

# 複電圧架線ハイブリッド型の電力変換回路と制御法の開発

小笠 正道\* 田口 義晃\*

## Development of a Dual Voltage Contact-wire/Battery Hybrid Power Conversion Circuit and Control Sequence

Masamichi OGASA Yoshiaki TAGUCHI

As a dual voltage contact-wire/battery hybrid power conversion circuit which enables a through operation of vehicles between three types of power supply section, namely d.c.1500 V electrified, d.c.600 V electrified, and non-electrified sections, the authors have developed a new type of PWM converter-chopper/inverter that has an intermediate circuit. By handling the supply mode select switch of the driving panel and turning on/off the battery breakers, five running modes of power supplies are available: only the contact-wire of the voltage of 1500 V or 600V, only the battery of the voltage of 600 V, and hybrid sources from the contact-wire of 1500 V or 600 V simultaneously from the battery of the voltage of 600 V. We report on the dual voltage hybrid traction circuit and control sequence as well as the running test results.

キーワード：電車、架線、蓄電、ハイブリッド、複電圧、パワーフロー、リチウムイオン二次電池

### 1. はじめに

架線集電と車載蓄電による電源ハイブリッド型電車は、ブレーキ時の回生エネルギーを有効再利用して省エネ化が可能であり、車載蓄電媒体のパワーやエネルギー量次第で無架線区間での架線レス走行が可能な電車である。

筆者らは、2004年度にインバータと並列に電流可逆チョップと蓄電バッテリーを配置した架線・バッテリーハイブリッド主回路構成と制御法を開発した。車両試験台における直流1500V対応インバータと直流1500V対応充放電チョップ装置による速度100km/hからの力行回生試験や、所内試験線における直流750V対応インバータを中古路面電車に搭載しての直流750V架線での速度45km/hからの架線ハイブリッド走行試験を行ってきた。また、2006年には直流750V剛体架線からの停車中のバッテリー急速充電を実施、2007年には中古路面電車による直流1500V架線での速度45km/hからの架線ハイブリッド走行試験を行い、制御手法を蓄積してきた。

今回、直流1500V、直流600V、非電化の3種類の電源区間への相互直通を可能にする複電圧架線ハイブリッド型の電力変換回路として、中間回路を有するコンバータPWMチョップ/インバータ方式を開発した。運転台の電源モード切替えスイッチとバッテリー遮断器投入により、1500V架線のみ、600V架線のみ、600Vバッテリーのみ、1500V架線と600Vバッテリーのハイブリッド、

600V架線と600Vバッテリーのハイブリッドの5つの電源モードでの走行が可能である。本稿では、主回路と制御シーケンスについてその設計思想と合わせて報告する。また、走行試験結果についても例示する。

### 2. 架線・バッテリーハイブリッド電車

#### 2.1 架線・バッテリーハイブリッド走行の意義

架線区間における架線集電と車載蓄電とのハイブリッド走行を行なう利点は以下のとおりである。

(1)環境面： 回生負荷に起因する回生失効や回生絞込みを低減し、架線へ返せない回生エネルギーを車載バッテリーに蓄電して再利用することで、エネルギーの有効活用による省エネルギー化が図られる。摩擦ブレーキ使用割合の減少による摩耗粉塵や、不快なきしり音を低減できる。

(2)サービス面・運用面： 回生失効や回生絞込みの低減により、回生ブレーキの信頼性が向上する。摩擦ブレーキ使用割合の減少で、ブレーキシュー（制輪子）交換頻度低減や、車輪熱亀裂、凹摩耗の抑制に役立つ。

また、き電抵抗とパンタ点上限電圧制限による架線授受可能パワーを超える電気パワーを車両駆動系にもたせることが可能である。この場合、高速域での電氣的パワーを増大し、増大パワー分を車載バッテリーで負担することにより、消費エネルギー増加を抑えながら加速アシストによる時分短縮に寄与できる。例えば曲線での減速再加速を頻繁に行なう電車

\* 車両制御技術研究部（駆動制御）

特集：車両技術

において高速域における高加速化や、ブレーキ時には、高速から停止までの回生ブレーキ分担率向上を実現できる。

あるいは、車両駆動パワーを現行と同じとする場合には、車載バッテリーの負担する分だけ架線との授受パワーを低減でき、変電所のピークパワーカットによる契約電気料金の低減につながる。

地上設備の増強を行わずに架線電圧低下を防止することも可能である。

さらに、架線停電など非常時には、自車バッテリーでの自力移動による旅客閉じ込め防止に役立つ。

- (3) 建設・保守面： 電気エネルギーで一元化されており、同じハイブリッドでもエンジン方式や燃料電池方式と異なり、液体燃料（軽油）や気体燃料（水素）を扱わないので保守が容易である。パンタグラフ上昇によって架線からの充電が容易であり、蓄電残量調整によるエネルギー管理を行い易い。将来的には、電気バス・電気トラックなどとの充電所兼用も想定できる。

2.2 架線・バッテリーハイブリッド LRV の性能設計

2007年9月に落成した LH02 型 LRV<sup>1)</sup> (図1) の速度-引張力特性を力行時(図2)と回生時(図3)について示す。ハイブリッドモード・パワーセーブ時およびバッテリーモード力行時は、定トルク加速域は同じで、最大パワーが半分となっている。最高速度 80km/h での走行が可能である。

ハイブリッドモード・フルパワー時の走行では、速度約 40km/h まで定トルク域を設定しており、路面上の併用軌道を走行する際は法定最高速度の 40km/h から停止まで回生ブレーキのみで負担可能である。

性能設計上、架線・バッテリーハイブリッドモード時および純架線モード時にはフルパワー(約 400kW)での力行、回生を可能とし、バッテリーモードでは力行パワーを半減(約 200kW)するパワーセーブモードとした。これはバッテリーのみでの走行時に電流負担を必要以上に大きくしないための措置であるが、設定変更によりフ



図1 架線・バッテリーハイブリッド LRV

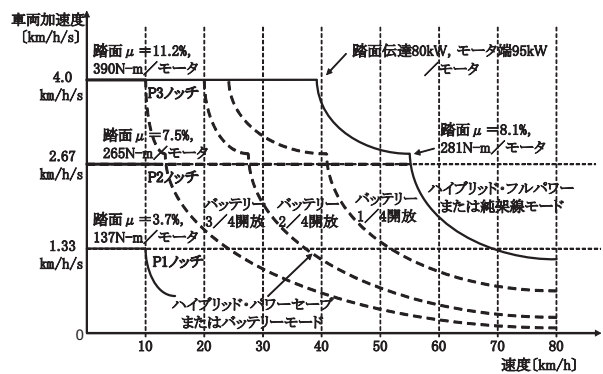


図2 速度-引張力特性(力行)

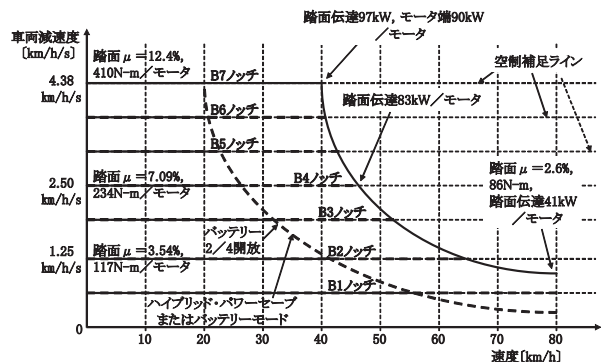


図3 速度-引張力特性(回生)

ルパワーでのバッテリー走行も可能である。

3. 主回路構成と動作モードごとの制御シーケンス<sup>2)</sup>

図4に主回路主要部の構成を示す。

3.1 主回路の構成

架線からパンタグラフを介して得られる集電電力と車載リチウムイオンバッテリーからの充放電電力は、各々高速度遮断器とコンバータ装置を通して直流中間回路に供給される。架線側チョップ Cov1 とバッテリー側チョップ Cov2 の2系統の出力が中間回路入力段で接続されている。

負荷側は、中間回路出力段に第1群インバータ Inv1、第2群インバータ Inv2、補助電源装置 SIV が並列に配置され、まとめてインバータ装置となっている。

中間回路電圧は直流 750V 基準に制御され、負荷側機器は全て低圧対応である。インバータ装置各群は2台の 75kW 誘導主電動機を駆動し、車両全体として全4軸が電動軸となっている。

さらに、主蓄電池は公称電圧 28.8V、公称容量 30Ah のマンガン系リチウムイオンバッテリーモジュールを 21 直列したものを 4 群並列化し、群ごとに配線用遮断器 (MCCB: Molded Case Circuit Breaker) を装備している。これによりバッテリー全体として公称電圧 605V、公称容量 120Ah (公称 72kWh) を構成した。

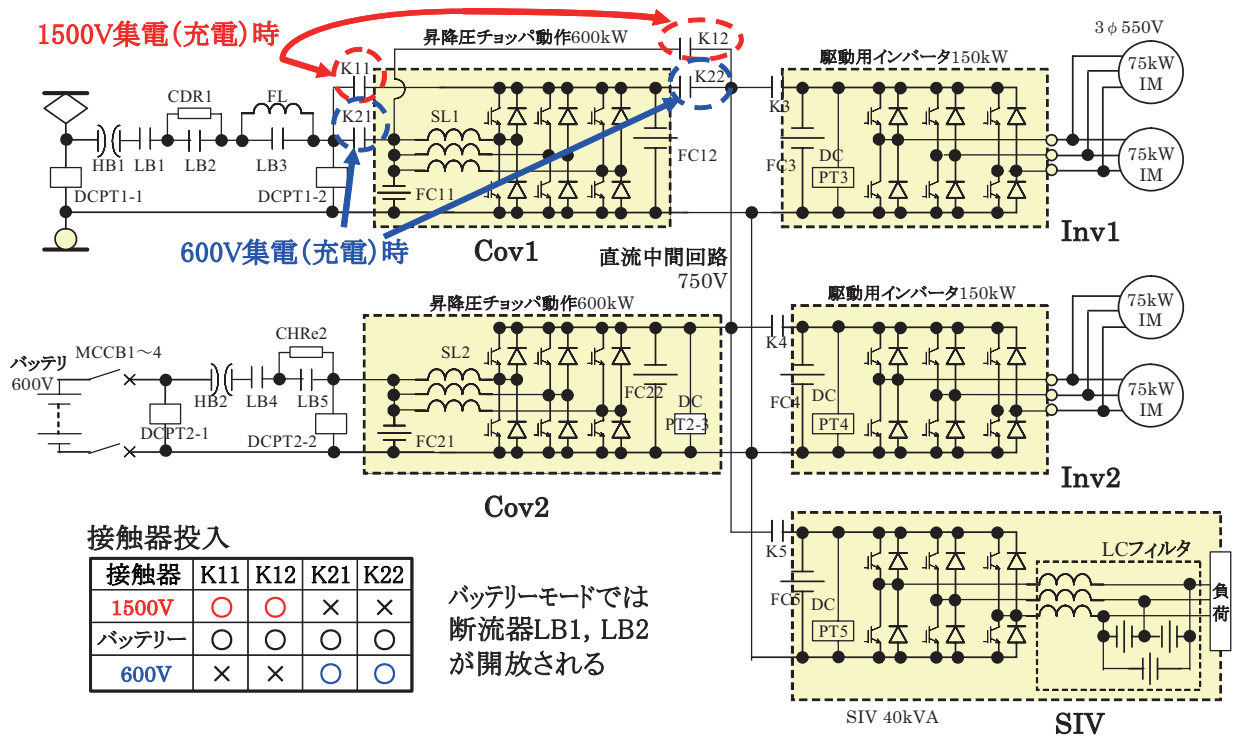


図4 主回路主要部

コンバータ装置の箱内には、直流1500Vまたは600V架線の電圧を中間回路電圧750Vに変換するCov1（公称600kW）と、直流バッテリー（公称電圧600V）の電圧を中間回路電圧750Vに変換するCov2（公称600kW）が主として収められている。またそれ以外にも、架線電圧に応じてCov1の入出力を逆転させる接触器K11, K12, K21, K22および各チョッパ入力段のフィルリアクトルFL, 出力段の平滑リアクトルSL1-1～SL1-3, SL2-1～SL2-3が配置されている。

インバータ装置の箱内にはVVVFインバータユニット（約240kVA）が2群、補助電源装置SIV（公称40kVA）として、補助電源用CVCFインバータユニット、補助電源用変圧器T1～T3、交流フィルタACLU, ACLV, ACLW, 補助整流器DS1, 主回路用接触器K3, K4, K5, フィルタコンデンサFC3～FC5, 制御ユニットを配置してある。

### 3.2 主回路動作モード

運転台の電源モード切替えスイッチ（図5）によって、1500Vモード、バッテリーモード、600Vモードの3種類の回路構成が可能である。また、主バッテリーのMCCBの投入または開放により、ハイブリッドモード、純架線モードの回路構成が可能となる。

### 3.3 1500V架線ハイブリッドモード・純架線モード

#### 3.3.1 起動シーケンス

運転台の電源モード切替えスイッチを1500Vモードにすると、接触器K11, K12が投入され、Cov1は架線電圧



図5 電源モード切替えスイッチ

1500Vから中間回路電圧750Vへの降圧チョッパ回路を構成する（図6）。Inv1, Inv2, SIVの入力段にある接触器K3, K4, K5は故障時以外は常時投入されている。

次に、運転台でパンタ上昇スイッチを扱うと、パンタグラフが上昇して架線に着線する。このときパンタグラフと高速度遮断器HB1の間に設けた架線電圧検知器DCPT1-1により、架線電圧が直流1000Vから1900Vの範囲内であるかをCov1が判定する。この電圧が所定範囲内にある場合は、高速度遮断器HB1が投入可能となる。

さらに運転台のシステム起動スイッチを扱うと、主バッテリー群と高速度遮断器HB2の間に設けたバッテリー電圧検知器DCPT2-1により、Cov2がバッテリー電

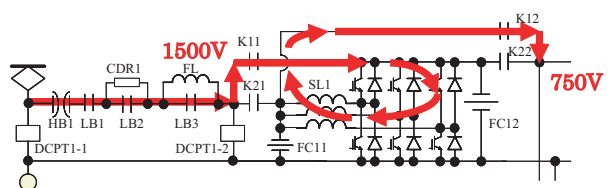


図6 1500Vモード降圧チョッパ回路

特集：車両技術

圧を認識し、454V（リチウムイオンバッテリー単セル電圧2.7Vに相当）から705V（単セル電圧4.2Vに相当）までの所定範囲内にある場合、Cov2が高速度遮断器HB2、断流器LB4、LB5を投入し、昇圧チョッパ動作を開始する。これにより中間回路に直流750Vがバッテリーから供給される。このシステム起動スイッチは、通常の電車における「パンタグラフ上昇」に相当するもので、電車の主回路を加圧するトリガとなるスイッチである。

中間回路電圧が確立されると自動的にCov1が架線側の高速度遮断器HB1と断流器LB1、LB2を投入し、Cov1が降圧チョッパ動作を開始する。この時、Cov1の出力電圧指令値はCov2の出力電圧よりも若干高い値に設定され、架線からの電力供給が優先となる。Cov1の出力不足によって中間回路電圧が低下しはじめるとCov2の出力が中間回路に供給され、Cov1をアシストする形でのハイブリッド電源供給となる。

Cov1またはCov2による中間回路電圧が確立したと判定されると、Cov1かCov2あるいは両方からInv1、Inv2、SIVに対して起動許可指令が伝達されてSIVが起動する。これにより、システム起動指令から一定時間以内に空気ブレーキ用コンプレッサ、室内灯、冷暖房など、直流24V系、直流100V系、単相100V系、三相205V系の負荷が動作可能となる。

このように通常はCov1よりもCov2が先に起動することで、架線ハイブリッドモード、バッテリーモードに関らず、主バッテリーからの電力により主回路起動を行い、直後にCov1動作によって架線優先の電力供給が行われる。一方、システム起動指令から一定時間経過後にCov1も動作するため、その間にCov2が動作開始しない場合でも所定時間以内にSIVが起動する。従って、主バッテリーの配線用遮断器MCCBを投入していてもバッテリー電圧が所定範囲を外れている場合や、4群全てを開放した場合は、純架線モードによる通常の1500V架線対応電車として運転可能である。

なお、4群のうちいくつかの群だけを開放した場合、開放数に応じた力行、回生パワー制限がかかるのみで、起動シーケンスには影響しない。

3.3.2 力行・回生時のパワーフロー

1500Vハイブリッドモードでの力行時のパワーフローを図7に、回生時のパワーフローを図8に示す。

力行時はCov1からの架線電力優先となり、不足分がCov2を介してバッテリーから供給される。

回生時は、回生パワーが優先的にSIVに供給され、続いて架線へ返還される。パンタ

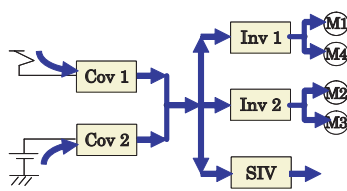


図7 ハイブリッドモード力行時のパワーフロー

に持たせた回生絞込み開始電圧に達する回生軽負荷時や、架線電流リミッタによるパンタ点電流制限により架線へ返しきれない余剰パワー分をバッテリーに回収する。

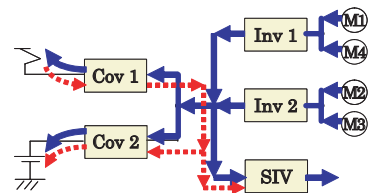


図8 ハイブリッドモード回生時のパワーフロー：赤色は低速時の

ごく低速で主電動機からの回生パワーが小さくなった場合には、SIVへの電力はCov1を介して架線から供給される。

3.3.3 調整充電時のパワーフロー

調整充電時のパワーフローを図9に示す。

車両の運転状態とは無関係に、主バッテリーの電圧低下を検知して架線から小電流による補充電を行なう制御が随時動作する。具体的には、例えば主バッテ

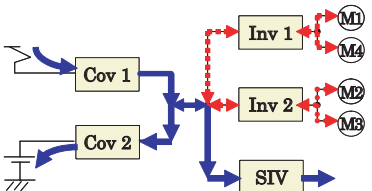


図9 調整充電時のパワーフロー：赤色は力行・回生中

リー電圧が低下してきて540Vに達した場合、620Vになるまでバッテリー充電電流50Aによる調整充電を行なう、といった制御が行なわれる。Cov2で設定するバッテリー調整充電電流の値、充電開始電圧、充電終了電圧、および調整放電用パラメータの設定を可能としてある。

なお、充電電流値よりも充電終了電圧が優先されるため、電圧が高い領域では、CC/CV（Constant Current / Constant Voltage：定電流定電圧）充電となり、充電電流値に依存する主バッテリー内部抵抗による電圧降下に依拠して電流値が徐々に絞られていく充電となる。

3.3.4 急速充電時のパワーフロー

急速充電時のパワーフローを図10に示す。

停車中に運転台の急速充電ボタンを乗務員が扱うことにより、最大充電電流1000Aによる短時間でのバッテリーへのエネルギー供給を可能とするCov1、Cov2の制御モードである。

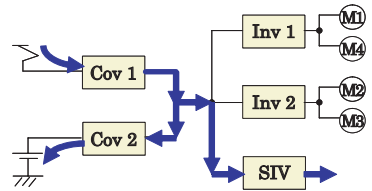


図10 急速充電時のパワーフロー

ハイブリッドモード前提で急速充電ボタンが扱われると、断流器LB3が投入されてフィルタリアクトルが短絡される。これは、急速充電によるフィルタリアクトルの熱責務が厳しくなるのを防ぐためであり、架線電流が500Aを超える場合には、剛体架線に直流電流を供給する地上側設置の整流器後段等に同等以上のインダクタン

ス値を持つリアクトルを設置することを前提としている。具体的には、直流600V剛体架線からの1000Aでの急速充電を行なう場合が該当する。直流1500V剛体架線の場合は、バッテリー電圧が600Vならば、バッテリー充電電流が1000Aの場合でも架線集電電流が400A程度と少なくなるため、1分程度の継続時間の観点からLB3は入ったままでも問題は無い。

急速充電ボタンが扱われている間は、運転台主幹制御器（マスコンハンドル）からの前進後進指令、ノッチ指令を受けてもInv1とInv2が動作しないよう、ゲート点弧禁止のインターロックをかけてある。これは1つにはパンタグラフからの集電電流を急速充電負荷と補機負荷の和以上にならないよう制限するためである。そして主たる目的は、急速充電中に電車が動き出してパンタグラフが充電用架線から外れることで大電流遮断によるパンタグラフでのアークが発生したり継続したりするのを、未然に防止することである。

アーク発生防止の目的のために、上記のインバータゲート点弧禁止以外にも、急速充電指令中はパンタグラフ降下ボタン押し下げが無効となるよう、リレーによるハード的なインターロックを施してある。

### 3.4 600V 架線ハイブリッドモード・純架線モード

運転台の電源モード切替えスイッチを600Vモードにすると、1500Vモード時の接触器K11、K12の代りに接触器K21、K22が投入され、Cov1は架線電圧600Vから中間回路電圧750Vへの昇圧チョップ回路を構成する(図11)。昇圧チョップ動作を行う以外は、1500Vハイブリッドモードの時と同じ動作である(図7、図8)。

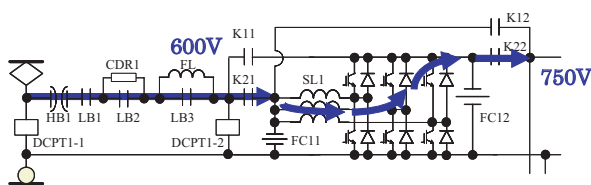
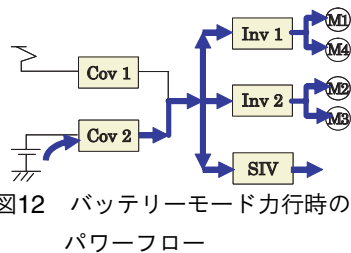


図11 600Vモード昇圧チョップ回路

### 3.5 バッテリーモード

バッテリーモードでの力行時のパワーフローを図12に、回生時のパワーフローを図13に示す。

運転台の電源モード切替えスイッチをバッテリーモードにすると、断流器LB1、LB2が開放され、Cov1のチョップ動作（ゲート点弧）が停止し、接触器K11、K12、K21、K22全てが投入される。これにより、1500Vモードと600Vモードの切替えの際に必ず



ずバッテリーモードでの接触器全投入状態を経由することになる。この動作によるメリットは下記のとおりである。

まず、接触器の接点全てがCov2に

よって作り出される中間回路の電位となることで、バッテリーモードからハイブリッドモード（1500Vまたは600V）へ移行する際に、接触器開放による電流遮断を避けることができる。そのため、電流遮断能力を持たない電磁開放型の接触器を使用することが可能となった。

また、Cov1内のコンデンサが全て中間回路電圧となり、中間回路電圧のさらなる安定化に寄与できる。

バッテリーに異常等が無い場合は、力行パワーをバッテリーのみで、回生パワーをSIV負荷とバッテリー回収で分担できる。一方、バッテリーの蓄電残量が満充電に近い場合や、バッテリー群開放時にバッテリーで受け止めるパワーに制限がかかる場合に対応できるよう、インバータの軽負荷回生絞込み制御は活かしてある。

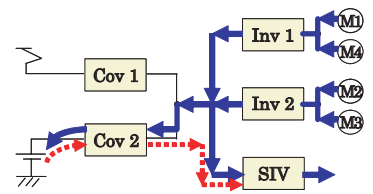


図13 バッテリーモード回生時のパワーフロー：赤色は低速時

### 3.6 パワーセーブモード

パワーセーブ切替えスイッチにより、4軸駆動ながら2軸相当分のパワーに抑制する(図2、図3)。変電所パワーが弱く、また高い加減速度を必要としない線区で使用することができる。また、パワーセーブ時には、急速充電時の電流値が半分に抑制される。

### 3.7 インバータ群開放モード

インバータ2群のうち1群を開放する、いわゆるユニットカットモードである。LH02型LRVは、1インバータ2電動機駆動分を1群として2群で構成されており、健全時は4軸駆動電車として、4軸ともに均一の駆動力、ブレーキ力が得られ、ブレーキ力のほとんどが回生ブレーキ力となる。

運転台の「第1群（第1軸と第4軸）開放」ボタンまたは「第2群（第2軸と第3軸）開放」ボタンにより、中央2軸または両端2軸の駆動車両とすることが可能である。この動作は、インバータ制御ユニットの群開放リレー励磁により行なう。なお、インバータ入力段の接触器K3とK4は、故障検知による場合のみ自動開放される。

今回の車両では空気ブレーキは全軸均等にかかるため、常用ブレーキにおいて、健全2軸と開放2軸ではブレーキ力に違いが現れる。ただ、第1軸と第4軸のブレーキ力は等しく、第2軸と第3軸のブレーキ力は等しいため、車体前後でのブレーキ力バランスには問題を生じない。

なお、非常ブレーキ時は全軸とも空気ブレーキのみの

特集：車両技術

動作となって全軸均一なブレーキ力となるので保安上の問題は無い。

3.8 バッテリー並列群開放モード

バッテリー第1～第4群のいずれかの配線用遮断器MCCBを投入せずに縮退運転する場合、あるいは保護によるMCCBトリップの場合、パワー制限がかかる。MCCB投入状態はインバータに常時伝達されており、投入数に応じた走行パワー制限や急速充電時の電流制限が行なわれる(図2, 図3)。

4. 走行試験結果

一例として、直流1500V架線ハイブリッドモードによる速度42km/hまでの所内試験線走行結果を図14に示す。

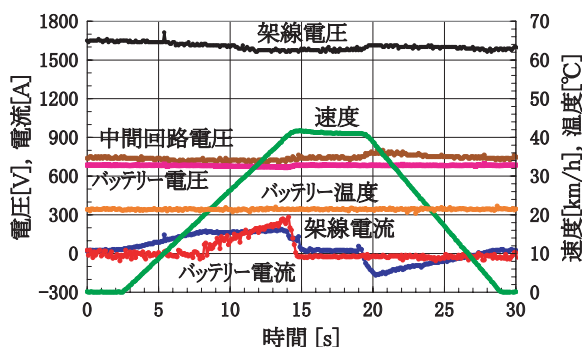


図14 架線・バッテリーハイブリッドLRVによる1500Vハイブリッドモードでの所内走行

中間回路電圧はほぼ750Vになるよう制御されている。回生時は電圧閾値の800Vに達するまでは電圧上昇を許容し、到達後はバッテリーへの回生動作を行う。

架線電流リミッタ力行時200A、回生時マイナス1200A(事実上フリー)に設定した走行であり、力行開始後5.5秒で架線からの集電電流がリミッタ値に達し、その後の5.0秒で速度42.0km/hに達するまでの間、不足パワーをバッテリーから供給してアシストしている。力行オフ直前の架線電圧1560V、架線電流190Aから架線からの最大集電パワーは296kW、バッテリー電圧670V、バッテリー電流280Aからバッテリーからの最大放電パワーは188kWであった。架線とバッテリーのパワーハイブリッド比で約8対5となった。

惰行中は、架線電流20Aが継続して補機にパワーを供給している。このときバッテリー電圧は680Vで蓄電残量は十分にあり、調整充電は入っていないため、バッテリー電流はゼロのままである。

回生時には回生負荷が十分あったため、補機供給分以外は架線に回生されている。ブレーキかけ始めの架線電圧1610V、架線電流168Aで回生パワー270kWであった。

エネルギー面からは、架線からの供給量2.88MJ、架線

への回生量1.0MJ、バッテリーからの供給量0.61MJ、バッテリーへの回生量0.2MJが得られ、電源回生率は34.4%、運動エネルギー回収率は62.9%となった。なお、電源回生率は、Cov1架線側端子とCov2バッテリー側端子におけるパワーの時間積分値の和から求めた総供給量に対する、架線およびバッテリーへの回生パワーの時間積分値の和の比率として定義しており、バッテリー調整充電による影響分を除いた値とした。

5. 結論

本論文における結論は以下のとおりである。

- (1) 直流1500Vまたは600Vの架線と直流600Vバッテリーによる複電圧架線・バッテリーハイブリッド主回路構成と制御法を開発した。電源モードごとのパワーフローと、電源モード切替えを実現するための制御シーケンスを開発した。
- (2) 主回路構成と制御を織込んだ電力変換器として、コンバータPWMチョップ装置およびインバータ装置を実現し、試験用LRV新車に搭載した。
- (3) 試験用LRVを用いた所内走行試験により、電源モードごとのパワーフロー制御を実走行で実証した。例えば、架線優先でかつ架線電流リミッタを設けたハイブリッド走行試験を実施した結果、インバータ所要パワーの不足分をバッテリーからのパワー供給でアシストするハイブリッドパワーフロー制御が実現できていることを確認した。

6. おわりに

電化区間(直流1500V, 600V)と非電化区間、鉄道線と軌道線の相互乗入れを可能とする複電圧架線・バッテリーハイブリッド電力変換技術を開発し、車両搭載の形で実現した。今後さらなる制御性向上、変換器の小型軽量化を行なっていく予定である。

当研究開発は、経済産業省からの交付金を原資として実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一環として、2005年度から2007年度までNEDO技術開発機構の委託契約に基づき実施した。

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, 鉄道技術連合シンポジウムJ-Rail'2007, S4-4, pp.119-122, 2007.12
- 2) 村島, 松本: 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, 東洋電機技法第117号, S11731, pp.18-23, 2008.03