

直流電車の回生性能改善による電力量最大削減効果の評価

岡田万基*、古関隆章（東京大学）

Evaluation of maximal reduction of electric energy consumed by DC-fed electric trains
through an improved regenerative performance
Yuruki Okada, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. はじめに

現在、大都市の鉄道における電気車は、そのほとんどが回生車となっているが、直流き電システムでは、通常、変電所は余剰回生電力を受け入れる能力を持たない。

回生車は、ブレーキの際、制動エネルギーを電気エネルギーに変換して、そのエネルギーを同じ路線上の加速している列車（以下、回生負荷と記す）に供給することによってブレーキをかけているが、回生車の比較的近傍に十分な回生負荷が存在しない状況では、パンタ点電圧の過大な上昇を防ぐために、回生車は、ブレーキ力の一部を機械ブレーキに負担させ、回生ブレーキは絞り込む、いわゆる回生絞り込み制御を行っている。

回生絞り込み制御は、列車の電気機器保護の観点から必要不可欠であるが、現在の回生絞り込み制御では、回生負荷が十分に電力を消費している状況でも、過剰に電力を絞り込んでいる場合のあることが指摘されている^①。

本資料では、「過剰な回生絞り込み」がなくなった時に、どのような現象が見られ、それによるエネルギーの削減効果はどの程度かを定量的に明確化することを目的に、路線上の全列車の電力をリアルタイムに集中管理し、常に変電所出力が最小になるよう、回生電力を制御する理想的な電力制御システムを想定し、その振舞いを議論する。

2. 現在の回生絞り込み制御とその問題点

前述のように、回生負荷が十分に存在しない状況では、回生車のパンタ点電圧が上昇する。そこで、一般に、図1の特性に従って、電動機電流を絞り込むことにより、回生電力を絞りこむ。なお、 V_{max} は、き電回路が許容する最大電圧である。

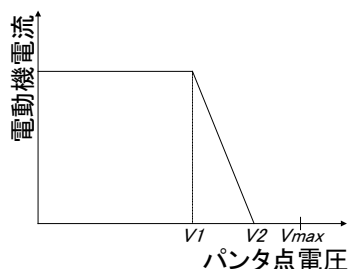


図1：現在の一般的な回生絞り込み特性
Fig.1. Present regenerative performance

しかし、回生電力を十分に活用することを考えた場合、図1の特

性で回生電力を絞り込むと、以下のような問題がある。

- ① 電動機電流が大きいても主回路電流が小さい低速域で、不必要に絞り込みを行うことになる。
- ② パンタ点電圧が高い場合でも、遠くの回生負荷が十分に電力を消費している状況では、不必要に絞り込みを行うことになる。

そこで、次章で述べる理想的なモデルを考え、検討を行う。

3. 理想的な電力配分指令システム

検討を単純化するため、以下のモデルを考える。

- ① 列車の位置、速度、架速度は既定の運転曲線に従う。また、駅での停車時間も固定とする。
- ② 路線上の全列車の電力を PDIS (Power Distribution Instruction System) で管理する。

ここで、PDIS は、常に、路線上の全列車の位置と電力を監視し、変電所出力が最小となるよう、回生車に対して、回生する電力をリアルタイムに指示できる理想的な装置とする。こうすることで、最適化計算の時間依存性を考慮する必要がなくなり、議論を単純化できる。

4. 電力シミュレーション

<4・1>路線および車両の条件設定 き電回路の電力シミュレーションを行うために、以下のような条件を設定した。

- ① 大都市地下鉄A線（路線長21.3km、駅数19、平均駅間距離1.2km、変電所、駅の位置および列車の初期位置を図2に示す）を対象とする。なお、変電所は回生用インバータを持たないものとする。
- ② 1[km]当たりの線路抵抗を0.033[Ω]とする。
- ③ 列車の動きに関しては、図3に示す運転曲線を設定し、全ての列車が、それに従うものとする。
- ④ 列車の運行間隔を10分とする。
- ⑤ 図1に示す特性で、 $V_1=1650$ [V]、 $V_2=1750$ [V]、 $V_{max}=1900$ [V]とする。

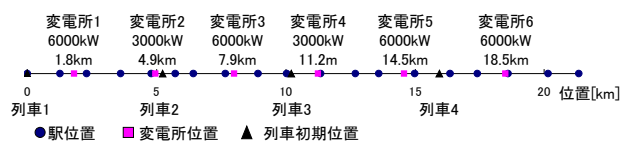


図2：変電所および駅の位置
Fig.2. Position of substations and stations

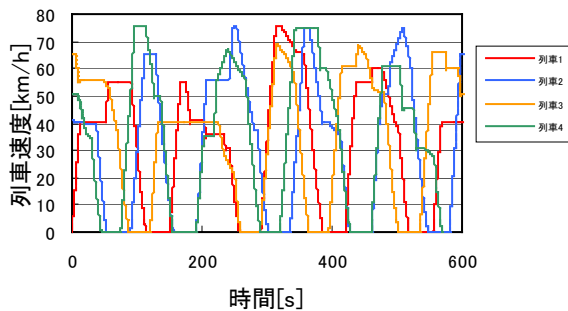


図3：運転曲線
Fig.3. Run Curve

<4・2>変電所出力を最小にする回生性能 PDISにより、図4の破線で示すように、架線電圧に1900[V]の上限を設け、その範囲内で、変電所の出力が常に最小になるように、回生電力の制御を行うという想定で走行シミュレーションを行った。回生時の架線電圧と回生電力との関係を調べるため、10分間の走行シミュレーションで、0.25秒ごとに路線上の全列車のパンタ点電圧と回生電力の関係をプロットした結果を図4に示す。このとき、路線には最大で4本の列車が存在する。図4中の実線は主回路電流を絞り込む場合の特性である。この結果から、実線の特性では、かなり保守的に、回生電力を絞ってしまうことが分かる。なお、図1で示す電動機電流を絞り込む現用の特性では、2.の理由から回生エネルギーはさらに少なくなってしまう。

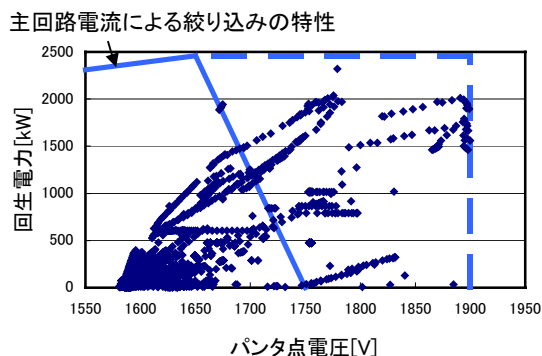


図4：回生性能
Fig.4. Regenerative performance

図4から、パンタ点電圧が高い場合でも、十分な回生負荷が存在する状況では、電力回生を行えることが分かる。これから、比較的遠い位置に十分な回生負荷が存在している場合には、絞り込み特性の範囲を広げることで、電力回生を行えることが分かる。

次に、図5にこの10分間のシミュレーションでの回生エネルギーの総和を、図6に変電所出力エネルギーの総和を示す。この結果から、変電所出力が常に最小になるように制御した場合、図4実線の絞り込み特性で制御した場合に比べて、回生エネルギー総量は、

約6.6[kWh]、割合にして約13[%]増加することが分かる。また、約3.7[kWh]、割合にして約2.6[%]の変電所出力エネルギーを削減できることが分かる。仮に、1[kWh]の当たりの電気代を14円とし、同一のパターンで1日7時間運行したとすると、年間365日で57.3[MWh]のエネルギーを削減でき、約80万円の電気料金を削減できる。

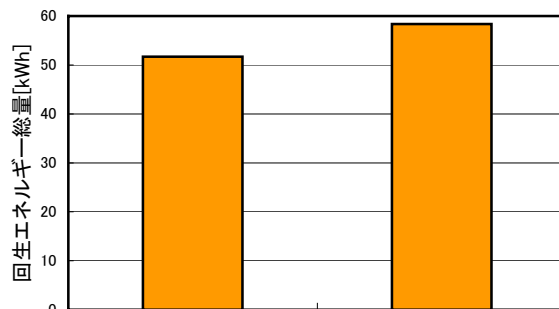


図5：回生エネルギー
Fig.5. Regenerative energy

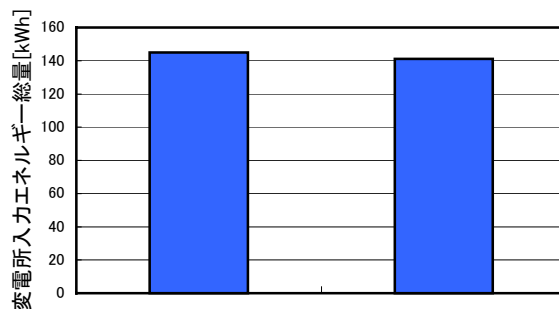


図6：変電所出力エネルギー
Fig.6. Output of substations

5. まとめ

- ① 比較的に遠くに大きな回生負荷が存在している場合には、回生時の回生車のパンタ点電圧は高くても、十分な電力回生を行える。
- ② 本検討例では、絞り込み特性の範囲を広げることで、回生エネルギーを約13[%]増加させることができ、また、変電所出力エネルギーを約2.6[%]削減できた。

文献

- (1) 曾根 悟, 回生車時代の饋電特性と絞り込み特性の再検討, 電気学会交通・電気鉄道リニアドライブ合同研究会, TER-02-49 LD-02-64(2002)