

# 広島電鉄株式会社3900形更新車両用電機品

Electric equipment for retrofit of Type 3900 train for Hiroshima Electric Railway Co., Ltd.

Hiroshima Electric Railway Co., Ltd. 3900 type train was newly built in 1990. Today, for the purpose of preventive maintenance, electrical equipment has been updated. Upon this renewal, we delivered the traveling equipment.

We applied SiC power semiconductors to Propulsion inverter, and compared with existing equipment, we were able to significantly reduce the size and weight of the equipment. This document introduces the updated electric devices.

藤本 和樹  
Kazuki Fujimoto

大久保 孔靖  
Michiyasu Okubo

奥村 啓介  
Keisuke Okumura

鈴木 章浩  
Akihiro Suzuki

登山 昭彦  
Akihiko Toyama

## 1. まえがき

広島電鉄株式会社(以下広島電鉄) 3900形電車<sup>[1]</sup>は1990～96年にかけて合計8編成、さらに1997～98年に車体のデザインおよび内装が変更になった3950形が合計6編成導入され、30m級の車体長による乗車人員が多いことを生かして、主に宮島線広電宮島口への直通運転に使用されている。

制御装置は逆導通GTOによる1C2M制御・ヒートパイプによる走行風自冷のVVVFインバータ装置<sup>[2]</sup>を2台/編成として、床下に設置している。

しかし、初期の3900形の電気機器は25年以上の経年となり、特に制御装置の電子機器の寿命による不具合発生が今後増加する懸念があるため、更新を行う必要があった。

一方、近年SiC(Silicon Carbide)に代表される化合物半導体によるパワーデバイスの実用化が進んできた。SiCは、高速・高温かつ低損失にて動作可能で、鉄道向けインバータに適用、営業運転に投入されている例も増えてきている<sup>[3]</sup>。

インバータ装置の小型軽量化には主回路半導体素子冷却器の簡素化、そのための主回路半導体素子低損失化は不可欠である。当社は、既存の車両システム、および更新対象の制約により、3900形のVVVFインバータ装置の置き換え更新用にSiCハイブリッドモジュールを適用することにした。

従来Si(Silicon)-IGBTでは、素子の冷却を強制風冷方式(ファン冷却)としなければ構成が不可能であったが、SiCハイブリッドモジュールの適用により既存車両(GTO)同様自冷方式で構成することが可能となった。

以下に3900形更新に納入した主な電機品について解説する。

## 2. 更新に関する制約と設計方針<sup>[4]</sup>

図1に3900形電車の外観、表1に主要諸元を示す。



■ 図1 車両外観  
Fig.1 Exterior of vehicle

■ 表1 3900形の主要諸元(既存)  
Table1 Vehicle specification of type 3900  
(before replacement)

項目	仕様
編成	27960×2496×3820mm 3車体4台車(4台車中2台車が電動台車)
編成質量	38.0ton
電車線電圧	直流600V
制御電圧	直流24V, 三相交流200V60Hz (三相交流はGTOのゲートドライブ電源に使用)
最高速度	60km/h(設計最高80km/h)
加速度	0.833m/s <sup>2</sup> (3.0km/h/s) 0-250%応荷重制御付
常用最大減速度	1.389m/s <sup>2</sup> (5.0km/h/s) 45km/h以上 1.222m/s <sup>2</sup> (4.4km/h/s) 45km/h未満
主電動機	三相かご形誘導電動機 TDK6305-A 1時間定格 85kW 440V 144A 1760rpm
主制御器	VVVFインバータ装置(逆導通GTO) RG629-A-M 1C2M制御×2台/編成

更新に関する制約条件を以下に示す。

- (1) 車両システム全体の刷新は行わない  
(更新はVVVFシステム、主電動機のみ)
- (2) 主電動機の更新は基本的に絶縁更新のみの実施
- (3) 補助電源の更新とは関係なく実施するため、制御電源容量は従来どおりとする

以上から、VVVF装置には次の制約が生まれる。

- i. ブレーキ制御装置のシステム更新と同時ではないため、粘着限界を上げることはできない
- ii. 主電動機の変更がないためトルク限界も変更がない。従って引張力パターンは従来と同じ
- iii. 冷却ファン用の電源は確保できない
- iv. ギ装スペースは従来どおり

iiiに関してはGTOによる駆動用電源(補助電源の三相交流出力200VをDC100Vに変換)を流用することも考えられるが、システム単純化の観点から制御電源は既存のDC24Vのみとして、車両システムとしての制御電源(サービス電源にかかわらない部分)は1種類とすることがメンテナンス上も好ましい。よって強制風冷式は選択できない。さらにivに関連してギ装スペース、配置の変更はほとんどない。また、車両構体の制約から冷却器への走行風はあまり期待できない。そのうえ現状装置の特殊な形状を合理的な形に近づける変更を行うため、使用できるスペースはさらに減少する。したがって、主回路半導体の冷却には更新前と同様、冷却ファンを使用しない自然空冷式とすることが必要である。

### 3. 主回路半導体の発熱計算

主回路半導体冷却器(以下冷却器)を自冷式とする場合、与えられるスペースと冷却器の性能がほぼ比例すると言つてよい。したがって、既存のVVVF装置のスペース(1450×1660×498mm、ただし特殊な形状のため、前述のように合理的な形状に変更する必要がある)から冷却器の性能がおおむね決まってしまうことになり、許容される主回路半導体発熱量も決まる。

発熱計算で検討した主回路半導体はSiCハイブリッドモジュールと従来のSi-IGBTモジュールの2種類である。これらはいずれも2in1タイプの1700V耐圧1200A定格、最大ジャンクション温度150°Cの素子である。また外形もほぼ同一形状である。これら2素子の違いは還流ダイオードにSiC-SBDを使用しているか、Si-Pinダイオードを使用しているかの違いのみである。このモジュールを三つ使用して2レベル三相インバータを構成する。最大発熱量となる走行パターンは、最悪条件を考えVVVF装置の1群をカットアウトした状態で

の満車走行である。スイッチングパターンは非同期制御時800Hz、インバータ周波数約30Hzから同期パルスモードとなるものとした。この時の三相分の発熱量はそれぞれ、

SiCハイブリッド：約900W  
Si-IGBT　　：約1300W

となった。一般に、SiCハイブリッド化により素子損失は20～30%下がると言われているが、この数字ともおおむね一致する<sup>[5][6]</sup>。

今回、冷却フィンに使用できるスペースから、許容される冷却器の熱性能は900W/55K、550×220×350mm、約20kgであった。よって周囲温度を45°Cとして冷却器温度、および素子ジャンクション温度を求めると、

SiCハイブリッド：冷却器温度95°C  
                  ジャンクション温度110°C  
Si-IGBT　　：冷却器温度125°C  
                  ジャンクション温度140°C

となる。Si-IGBTは絶対定格温度に非常に近く余裕がない。したがって、今回許容されるギ装スペースからはSi-IGBTは選択できず、SiCハイブリッドを選択する必要があると言える。

なおSi-IGBTを適用する場合、冷却器は550×234×460mm、約29kgとなり大型化し、ギ装限界に抵触する。



この結果から本更新におけるVVVF装置にはSiCハイブリッドモジュールの適用が必須であり、この方針ののっつてVVVFインバータ装置設計を行った。

## 4. 納入した電機品

### 4.1 VVVFインバータ装置(RG6039-A-M)および断流器箱(SA156-A-M)

前章で述べたとおり、SiCハイブリッドモジュール適用の三相2レベルインバータであり、後述の85kWの三相かご形誘導電動機を2台駆動する。

断流器箱は編成で1台搭載のため、高速度遮断器1台とインバータ2回路分の断流器を収納している。いずれも電磁投入式のディアイオングリッド方式を採用している。

インバータ制御は速度センサレスベクトル制御であり、既存のGTOシステムに比べて外乱への追随、検知性能に優れている。2にVVVF装置の外觀、3に断流器箱の外觀を示す。



■ 図2 VVVFインバータ装置  
Fig.2 Propulsion inverter



■ 図3 断流器箱  
Fig.3 Line breaker box

従来のGTO, Si-IGBT, SiCハイブリッドの各素子を適用したVVVF装置の体積, 質量, 単位体積あたりの出力の比較を表2に示す。質量, 体積は100を下回れば従来のGTOシステムより優れており, 出力密度は100を超えれば優れていることを表す。なおSi-IGBT搭載装置は冷却器が3章に示す大きさ, 質量になったと仮定して算出した。

表2より, 質量, 体積, 密度いずれもSi-IGBT, SiCハイブリッドと半導体素子の変遷にしたがって優れた結果となるのがわかる。特にSiCハイブリッドでは出力密度が従来のGTOに比べて2.4倍と大幅に向上したといえる。Si-IGBT以降はスナバレス構成やゲート電力の省電力化など主回路素子損失以外の要素も小型軽量化の理由となっているが, Si-IGBTとSiCハイブリッドの差は3章で述べたとおり, 主回路素子損失の差, すなわち冷却器の大きさの差である。これにより占有体積がほぼ0.7倍となったといえる。

■ 表2 VVVFインバータ装置の比較  
Table2 Comparison of propulsion inverters

	GTO	Si-IGBT	SiC ハイブリッド
質量	100 (380kg)	67 (255kg)	65 (244kg)
占有体積	100 (1.2m <sup>3</sup> )	60 (0.7m <sup>3</sup> )	42 (0.5m <sup>3</sup> )
出力密度	100 (141kW/m <sup>3</sup> )	167 (236kW/m <sup>3</sup> )	240 (340kW/m <sup>3</sup> )

※いずれも従来のGTOシステムを100とした場合

#### 4.2 フィルタリアクトル(L3058-A)

定格5.3mH, 210Aの空芯リアクトルを走行風自然冷却方式の外箱に収めている。外箱と吊枠の一体化により, 更新前の搭載品に比べて装置の小型化を実現した。

表3に仕様, 図4に外観を示す。

■ 表3 フィルタリアクトル仕様  
Table3 Specifications of filter reactor

項目	仕様
定格	DC600V 210A 5.3mH×1群
巻線材質	銅
冷却方式	乾式自然空冷



■ 図4 フィルタリアクトル  
Fig.4 Filter reactor

#### 4.3 主電動機(TDK6305-A1)

自己通風方式の三相かご形誘導電動機で, 1時間定格出力は85kWである。軸受構造はグリース潤滑方式で, 絶縁軸受を採用している。さらに速度センサが反駆動側に取り付けられた構造となっている。

更新の制約条件で述べたように, 最初の1編成は新規の製作とし, 2編成目以降は更新が終わった編成から降ろした主電動機を絶縁更新および同等の仕様に改造して使用する。

### 5. 消費電力の検討<sup>[4]</sup>

更新前後の主回路半導体の違いによる消費電力について検討した。走行条件は3章と同一でスイッチングパターンは従来のGTO-VVVF装置と同一とした場合, 更新前の主回路半導体およびスナバ回路の損失は,

GTO素子損失+スナバ損失: 約3300W

となる。Si-IGBTとSiCハイブリッドの算出は3章で行ったとおりである。したがって更新前からインバータとしての損失は約70%低減したと言える。またSi-IGBTシステムとSiCシステムを比較しても30%の損失低減である。

一方で推進システム全体を考えた場合, インバータ出力は85kW×2+主電動機損失である。今回の主電動機は効率90%程度の主電動機であることから, 損失は17kW程度となる。

したがってGTOからSiCハイブリッドに変更したことによ

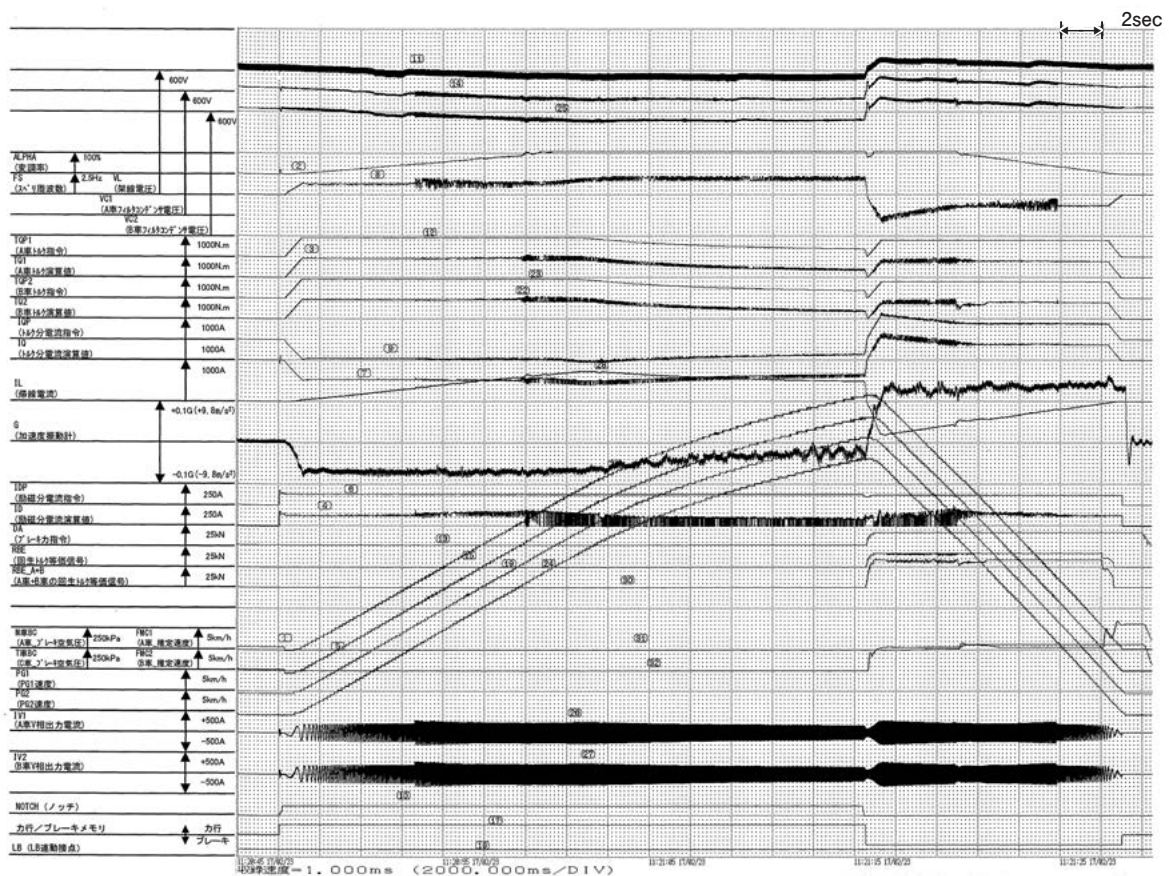
る主回路システム(インバータとモータ)の損失低減効果は、  
 $(3300W-900W)/(85kW \times 2 \times 10\% + 3300W) = 11.8\%$   
 よって11.8%損失が低減した。消費電力低減効果は、  
 $(3300W-900W)/(85kW \times 2 \times 110\% + 3300W) = 1.3\%$   
 となる。同様にSi-IGBTからSiCハイブリッドに変更したこと  
 による主回路システムの損失低減効果、消費電力の低減効果は、  
 損失  $(1300W-900W)/(85kW \times 2 \times 10\% + 1300W) = 2.2\%$   
 消費電力  $(1300W-900W)/(85kW \times 2 \times 110\% + 1300W) = 0.2\%$   
 となる。  
 単純に素子を変更した場合の損失低減効果、消費電力低減  
 効果は車両全体の損失、消費電力から考えると大きくないこ  
 とがわかる。実際にはさらにギアの損失、走行抵抗が損失と  
 して加算されるので素子変更による損失、消費電力低減効果  
 はさらにわずかなものとなる。

### 6. 現車性能試験

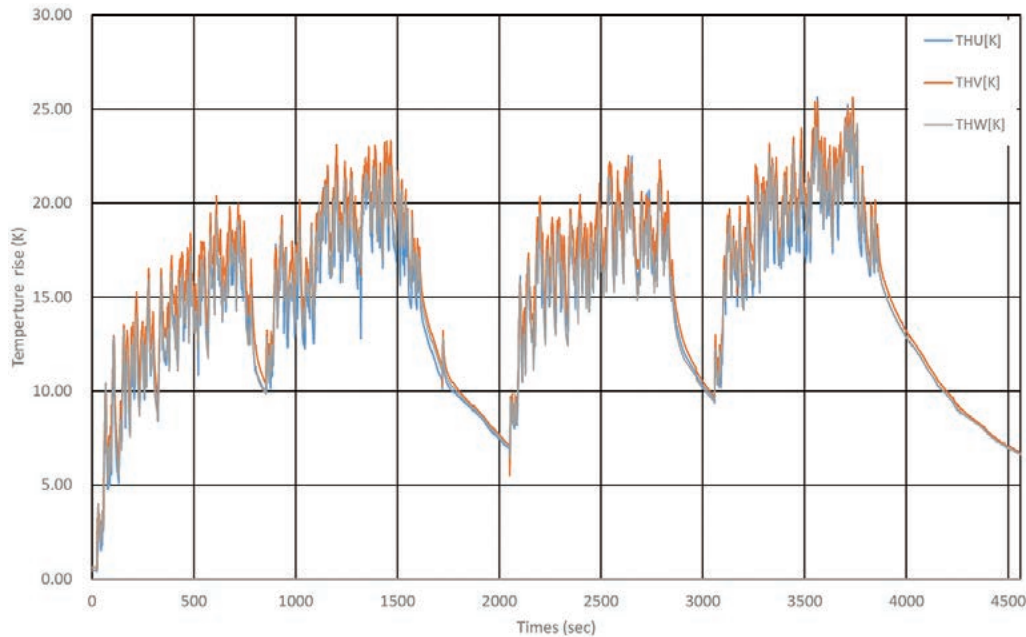
2017年2月に3901編成の電機品更新を行い、現車性能試験  
 を実施した。性能試験中の代表的な測定チャートを図5に、  
 半導体冷却器温度上昇チャートを図6に示す。

半導体冷却器温度上昇チャートにおける走行パターンは宮  
 島線(商工センター入口-宮島口)、空車状態での各駅停車運  
 用2往復である。

図5より、車両はスムーズに加減速できており車両性能、  
 乗り心地は問題ないことがわかる。図6より最大温度上昇は  
 約25Kである。車両が空車であることから3章の発熱量より  
 小さく450W程度である。空車条件におけるシミュレーショ  
 ンでの発熱量は440Wであり、よく一致する。



■ 図5 性能試験のチャート  
 Fig.5 Test run results



■ 図6 温度上昇試験結果  
Fig.6 Test run results (Temperature)

## 7. むすび

広島電鉄3900形電車の更新用電機品を納入した。

VVVFインバータ装置には、ぎ装上の制約から装置小型化のためSiCハイブリッドモジュールを適用した。適用の結果下記の結果が得られた

- (1) 従来のGTOによる装置に比べ質量40%削減、体積60%減、出力密度2.4倍の装置となった
- (2) Si-IGBTによる装置仮定と比べても質量5%削減、体積30%削減、出力密度1.5倍の装置となった

更新1編成目となる3901編成は2017年2月28日から営業運転を開始した。2017年度以降、毎年2編成程度の機器更新が進められる計画である。

最後に、本装置の納入にあたりご指導を賜った広島電鉄株式会社ならびにご協力いただいた関係会社各位に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 「広島電鉄向 3900形電車用電機品」東洋電機技報81号, 1991年9月p.8
- [2] 鶴島：「路面電車用VVVFインバータ装置」東洋電機技報89号, 1994年7月pp.30-35
- [3] 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
- [4] 藤本, 大久保, 牧島, 鈴木, 畠山：「SiC素子の適用による鉄道用VVVFインバータの小型軽量化」2017年電気学会産業応用部門大会, 5-43
- [5] 鉄道車両用主回路機器の高性能化技術調査専門委員会：「鉄道車両用主回路機器の高性能化技術」電気学会技術報告1227号(2011)
- [6] 石川, 小川, 長洲：「3kV級SiCショットキーバリアダイオードを搭載したハイブリッドモジュールと高速駆動を併用した鉄道インバータ」電学論D Vol.135No.5 pp.531-538

## 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。主に鉄道車両用インバータ駆動システムの設計・開発に従事。

電気学会会員, IEEE member.



大久保 孔靖

2011年入社。現在、交通事業部交通工場設計部に所属。主に鉄道車両用インバータ駆動システムの設計・開発に従事。



奥村 啓介

2014年入社。現在、交通事業部交通工場設計部に所属。主に鉄道車両用インバータ装置および補助電源装置のリアクトル、トランスの設計・開発に従事。



鈴木 章浩

2010年入社。現在、交通事業部交通工場設計部に所属。主に鉄道車両用主電動機の開発・設計に従事。



登山 昭彦

1983年入社。現在、交通事業部交通技術部に所属し主に車両システムの技術とりまとめに従事。