

# 架線と車載蓄電との複電圧用ハイブリッド電車 と制御法の開発

小笠 正道\*      田口 義晃\*  
末包 洋士\*      門脇 悟志\*

## Development of a Hybrid Electric Vehicle with the Power Supply from Dual Voltage Trolley and On-board Battery and Its Power Flow Control

Masamichi OGASA      Yoshiaki TAGUCHI  
Hiroshi SUEKANE      Satoshi KADOWAKI

Hybrid electric vehicle (or Hybrid Electric Multiple Units) can be defined as railway electric vehicles (EMU) fed by both contact feeder line (trolley) and on-board electric energy storage device. This type of vehicle runs with good energy re-cycling characteristics in electrified lines, and is able to run into non-electrified lines also. In Japan, there are two kinds of trolley voltage of direct current -“High voltage” of d.c.1500V, and “Low voltage” of d.c.600V or d.c.750V. From the view point of interoperability into the sections of two kinds of trolley voltage, we’ve developed a hybrid electric vehicle with the power supply from dual voltage trolley and on-board battery. In this paper, we report on the study results of the dual voltage hybrid traction circuit and control algorithm 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ハイブリッド電源型電車は、回生失効防止時の蓄電再利用により省エネ化が見込め、また車載蓄電媒体のパワーやエネルギー容量次第では電化区間と比較的短距離の非電化区間を直通乗入運用することが可能な鉄道車両である。筆者らは、現在までに直流750V架線と600V車載リチウムイオン二次電池による架線ハイブリッド主回路と制御の開発を行ない、走行試験による架線ハイブリッド技術の実証を行ってきた<sup>1)</sup>。

ところで、国内の都市鉄道の架線電圧には、直流600V、750Vの低圧系（以下600V系と称する）と、同1500Vの高圧系の2種類がある。600V系インバータは耐圧面で1500V印加が不可能なため、直流600V系インバータ搭載車両が直流1500V架線区間に乗入れるためには、何らかの対策が必要となる。

そこで複電圧用架線ハイブリッド駆動技術の開発へ向けての前段開発として、1500V架線電圧を600Vに降圧し、中間回路に600V系バッテリーと600V系インバータを並列接続する、変圧後並列分岐蓄電方式（中間回路にバッテリーが直接接続される方式）を開発した。

また、実際に複電圧を実現する回路方式として昇降圧後並列分岐変圧蓄電方式（中間回路にさらに変圧変換器を介してバッテリーを接続する方式）を、チョップコンバーター駆動インバータ方式によって実現した。その結果、純架線2方式（直流1500Vまたは600V架線）、架線ハイブリッド2方式（直流1500Vまたは600V架線と車載600Vバッテリー）、純バッテリー1方式（車載600Vバッテリー）による、複電圧架線ハイブリッド走行が可能となる電力変換器を実現することができた。

本論文では、回路トポロジーの構成バリエーションを整理し、開発した変圧後並列分岐（+変圧）蓄電型の複電圧架線ハイブリッド主回路と制御アルゴリズム、所内走行試験結果について報告する。

### 2. 架線ハイブリッド主回路構成のバリエーション

架線ハイブリッド構成での蓄電装置の目的は、駆動インバータの入出力パワーの一部または全部を授受することで、省エネ等種々の効用を持たせることである。そのため蓄電回路の配置は、駆動インバータの入力（直流）側か出力（可変電圧可変周波数の三相交流）側か、また並列配置か直列配置かの組合せで、4通り考えられる。

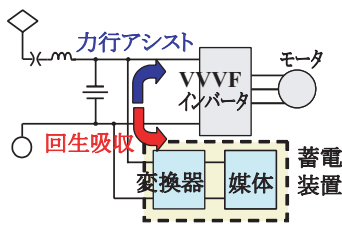
\* 車両制御技術研究部（駆動制御）

特集：車両技術

2.1 駆動インバータの入力側（直流側）に並列に蓄電回路を配置する方式

2.1.1 並列分岐後・変圧蓄電方式

回生失効や回生絞込み時に、架線へ返せなくなったパワーを並置した蓄電装置で受け止める方式の回路トポロジーである（図1）。



最もオーソドックスな構成であるが、駆動インバータの電圧耐圧

と蓄電媒体前段に配置する電力変換回路（昇降圧チョップ装置など）の電圧耐圧がほぼ同じである必要がある。例えば、直流1500V系受電の場合、駆動インバータ、蓄電制御用チョップ装置（二次電池やキャパシタの場合）、蓄電制御用インバータ（フライホイール式蓄電装置の場合）とともに、耐圧1500V系の設計とする必要がある。

具体的な回路例として、蓄電媒体に二次電池、キャパシタ、フライホイールのいずれをも用いることのできる三相三重PWMチョップ方式<sup>2)</sup>（フライホイール接続時はインバータ動作）によるものを図2に示す。蓄電媒体に種々のものを使用できる特長がある一方、蓄電媒体電圧を架線電圧よりも低い値に設定する必要がある。万が一架線電圧がゼロとなった場合は、蓄電媒体から架線側に対して制御不能電流が流出しないよう、高速度遮断器を開放する等の保護が必要となる。

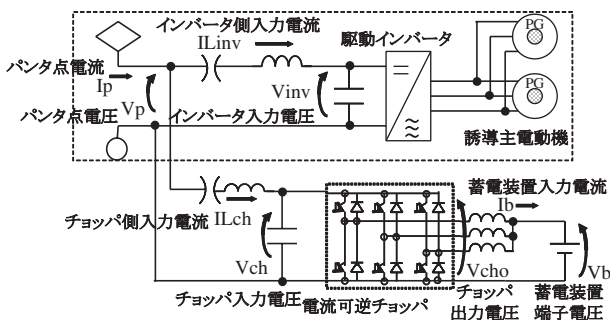


図2 三相三重チョップ並列型の主回路構成

上記の欠点を補い、リアクトルを介して2象限チョップを突合せたもの<sup>3)</sup>が図3である。この方式は、架線電圧に対する蓄電媒体の電圧が高くても低くても良く、蓄電媒体の電圧を問わないで良いことが特長である。

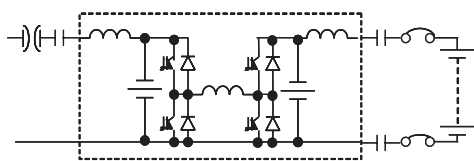


図3 2象限チョップ突合せ型蓄電部主回路例  
〔並列分岐後・変圧蓄電方式〕

2.1.2 変圧後・並列分岐蓄電方式

受電電圧と駆動インバータの電圧耐圧に差がある場合の構成で、蓄電媒体端子と駆動インバータ端子が直接接続される（図4）。

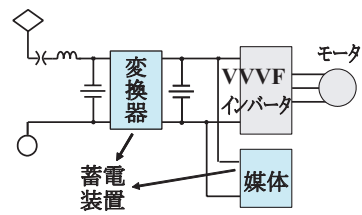


図4 直流側並列蓄電方式（2）  
〔変圧後・並列分岐蓄電方式〕

例えば、駆動インバータ、蓄電媒体がともに600V系

で、1500V架線ハイブリッド構成としたい場合にする方法となる。

蓄電媒体と駆動インバータのパワー授受量を、昇降圧変換装置後段のパワー授受で間接的に制御する。蓄電媒体には、二次電池、キャパシタや、直流電動機によるフライホイール式蓄電装置など、直流電流によるパワー授受が可能なものに限られる。交流電動機（同期電動機または誘導電動機）によるフライホイール式蓄電装置の場合は、前段にさらに蓄電制御用インバータの配置が必要となる。

2.1.3 変圧後・並列分岐変圧蓄電方式

上記2.1.1と2.1.2を組合せたトポロジーである（図5）。

具体的な回路例として、PAMによるインバータ電圧上昇方式<sup>4)</sup>が提示されている（図6）。

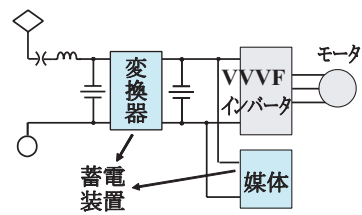


図5 直流側並列蓄電方式（3）  
〔変圧後・並列分岐変圧蓄電方式〕

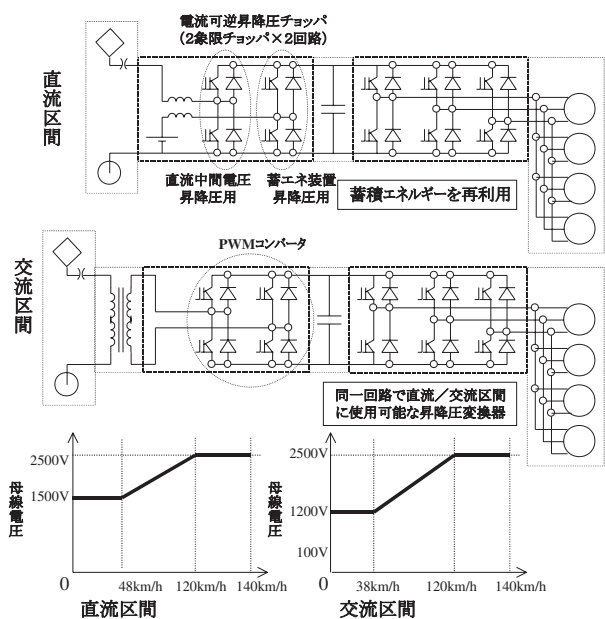


図6 PAM（Pulse Amplitude Modulation）方式による主回路構成と交直流車への適用

この方式は、中間回路電圧を低速域では架線電圧と等しくしておき、中速～高速域にかけて中間回路電圧を上昇させることで定トルク域速度範囲を増大させることにより、インバータパワーを増大させるものである。その上で、架線電圧との関係で余剰または不足となるパワー授受を車載蓄電部と行うものであるから、昇圧部と蓄電部を共に大容量とすれば、車両性能を粘着限界等が許容する最大限まで向上可能である。従って、速度-引張力特性として与えるμパターンに沿ってパワー制御が可能となる特長を持つ。

課題として、中間回路電圧は入力架線電圧よりも高くする必要のあることから、架線電圧が1500Vの場合にはインバータ等の変換器の耐圧を2000V～2400V程度まで高める必要が生じる。そのままでは変換器数やコスト面で不利であるが、交直流車両への適用を考えることで相対的な付加コストの低減も可能である。

別の回路例として、コンバータチョップ・駆動インバータ方式<sup>5)</sup>が考えられる(図7)。コンバータ側の入出力を変えて直流中間回路電圧を固定化することで複電圧化が容易となる。

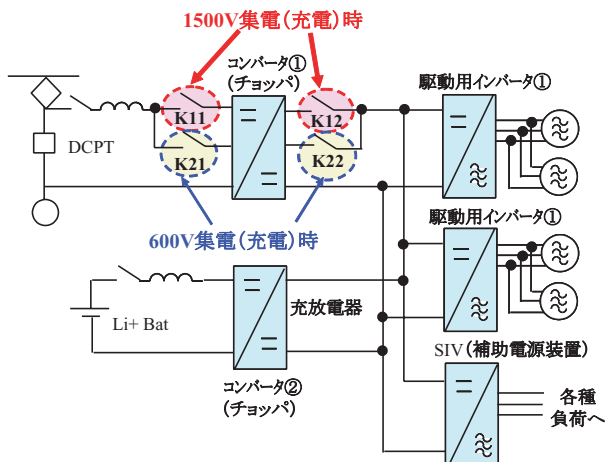


図7 コンバータ(チョップ)・インバータ方式

## 2.2 駆動インバータの入力側(直流側)に直列に蓄電回路を配置する方法

パンタグラフ後段とインバータ入力前段の間に蓄電媒体を直列に挿入する回路トポロジーである(図8)。

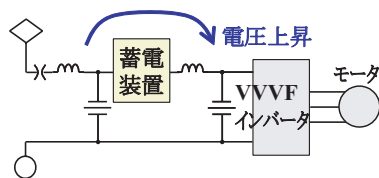


図8 直流側直列蓄電方式

蓄電装置によって架線電圧よりもインバータ入力電圧を上昇させる<sup>6)</sup>ことにより、高速域における回生ブレーキパワーならびに回生ブレーキ力を増大することで、回生回収量の増大による省エネと、力行時高速域での駆動力増大による高加速が実現できる。

## 2.3 駆動インバータの出力側(三相交流側)に並列に蓄電回路を配置する方法

駆動インバータの出力側に、別の駆動用インバータを三相接続することで、交流電動機のパワーを増大する方法である(図9)。概念と回路例<sup>7)</sup>が存在する。

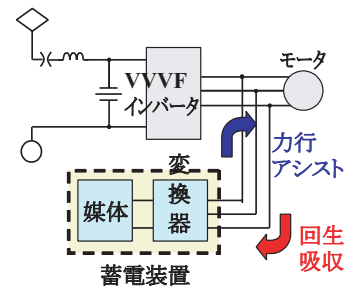


図9 交流側並列蓄電方式  
〔三相電流分流蓄電方式〕

架線へ返せないパワー分は分流側インバータにより吸収し、力行時には駆動用インバータと同一周波数および位相による供給を行なうことでパワーアシストを可能とする。省エネや高速域回生ブレーキ力増大につながる。

また、空転滑走時の再粘着制御を、分流側インバータで行なうことができ、回生絞込みによるトルク低減と再粘着制御によるトルク低減の切り分けが可能となる。

さらに、分流側インバータから高周波電流の印加も可能となることから、速度センサレス駆動時の起動、再起動を容易にすることもできる。一方、蓄電変換器の交流側で位相同期を取るなど制御が複雑化し、リアクトル設置による質量が増大する課題がある。

## 2.4 駆動インバータの出力側(三相交流側)に直列に蓄電回路を配置する方法

駆動インバータの出力側(可変電圧可変周波数三相交流側)に三相変圧器を配置し、蓄電媒体からのパワーを別のインバータで変

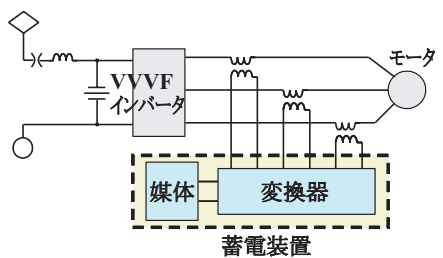


図10 交流側直列蓄電方式  
〔三相電圧加算蓄電方式〕

圧器巻線に供給することで、インバータ交流側電圧を重畳する方式である(図10)。

具体的回路例<sup>8)</sup>が提唱され、提唱者とは別グループによるミニモデル実験<sup>9)</sup>も行なわれている。高い回生失効軽減効果が見込める反面、可変周波数対応の大電流変圧器など実現上の課題が残る。

## 3. 変圧後・並列分岐蓄電方式(1500V受電走行)

### 3.1 主回路構成

600V系の電圧耐圧しか持たない駆動インバータと直

特集：車両技術

流 600V 系蓄電媒体を用いて、1500V 架線との架線ハイブリッド制御を行なう場合、対応する主回路トポロジーは図4のようになる。つまり、1500V 耐圧を持つ電圧変換器を架線側に設置する必要があり、降圧した中間回路を介して 600V 系機器を接続する必要がある。

この回路に対応する制御アルゴリズムを2種類考案した。以下、各々を説明する。

3.2 制御法①（並列分岐後・変圧蓄電方式の双対型）

バッテリーとインバータの間に変換器が介在しない主

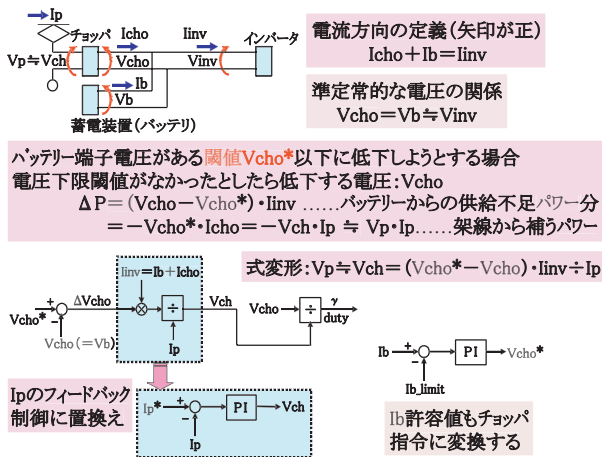


図 11 余剰パワーのチョッパ通過率への変換過程 (変圧後・並列分岐蓄電方式)

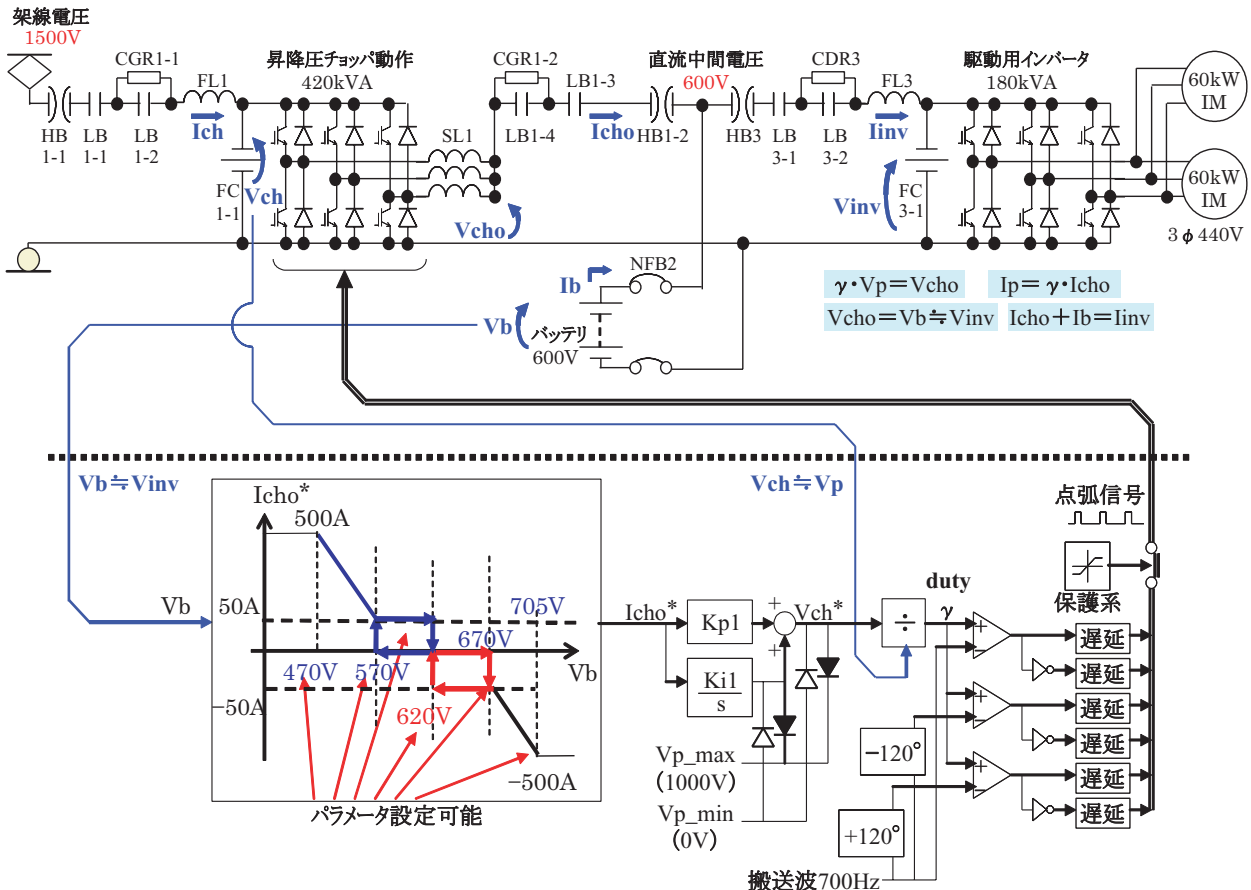


図 12 変圧後・並列分岐蓄電方式の制御ブロック図 その2 (バッテリー V-I パターン設定型)

回路構成のバッテリー車両が存在していると仮定する。いま、バッテリーからのパワーだけでは力行時に不足、または回生時に余剰となるパワー分を架線と授受するようにハイブリッド化すると考える。具体的には、力行中にバッテリー電圧が閾値より低下したら、架線から電流(パワー)を補給する。回生中にバッテリー電圧が閾値より上昇したら、架線へ電流を返す。

この考え方で余剰または不足パワーを架線側チョッパ装置の通過率指令に変換する(図11)と、既に架線ハイブリッド方式として開発済みの「並列分岐後・変圧蓄電方式制御(図2)」と双対な制御ブロック図を得ることができる。

3.3 制御法② (バッテリー V-I パターン設定型制御)

リチウムイオンバッテリーなど、バッテリー開路電圧がバッテリーエネルギー残量 (S.O.C.: State of Charge) と 1 対 1 対応の特性を示し、またメモリ効果が無いバッテリーを対象とする場合には、バッテリー残量を端子電圧で捉えることで読替えが可能となる。つまり、バッテリー端子電圧に対するバッテリー充放電電流パターン (V-I 特性) を持たせる (図 12) ことで、バッテリー残量に応じた架線とのパワー授受が可能となる。

調整すべき制御ゲインが少なく済む特長の一方で、パターンの与え方は試行錯誤的になる。

### 3.4 バッテリーV-Iパターンによる走行結果（直流1500V架線）

調整パラメータ数が少なく実現が容易なバッテリーV-Iパターン設定による走行試験を実施した。V-Iパラメータ例を図12に、架線集電ハイブリッド用機器の仕様を表1に、供試車両を図13に示す。

供試車両は、2両連結状態で空車質量和が39.4トン、全8軸のうち2軸が駆動軸で力行，回生を行う。走行試験の結果例を図14に示す。

時刻5～45秒までの力行中は、チョップ出力電流とバッテリー放電電流の和がインバータ入力電流となっている。バッテリー端子電圧が力行開始以前に570Vに達した履歴が残っているため、図12のヒステリシス曲線の50A充電の経路を通して620Vになるまでの充電がはじまっているが、走行開始とともにバッテリーからの放電電力が増加し、速度20km/hに達する直前からバッテリー端子電圧が570Vを切るようになる。

バッテリー電圧570V以下では端子電圧が低下するほ

表1 架線ハイブリッド蓄電・制御部の仕様

○エネルギー蓄積媒体：リチウムイオン二次電池（マンガン系正極活物質）	
質量	605kg（セル総和），1,160kg（架台含む）
定格電圧	604.8V（使用範囲504.0～705.6V）
充放電可能電流	±500A（定格最大パワー：300kW）
定格容量	55Ah（エネルギー118MJ）
セル公称電圧	3.6V（使用範囲3.0～4.2V）
標準内部抵抗値Rb	0.1Ω
○昇降圧チョップ装置（電圧形2レベルIGBT3相ブリッジ回路）	
制御方式	位相差120°PWM昇降圧チョップ動作（二次電池，キャパシタ等に適用）
定格入力	直流1,500V（750～1,900V），300A，450kVA
定格出力	直流600V（500～750V），250A（最大500A）
搬送波周波数	700Hz×3＝2,100Hz
制御周期	250μsec（電流制御）
入力インダクタンスLc	4.0mH
フィルタ静電容量Cc	9,800μF
出力インダクタンスLb	5.3mH（×3並列：U・V・W各相）



図13 1500V架線ハイブリッド供試車両（2両連結：空車質量39.4トン）

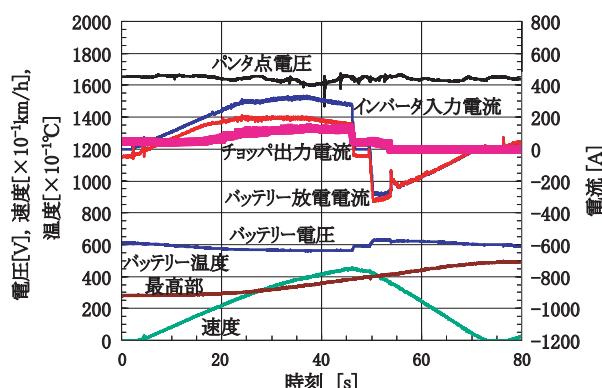


図14 1500V架線ハイブリッド走行試験結果（2両連結）〔変圧後・並列分岐蓄電（バッテリーV-Iパターン）方式〕

ど架線からの補足電流が増加する設定となっており、パワーがバランスする値の架線電流が流れる。つまりバッテリーからの出力だけでは不足（バッテリー電圧に応じた設定充電電流が増加する領域）のパワーを、1500V架線からの降圧でチョップ出力として補足している。

時刻50秒以降の回生中はほとんどの回生パワーがバッテリーに吸収されている。

中間回路電圧は、620Vに向かうように、ヒステリシスの範囲である570～670Vの範囲でゆっくり変動する。バッテリーが中間回路に直接接続されていることから、電圧は安定している。

このときのエネルギー回収効率は、対力行エネルギーに対して31.3%（回生率），対運動エネルギー（ブレーキ初速42.7km/h）に対して61.0%，2軸のみでの回生平均減速度は1.85km/h/sであった。

なお、中間回路のバッテリーを遮断した状態で試験を行ったところ、中間回路電圧値が、力行時に570Vと620Vの間を、回生時に620Vと670Vの間を各々約2Hzの周期で振動する結果となった。これは、バッテリーが直接接続されて回路電圧安定化が行なわれていた状態から、バッテリーを切離した結果、チョップ出力段とインバータ入力段のコンデンサ容量のみとなってしまったためである。蓄電優先制御となっている回路構成と制御定数の関係で、バッテリー接続が前提となる構成であることが実験結果からも明らかとなった。

## 4. 変圧後・並列分岐変圧蓄電方式（複電圧化）

### 4.1 主回路構成<sup>5)</sup>

中間回路に電力変換器を挿入して蓄電媒体と接続することで、上記課題を解決できる。架線側コンバータの入出力関係を接触器切替えによって変更可能として、架線電圧が直流1500V、600Vのいずれにも対応可能な複電圧主回路が得られた（図7，図15）。

特集：車両技術

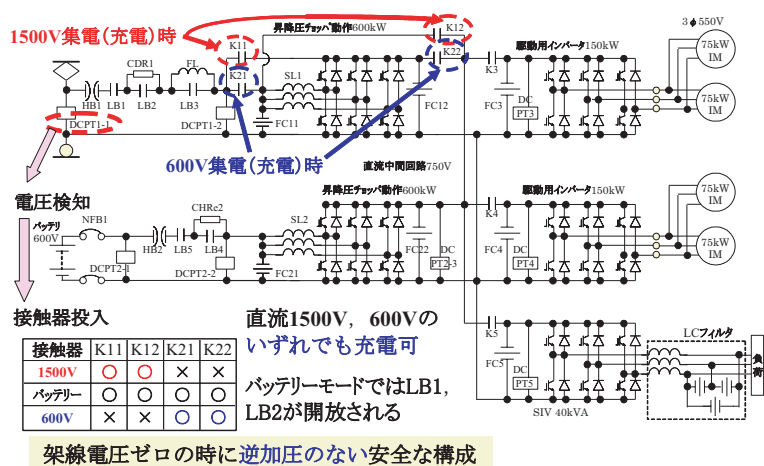


図 15 複電圧架線ハイブリッド主回路構成  
〔変圧後・並列分岐変圧蓄電方式〕

4.2 制御法<sup>5)</sup>

制御は並列分岐後・変圧蓄電方式と変圧後・並列分岐蓄電方式のものを組み合わせることで実現した。

直流架線 1500V・600V、バッテリー 600V 対応のハイブリッド構成で、無電圧架線への逆加圧を防ぐコンバータ・インバータシステムである。

コンバータは架線側チョップ Conv1 とバッテリー側チョップ Conv2 から成り、中間回路を介して負荷側に第 1 群、第 2 群のインバータ、補助電源装置を配置した。中間回路電圧は 750V 基準に制御され、負荷側機器は全て低圧対応である。

運転台のモード切替スイッチ（1500V モード、バッテリーモード、600V モードのいずれかを選択）を扱うことで、Conv1 は DCPT1-1 で検出された電圧が所定範囲内ならば、選択されたモードに該当する接触器を閉じる。例えば、1500V 架線対応（ハイブリッドを含む）時には図 15 の接触器 K11 と K12 が閉じ、Conv1 は中間回路電圧 750V まで降圧動作を行う。600V 架線対応時には K21 と K22 が閉じ、Conv1 は昇圧動作を行う。また、バッテリーモード時には架線側の断流器 L1, L2 が開放され、架線無加圧状態の時に逆加圧が起る危険をハード的に排除でき安全が確保される。

これにより、複電圧架線ハイブリッド主回路を構築できた。現在、新型 LRV 車両に適用搭載され、軌道営業線の試験走行で性能を確認中である。

5. 結論

本論文における結論は以下のとおりである。

- (1) 架線ハイブリッド蓄電回路のトポロジーについて、駆動インバータを中心にして入力側（直流側）と出力側（三相可変周波数交流側）に蓄電媒体を設置するか、また駆動インバータに対して直列と並列に蓄

電媒体を設置するかにより、4つのバリエーションがあることを示し、各々の簡単な特徴を整理した。

- (2) 直流側並列蓄電方式の 2 形態の 1 つである、変圧後・並列分岐蓄電方式について、直流 1500V 受電で 600V 系インバータを駆動できる回路と制御を開発した。制御則として、バッテリー電圧に応じた架線からの充放電電流を予めパターンとして与える方法を用いた。
- (3) 直流 1500V 架線下での実車走行試験の結果、基本はバッテリーで走行し、過不足分を直流 1500V 架線と授受しながら走行できる架線ハイブリッド車載蓄電システムを実現した。
- (4) 中間回路に接続する蓄電媒体の前段に電力変換器を挿入することで、直流 1500V、600V 受電で 600V 系インバータを駆動できる複電圧蓄電主回路が得られた。

6. おわりに

複電圧架線ハイブリッド技術により、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り入れが可能となる。電力リサイクル技術を発展させたこの技術は次世代電気車の基本技術となる可能性がある。

なお、複電圧架線ハイブリッド（架線レス）電車の開発は、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、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：バッテリー駆動架線レストラム（架線・バッテリーハイブリッド）、平成 18 年電気学会産業応用部門大会 1-O5-2, pp.107-112, 2006.8
- 2) 小笠, 田口, 上園, 丸山：架線ハイブリッド回生失効防止制御とトラム級車両での走行結果, 電気学会交通・電気鉄道研究会 TER-05-40, pp.63-68, 2005.7
- 3) 小倉, 吉田, 堤, 西村：低床電池駆動路面電車（LRV）の開発, J-Rail'2007, S4-5, pp.123-126, 2007.12
- 4) 小笠, 山本, 山下, 渡邊：電気車のエネルギーリサイクルの各種方策, J-Rail'2001, S3-2-8, p.219-222, 2001.12
- 5) 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, J-Rail'2007, S4-4, pp.119-122, 2007.12
- 6) 田口, 小笠, 秦, 平元, 真野：インバータ入力直列キャパシタ蓄電装置の基礎的検討, 電気学会研究会, TER-05-39, pp.57-62, 2005.7
- 7) 小笠, 山下, 山本, 渡邊：電流分流制御装置, 特許公報・特許第 3825647 号, 出願 2001.3, 登録 2006.7
- 8) 佐藤, 神山, 福田, 曾根, 高野：直流電気鉄道へのエネルギー蓄積素子導入の検討—高速回生能力向上及び回生失効対策を考慮した車両システムの概要設計—, 平成 18 年電気学会全国大会 5-151, pp.223-224, 2006.3
- 9) 水村, 矢野, 倉持：直流電気鉄道への電動機に直列接続された蓄電装置の検討, 平成 19 年電気学会全国大会 4-151, pp.249-250, 2007.3