかを示す尺度として利用率を定義した場合, 6.5 kV 素子よりも, 3.3 kV, 4.5 kV 素子の利用率が高くなっており, 鉄道応用として使いやすい定格素子である。

Comparison of power between power device ratings

電流化が可能である。鉄道車両用として3.3 / 4.5 kV 定格のパワーデバイス, 1 ~ 2 kA で十分であり, 冷媒として環境に優しい純水が使える前者の構造が主流になっている。同一パッケージサイズ (190 × 140 mm) の IEGT 2 種類と IGBT 1 種類の3種類について, 同じ冷却方式 (ヒートパイプ方式) で変換回路として利用した実績値を図2に示す。利用率は次の式による。

$$\text{利用率 (\%)} = \frac{\text{主変換装置最大皮相電力 (VA)}}{\text{IEGT (IGBT) 定格電圧 (V)} \times \text{IEGT (IGBT) 定格電流 (A)}} \times 100$$

2.3 主変換装置のパワー密度

表1の主変換装置容量の考え方は, 機関車と電車用途で異なる。機関車用はもっとも明確であり, 連続出力容量 (主電動

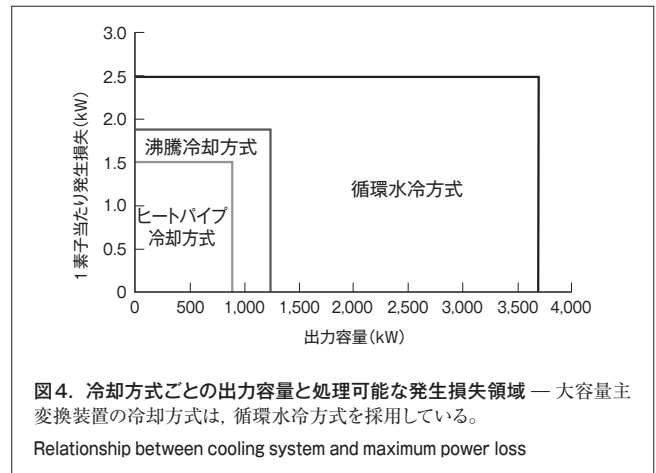


図4. 冷却方式ごとの出力容量と処理可能な発生損失領域 — 大容量主変換装置の冷却方式は, 循環水冷方式を採用している。

Relationship between cooling system and maximum power loss

機定格容量) : 最大出力容量 = 1 : 1 となる。これに対して電車用は, これが1 : 1.5 ~ 2 である。つまり, 連続出力容量は路線の実効電流により決まり, 最大出力容量は加減速度で決まる。

鉄道車両用主変換装置は, 機関車のような床上タイプ, 電車のような床下タイプ, いずれの場合においても限られたスペースに搭載されるため, パワー密度 (= 出力容量 / 装置体積) の向上が重要な設計指標となる。機関車用と電車用の代表的な主変換装置のパワー密度を図3に示す。

電車用は, 前述したとおり主変換装置容量が1,000 kW 前後であり, 冷却器としてヒートパイプあるいは沸騰冷却方式が用いられるのに対して, 機関車用は3,000 kW 前後と大容量になるため, 循環水冷方式を採用している。機関車用変換装置のパワー密度 500 kW/m³ (電力変換部分は 770 kW/m³) は, グローバル市場における最大パワー密度 600 kW/m³ と比較しても, 十分に競争力のある装置となっている。図3の事例とともに, IEGT 1 素子当たりの発生損失と冷却方式の関係を図4に示す。

パワー密度を更に向上させるためには, IEGT のいっそうの

低損失化が必須である。3.3 kV-1.2 kA 定格素子におけるプレーナゲート構造とトレンチゲート構造の素子特性比較を表2に示す。プレーナゲート構造からトレンチゲート構造にすることにより損失を15%低減できる。

両者の電流遮断特性を図5に示すが、電流変化率 di/dt がプレーナゲート構造では5.5 kA/μsであるのに対して、トレンチゲート構造では9.3 kA/μsと急しゅんなターンオフ特性となっている。これに対応するために、回路の低インダクタンス化設計を行い、回路インダクタンス100 nH以下を達成し、電

圧跳ね上がりの抑制を図っている。

2.4 信頼性

鉄道車両用途で重要な適用技術として、パワーデバイスの寿命設計がある。モジュール型構造は、電力端子はんだ接合部あるいはアルミニウムワイヤボンディング部があるので、図6のような信頼性曲線が規定される。車両として運用される条件(駅間の運転時間と平均荷重負荷あるいは乗車率での1日の温度変化(ΔTc)と温度変化サイクル数を積算)で走行シミュレーションを実施し、図6の信頼性曲線から限度を求め、安全係数を考慮して冷却設計へフィードバックする。

表2. 3.3 kV-1.2 kA 定格素子の特性改善

Improvement of 3.3 kV-1.2 kA IEGT loss characteristics

項目	プレーナゲート	トレンチゲート
Vce(sat)(コレクタエミッタ間飽和電圧) (V)	3.6	3.0
Eoff(ターンオフスイッチング損失) (J)	2.2	1.7
Eon(ターンオンスイッチング損失) (J)	2.0	1.7
Vf(順電圧) (V)	3.0	3.3
Edsw(逆回復損失) (J)	1.3	0.7
PWMコンバータ損失(力行時) (W/素子)	2,078	1,745
		約15%低減

PWM : Pulse Width Modulation

3 機関車用 主変換装置

資源保有国などにおける機関車新製需要は盛んで、特に中国では、貨物輸送の高速化を目的とした大出力化が進んでいる。中国鉄道部向け機関車を図7に示す⁽²⁾。また、この機関車の主回路構成を図8に示す。4.5 kV-0.9 kA IEGTをコンバータとインバータに用いている。

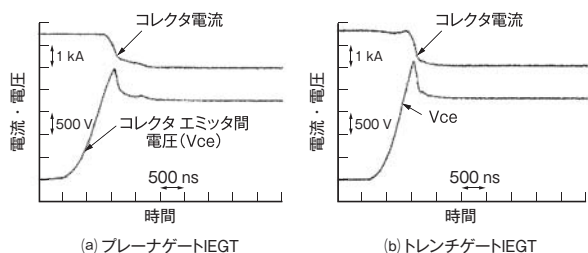


図5. トレンチゲート化によるターンオフ特性の変化 — トレンチゲート構造では損失低減が可能になる反面、急しゅんなターンオフ電圧特性となる。回路の低インダクタンス化設計により、電圧跳ね上がり抑制を図っている。

Results of turn-off tests

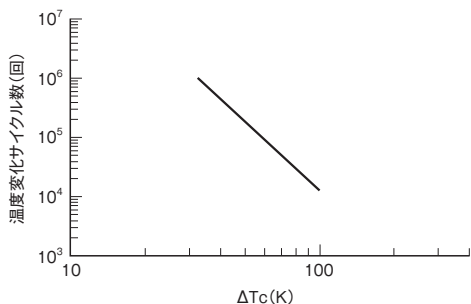


図6. 3.3 kV-1.2 kV トレンチゲート素子の信頼性曲線 — 電力端子はんだ接合部、アルミニウムワイヤボンディング部にΔTcが加わると、はんだき裂などが発生する。走行シミュレーションで算出される温度変化サイクル数から寿命を予測し、最適冷却設計に反映する。

Reliability of 3.3 kV-1.2 kA IEGT



図7. 中国鉄道部向け機関車 — 定格出力7,200 kWのHXD3型式の機関車で、架線電圧はAC25 kV 50 Hz、最高速度は120 km/hである。

Locomotive for China Railways

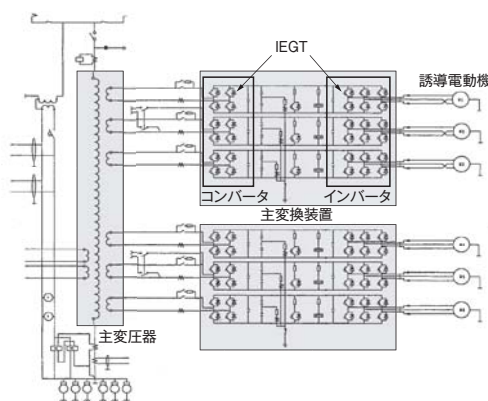


図8. 中国鉄道部向け機関車の主回路構成 — 1,200 kW 誘導電動機1台を駆動するコンバータ・インバータシステムが1両に6台搭載され、総計7,200 kW 出力を発生する。

Main circuit configuration of locomotive for China Railways

ここでコンバータ側のIEGTは2並列、インバータ側は1並列としている。現状のモジュール型IGBTの定格を考慮しても、2台の電動機を1並列のIEGT若しくはIGBTでは駆動できないので、冗長性向上を兼ねて1電動機1インバータ駆動としている。

機関車用の主変換装置と水冷パワーユニットを図9、図10に示す。

図11に示すように、水冷フィンにIEGT 2個を取り付けたものをモジュールとして標準化した。コンバータは2モジュールを組み合わせて相ユニットを構成し、インバータは1モジュールで相ユニットを構成している。

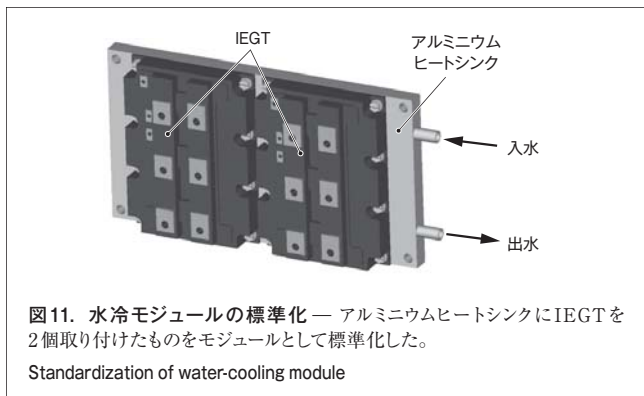
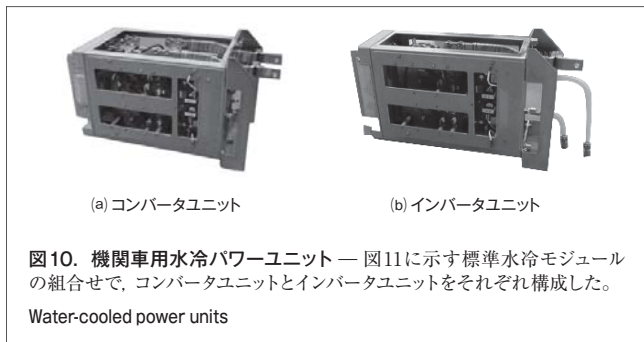
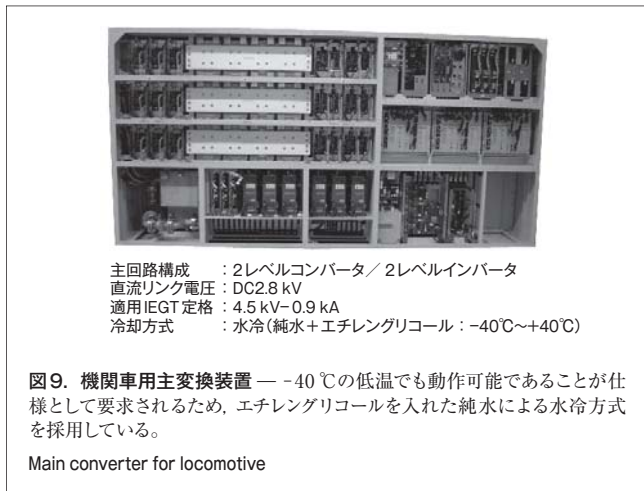


表3. 6.5 kV素子と4.5 kV素子の機関車適用時の損失比較
 Comparison of loss of converters using 6.5 kV IGBT and 4.5 kV IEGT

項目	6.5 kV-0.6 kA IGBT	4.5 kV-0.9 kA IEGT
直流リンク電圧 (kV)	3.3	2.8
IEGT発生損失 (倍)	1.25 (現状)	1.0

表4. 機関車へのIEGT適用実績と故障率
 Failure rate of IEGT for locomotive

項目	内容
機関車稼働両数	60両
走行距離	約20万km/両
IEGT総数	5,040個
IEGT故障率	0.04%
IEGT故障率	66 FIT

FIT: Failure in Time
 * 2008年7月1日現在

開発当初(2004年)、直流リンク電圧と適用IGBT及びIEGTについて比較検討した結果、コンバータ・インバータ回路方式の機関車の場合、表3のように、直流リンク電圧2.8 kV、4.5kV-0.9 kAのIEGTを適用するのが、発生損失を最小にでき最適と判断した。現時点までのフィールド故障率は、表4のように想定内で十分に小さく、満足できる結果が得られている。

4 新幹線用主変換装置

新幹線に誘導電動機ドライブシステムが初めて採用された東海道山陽新幹線の300系車両以降、主変換装置の冷却は強制風冷沸騰冷却方式が用いられた。前述した表2のトレンチゲート構造による低損失IEGTの開発、及び床下走行風の解明により、新幹線として初めて、走行風冷却方式がN700系車両で実用化された。走行風冷却方式は、冷却用電動送風機や冷却風洞構成要素が不要となり、主変換装置の大幅な小型・軽量化に寄与する⁽³⁾。

N700系車両用の走行風冷却方式による主変換装置を



表5. N700系新幹線の主変換装置の比較

Comparison of air-cooled and conventionally cooled main converters

項目	主変換装置型式	
	TCH100 WPC203	TCH3 WPC202
冷却方式	走行風冷却方式	強制風冷沸騰冷却方式
コンバータ	3レベル変調単相電圧形PWMコンバータ	
インバータ	3レベル変調三相電圧形VVVFインバータ	
出力容量 (kW)	最大:1,340	定格:1,220
装置外形 (mm)	3,250 (幅)×2,180 (長さ)×700 (高さ)	
装置質量 (kg)	1,315	1,538
コンバータIGBT	3.3 kV-1.2 kA (2並列接続) トレンチゲート方式	3.3 kV-1.2 kA (2並列接続)
インバータIGBT	3.3 kV-1.2 kA トレンチゲート方式	3.3 kV-1.2 kA



図14. トルコ国鉄向け通勤電車の主変換装置 — 大容量210 kW 誘導電動機4台を1台のインバータで一括駆動する。

Main converter for Turkish State Railways

表6. トルコ国鉄向け通勤電車の主要諸元

Main specifications of main converter for Turkish State Railways

項目	仕様
架線電圧	AC25 kV
電動機	誘導電動機210 kW×4
MT比*	2M1T
IEGT 定格	3.3 kV-1.2 kA
冷却方式	ヒートパイプ適用走行風自冷

* : 編成中の電動車 (M) と付随車 (T) の割合

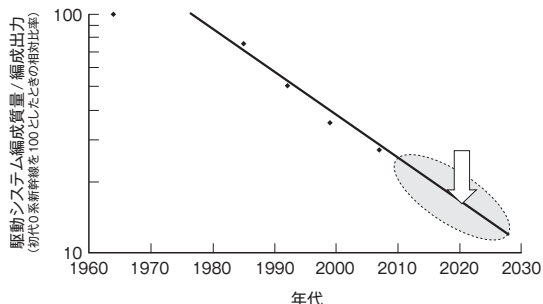


図13. 新幹線駆動システムの軽量化トレンド — 初代0系新幹線を100とした場合の、単位出力当たりの駆動システム質量のトレンドを対数表示したものである。これまで過去の軽量化トレンドの延長線上に沿って着実に軽量化が図られている。

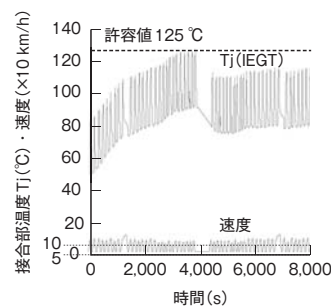
Trend in weight of drive systems for Shinkansen

図12に、強制風冷沸騰冷却方式との諸元比較を表5に示す。装置外形は取付け互換の仕様から同一であるが、走行風冷却方式の採用により、質量は約15%の軽量化を達成した。

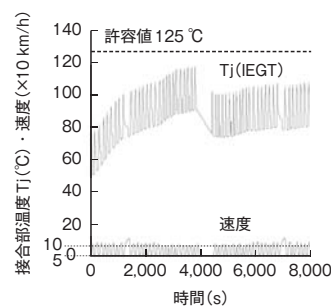
新幹線駆動システム(変圧器、主変換装置、電動機)の単位出力当たりの質量のトレンドを図13に示す。2007年のN700系走行風冷却主変換装置は、過去の軽量化トレンドの延長線上の軽量化を達成しており、今後もこのトレンドを目安に軽量化開発を行っていく。

5 通勤電車用主変換装置

通勤電車用主回路変換装置の冷却は通常、走行風を利用した自然風冷却方式が採用されているが、GTOサイリスタからIGBTへ移行した当初は、素子のV_{ce}(sat)(コレクタエミッタ間飽和電圧)– E_{off}(ターンオフスイッチング損失)特性で決まる発生損失、つまり温度上昇の制約から、駆動する電動機定格容量が200 kW以上あるいは、車両速度が100 km/h以下で起動停止を繰り返す用途には、1台の主変換装置で制御



(a) プレーナ型素子適用



(b) トレンチ型素子適用

図15. トルコ国鉄向け通勤電車での全線走行温度シミュレーション — プレーナ型素子では接合部温度の許容値を超過してしまうが、トレンチ型素子の適用により、大容量電動機4台の一括駆動が成立するシミュレーション結果が得られた。

Results of power device temperature simulation

する電動機台数を2台とするか、冷却を強制風冷方式とした。前述した表2のように、トレンチゲート構造のIEGTによる特性改善が進み、電動機定格容量が200 kW以上あるいは最高速度が70～80 km/hの運用条件でも、自然冷却方式が

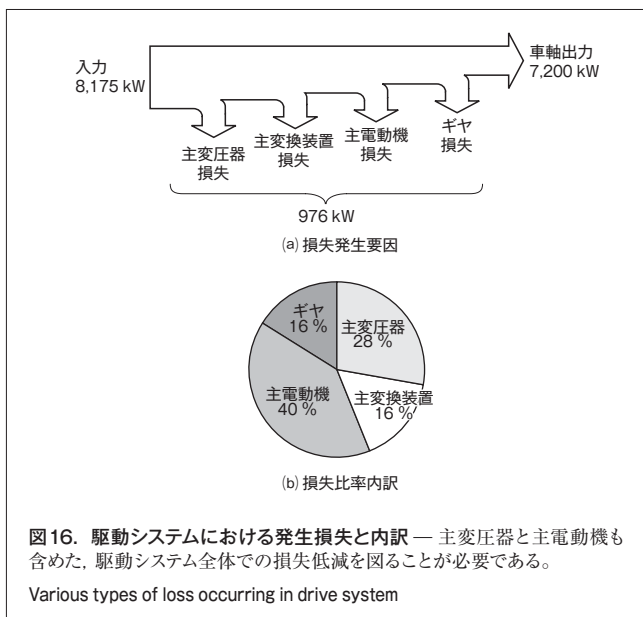
実現できるようになった。

トルコ国鉄向け通勤電車の定格容量210 kW電動機を一括制御する、主変換装置とその主要諸元を図14及び表6にそれぞれ示す。ヒートパイプを適用した走行風自冷方式では最大級の電動機容量である。インバータ素子としてプレーナゲートIEGTとトレンチゲートIEGTを適用した際の、全線走行時の温度シミュレーションの結果を図15に示す。この事例では、駆動電動機容量が210 kW×4台で大きく、プレーナゲートIEGTを適用した場合には接合部温度最大値(Tj max)が許容値の125℃を超過してしまうが、トレンチゲートIEGTの適用により、IEGT素子のTj maxが許容値以下に低減され、210 kW電動機4台の一括駆動を実現できることがシミュレーションで確認できた。

6 今後の課題

鉄道車両用主変換装置は、今後も更なる省エネルギーとパワー密度向上を目指して開発が進められる。

- (1) 省エネルギー 一例として、機関車のエネルギーフローを図16に示す。システム変換効率は約88%である。主変換装置回路はIEGTの更なる特性改善を検討中である。主変圧器は、主変換装置回路を2レベルコンバータから3レベルコンバータ方式にすることで、高調波電流が低減し、主変圧器損失を14%低減することが可能になる。主電動機は、従来の誘導電動機を高効率な永久磁石同期電動機に替えることで、損失を23%低減することが可能になる。以上のような要素技術をベースに、主回路システムとしての最適化を検討していく。
- (2) パワー密度の向上 主変換装置のパワー密度向上の



ためには、IEGTの低損失化とともに、接合部の動作許容温度の高温化がある。これまでハイパワー分野のサイリスタ、GTO、IGBTはすべて、動作温度が最大125℃以下で設計されてきたが、Tj max 150℃まで許容するデバイスが実現しつつある。この高温化素子の適用により、例えば、前述した図10の標準モジュールを片面実装から両面実装にできるので、パワー密度の向上につながる。

- (3) 長寿命化 鉄道車両の寿命は一般に20～30年と言われているが、電動送風機の軸受などの機械的消耗品や、アルミニウム電解コンデンサなどの電気化学的消耗品は、それ以前に交換が必要である。

パワーデバイス及びその周辺用品の寿命は、大半は温度で左右される。長寿命化するには、温度デレーティングを上げるか用品の耐量を向上する必要がある。前者の場合、一般的には用品が大型化するので、後者の方針で車両寿命に近づけるよう、パワーデバイス、コンデンサ、冷却器などを改善中である。

7 あとがき

IEGTを適用した鉄道用主変換装置を開発し、主変換装置の小型・軽量・高効率化を実現してきた。今後も、IEGT素子特性の改善や駆動システム全体での最適化設計により、いっそうの小型・軽量・高効率化を図ることで、鉄道車両駆動システムの更なる発展に寄与していく。

文献

- (1) 三浦和敏, ほか. “低損失IGBT (IEGT) を使用した車両駆動用主回路の開発”. 第43回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集. 2006, p.506.
- (2) 八田衛明, ほか. 中国鉄道向けHXD3形大容量交流電気機関車. 車両技術. 9. 234. 2007, p.117-127.
- (3) 萩原善泰, ほか. 新幹線電車用走行風冷却方式主変換装置の開発. JREA. 48. 10. 2005, p.31183-31186.



中沢 洋介 NAKAZAWA Yosuke

電力流通・産業システム社 府中事業所 交通ドライブシステム部主査。交通ドライブ用パワーエレクトロニクスの開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex



青山 育也 AOYAMA Ikuya

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長。鉄道車両システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。
Transportation Systems Div.



安岡 育雄 YASUOKA Ikuo

電力流通・産業システム社 府中事業所技監。交通ドライブ用パワーエレクトロニクスの開発に従事。電気学会会員。
Fuchu Complex