

直流高電圧き電用電力変換器における 回生電力有効活用のための制御方法

吉井 剣* 生出 珠之助*

A Control Method for DC-DC Converter Used for High Voltage DC Feeding System
in order to Effectively Utilize Regenerative Power

Tsurugi YOSHII Tamanosuke OIDE

A high Voltage DC feeding system which consists of higher-Voltage feeders and DC-DC converters in addition to an existing feeding circuit makes it possible to supply Vehicles power with conventional feeding Voltage. In this system, the control method of the converter is an important consideration item to maximize energy saVing effect. In this paper, we propose a converter control method, named a DC-AT control method, to make the Voltage ratio between the overhead line and the higher-Voltage feeder constant. We evaluate the energy saVing effect of the high Voltage DC feeding system with a DC-AT control method by simulation.

キーワード：直流き電回路，高電圧き電方式，DC-DC 変換器，回生電力，省エネルギー，単巻変圧器

1. はじめに

直流電気鉄道は交流電気鉄道と比較して低圧大電流のシステムとなるため、電車線やレールの抵抗によるジュール損や電車線電圧降下が大きい。現在、国内の主要路線の直流電車線標準電圧は1500Vであるが、この電圧は欧州の長距離幹線で一般的な3000Vと比較して低く、頭記の課題が特に顕著である。

このため、過去の600Vから1500Vへの変更事例などを参考として、日本国内の電車線標準電圧を3000Vに再度昇圧することの是非が過去に度々検討されてきた¹⁾。しかし、既存路線の電車線電圧を昇圧する場合、変電設備や電車線の支持物等の地上設備の改修と、昇圧前後の両方の電圧に対応した車両の新造・改修との双方が必要になる。複数路線・複数事業者間の直通運転が広範に発達した国内の現状において、電車線標準電圧の昇圧は、改修対象となる車両数が莫大であること、また技術的にはかつて直流電動機車両で広く行われた直並列接続変更による昇圧手法が現在主流のVVVFインバータと交流電動機を用いた車両には適用できないこと等の事情により、現実的には困難であるとされてきた。

そこで、図1のように、電車線（ここでは架線に加え、現行のき電線を含む）より高い電圧の「高電圧き電線」を追設することによって電車線標準電圧の昇圧と似た利点を得るき電方式（以下、高電圧き電方式）が提案・検討されている²⁾³⁾⁴⁾。筆者らは、この高電圧き電方式において電車線と高電圧き電線の電力の間で電力を授受す

る電力変換器に対し、電車線電圧と高電圧き電線の電圧の比を一定に制御するDC-ATき電方式を提案する。そして、前記のような高電圧き電方式の利点に加えて、このDC-ATき電方式によって回生電力の活用を促進することにより、大きな省エネルギー効果が得られることを、シミュレーションにより示す。

2. 高電圧き電方式

2.1 高電圧き電方式の概略構成とその期待効果

高電圧き電方式では、電車線の電圧 V_T は変更せず、 V_T より高い電圧 V_F で運用する高電圧き電線を追設し、変電所（以下、SS）やき電区分所（以下、SP）等にDC-DC変換器（以下、変換器）を設置する。この変換器で電車線（T）と高電圧き電線（F）の間の電力授受を行い、SSと負荷（列車）の電力フローをT側とF側で適切に分担することで、既存の車両を継続使用しつつ、 V_T の昇圧と同様の効果が得られる、というのが高電圧き電方式の大きな特徴である。このため、変換器の制御方式や回路方式は、高電圧き電方式の有効性を左右する重要な要素となる。

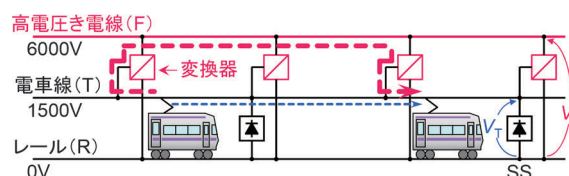


図1 高電圧き電方式の概略図

* 電力技術研究部 き電研究室

2.2 直流電気鉄道の課題と高電圧き電方式

一般的な直流電気鉄道では、シリコン整流器（以下、SR）が用いられている。SRは、交流から直流へ電力を変換するが（順変換）、直流から交流への電力変換（逆変換）はできない。そのため、回生ブレーキを用いて減速中の列車（回生車）から発生した回生電力を、加速中の他の列車（力行車）に円滑に融通して消費させることが、さらなる省エネルギー化の鍵を握る。

ところが、取り扱う瞬時電力の大きさ（数MW）に対して相対的に低電圧・大電流のシステムである直流電気鉄道では、回生車と力行車の間の距離が長い場合、その間の電車線とレールの直流抵抗に伴う電圧降下と、絶縁設計等から許容される最高電車線電圧とのかねあいによって、必要なブレーキ力に対応する回生電流が流せない場合がある（回生絞り込み）。この場合、ブレーキ力の確保のために機械ブレーキなどを用いることになるため、運動エネルギーの再利用率が低下する。

高電圧き電方式の昇圧効果は、SSから力行車への電力供給時だけでなく列車間の回生電力融通においても現れるため、大きな省エネルギー効果をもたらす可能性がある。しかしながら、先行研究²⁾³⁾⁴⁾はいずれも主にSSから列車への電力供給の効率化の観点からしか高電圧き電方式をとらえておらず、回生電力融通の促進効果の具体的な検討は、ほとんど行われていない。

そこで、筆者らは回生電力を遠方の力行車へ効率よく融通することを可能とする変換器の制御方式として、 V_F と V_T の比を一定に制御する手法を考案し、その効果をシミュレーションにより検証した。

3. 変換器の制御方式

変換器が担うT側とF側の間の電力授受の制御方法は無数に存在する。例えば、中央指令のような施設に集約した各列車の位置や負荷状況等の情報に応じて、各変換器をリアルタイムに制御するといった極めて高度な方法も考えられる。

ここでは、高電圧き電方式をより多くの路線に普及させることを重視し、指令所や中央演算装置等、変換器の設置場所以外から指令や情報を遠隔で受けることを必要とせず、個々の変換器自身の電圧・電流センサーから得られる情報のみにより、各変換器がスタンドアロンで動作することを前提とした。このような条件を満たすシンプルな制御としては、以下のようなものが考えられる。

- ・ V_F 一定制御：高電圧き電線側を定電圧制御。
- ・ V_T 一定制御：電車線側を定電圧制御。
- ・整流器（SR）+回生インバータ模擬制御：シリコン整流器と回生インバータが設備されたSSの V_T 出力特性に倣って制御（電車線へ出力する電流に応じ

て線形に V_T が降下、電車線から電流を吸い込む場合は V_T 一定とする等）。

- ・ V_F/V_T 一定制御：各変換器の位置において V_F と V_T の比 $V_F/V_T=N$ が一定になるように制御。

高電圧き電方式では、SSやSP等、複数の箇所に変換器が設備されるため、実際には前記のいずれかの制御方式、もしくは複数の制御方式を実装した変換器を組み合わせ、変換器群として制御する。変換器群の制御にも無数の方法が考えられるが、高電圧き電方式による省エネルギー性を発揮するためには、以下のような要求条件を満足する必要がある。

- ・電流を低損失な送電ルートに適切に配分
- ・回生電力を力行車（負荷）に効率的に融通
- ・T側とF側との循環電流を抑制

また、F側には外部電源が存在しないため、 V_F を定常的に安定させるためには、 V_F を直接制御する変換器が少なくとも1台は存在する必要がある。そして、ある変換器によってF側へ送り込まれた電力は、損失分を除き必ず他の変換器からT側へ戻されなければならないことに留意する必要がある。

4. DC-AT き電方式

4.1 基本的特性

3章に挙げた変換器群制御への要求条件を考慮し、交流き電の方式であるATき電方式（図2（a））から着想を得て、路線内の全変換器に V_F/V_T 一定制御を適用する方式（図2（b））を考案した。ATき電方式も、高電圧き電方式と同じく、電車線とき電線の間に電車線電圧よりも高電圧を印加することで、電圧降下を低減し、長距離送電を行うことを目的の一つとしている⁵⁾。ATき電方式と、図2（b）を比較すると、T、F、Rの接続関係はやや異なるが、回路の幾何学的構成に類似性を見出すことができ、ATき電方式の単巻変圧器（AT）と図2（b）の変換器は対の関係になっている。

ATは変圧器の一種であり、両端を電車線とATき電線（F）に接続し、巻数比1:1となる位置に設けた中間タップをレールと接続することで、き電電圧と電車線電圧の比を2:1に保っている。つまり、変換器の V_F/V_T 一定制御は「直流（DC）回路で動作するAT」を模

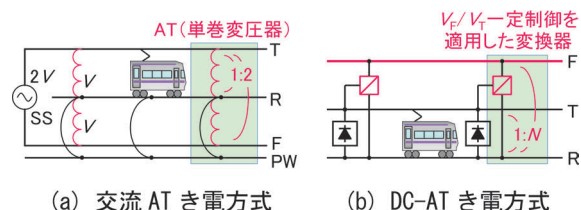


図2 交流ATき電方式とDC-ATき電方式の類似性

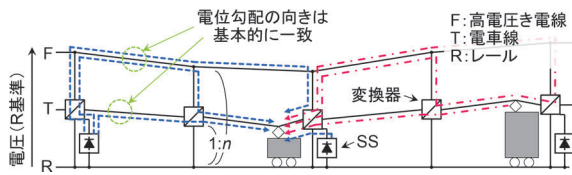


図3 DC-AT き電方式の電力フローと電位勾配

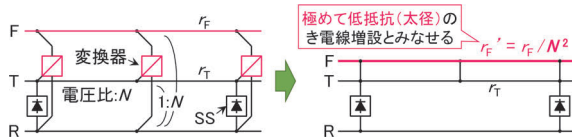


図4 DC-AT き電方式の等価回路

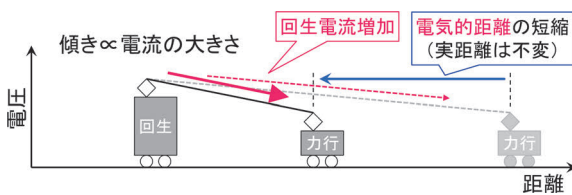


図5 電気的距離の短縮

したものとみなすことができる。このことから、 V_F/V_T 一定制御を適用した変換器を用いる高電圧き電方式を(図2(b))をDC-ATき電方式と命名した。

図3は、DC-ATき電方式における電力フローと電位勾配を示したものであり、次のような特徴を見出せる。

- ・各変換器間でT側とF側の電位勾配の方向が一致(基本的に循環電流を生まない)
- ・力行/回生による V_T の変動と V_F の変動が比例するため、T側の負荷状態を的確にF側に伝達
- ・線形素子であるATを模擬することで安定な回路を構成可

また、 V_F/V_T 一定制御を適用した変換器は、変圧器と同様にインピーダンス変換器とみなすことができ、高電圧き電線の抵抗 r_F はT側回路に換算すると $r_F' = r_F/N^2$ となる($N = V_F/V_T$:電圧比)。よって、例えば $N = 4$ に設定すると、通常なき電回路(TとRのみで構成)に対して1/16の抵抗値に見えることになる(図4)。これは、T側回路において、現実的には設備困難な太径(低抵抗)なき電線を増設したことと等価であり、SS~列車あるいは列車同士の電気的距離が大幅に短縮されたことと電気的には同義である(図5)。この電気的距離の短縮作用により、送電ロス低減や回生電力融通量の増加といった大きな省エネルギー効果が生まれる。

4.2 回生電力の有効利用率向上効果

回生ブレーキは、発生した回生電力を電車線に戻し、近傍の力行車に消費させることでブレーキ力を得る。回生電力を電車線に戻すためには、回生車直下の V_T (パン

タ点電圧)を力行車あるいはSSの整流器など隣接する要素の V_T より上昇させる必要がある。一方で、車両の変換器には過電圧による損傷を防ぐため、 V_T が一定以上になると回生ブレーキを制限する制御(回生絞り込み制御)が実装されている。

つまり、ある抵抗を持つ回路において、十分な回生電力が融通できる距離には必ずと制約が生まれる。回生絞り込み制御でブレーキ力が不足する分、機械ブレーキの負担率が上昇し、列車の運動エネルギーを熱エネルギーとして散逸させる量も増加する。

DC-ATき電方式では、図5のように列車間の電気的距離が短縮される。よって、従来なき電方式よりはるかに遠方の力行車に対して、回生絞り込み制御に制限されことなく回生電力の融通が可能になると予測される。

5. 電力シミュレーションによる評価

き電回路では、負荷である列車がレール上を移動するため、その電流の大きさや向きも逐次変化する。そのため、電力フローは非常に複雑かつ大きな時間変動を伴う。ゆえに、ある瞬間だけの列車の位置や電流値を仮定した電圧降下計算や、列車の力行時の電流の時間変化を無視して統計平均的に扱う解析手法は、DC-ATき電方式と従来の直流き電方式(以下、従来方式)の消費電力量の差異の比較評価する方法として必ずしも適切ではない。その上、前節に述べた遠方への回生電力の融通・活用がおよぼす消費電力量の変化の程度を調べるためには、複数の変電所・変換器・列車を含む路線全体を対象とした時間変化を模せる計算が必要である。

そこで、実際なき電回路と同様に負荷の電流量や力学的振舞いの連続的な時間変化を評価できる列車運転電力シミュレータ⁶⁾を用い、 V_F/V_T 一定制御を適用した変換器シミュレーションモデルと高電圧き電線をき電回路モデルに追加することによって、DC-ATき電方式の消費電力量を評価した。

5.1 シミュレーション条件

ここでは、ある実在の路線をベースとした図6のような全線複線のモデル路線に、DC-ATき電方式を適用することを想定した。速度制限や勾配についてはベースとなった路線に準拠して設定した。車両についてもベースとなった路線で運用中の代表的な通勤型車両(7両編成)の特性を模擬し、2.2節で述べた回生絞り込み制御についても1700V以上で絞り込みを開始し、1830Vで回生ブレーキ力ゼロとなるまでパンタ点電圧に応じて直線的にブレーキ力が逓減する特性として考慮した。

き電回路条件を表1、表2に示す。高電圧き電線は上下線共通とし、硬アルミより線300mm²を2条設備し

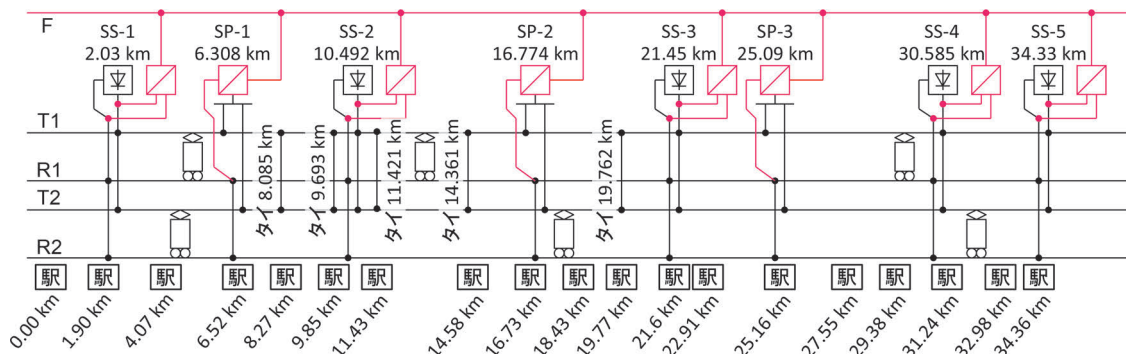


図6 シミュレーションに使用したモデル線区

表1 き電回路条件 (変電所)

変電所	容量 (kW)	電圧変動率 (%)	無負荷電圧 (V)
SS1	4000	5	1575
SS2	6000	5	1575
SS3	6000	5	1575
SS4	6000	5	1575
SS5	6000	8	1620

表2 き電回路条件 (線路定数)

	抵抗値 (Ω/km)	備考
T	0.0238	シンプル GT110 mm ² +AL510 mm ² ×2
R	0.017	50 kgN レール
F	0.04845	Al300 mm ² ×2

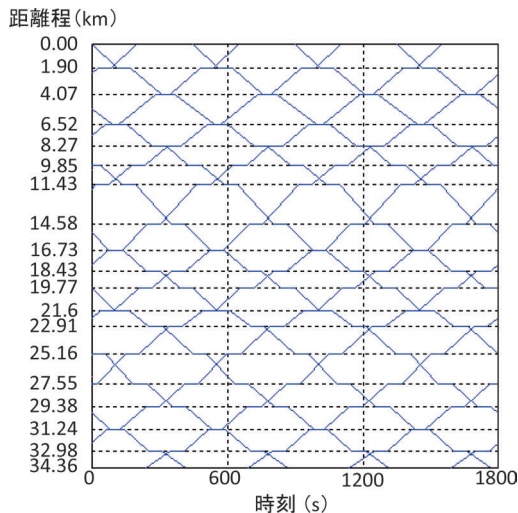


図7 シミュレーションに使用したダイヤ例 (ダイヤシフト0分)

たと仮定した。変換器は全 SS・SP への設置を仮定し、全ての変換器に V_F/V_T 一定制御を適用した。電圧比は $N=4$ とした。変換器の変換効率は、電流の大きさによらず 97% と仮定した。

本稿では DC-AT き電方式と従来方式の傾向比較のみに着目するため、計算に使用する列車ダイヤは仮想的な

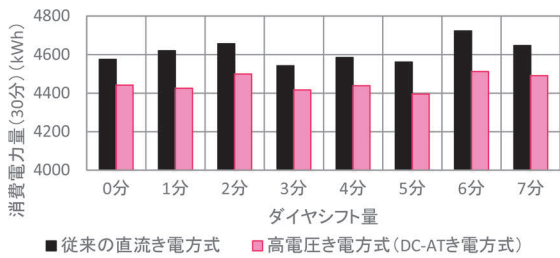
ものとした。従来方式において回生電力の活用率が低くなるとされる 7 分 30 秒間隔⁷⁾の等時隔ダイヤ (全列車各駅停車) 30 分間分を作成し (図 7), シミュレーションを実施した。ただし、ある瞬時における路線内のすべての列車負荷の位置関係や、各列車の操縦 (力行, 惰行, ブレーキ) のわずかな違いで、回生電力の活用率は大きく変化するため、特定の列車ダイヤのみにおける計算では、そのダイヤに基づく各列車の電力需給だけにおける運転電力の評価に留まることとなり、DC-AT き電方式の導入によって期待される省エネルギー効果を公平に評価したことはない。

そこで、下り列車の始発駅発車時刻を固定して、上り列車の始発駅発車時刻を平行移動した複数のダイヤパターンによって評価することとした。この平行移動の量をここではダイヤシフト量と呼ぶ。今回の検討では、ダイヤシフト量の変化は 1 分とし、ダイヤシフト量 0~7 分の 8 パターンで評価することとした。なお、計算ステップは 1 秒間隔である。

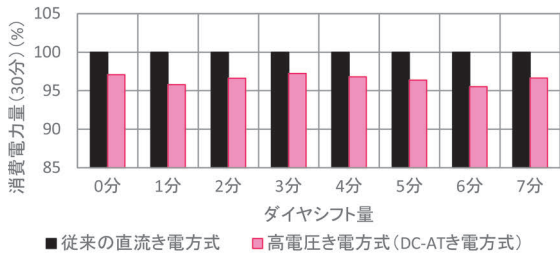
5.2 消費電力量の削減効果の検証

図 8 (a) は、各ダイヤシフト量における全 SS からモデル路線へ 30 分間に供給した総電力量 (消費電力量) を、従来方式と DC-AT き電方式で比較した結果である。回生電力が他の列車で再利用されると、その分だけ SS からの供給電力量、すなわち消費電力量は減少する。図 8 (b) は、各ダイヤシフト量における従来方式の路線総電力量 (消費電力量) を 100 として規格化し、消費電力量の変化を比率として表したものである。

図 8 (a) から分かるように、従来方式と DC-AT き電方式のいずれも、ダイヤシフト量の違いによる消費電力量の差が大きい。これはダイヤシフトにより、列車同士の力行や回生の重なりが変化し、回生電力の有効利用率が変化するためと考えられる。しかしながら、図 8 (b) から分かるように、ダイヤシフト量にかかわらず DC-AT き電方式の採用により消費電力量は減少しており、省エネルギー効果が認められる。この消費電力量の



(a) 実系



(b) 比率（従来方式を100として規格化）

図8 従来のき電方式と高電圧き電方式（DC-ATき電方式）の消費電力量比較

削減量は、最大約4.5%、平均約3.5%であった。ただし、この数値は路線や車両・ダイヤ等の条件に影響されるものであり、その大きさ自体には一般性はない。

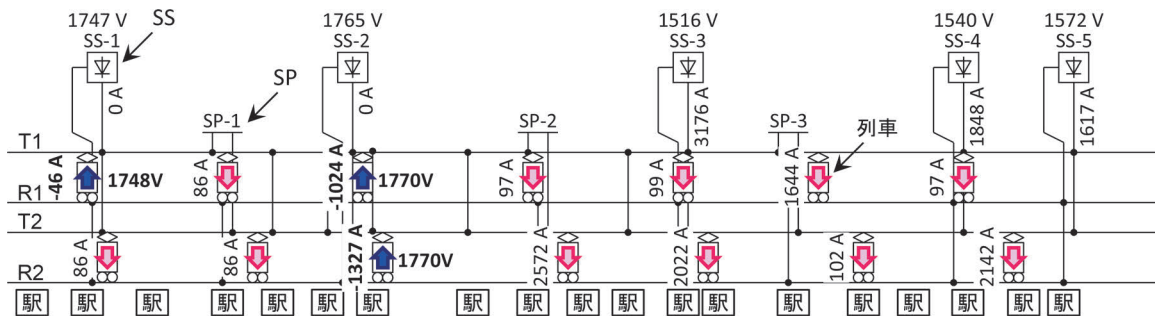
なお、基本的には電圧比 N が大きいほど省エネルギー

効果は高まるが、変換器の高耐圧化や絶縁隔離の拡大等によるコスト増とのトレードオフの関係にある。

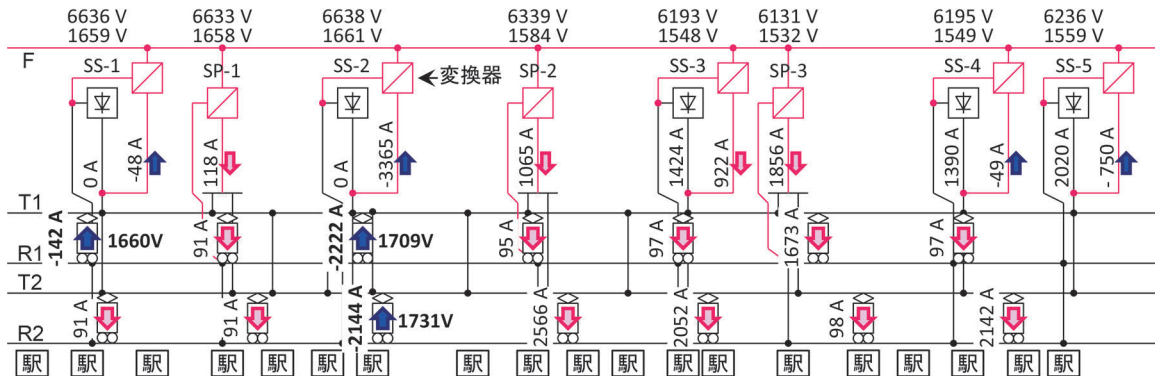
5.3 回生電力の利用促進効果の検証

図8からわかるように、路線全体の消費電力量はダイヤシフト量の違いで変化するが、従来方式で消費電力量が比較的大きいダイヤ（ダイヤシフト量：1分、6分等）では他のダイヤと比べてDC-ATき電方式による省エネルギー効果が高めに現れる傾向が見られた。これは、4章で述べたようなDC-ATき電方式によるき電回路の等価的な抵抗の減少により、変電所から力行する列車までの間の通電ロスの減少効果や、回生電力がより遠方の列車へ融通される効果（回生電力の利用促進効果）が、顕著にあらわれたものと考えられる。

図9は、回生電力の利用促進効果を示す一例として、ダイヤシフト量：6分、時刻 t ：558秒の場合のモデル線区全体の各所の電圧・電流を示したものである。図9(a)が従来方式、図9(b)がDC-ATき電方式である。赤矢印の列車は力行中の列車（力行車）、青矢印の列車は回生中の列車（回生車）を示し、電流値は力行を正としている。また、変換器の赤矢印はF側からT側への電力授受（力行運転）、青矢印はT側からF側への電力授受（回生運転）を示す。電流値は力行運転を正、回生



(a) 従来方式



(b) DC-ATき電システム

図9 ダイヤシフト量：6分、時刻 t ：558秒におけるモデル線区全体の電力フローの比較

運転を負としている。図の最上部に示した電圧値は、SS直下における V_T すなわち直流送り出し電圧であるが、図9(b)においては変換器の V_F (上段)と V_T (下段)を示す(SSの変換器においては V_T とSSの送り出し電圧は等価である)。また、回生車については列車直下の V_T (パンタ点電圧)を示している。

従来方式の図9(a)を見ると、SP-2~SP-3付近には合計6000Aを超える大きな負荷がある。この時、SS-2付近には下り線と上り線に1編成ずつの計2編成の回生車が存在し、合計で約2400Aの回生電流が発生している。しかし、2編成の回生車のパンタ点電圧はいずれも1770Vと大きく上昇しており、回生絞り込みが発生している。つまり、路線全体で見れば回生電力の消費先が十分あるにもかかわらず、き電回路の抵抗のために回生絞り込み制御が行われ、電力融通が制限されて本来活用できたはずの回生電力が失われている。一方で、SS-3~SP-3付近の力行列車の電力を補うため、SS-3の整流器からは約3200Aの大きな電流が供給されており、これは外部からの受電でまかなうこととなる。

これに対して、DC-ATき電方式の図9(b)では、回生車のパンタ点電圧はそれぞれ1709V(下り線)と1731V(上り線)と従来方式と比較して大きく低下しており、2編成の合計の回生電流は80%以上増加して約4400Aとなっている。この回生電力のうち3300A以上がSS-2の変換器によってF側に送り込まれ、SP-2およびSP-3の変換器からT側に戻っている。このように、回生絞り込みによって制限されていた回生電流が高電圧き電線によって遠方まで円滑に融通されるようになった結果、SS-3からの電流は半分以下の約1400Aまで減少しており、電力系統からの受電電力量が抑えられたことが分かる。

6. まとめ

本稿では、直流き電方式の省エネルギー施策の一つとして高電圧き電方式に焦点を当て、電車線と高電圧き電線の電力の間で電力を授受する電力変換器に対し、電車線電圧と高電圧き電線の電圧の比を一定に制御するDC-ATき電方式を提案した。

また、列車運転電力シミュレーションによって、現実

の近郊線区をベースとしたモデル線区を対象に、従来の直流き電方式と上記DC-ATき電方式の消費電力量を計算・比較した。比較の結果、電力変換器と高電圧き電線により、回生車から遠方の力行車へ回生電力が融通され、今回の計算条件では、DC-ATき電方式により従来の直流き電方式と比較して最大約4.5%、平均約3.5%程度の省エネルギー効果が期待されることが確認された。

謝 辞

本研究においては三菱電機株式会社の石山琢麻氏、東芝三菱電機産業システム株式会社の谷内田貴行氏、西日本旅客鉄道株式会社の明石太輔氏をはじめ、関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 高電圧直流電化方式調査専門委員会編：直流電気鉄道の高電圧化の調査報告，電気学会技術報告第II-295号，電気学会，1989
- 2) Philippe Ladoux, Jean Marc Blaquiere, Herve Caron, Diego Iannuzzi, Marino Coppola : "New three-wire supply systems for DC electric railways," IET Electrical Systems in Transportation, Volume: 5, Issue: 3, 2015.
- 3) 重枝秀紀，森本大観，藤井俊行，森島直樹：電力変換装置を用いた高電圧直流き電方式の検討その1，第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail2015)，No.2503，2015
- 4) 重枝秀紀，森本大観，藤井俊行，森島直樹：電力変換装置を用いた高電圧直流き電方式の検討その2，第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail2015)，No.2504，2015
- 5) 権藤豊美：AT(単巻変圧器)電化方式とその考え方，電気鉄道，No.241，第22巻，第6号，鉄道電化協会(現，日本鉄道電気技術協会)，1968
- 6) 森本大観・吉井剣：鉄道電力従事者向け直流運転電力シミュレータの機能拡張，第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail2015)，No.2506，2015
- 7) 山野井隆・伊東和彦・中村悦章・川原敬治：直流き電における電力貯蔵装置等の導入指標の検討，電気学会全国大会，5-089，2013