

財団法人鉄道総合技術研究所向け LH02形架線ハイブリッド LRV 用電機品

Electric Equipments of Type LH02 LRV with trolley and battery hybrid for Railway Technical Research Institute

Railway Technical Research Institute has developed type LH02 LRV(Light Rail Vehicle) which can drive in the line area without overhead wire using the trolley and battery hybrid technology under the consignment contract with NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization).

The type LH02 has a passenger compartment with the capacity of 44 persons, and a main circuit operated by DC 600V overhead wire, DC 1500V overhead wire and DC 600V battery mounted in the vehicle. The type LH02 LRV can be drove at a maximum speed of 70km/h.

TOYO DENKI SEIZO K.K. has delivered the converter unit, inverter unit, filter reactor, high-speed power circuit breaker, and traction motor for the type LH02 LRV.

This paper gives an explanation of trolley and battery hybrid type main circuit of the type LH02 vehicle, and introduces principle electric components for the main circuit.

村島 稔 松本 哲也
Minoru Murashima Tetsuya Matsumoto

1. まえがき

財団法人鉄道総合技術研究所は、独立行政法人 NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）との委託契約に基づき、架線ハイブリッド技術により架線のない線区でも走行可能な LRV 車両 LH02形を製作した。

財団法人鉄道総合技術研究所は、旧型路面電車の車内にリチウムイオン二次電池と主回路制御装置を搭載した架線ハイブリッド方式実証用の電車を2005年2月に公開しているが、今回製作した LH02形はさらに進んで、架線ハイブリッド方式の実用化試験電車となっている。従来は客室内に設置されていた主回路装置や蓄電池はすべて客室外に取付けられ、定員44人の客室スペースが確保されている。また、軌道線と鉄道線の直通運転も考慮して主回路は直流600V 架線、直流1500V 架線、及び車両に搭載された直流600V 蓄電池の各電源に対応し、走り装置は最高速度70km/h の運転を可能にしている。さらに、架線ハイブリッド主回路システムの運転は、すべて運転台に設けられたスイッチによる指令に基づいて行われる。

当社では、このLH02形用に主回路用電機品としてコンバータ装置、インバータ装置、高速度遮断器、フィルタリアクトル、主電動機、パンタグラフ、主回路ヒューズ箱、接地スイッチ箱、及び駆動装置を、運転台用機器として主幹制御器、速度計装置、走行検出器、及び車室モニタ装置を納入した。

本稿では、LH02形の架線ハイブリッド方式主回路の概要を解説し、主な主回路用電機品を紹介する。



図1 LH02形架線ハイブリッド LRV
Fig.1 Type LH02 LRV vehicle

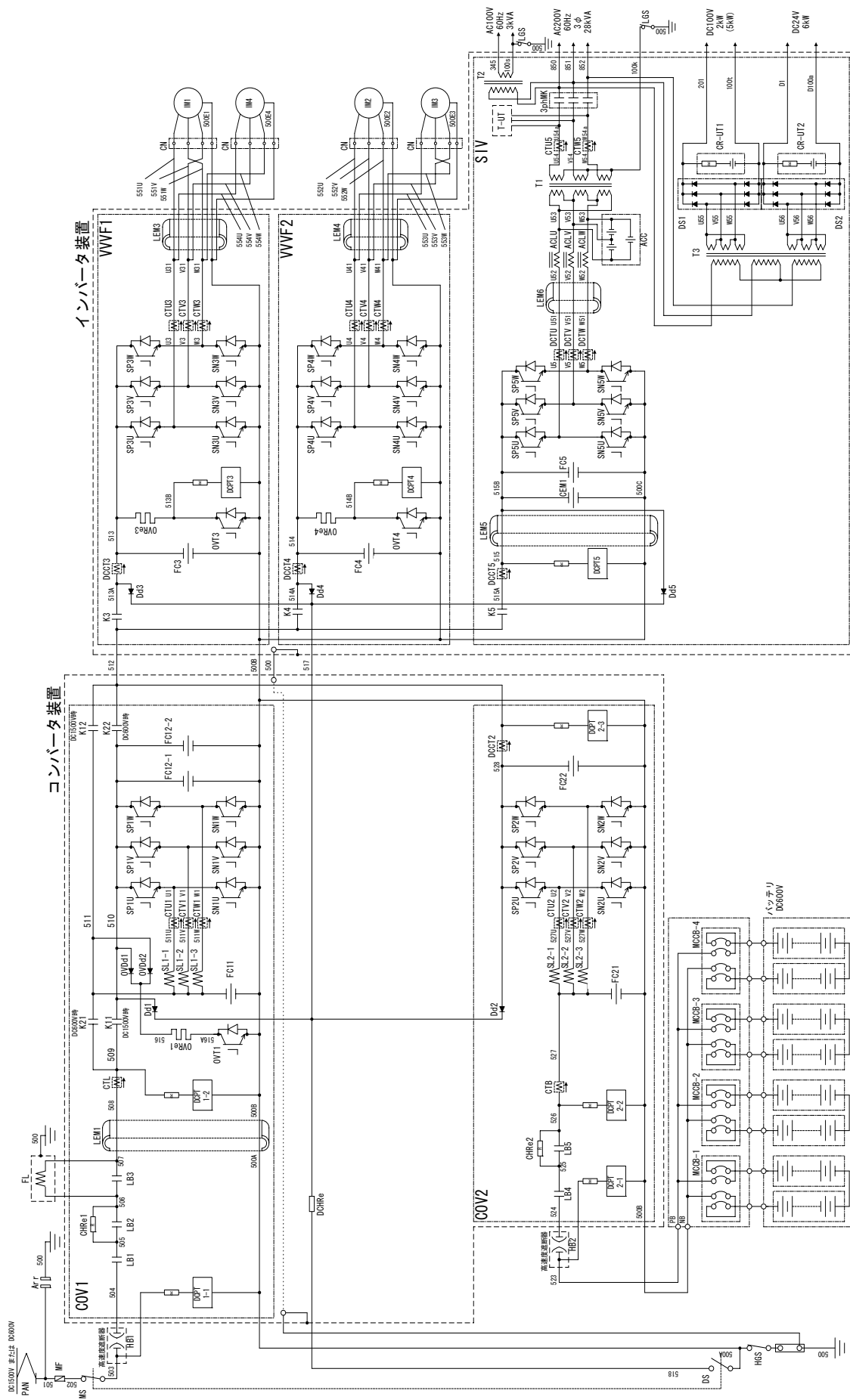


図2 主回路接続

Fig.2 Main circuit connection diagram

2. 車両諸元

図1にLH02形架線ハイブリッドLRVの外観を示す。

LH02形は単車方式で国内最小クラスの超低床形路面電車である。軌道線のほかに鉄道線の運転も想定して一体輪軸の台車が採用されているため、車体は前後の台車間の客室部分を低床とした部分低床式で、主電動機以外の主回路装置はすべて屋根上にぎ装されている。リチウムイオン二次電池モジュール84個で構成された蓄電池は、車内の運転台周辺に分散して収納されている。

LH02形の車両諸元を表1に示す。

表1 車両主要諸元
Table 1 Major features of vehicle

項目	仕様
形式	LH02
車両質量	24.0ton
定員(座席定員)	44人(20人)
車体	長さ12900mm×幅2230mm×高さ3800mm 低床部高さ350mm(レール面上)
台車	FS601型
軌間	1067mm
電気方式	架空電車線 DC1500V, DC600V 車載蓄電池 DC600V
主電動機	三相かご形誘導電動機 75kW×4台
駆動方式	中実軸平行カルダン式 TD継手
制御方式	昇降圧チョップパ+三相PWMインバータ
制御電圧	DC24V
主電動機制御	VVVFインバータによる可変速駆動 1C2M×2群
補助電源装置	CVCFインバータ 三相AC200V 40kVA
ブレーキ方式	回生蓄電併用電気指令式空気ブレーキ
車載蓄電池	リチウムイオン二次電池 DC600V-30Ah×4群
歯数比	72/11=6.545
最高運転速度	40km/h(軌道線), 70km/h(鉄道線)
加速度	4.0km/h/s
減速度	4.4km/h/s(常用最大), 5.0km/h/s(非常)

3. 主回路の構成と動作

3.1 主回路の構成

図2にLH02形の主回路接続図を示す。

架線と蓄電池の電力はコンバータ装置へ入力され、インバータ装置は主電動機と各種電圧の補機へ電力を出力する。インバータ装置とコンバータ装置間は直流750V回路でリンクしている。コンバータ装置には架線とリンク間の電圧変換器(COV1)と、蓄電池とリンク間の電圧変換器(COV2)が内蔵され、いずれも電流可逆形昇降圧チョップ装置として動作する。インバータ装置には主電動機駆動用の三相VVVFインバータ(VVVF1・VVVF2)と、補助電源用の三相CVCFインバータ(SIV)が内蔵されている。

3.2 主回路の動作

主回路の動作モードは、

- ①600Vハイブリッドモード
- ②1500Vハイブリッドモード
- ③バッテリーモード

の3種類があり、運転台からの指令によって切換えられる。以下に各モードの動作を、コンバータ装置を中心に説明する。

3.2.1 600Vハイブリッドモードでの動作

600Vハイブリッドモードの主回路簡略接続を図3に示す。

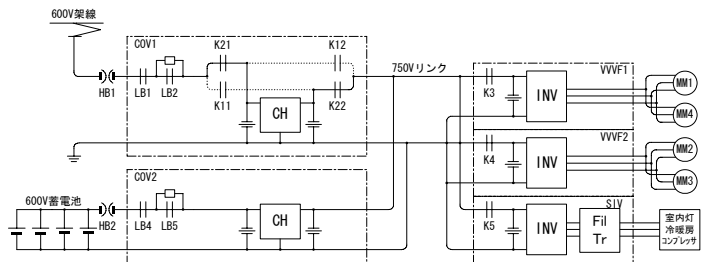


図3 600Vハイブリッドモード主回路

Fig.3 Main circuit in 600V-Hybrid mode

600Vハイブリッドモードでは、K21・K22接触器が投入されて、COV1のチョップパは架線からリンクへの昇圧チョップ回路を構成する。VVVF1・VVVF2・SIVの各入口にあるK3～K5は、故障時に回路を開放するための接触器で、平常時は投入されている。主回路は運転台からのシステム起動指令によって起動し、まずCOV2がLB4・LB5断流器を投入してチョップ運転を開始してリンク電圧を出力し、次にCOV1がLB1・LB2断流器を投入してチョップ運転を開始する。その後はCOV1が主、COV2が補助となるバッテリーアシスト方式のハイブリッド運転となる。COV2が先に起動することで、いずれかの理由によりCOV1が起動しない場合でもリンク電圧は遅れることなく出力され、SIVが起動する。このため、ハイブリッドモード・バッテリーモードにかかわらずシステム起動指令から一定の時間で、室内灯、冷暖房、ブレーキ装置用空気圧縮機等の補機類が動作可能となる。また、COV2が起動しない場合はシステム起動指令入から一定時間経過後にCOV1が起動するシーケンスとしている。このため、蓄電池を開放することで通常の600V架線の電車としての運転も可能となっている。

ハイブリッドモードでの車両の力行運転時のパワーフローを図4に、回生運転時のパワーフローを図5に示す。力行運転時は、蓄電池電力は架線電力の不足分を補足する。回生運転時は、主電動機の発電電力は主にSIVへ供給されるか、または架線へ回生される。蓄電池へ充電・吸収される電力は、回生負荷が軽く、架線へ回生できない電力分が充電される。また、発電電力が低下してSIVへの供給電力が不足する場合も、架線からの電力が補足される。

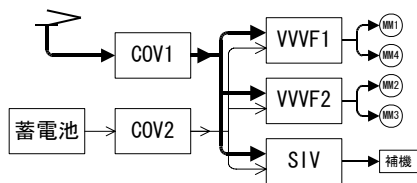


図4 力行運転時のパワーフロー
Fig.4 Flow of Electric power (Powering)

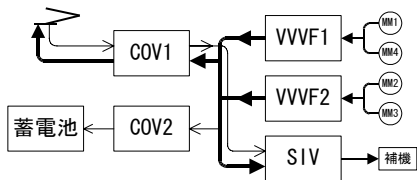


図5 回生運転時のパワーフロー
Fig.5 Flow of Electric power (Braking)

ハイブリッドモードでは、このほかに架線の電力によって蓄電池を充電する動作が2種類ある。一つは、停車中に運転台からの指令にしたがって、最大1000Aの大電流により短時間で蓄電池を充電する急速充電である。この場合はパンタグラフの集電電流が非常に大きくなるため、VVVF1とVVVF2を動作させない。もう一つは、車両の運転状態に関係なく蓄電池電圧の低下を検知して小電流による補充電を自動で行う調整充電である。急速充電時のパワーフローを図6に、調整充電時のパワーフローを図7に示す。

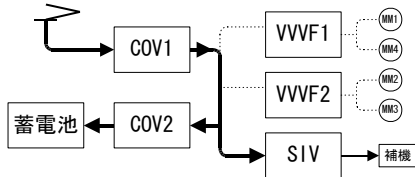


図6 急速充電時のパワーフロー
Fig.6 Flow of Electric power (Quick Charging)

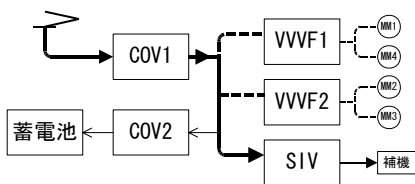


図7 調整充電時のパワーフロー
Fig.7 Flow of Electric power (Slow Charging)

3.2.2 1500Vハイブリッドモードでの動作

1500Vハイブリッドモードでは、K21・K22に代わってK11・K12接触器が投入されて、COV1のチョップは架線からリンクへの降圧チョップ回路となる以外は、600Vハイブリッドモードと同じ動作となる。1500Vハイブリッドモードの主回路簡略接続を図8に示す。

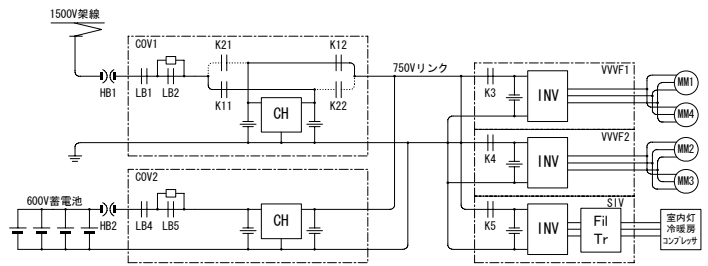


図8 1500Vハイブリッドモード主回路
Fig.8 Main circuit in 1500V-Hybrid mode

3.2.3 バッテリーモードでの動作

バッテリーモードの主回路簡略接続を図9に示す。

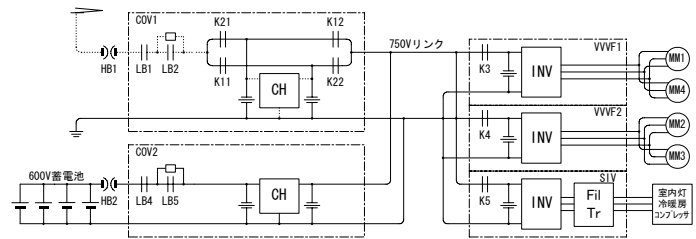


図9 バッテリーモード主回路
Fig.9 Main circuit in Battery mode

バッテリーモードではLB1・LB2断流器を開放して主回路を架線から切り離すと共にK11～K22接触器をすべて投入する。これによりK11～K22接触器の主接点はすべてリンク電圧に保たれ、ハイブリッドモードへの切換えで接触器を開放する時に電流を遮断しない。この仕組みにより、K11～K22接触器には電流遮断能力を持たない電磁開放器の使用を可能としている。

バッテリーモードでの力行運転時のパワーフローを図10に、回生運転時のパワーフローを図11に示す。バッテリーモードではすべての電力が蓄電池が供給し、VVVF1・VVVF2の回生電力はSIVと蓄電池が吸収する。しかし、蓄電池の充電状態により回生電力を完全に吸収できない場合があるため、VVVF1・VVVF2には軽負荷回生電力制限機能を持たせている。

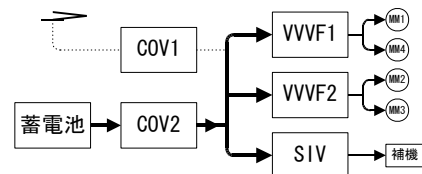


図10 力行運転時のパワーフロー
Fig.10 Flow of Electric power (Powering)

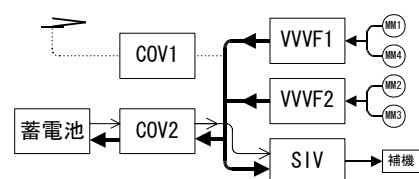


図11 回生運転時のパワーフロー
Fig.11 Flow of Electric power (Braking)

4. 主な主回路用電機品

4.1 コンバータ装置 (RG6003-A-M)

コンバータ装置は、屋根上ぎ装形の外箱にチョップユニット、チョップ用平滑リアクトル、断流器、主回路用接触器、フィルタコンデンサ及び制御アンプ等の制御機器を収納した装置である。小型の路面電車の屋根上にぎ装されるため、チョップユニットや平滑リアクトル等の発熱機器はコンバータ装置に内蔵したファンモータによる強制風冷式として小型化する、主回路用接触器は制御シーケンスにより電流遮断を不要として電磁開放器を使用するなどにより、コンバータ装置の小型化と保守の軽減を図っている。また、断流器はアークレス方式として、コンバータ装置と車体間の絶縁を不要としている。ただし、架線事故時の安全確保などの観点から、コンバータ装置は車体ぎ装後に絶縁塗装が施されている。コンバータ装置の外観を図12に示す。



図12 コンバータ装置外観
Fig.12 Converter Equipment

コンバータ装置の中心となるチョップユニットは三相インバータユニットと同じ構造で、強制風冷式のアルミ製ヒートシンクに高耐圧IGBT6個とゲートドライブ用プリント基板を組立てた構造となっている。また、コンバータ装置内の配線の制約を少なくするため、制御ユニットからのゲート信号伝送は光ケーブルを使用しない電気ゲート方式としている。チョップユニットの仕様を表2に示す。

表2 チョップユニット仕様
Table 2 Specification of chopper unit

回路方式	直流チョップ 3並列
素子	IGBT 3300V 1200A
制御方式	電流可逆式昇降圧チョップ
チョップ周波数	700Hz 固定 可変幅パルス
入出力電圧	DC360V~1850V
定格電流	1200A
冷却方式	強制風冷
ゲート制御電圧	AC38V 25kHz
ゲート指令方式	20mA 電流ループ伝送

4.2 インバータ装置 (RG6002-A-M)

インバータ装置は、屋根上ぎ装形の外箱に2台の主電動機制御用インバータユニット、補助電源用インバータユニット、補助電源用変圧器とリアクトル、補助整流器、主回路用接触器、フィルタコンデンサ及び制御アンプ等の制御機器を収納した装置で、コンバータ装置と同様の考え方で装置の小型化と保守の軽減を図っている。また、インバータ装置も車体への絶縁取付けは行わず、ぎ装後に絶縁塗装が施されている。インバータ装置の外観を図13に示す。

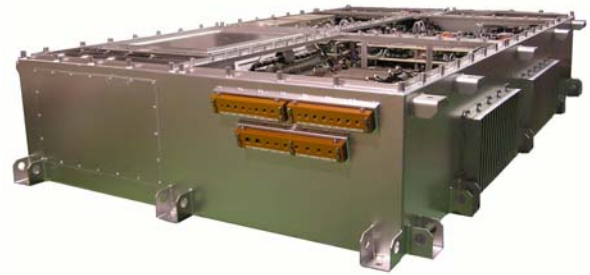


図13 インバータ装置外観
Fig.13 Inverter equipment

インバータユニットは、素子にIGBTを使用した三相インバータで、チョップユニットと同様に強制風冷、電気ゲート方式となっている。主電動機制御用インバータユニットの仕様を表3に、補助電源用インバータユニットの仕様を表4に示す。

表3 主電動機制御用インバータユニット仕様
Table 3 Specification of inverter unit for traction control

回路方式	三相2レベル電圧型PWMインバータ
素子構成	IGBT 1700V 800A 1S1P6A
制御方式	VVVF 速度センサレスベクトル制御
キャリア周波数	1050Hz (非同期モード)
入出力電圧	DC600V~900V
定格電流	250A
冷却方式	強制風冷
ゲート制御電圧	AC38V 25kHz
ゲート指令方式	20mA 電流ループ伝送

表4 補助電源用インバータユニット仕様
Table 4 Specification of inverter unit for auxiliary power supply

回路方式	三相2レベル電圧型PWMインバータ
素子	IGBT 1700V 600A 1S1P6A
制御方式	CVC出力 AC200V 60Hz
キャリア周波数	1620Hz
入出力電圧	DC600V~900V
定格電流	115A
冷却方式	強制風冷
ゲート制御電圧	AC38V 25kHz
ゲート指令方式	20mA 電流ループ伝送

4.3 高速度遮断器箱 (SA401-M/M1-M)

本体はデアイオングリッド消弧式のアークレス遮断を行う電磁制御式の高速度遮断器で、屋根上装用の機器枠に取付けられた樹脂製のアークカバーに内蔵されている。高速度遮断器の定格電圧は1500V、定格電流は800Aで、電磁コイルの制御電圧はDC24Vである。架線側HB1と蓄電池側HB2の2台が搭載されている。高速度遮断器箱の外観を図14に示す。



図14 高速度遮断器箱外観
Fig.14 High speed breaker

4.4 フィルタリアクトル (L3038-A)

インダクタンス5mH、定格電圧1500V、定格電流225Aの空芯リアクトルが、屋根上取付け形の外箱に収納されている。冷却はファンモータによる強制風冷で、コイル電流が流れないバッテリーモード時はファンモータを停止する制御を行う。フィルタリアクトルの外観を図15に示す。



図15 フィルタリアクトル外観
Fig.15 Filter reactor

4.5 主電動機 (TDK6253-A)

主電動機は小型・軽量の自己通風型の三相かご形誘導電動機で、1時間定格は75kWである。ストレーナは通気抵抗が少なく塵埃の分離効率が高い遠心分離式のクリーンストレーナを、回転子軸受けは電食防止用に絶縁ベアリングを採用して

いる。主電動機制御は速度センサレスベクトル制御であるが、車両性能測定用の速度センサとして無電源ダブルパルスセンサを取付けている。主電動機の仕様を表5に示す。

表5 主電動機仕様

Table 5 Specification of traction motor

方 式	三相かご形誘導電動機
定 格	1時間
出 力	75kW
電 圧	550V
電 流	106A
周 波 数	55Hz
回 転 速 度	1615min ⁻¹
速 度 セ ン サ	無電源ダブルパルスセンサ

5. むすび

以上、LH02形架線ハイブリッドLRV用主回路と主回路電機品について解説した。LH02形は2007年11月から札幌市交通局の営業線で、寒冷地での冬季耐久試験を兼ねた各種試験を行っている。今後、LH02形がその性能を十分に発揮し、日本各地の路線での走行により、架線ハイブリッド車両実用化に向けての有用なデータが得られることを期待している。

最後に、LH02形用の主回路機器を始めとした多くの電機品の完成に多大なご指導を賜った財団法人鉄道総合技術研究所、ご協力頂いた関係メーカ各位に厚くお礼を申し上げる。

参考文献

- (1) 小笠, 田口, 前橋, 門脇, 末包:「架線ハイブリッド(架線レス)LRVの新車概要と車両性能」第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007), 2007年12月, S4-4, pp.119-122

執筆者略歴



村島 稔

1980年入社。相模工場技術部、鉄道設計部等を経て、現在交通事業部交通工場制御設計グループに所属。電気学会会員。



松本 哲也

1992年入社。相模工場車両システム部にて鉄道車両用制御装置の設計に従事。現在、本社交通事業部交通技術グループに所属。