

蓄電装置挿入によるインバータ入力電圧上昇方法と省エネ効果

田口 義晃* 小笠 正道*

Energy-saving Performance and the Principle of a Measure for Boosting the Input Voltage of the Traction Inverter Using the Energy Storage Equipment

Yoshiaki TAGUCHI Masamichi OGASA

Recently, the regenerative brake has been widely spread. However, it is unusual that we can obtain sufficient brake force only with the regenerative brake at a high-speed region. It is because the motor voltage and the motor current are limited. In this paper, we discuss on a new measure for increasing the motor voltage by using the energy storage equipment. The energy storage equipment is series-connected to the traction inverter. According to the simulation results, the authors could obtain satisfactory operational performance, and estimated the energy-saving performance assuming the typical running curve.

キーワード：直流電車，回生電力，インバータ入力電圧，蓄電装置，省エネ

1. はじめに

減速時にモータを発電機として動作させる電力回生ブレーキは、電気車の省エネ技術として欠かせないものとなっている。近年では、電力回生ブレーキのみで車両を停止させられる全電気停止ブレーキも普及してきた。しかし高速域においては、電力回生ブレーキだけでは十分な減速度が得られない場合がある。問題の一つは回生失効であり、この場合には電力回生ブレーキ力の定格が十分であっても、それを発揮できる機会が少ない。対策としては、蓄電媒体を搭載したハイブリッド車両¹⁾等が有効である。もう一つの問題は、車両が備える回生ブレーキ力の定格そのものの不足である。高速からの回生ブレーキ時には大電力が発生するが、モータに与えられる電圧や電流には上限があるためである。本稿では回生失効がさほど問題にならない場合か、あるいは既に対策済である場合を想定して、回生ブレーキ力の定格そのものを向上させる方策について検討する。

高速域での回生ブレーキ力を向上するには、図1に示すような様々な方法^{2)~4)}が提案されており、モータ電圧を増加するかモータ電流を増加するかで大別される。モータ電圧を増加する方法には、インバータの交流側で昇圧するか、直流側で昇圧するかの2通りがある。著者らが検討してきたのはインバータの直流側で昇圧する方式の一つであり、インバータ入力部に直列蓄電装置と称する蓄電装置を挿入して電圧をかき上げる。追加機器

が小容量である割には大きな回生電力増大効果が期待できる。

著者らはこれまでに、机上検討によって直列蓄電装置の動作特性や高調波特性を確認してきた^{5)~8)}。基本動作に関してはミニモデルによる実験検証も既に行われている⁹⁾。本稿では、これまでの机上検討に基づいて回路シミュレーションによる動作特性を検討し、走行シミュレーションによって省エネ効果を試算する。

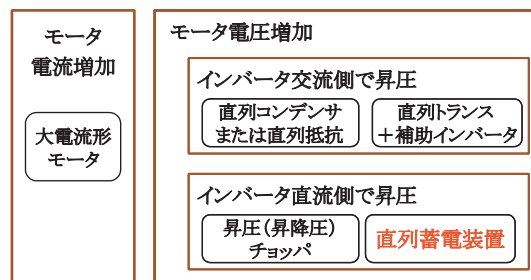


図1 電力回生ブレーキ力の増大手法

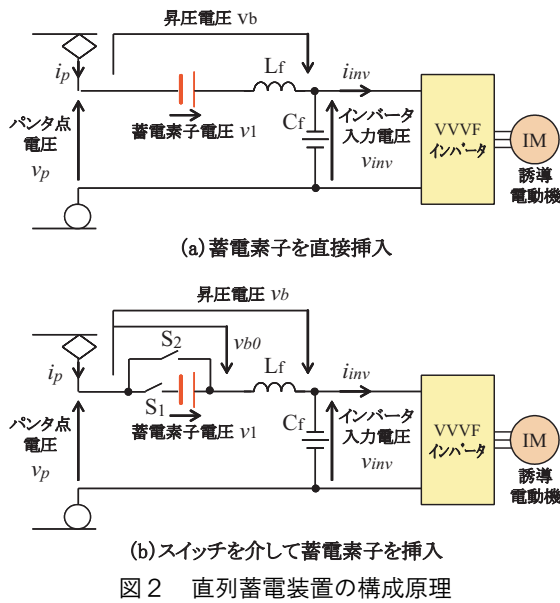
2. 直列蓄電方式の動作原理と回路構成

2.1 電圧制御の必要性

最も簡単にインバータ入力電圧を増大させるには、図2(a)に示すように蓄電素子を直接挿入すればよい。架線を電池に見立てれば、別の電池をさらに直列に接続したのと同様である。しかし、この構成では架線電圧よりも常に蓄電素子電圧分だけインバータ入力電圧が上昇するためインバータの過電圧に注意する必要がある。蓄電素子の充電・放電を制御できない。対策として図2(b)

* 車両制御技術研究部（駆動制御）

特集：車両技術



のように切替用の接触器を挿入すると、今度は切替時にインバータ入力電圧が急激に変動するため、インバータ入力部のフィルタコンデンサ C_f およびフィルタリアクトル L_f の間で共振を引き起こし、過電圧や過電流によって機器を破損する恐れがある。こうした問題を回避するためには、昇圧電圧の制御手段が必要である。

2.2 電圧制御原理

図2 (b) に示す接触器（機械スイッチ）を半導体スイッチに置き換えることにより、高速なON/OFF動作が可能となる。スイッチS1だけをONする期間は $v_{b0}=v_1$ 、スイッチS2だけがONする期間は $v_{b0}=0$ である。その結果、図3に模式的に示すように、 v_{b0} は短冊状となる。 L_f と C_f の共振周波数（数十Hz）より十分高い周波数でスイッチを切替えると前述の共振は発生せず、リアクトル L_f の作用によって、昇圧電圧 v_b は平滑化されて v_{b0} の平均値をとる。また、S1がONする期間の割合を通流率 d_1 と定義

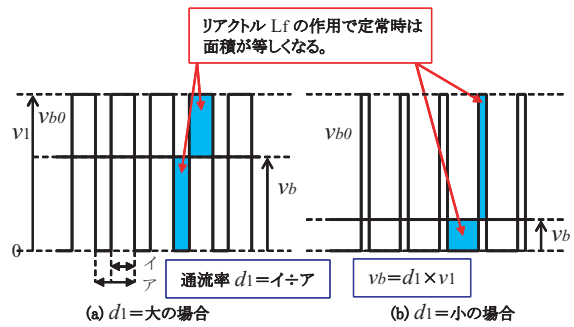


図3 昇圧電圧波形の模式図

すると、架線電流や通流率 d_1 の変動がゆるやかな定常状態では次式が成立する。

$$v_b = d_1 v_1 \tag{1}$$

通流率の範囲は $0 \leq d_1 \leq 1$ であるので、昇圧電圧 v_b の範囲は、

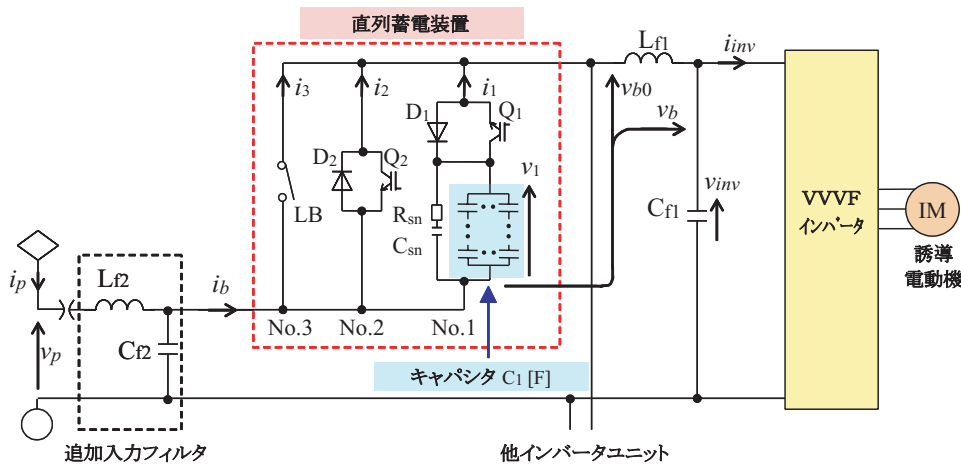
$$0 \leq v_b \leq v_1 \tag{2}$$

となり、蓄電素子の電圧 v_1 を超えることはできない。必要な昇圧電圧 v_b よりも、蓄電素子の電圧 v_1 を高く保つ必要がある。

2.3 主回路構成

図4に直列蓄電装置の主回路構成を示す。半導体スイッチはIGBTおよび逆並列ダイオードの対で構成する。 L_{f2} と C_{f2} は、直列蓄電装置による高調波電流が帰線に流出するのを抑制する追加入力フィルタである。VVVFインバータと直列蓄電装置の電流定格に応じて、直列蓄電装置の後段に複数のインバータを接続することも可能である。断流器LBを閉じると直列蓄電装置を搭載しないのと同様の主回路となる。

図2では説明の便宜上、蓄電素子をバッテリーとして描いているが、実際には図4のようにキャパシタ（電気



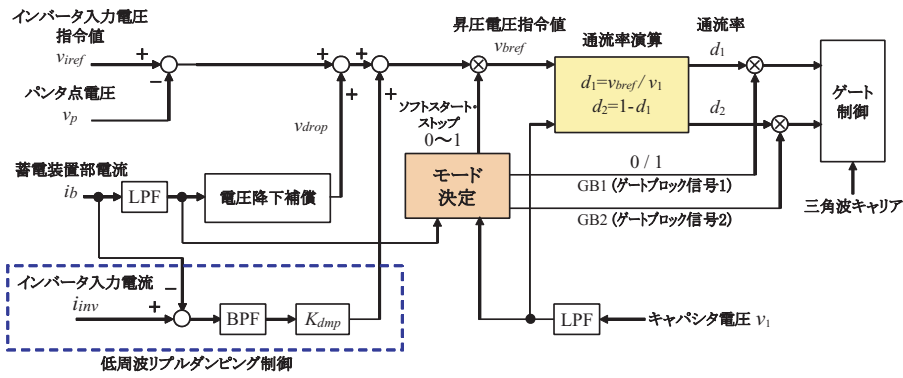


図5 制御回路ブロック図

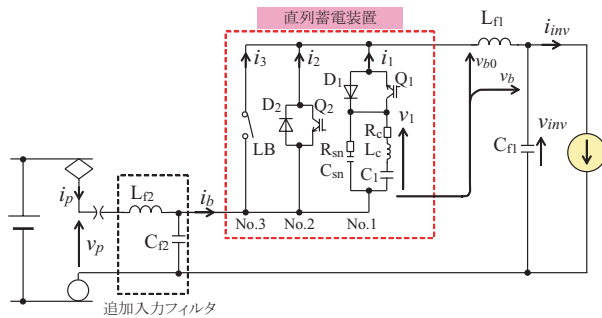


図6 回路シミュレーションモデル

表1 回路シミュレーション定数

パンタ点電圧 V_p	1600 V	キャパシタ定格最大電圧	400 V
フィルタリアクトル L_{f1}, L_{f2}	20 mH	キャパシタ内部抵抗 R_c	60 mΩ
フィルタコンデンサ C_{f1}, C_{f2}	1350 μF	キャパシタ内部インダクタンス L_c	10 μH
力行時インバータ入力電流	200 A	スナバ抵抗 R_{sn}	0.6 Ω
回生時インバータ入力電流	-200 A	スナバ容量 C_{sn}	50 μF
キャパシタ定格容量 C_1	1 F	三角波キャリア周波数 f_{tri}	200 Hz

二重層キャパシタ)を採用するほうが本装置の充放電パターンに相応しく、期待寿命が長いと考えている。

2.4 制御回路構成

図5に制御回路のブロック図を示す。制御対象はインバータ入力電圧 v_{inv} であり、指令値は v_{iref} と表す。パンタ点電圧を v_p 、電圧降下補償分を v_{drop} とすると、昇圧電圧指令値 v_{bref} は次式で決定される。

$$v_{bref} = v_{iref} - v_p + v_{drop} \quad (3)$$

ここで、式(1)の v_b を v_{bref} に置き換えた式(4)および、電流が連続するための条件式(5)によって通流率を決定する。 d_1 はNo.1アームの通流率、 d_2 はNo.2アームの通流率、 v_1 はキャパシタの電圧である。

$$d_1 = \frac{v_{bref}}{v_1} \quad (4)$$

$$d_2 = 1 - d_1 \quad (5)$$

上記に加えて、モード決定部によって昇圧指令値の立

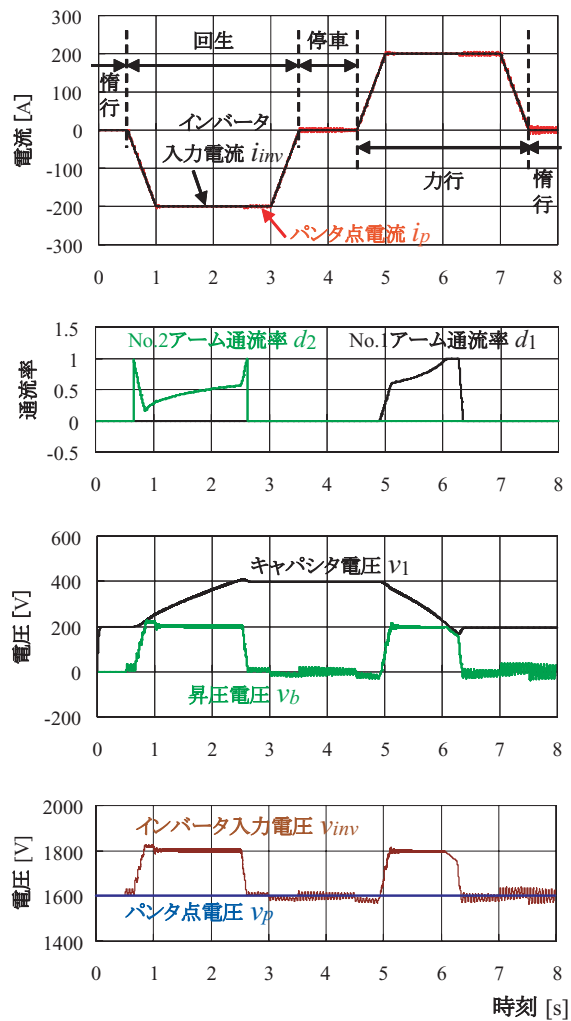


図7 回路シミュレーション結果

上げ・立ち下げおよびスイッチングする素子の選択を実施する。モードは待機モード、力行昇圧モード、回生昇圧モードの3種類とする。力行電流が一定値以上で、キャパシタが放電可能であれば力行昇圧モードとし、回生電流が一定値以上で、キャパシタが充電可能であれば回生昇圧モードとし、それ以外では待機モードとする。よってモード決定部には蓄電装置部電流 i_b およびキャパシ

特集：車両技術

タ電圧 v_1 を入力している。

また、低周波リプルダンピング制御を付加することで入力 LC フィルタ追加に伴う共振電流増大を抑制しているが、詳細は文献 6) を参照されたい。

3. 回路シミュレーション

3.1 計算条件

図 6 に回路シミュレーションに用いたモデルを、表 1 にシミュレーション用パラメータを示す。パンタ点電圧は 1600V 一定の電圧源とし、インバータは電流源として単純化する。インバータ電流のパターンは、力行時・回生時ともに最大 200A の台形波状に与える。本稿では、直列蓄電装置を現行車両の主回路に追加することを想定する。このため、インバータ入力電圧指令値 v_{iref} は現行機器の機器耐圧を考慮して 1800V と設定する。その結果、平均的なパンタ点電圧を 1600V と想定すると、平均的な昇圧電圧として 200V 必要である。よって、常時 200V の昇圧を可能とするため、キャパシタの電圧変動範囲を 200V ~ 400V と決定する。この条件でのキャパシタ容量は、最高速度 100km/h の通勤電車では 1 モータあたり最大で十数 F と設計すべきであるが、シミュレーションの便宜上 1F と設定した。

キャパシタの等価回路は、容量 C_1 以外に、内部抵抗 R_c 、浮遊インダクタンス L_c を考慮した。 R_{sn} 、 C_{sn} はスイッチング時の過電圧を抑制するスナバ回路である。スイッチングに用いる三角波キャリアの周波数はシミュレーションの便宜上 200Hz としたが、実際の設計では数 kHz まで設定可能である。

3.2 回路シミュレーション結果

図 7 に回路シミュレーション結果を示す。昇圧期間中のインバータ入力電圧は指令値 1800V にほぼ一致している。キャパシタ電圧は変動しているが、昇圧電圧はほぼ 200V 一定であり、ここから通流率制御の妥当性を確認できる。また、昇圧電圧の立ち上げと立ち下げをなめらかにしたため、大きな共振現象は発生していない。

キャパシタは回生時の昇圧によって充電し、力行時の昇圧によって放電しており、設定値どおり 400V で充電終了、200V で放電終了となっている。昇圧期間は回生時より力行時のほうが短い、これは回生時にキャパシタに流入したエネルギーの一部は内部損失となるため、力行時に放出できるエネルギーのほうが少ないためである。

昇圧していない期間において、パンタ点電流に微少な振動成分が含まれているのは入力フィルタ部によって 20Hz 程度の共振がわずかに発生しているためであり、軌道回路に悪影響を及ぼす場合には追加対策が必要である。以上のように、直列蓄電装置によるインバータ入力

電圧の昇圧動作と、内部のキャパシタの円滑な充放電動作を確認することができた。

4. 省エネ効果の試算

4.1 計算条件

表 2 ~ 4 に、走行シミュレーションの計算前提について整理する。提案する直列蓄電装置は回生失効の少ない稠密線区で効果を発揮するため、想定車両は都市部の通勤型電車とする。本章の走行シミュレーションでは回路のスイッチング動作は考慮せず、インバータと蓄電装置内の効率や損失は単純化して算出する。但しモータの入出力は昇圧に関連する重要項目であるためベクトル制御等価回路を仮定して算出する。

表 2 計算前提条件 (車両)

想定車両	直流通動型電車 2M2T 編成
編成質量	空車 129t, 積車 210t (200%)
制御装置	VVVF インバータ IC1M 方式
主電動機	誘導電動機 (定格 200kW) × 4 / 電動車
加減速度	2.4 km/h/s, -2.6 km/h/s (回生最大)
その他	ギヤ比 7.07, 車輪径 820mm

表 3 計算前提条件 (路線・架線)

路線条件	走行距離 2000m, 全線平坦, 直線
制限速度	100km/h
架線電圧	力行時 1500V, 回生時 1650V 一定
走行抵抗	$R=(7.0+0.1654V_t)W+0.4825V_t^2$ [N] $W=$ 編成質量[t], $V_t=$ 列車速度[km/h]

表 4 計算前提条件 (直列蓄電装置 1 台分)

昇圧電圧	200V 一定
蓄電容量	0.75kWh / 0.30kWh
搭載数	電動車 1 両につき 1 台
キャパシタモジュール	最大電圧 15V, 定格静電容量 333F 内部抵抗 5mΩ, 質量 4.2kg 最大電流 400A (充電) / 500A (放電) バランス回路込み, 6 セル直列構成
モジュール接続	36 直列 - 5 並列 (0.75 kWh 構成) 36 直列 - 2 並列 (0.30 kWh 構成)
合計内部抵抗	36mΩ (0.75kWh) / 90mΩ (0.30kWh)
キャパシタ電圧使用範囲	200V ~ 400V (全体) 5.6V ~ 11.1V (モジュール)
機器想定質量	電力変換回路 600kg, 追加フィルタリアクトル 700kg, 筐体, 断流器等 350kg
装置合計質量	2.4 t (0.75kWh) / 2.0 t (0.30kWh)

表5 走行シミュレーションによる省エネ効果試算結果

条件			運転状況		力行電力量 [kWh]			損失 [kWh]			回生電力量 [kWh]			消費電力量 [kWh]	節電量 [kWh]	節電率 [%]	搭載効果比率 (④/①)
ケース	蓄電装置	編成蓄電容量 [kWh] ①	最高時速 [km/h]	ブレーキ初速 [km/h]	架線から	蓄電装置から	力行合計 ②	走行抵抗	空制	蓄電装置内部	架線へ	蓄電装置へ	回生合計 ③	(②-③)	④		
A	非搭載	—	100.0	99.0	29.4	0.0	29.4	4.0	5.6	0.00	14.8	0.0	14.8	14.6	基準	基準	—
B	搭載	1.5	95.1	92.3	25.4	1.3	26.7	3.9	3.8	0.27	12.8	1.3	14.1	12.6	2.0	13.8	1.34
C	搭載	0.6	96.1	93.7	26.7	0.6	27.3	3.9	4.0	0.35	13.7	0.6	14.3	13.0	1.6	11.1	2.70

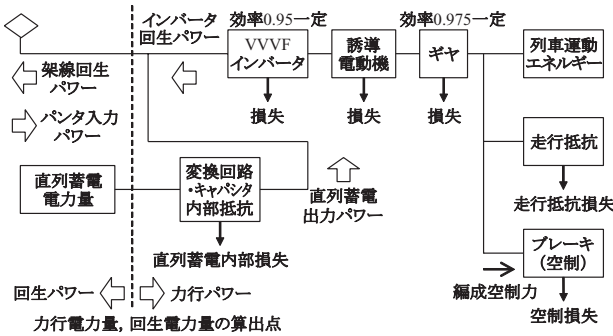
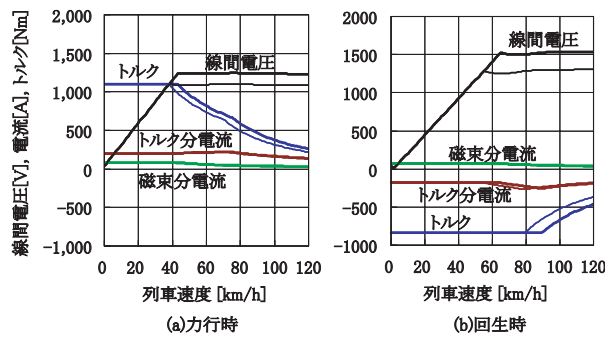


図8 走行計算時のパワーフロー定義



※ 太線=200V昇圧後, 細線=昇圧前
図9 誘導電動機性能曲線

パワーや損失の算出点は図8のように定義する。モータの電圧・電流・トルク以外は編成全体の合計値とする。誘導電動機の計算用性能曲線は、図9に示すように、現行車両の200%積車状態での性能をベースに、昇圧によるトルク増大を設定する。

路線条件は表3のように設定し、最高速度100km/hに達した後は停止ブレーキをとるまで惰行し、再力行は行わないものとする。

架線電圧は、力行時1500V/回生時1650Vと設定し、インバータ入力電圧指令値は、それぞれ1700V/1850Vと設定する。よって昇圧電圧は常に200Vであり、キャパシタの電圧範囲は3.1節で定めたとおりとする。キャパシタは現在入手可能なもので構成し、モジュールを直並列に組み合わせて1電動車あたり0.75kWhと0.3kWhの2通りの蓄電容量を設定する。0.75kWhは直列蓄電装置がブレーキ時に蓄電可能な最大エネルギーに相当する。これ以上の蓄電容量は過剰である。蓄電電力量は、キャパシタの静電エネルギーそのものではなく、電圧範囲の下限時をゼロと定義する。

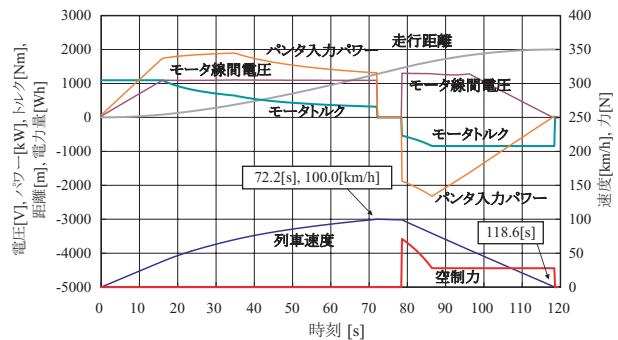


図10 ケースAのランカーブ

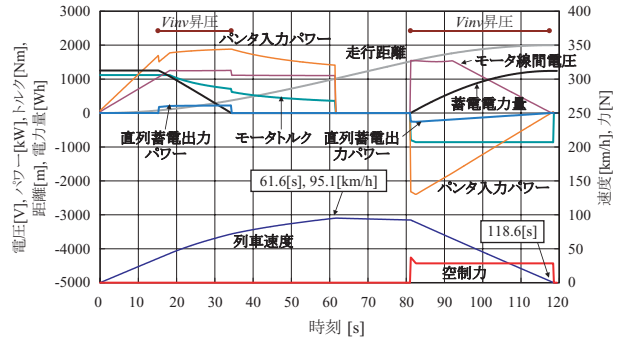


図11 ケースBのランカーブ

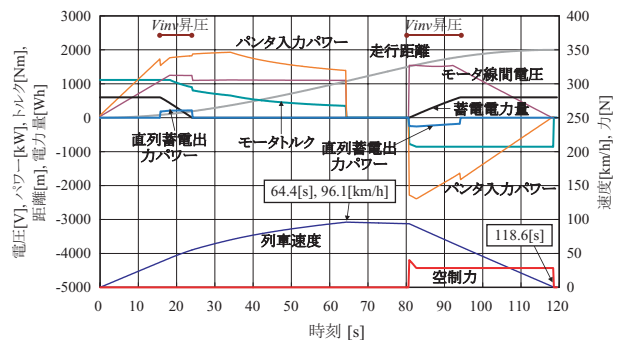


図12 ケースCのランカーブ

4.2 走行シミュレーション結果

表5に示すように、3つのケースを設定して比較する。まず、図10は直列蓄電装置を搭載しない、ケースAのランカーブである。ブレーキ期間のうち78~87秒においてモータトルクが不十分であり、大幅に空制(空気ブレーキ)が補足されている。図11は大容量の直列蓄電装置を搭載して所要時分を同一として走行させた、ケースBのランカーブである。ブレーキ時のモータトルク(回生ブレーキ力)の増大とブレーキ初速度低下により、空制補足が大幅に減少している。これらにより、空制によ

特集：車両技術

る損失は1.8kWhの減少となった。蓄電装置の動作としては、ブレーキ時は常時昇圧して回生電力の一部を蓄電し、力行時にはモータ電圧が頭打ちとなった時刻15秒以降で昇圧して放電している。力行時の昇圧によって加速度が増加するため、最高速度を下げて同一時分の走行が可能となる。全体として、消費電力量は2.0kWh(13.8%)の削減となった。

次に、図12は小容量の直列蓄電装置を搭載したケースCのランカーブである。ブレーキ時の昇圧・蓄電は14秒間程度、力行時の昇圧・放電は10秒間程度で終了している。このような短時間の昇圧動作であるが、節電量はケースBの8割の1.6kWhも得られている。理由として、空制補足による損失を低減するには十分な時間であったことが挙げられる。

搭載した蓄電容量に対する節電量の比を搭載効果比率と定義して表5の右列に整理した。その結果、ケースBもCも1以上、すなわち蓄電容量以上に節電効果が得られている。これは、ほぼ蓄電容量分だけ回生ブレーキの負担を増大したのみならず、最高速度を低下させてブレーキ初速度を下げたことによっても空制の補足を減少させたためである。ケースCのほうがケースBより搭載効果比率が高いという結果は、蓄電容量を経済的に設計するための重要な指針である。

なお、今回は回生失効が発生しない線区を仮定して試算したが、回生絞込みが発生する場合には搭載効果が低下し、回生失効時には効果がないことを確認している⁸⁾。すなわち、提案した蓄電装置単独では回生失効対策には適さず、インバータ入力に並列に接続する蓄電装置¹⁾等のほうが適している。

5. 結論

モータの回生ブレーキ力増大手法として、直列蓄電装置を提案した。回路シミュレーションによって良好な昇圧電圧制御と充放電動作を確認した。また、走行シミュレーションによって省エネ効果を試算したところ、搭載しない場合に比べて最大2.0kWh(13.8%)の節電となった。

実用化に向けては、さらなる小型軽量化、蓄電媒体の

耐久性等の検討が必要である。他の回生ブレーキ力増大手法の進展にも注目しながら進めていきたい。

謝辞

本稿に示した主回路構成の一部は、京都大学の舟木剛准教授とJR西日本の飯島様をはじめとする関係各位の御協力によって改良されたものである。ここに感謝申し上げる次第である。

文献

- 1) 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, 2005
- 2) 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-Rail2001, S3-2-8, pp.219-222, 2001
- 3) 曾根, 佐藤, 神山: 高速回生ブレーキ実用化に向けて～真の純電気ブレーキ実現のために～, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-05-26, 2005
- 4) 矢野, 水村, 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研究, 電気学会産業応用部門大会, 3-33, pp. III 229-234, 2007
- 5) 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, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-05-39, 2005
- 6) 田口, 小笠, 秦, 飯島, 大津山: インバータ入力直列キャパシタ蓄電装置の帰線電流高調波対策, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-06-65, 2006
- 7) 田口, 小笠, 秦, 飯島, 大津山, 舟木: インバータ入力直列蓄電装置のシンプルな構成方法, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-06-74, 2006
- 8) 田口, 小笠, 秦, 飯島, 大津山, 舟木: インバータ入力直列蓄電装置の動作と効果, J-Rail2006, SS3-1, pp.275-278, 2006
- 9) 飯島, 小林, 山下, 田口, 小笠, 秦, 舟木, 中沢: インバータ入力直列蓄電装置のミニモデル動作試験, J-Rail2007, S3-2-4, pp.529-530, 2007