

# 京成電鉄株式会社3000形電車への 高効率プロパルジョンシステムの適用

The high efficiency Propulsion System for type 3000 Keisei Electric Railway Co., Ltd.

Type 3000 commuter train Keisei Electric Railway Co., Ltd is developed in 2003. ToyoDenki supply Propulsion inverter, Traction Motor, Gear unit, Pantograph and so on.

Recently, compound semiconductor devices such as SiC devices have been developed for inverter systems of electric railway vehicles. We develop the high efficiency propulsion system used SiC device, apply type 3000 commuter train.

In this paper shows reduction energy consumption form developed equipment about Propulsion inverter, Filter inductor and Traction motor.

藤本 和樹  
Kazuki Fujimoto

## 1. はじめに

京成電鉄株式会社(以下京成電鉄) 3000形電車は、2003年より営業投入され、最新の14次車まで合計48編成が製作・運用されている。運用範囲は、6両編成は主に京成電鉄線内、8両編成は京成電鉄線内をはじめ、スカイアクセス線や東京都交通局浅草線、京浜急行電鉄本線・羽田空港線に乗り入れ、羽田空港および成田空港のアクセス列車に供されている。

走行制御装置は3300V1200A級Si(Silicon) IGBT素子による1C4M×2群制御・ヒートパイプ式冷却器走行風自冷のVVVFインバータを6両編成は2台、8両編成は3台として床下にぎ装している<sup>[1]</sup>。3000形車両落成当初より、VVVF装置、主電動機、フィルタリアクトル、駆動装置、パンタグラフ、低圧継電器箱等に当社製品を採用いただいている。

図1に車両外観を、表1に3000形電車の主要諸元を示す。

3000形電車導入13年を経て、次期新形式車への展開を想定した新技術として、省エネルギー化に重点を置いた主回路システムを開発、3000形電車3003編成に適用した。開発したシステムは主電動機、VVVFインバータ装置(ハイブリッドSiC



■ 図1 3000形電車外観(3003編成)  
Fig.1 Exterior of type 3000 (3003 formation)

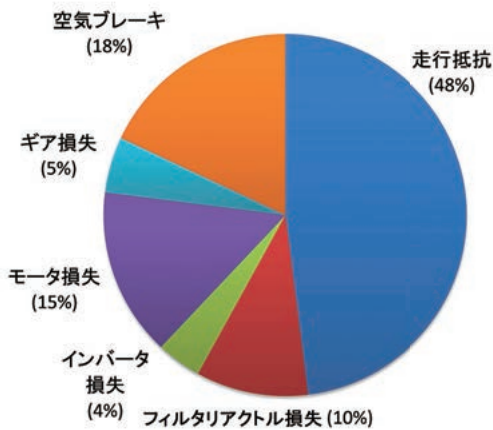
■ 表1 3000形電車の主要諸元(6両編成)  
Table1 Vehicle specification of type 3000

項目	仕様
車両編成	M2c-M1-T+T-M1-M2c
編成質量	186t (M車33t, T車27t)
最高速度	120 km/h
直線加速度	3.5 km/h/s (0.972m/sec <sup>2</sup> ) 応荷重制御付(0-200%)
最大減速度	4.0km/h/s (1.11m/sec <sup>2</sup> ) 常用最大 4.5km/h/s (1.25m/s <sup>2</sup> ) 非常
電気方式	DC1500V 架空電車線方式
制御装置	ATR-H8125-RG681A 1C4M×2群制御×2台/編成
主電動機	TDK6070-A 三相かご形誘導電動機 1時間定格125kW, 1100V, 83A, 2360min <sup>-1</sup>

適用)、フィルタリアクトルの3装置である。主電動機は全閉外扇構造の高効率主電動機、VVVFインバータ装置はハイブリッドSiC適用、フィルタリアクトルはコイル巻線に銅を使用し高効率化を図っている。本稿では開発した製品群とその消費電力効果について解説する。

## 2. プロパルジョンシステムとしての省エネルギー、高効率化、 その設計指針

文献[2], [3]より、SiC素子適用による直接的効果は装置の小型軽量化のみである。VVVFインバータ装置の主回路半導体をSiC化したのみでの省エネルギー効果は、車両全体が使用するエネルギーに対し0.2%に過ぎず、SiC素子適用のみでは省エネルギー効果は得られない。したがって他のアプローチで省エネルギー化を達成する必要がある。ここでプロパルジョンシステムにおける損失の内訳を考える。内訳の例を図2に示す。



■ 図2 プロパルジョンシステムにおける損失の内訳(例)  
Fig.2 An example of propulsion system loss

図2より、車体等で決定される走行抵抗を除けば空気ブレーキ、モータ損失、フィルタリアクトル損失の順に大きいことがわかる。空気ブレーキの損失とは、回生ブレーキによりブレーキ力が負担できていれば損失ではなくなるものである。回生ブレーキ負担率を上げ、回生負荷(力行車両)があれば損失ではなくなるため非常に効果大きい。次に割合の大きいモータ損失、フィルタリアクトル損失はそれぞれの機器を高効率化(=低損失化)することで全体のエネルギー消費を低減させることが可能である。

これらの考え方にに基づき、プロパルジョンシステム全体の設計指針は次のようになる。

- i. 主電動機を高効率なものに変更する。  
同時に性能をアップし、変更するためトルク裕度および適用する主回路素子の電流限界まで回生定トルク領域を伸ばして回生率の向上を図る。
- ii. ギア比と主電動機の関係から高効率な組み合わせとする。
- iii. フィルタリアクトルを高効率化する。
- iv. 回生ブレーキパターンを大きくとり、回生電力を最大限活用することで、力行による消費電力を抑制する<sup>[4]</sup>。
- v. 以上4点を満たしたうえでVVVF装置を小型化する。

このたびは京成電鉄3000形車両に搭載する機会をいただいた。このため3000形に従来搭載している機器と可能な限り取り付け互換とする必要があるが台車共通のため、iiは適用できない。iの適用により回生ブレーキ負担の増加により全機器の大型化が避けられない。よってiii、ivの小型軽量化も重要となる。SiC素子の適用は文献[2]、[3]に示すように小型軽量化に大きく寄与する。機器の大型化を抑える意味でSiC素子の適用および各機器の高効率化が必要である。

### 3. フィルタリアクトルと主電動機の高効率化<sup>[5]</sup>

#### 3.1 フィルタリアクトルの高効率化

フィルタリアクトルを高効率化するには直流抵抗値を下げるのが有効である。現状の3000形のフィルタリアクトル(L3027-A, 508kg, 2回路入り, 定格235A)は巻線素材がアルミニウム製で、8mH, 約70mΩとなっている。ここで巻線素材を銅化すると単純計算で抵抗率が約3割下がるため、約40mΩとすることができ、損失も30%低下する。最大電流に合わせて巻線素材をアルミニウム、銅それぞれ設計すると質量、寸法、磁気シールド板の質量は表2のようにになる。なお定格電流は既存車と同一である。

■ 表2 フィルタリアクトル コイル材質による比較  
Table2 Comparison of filter inductor

項目	銅コイル	アルミコイル
寸法	W1080×H730×D730mm	W1600×H730×D730mm
質量	943kg	870kg
シールド板質量	447kg	515kg

表2より、巻線素材を銅にすると寸法は小さくできるものの、比重がアルミニウムよりも大きいため、質量が大きくなる。また寸法に比例してシールド板は軽くなるが、本体の質量増大分ではほぼ相殺される。最終的には巻線素材に銅を使用すると占有体積で3分の2にすることができ、エネルギー密度は1.5倍となる。今回は省エネルギー効果、および大型化による軸重バランスへの影響を最小限に抑えるように小型化するため巻線素材には銅を選択した。フィルタリアクトルの主な諸元を表3に、外観を図3に示す。

■ 表3 フィルタリアクトル(L3066-A)諸元  
Table3 Specification of filter inductor

項目	仕様
定格	DC1500V 235A 8.0mH×2群
巻線材質	銅
冷却方式	乾式自然空冷



■ 図3 フィルタリアクトル(L3066-A)  
Fig.3 Filter inductor (L3066-A)

### 3.2 主電動機の高効率化

一般に誘導電動機は定格すべりを小さくし、すべり周波数が低い領域で常用することにより高効率化が可能である。具体的には適切なコイル巻回数の選定、スロット形状の変更、回転子導体や鉄心に低損失材料を用いることなどがあげられる<sup>[6]</sup>。高効率化により損失(=発熱)が減るため、冷却構造が簡素化でき、全閉外扇構造とすることができた。今回は後述の回生トルクパターンの変更に伴い、主電動機容量は125kWから140kWと大容量化している。また、電動機の設計を磁気装架型とすることにより最大トルクを大きく取り、4章で述べる回生トルクの増大に対応している。

主電動機(TDK6179-A)の主な諸元を表4に、外観を図4に示す。

フィルタリアクトルおよび主電動機の変更により、シミュレーション上、省エネルギー効果は1%程度期待できる。

■ 表4 主電動機(TDK6179-A)主要諸元  
Table4 Specification of traction motor

定格(1時間)	TDK6179-A	既存TDK6174-A
出力	140kW	125kW
電圧	1100V	
電流	96A	83A
回転速度	2375min <sup>-1</sup>	2360min <sup>-1</sup>
周波数	80Hz	
定格すべり	1.1%	1.7%
極数	4	
効率	94.5%	92.5%
力率	81.5%	85.5%
冷却方式	全閉(外扇型)	開放型自冷



■ 図4 主電動機(TDK6179-A)  
Fig.4 Traction motor (TDK6179-A)

### 4. 回生ブレーキパターンの変更<sup>[5]</sup>

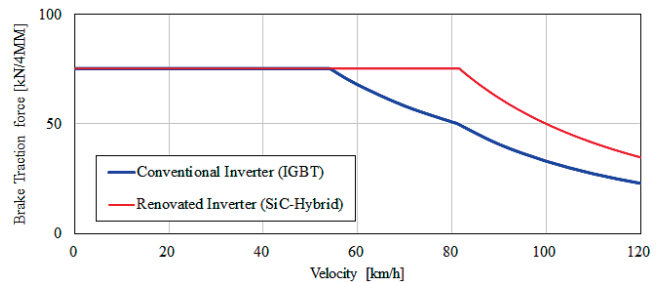
2章で述べたように機械ブレーキによるエネルギー損失を減らすために回生定トルク領域の終端速度をできる限り高い速度に設定する。図5に回生ブレーキパターンを示す。

図5に示すように、定トルク領域終端速度を54km/hから82km/hとすることにより、機械ブレーキでの負担を小さくすることができる。

なお、このパターンは主電動機の停動トルクに対して十分に余裕があることから、電気設計上はさらに定トルク領域終端速度を上げて、より消費電力量を削減する仕様も不可能ではない。しかし本例では、従来のトルクパターンでも郊外線区では軽負荷回生によるブレーキトルク絞り込みが発生している。回生ブレーキの負荷となる十分な車両が存在しなければ軽負荷回生となりトルク絞り込みが発生する。この場合、回生ブレーキ力を負担できないことから、回生電力が大きくなる高速域でのパターンを大きくする効果は限定される。

一方で、定トルク領域の拡大は主電動機のピーク電流および実効値電流が増加する。そのため、主電動機、VVVFインバータ、フィルタリアクトルの大型化、ギ装電線径への影響も顕著化することから、むやみに高速域でのパターンを増加させることは必ずしも適切ではない。

この効果によりシミュレーション上、省エネルギー効果は18%程度期待できる。



■ 図5 回生ブレーキパターンの比較  
Fig.5 Regenerative brake pattern comparison



## 5. インバータ装置の小型軽量化<sup>[5][7]</sup>

回生ブレーキ定トルク領域の拡大に伴い電流が増大し、VVVFインバータ側では対策を施さなければ電流が増加し、主回路半導体の損失が大きくなる。すなわち主回路半導体冷却器の冷却性能を上げるか、損失の少ない主回路半導体素子に変更するかの、いずれかを選択する必要がある。

走行風自冷方式で冷却器の冷却性能を上げる場合、冷却器の大型化が必須である。また冷却ファンによる強制空冷や水冷方式により小型化が実現可能であるものの、いずれも冷却系にエネルギーを使用することに加えて、信頼性低下やメンテナンス負担の増加の観点から今回は走行風自冷方式のままとした。

そのため、冷却器大型化の抑制のため、文献[2]と同様のアプローチを行う。すなわち、走行風冷却方式で従来のIGBT素子を使用した場合、消費電力の削減のため回生トルクパターンを変更すると冷却器の大型化は避けられないのに対して、ハイブリッドSiC素子を適用することにより冷却器の大型化を抑制しながら、消費電力削減が実現できる。

図6に今回開発した制御器(RG6040-A-M)の外観を示す。表5に既存の制御器を100とした場合の質量、体積、出力密度の比較を示す。表5より、質量、体積、密度いずれも変更後の方が優れた結果となることがわかる。特に出力密度は既存システムに比べて1.4倍である。高出力密度化の大半の要因はフィルタコンデンサの小型軽量化等による内蔵機器の見直しにより達成したものである。主回路半導体素子の差による占有体積減少は冷却器分0.2m<sup>3</sup>に留まる。



■ 図6 VVVFインバータ外観  
Fig.6 Propulsion inverter

■ 表5 インバータの比較

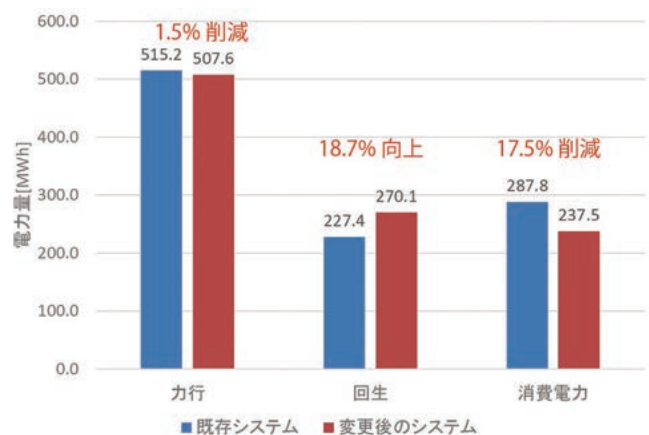
Table5 Specification of filter inductor

項目	既存 (RG681-A-M, Si-IGBT)	変更後 (RG6040-A-M, SiC)
質量	100	71.2
占有体積	100	79.9
出力密度	100	140

## 6. 消費電力の比較

搭載前後の消費電力について検討した。編成中残りのVVVF装置1セットは既存のシステムのままとしており、完全同一運転パターンでの比較が可能である。消費電力の比較はVVVF装置の積算電力量計での比較とした。図7に2017年1月～9月までの消費電力比較結果を示す。

図7より、力行時の消費電力量が1.5%低下している。これは主電動機、フィルタリアクトル、VVVFインバータ装置、それぞれの効率向上の結果である。また回生電力量、消費電力量についても18%向上した。いずれもシミュレーションによる試算とほぼ一致した。



■ 図7 消費電力の比較(2017年1月～9月)  
Fig.7 Comparison of energy consumption

## 7. まとめ

京成電鉄3000形電車にSiC適用高効率化電機品を適用した。消費エネルギー削減を狙いインバータ、フィルタリアクトル、主電動機を適用し従来装置と比較を行った。適用の結果、下記の結果が得られた。

- ・システム全体の省エネルギー設計により、18%程度の省エネルギー化となった。
- ・主回路システム全体の省エネルギー化には回生ブレーキ特性の変更が最も効果的である。

本試験の成果から、今後量産へのブラッシュアップを実施していく。最後に本開発にあたり京成電鉄株式会社にご多大なご指導、ご協力をいただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 延命, 可児, 半田:「京成電鉄3000形電車」車両技術225号(2003), pp47-63
- [2] S. Makishima, K. Fujimoto, K. Kondoh:” The Direct Benefit of SiC Power Semiconductor Devices for Railway Vehicle Traction Inverters” The 2018 International Power Electronics Conference -ECCE Asia- (IPEC-Niigata2018 ), 22H3-2
- [3] 峯吉, 池田, 小岩, 名取, 近藤, 藤本, 牧島:「鉄道車両の省エネルギー化に向けたインバータのSiC素子適用による電流増加時の損失の特性解析」電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-18-027
- [4] 河野, 岩崎, 近藤:「車両の省エネ技術の適用と具体的な効果」平成28年電気学会産業応用部門大会, 5-S1-6
- [5] 広瀬, 藤本, 飯田, 伊藤:「京成3000 形電車適用SiC インバータ装置－プロパルジョンシステム全体の見直しによる省エネルギー効果－」, 第55回日本サイバネティクスシンポジウム
- [6] 近藤, 宮部, 海老塚, 花岡, 山口:「鉄道車両用高効率誘導電動機の開発」第49回日本サイバネティクスシンポジウム 514
- [7] 藤本, 牧島, 畠山, 近藤:「SiC素子適用による主回路システムへの効果 -直接的な効果と間接的な効果の具体例-」第25回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018) 講演番号3406

## 執筆者略歴



藤本 和樹

2009年入社。

現在、交通事業部交通工場設計部に所属。主に走行システム用インバータの開発設計に従事。

電気学会会員、IEEE Member。