

直流き電システムにおける回生ブレーキ最大活用時のエネルギー評価

岡田万基^{*}, 古関隆章 (東京大学)

Evaluation of Energy at maximal usage of Regenerative Brakes in a DC Feeding System
Yuruki Okada^{*}, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

Abstract

This paper describes a method to enhance the ratio of regenerated energy in regenerative braking of a train by PDIS(Power Distribution Instruction System). The PDIS have been implemented into train's regenerative braking system in order to avoid excess of catenary voltage in regenerative braking operation. To solve this problem, the authors assume an ideal system for managing the power of whole trains in a feeding circuit, and calculate the effect of the ideal power distribution system.

キーワード：回生ブレーキ、回生絞り込み、電力管理
(regenerative brake, squeezing control, power management)

1. はじめに

現在、日本の電気鉄道の多くは直流き電システムを採用しており、また、そこを走行する電気車のほとんどは回生車となっている。

回生車は、ブレーキをかける際、運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、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。従って、回生ブレーキによるブレーキ力は回生負荷の状態に依存するため、路線上に十分な回生負荷が存在しない場合、パンタ点の過電圧防止のため回生電力を絞り込む、いわゆる回生絞り込み制御を行っている。

しかし、現在の回生絞り込み制御では、過剰に回生電力を絞り込んでいることが確認されている⁽¹⁾⁽²⁾。

そこで、本研究では、回生エネルギーの増大を目的として、実路線を対象に回生絞り込み制御を改良した場合のエネルギーの評価を行い、現在の回生絞り込み制御の改良点を検討する。

2. 現在の回生絞り込み制御の問題点

現在の回生絞り込み制御では、図1に示す特性に従って電動機電流を絞り込むことにより、回生電力を絞り込んでいる。しかし、以下のような問題点があるために、過剰に回生電力を絞り込んでいる。

パンタ点電圧の上昇に寄与する主回路電流ではなく、電動機電流を絞る特性になっているため、低速域で、不必要に回生電力を絞り込んでいる。

回生負荷の変動に対応するため、回生電力を絞り込む電圧が、き電システムの許容最大電圧よりかなり低く設定されている。

パンタ点電圧以外にも、絞り込みのための制御因子が存在するため、実際の動作点は、設定された特性よりかなり内側にある。

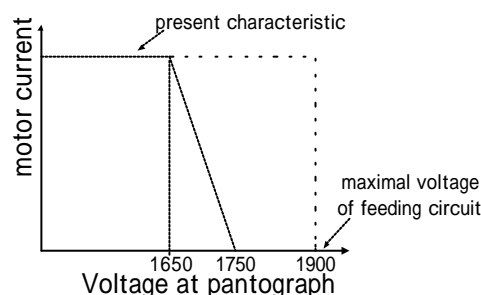


図1：現在の回生絞り込み特性

Fig. 1 Present characteristic of squeezing control

3. 回生絞り込み制御の改良点の検討

2. 節で述べた問題点から回生絞り込み制御の改良点を検討すると、以下のようにまとめられる。

絞り込み対象を電動機電流から主回路電流に変更する。

図1の現在の特性から破線で示す特性に回生絞り込み特性の範囲を広げて、パンタ点電圧が高い場合でも、き電システム上に十分な回生負荷が存在する場合には、電力回生を行えるようにする。

このうち、は絞り込み特性を変更することで容易に実現できる可能性があるが、を実現するには、現在の回生絞り込み制御の考え方を見直す必要がある。なぜなら、現在の回生絞り込み制御では、自車のパンタ点電圧と電動機(主回路)電流のみを測定して制御を行っているため、回生負荷がどのような状態にあるかを把握できないからであ

る。回生負荷の状態を把握できない状況では、回生負荷減少時に過電圧となるのを防ぐため、必然的に保守的な制御を行うことになる。従って、回生絞り込み特性を改良するには、列車間および列車と変電所との間での情報交換により、回生負荷の状態を把握する必要がある。

以上のことから、回生絞り込み制御の改良すべき点をまとめると表1のようになる。

表1：回生絞り込み制御の改良すべき点
Table 1 Improvement of squeezing control

絞り込む対象	絞り込み特性	情報交換の有無	
		無	有
電動機電流	図1実線の特性	CASE 0	CASE 2
主回路電流	図1実線の特性	CASE 1	CASE 3
	図1破線の特性	-	CASE 4

ところで、本論文では、き電システム内で情報交換を行った場合の検討を行うが、その情報交換の手法を述べる。

まず、き電システム内に理想的な電力管理システム PDIS (Power Distribution Instruction System) を設ける。PDIS は、図2に示すように、常に全列車の位置と電力を監視しており、システム内の回生車に対しては、き電回路の電圧が許容される最大電圧を超えないように、かつ、変電所出力が最小となるように、回生電力を指示する。つまり、き電システム内の回生負荷の状態を常に把握しながら、その回生負荷に応じて回生ブレーキを動作させるのが PDIS の役割である。

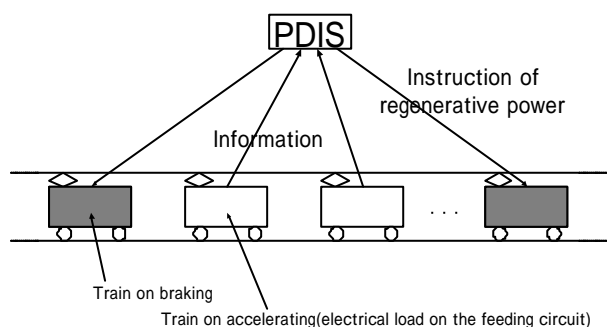


図2：PDISによる制御
Fig. 2 Concept of the PDIS

このように、常に回生負荷に応じて回生ブレーキを動作させることで、過剰な回生絞り込みをなくし、回生電力を有効に活用する状況を与えることで、情報交換を行う場合の効果を評価する。

4．本研究での検討内容

本研究では、表1のCASE 0～CASE 4の絞り込み特性を、

計算機上のき電回路の計算により評価し、表2の内容を検討する。

表2：改良点の評価

Table 2 Evaluation of improvement of squeezing control

改良点	検討内容
CASE 0 CASE 1 CASE 2 CASE 3	絞り込み対象を電動機電流から主回路電流に変更したことによる効果
CASE 0 CASE 2 CASE 1 CASE 3	絞り込み対象は同じで、情報交換を行った場合の効果
CASE 3 CASE 4	回生絞り込み特性の範囲をき電回路が許容する最大電圧まで広げ、さらに、情報交換を行った場合の効果

5．実路線を対象とした評価

回生絞り込みの改良に対する評価を行うため、実路線を対象に、計算機上でき電回路の計算を行う。

< 5.1 > モデルの設定

実路線のモデルを以下のように設定する。

大都市地下鉄A線を評価の対象とする(駅と変電所の位置関係を図3に示す)。なお、列車の運転間隔は10分とする。

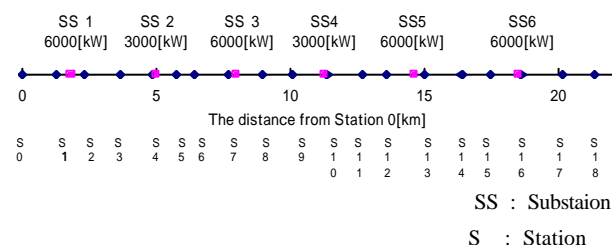


図3：駅と変電所の位置関係

Fig. 3 Positions of stations and substations

変電所に回生用インバータはないものとする。簡略化のため、全列車の動きは既定の運転曲線に従うものとし、駅での停車時間も固定する。従って、シミュレーションでは、列車が消費する電力は予め定められており、回生電力の制御のみを行うことになる。

運転曲線から必要となるブレーキ力のうち、回生ブレーキで負担できない分は、理想的な機械ブレーキが補足する。

き電回路は図4のように取り扱う。なお、このシミュレーションでは、列車の動きを運転曲線により固定するので、列車の消費(回生)電力が運転曲線により決まるために、列車を定電力源として扱う必要があるが、回路計算を簡略化するために、定電力源を電圧源と直列抵抗で近似している。

PDIS は 0.25[s]ごとに回路計算を行い、変電所出力を最小にする再生電力の配分を決定する。

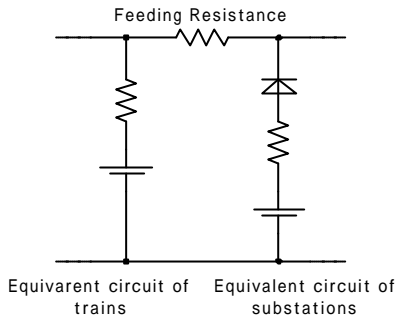


図4：直流回路としてのき電解回路の取り扱い
Fig. 4 Direct current circuit for feeding circuit

< 5 . 2 > 回生絞り込み制御改良の効果の検討内容

回生絞り込み制御改良について、検討の際の具体的な評価量は以下の通りである。

- パンタ点電圧 - 主回路電流特性上での動作点
- 回生エネルギー
- 変電所出力エネルギー
- 線路抵抗（線路と架線の抵抗）による損失（以下、き電損失と記す）エネルギー

なお、計算では、以上の評価量について、ダイヤの1周期(10分間)中の変化を計算する。

< 5 . 3 > パンタ点電圧 - 主回路電流特性上での動作点

図5に、CASE 0 および CASE 4 の回生絞り込み特性で計算を行った場合について、き電システム内の全回生車のパンタ点電圧 - 主回路（回生）電流特性上での動作点を0.25[s]ごとにプロットしたグラフを示す。

まず、図5のCASE 4の場合の動作点から、回生負荷が存在する場合には、パンタ点電圧が高くても、電力回生を行えることが分かる。また、CASE 0の場合との比較から、回生絞り込み特性の範囲を広げ、かつ、情報交換を行うことで、回生絞り込み特性を改善できると言える。

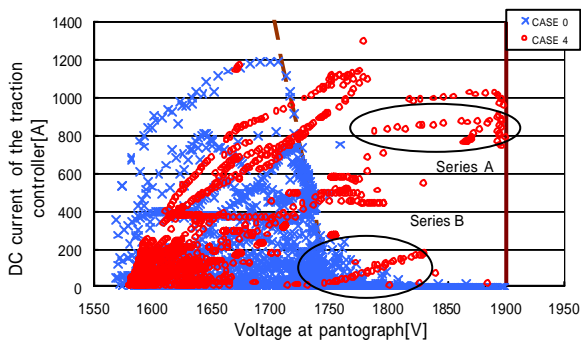


図5：CASE 0 および CASE 4 の場合の動作点
Fig. 5 Relation of voltage of pantograph and DC current of traction controller

ところで、CASE 4 の回生絞り込み特性で計算を行った場合、パンタ点電圧が高い位置にも動作点が存在している。では、どのような状況で電力回生を行った場合に、パンタ点電圧が高い位置で電力回生が行われるかを示すために、図5内の系列AおよびBについて、き電システム内の全列車の電力推移を示しながら考察する。

まず、系列Aでの、き電システム内の全列車の電力推移を図6に示す。また、列車1の電力推移に関しては、CASE 0 および CASE 1 の場合の電力推移を合わせて示す。図5中の系列Aに対応するのは、図6の列車1の電力推移である。このとき、き電システム内では、列車1が回生を行っており、列車2と列車4が力行を行って列車1の回生負荷となっている。ここで、単純に回生負荷の消費電力だけを見ると十分に大きい、消費電力の大きい列車4が列車1に対して遠い位置に存在するために、線路抵抗による電圧降下が原因となって、列車1のパンタ点電圧が高くなっていると考えられる。また、CASE 0 および CASE 1 の場合の電力推移を見ると、CASE 4の場合と比べて、回生電力が少ないことが確認できる。

次に、系列Bでの、き電システム内の全列車の電力推移を図7に示す。列車4の電力推移に関しては、CASE 0 および CASE 1 の場合の電力推移を合わせて示す。

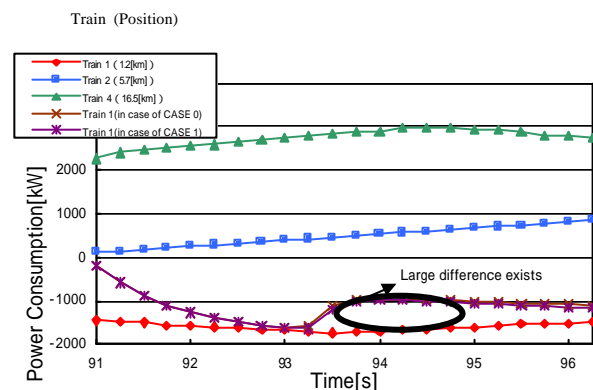


図6：系列Aでの電力推移
Fig. 6 Transition of power in series A

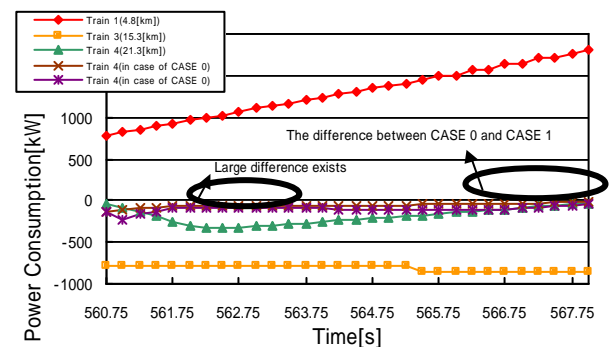


図7：系列Bでの電力推移
Fig. 7 Transition of power in series B

図5中の系列Bに対応するのは、図7の列車4の電力推移である。このとき、き電システム内では、列車3と列車4が回生を行っており、列車1がそれらの回生負荷となっている。こちらも、回生負荷は十分大きな電力を消費しているが、回生車と回生負荷との距離が長いために、パンタ点電圧が高くなっている。加えて、系列Bのケースでは、列車1と列車4の間で、列車2が回生を行っていることも、列車4のパンタ点電圧を高くする原因となっている。また、CASE 0 および CASE 1 の場合の電力推移を見ると、CASE 4 の場合と比べて、回生電力が少ないことが確認できる。加えて、CASE 0 の場合と CASE 1 の場合を比較すると、低速領域で、両者に違いが見られる。

従って、系列Aおよび系列Bの解析から、パンタ点電圧が高い位置で電力回生が行われるのは、回生負荷が十分に電力を消費していて、回生車と回生負荷との距離が長い場合であると言える。また、CASE 0 の場合および CASE 1 の場合と CASE 4 の場合を比較すると、絞り込み特性の範囲を広げたことで、回生電力が増加していることが確認できる。

< 5 . 4 > 回生エネルギーの評価

図8に、10分間の回路計算での、CASE 0 ~ CASE 4 の回生絞り込み特性における回生エネルギーの総量を示す。

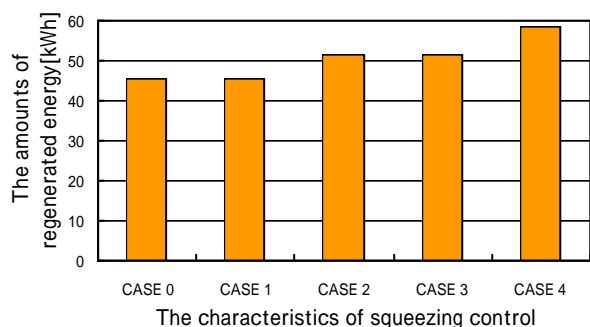


図8 : 10 分間での回生エネルギー総量
Fig. 8 Amount of regenerated energy

また、この結果から、以下の点が考察される。

CASE 0 と CASE 1、および、CASE 2 と CASE 3 の比較から、絞り込みの対象を電動機電流から主回路電流に変更しても、回生エネルギーはあまり変化しない。

CASE 1 と CASE 4 の比較から、回生絞り込み特性の範囲を広げ、かつ、情報交換を行うことで、回生エネルギーは約14[kWh](約29[%])増加する。CASE 0 と CASE 2、および、CASE 1 と CASE 3 の比較から、情報交換を行うことで、回生エネルギーは約6[kWh](約14[%])増加する。

また、と から、CASE 1 を CASE 4 に変更したことによる回生エネルギーの増加のうち、その約半分は情報交換を行うことによるもので、残り約半分は絞り込み特性の範囲を広げたことによるものであると言える。

従って、回生絞り込み特性を改善するには、絞り込み特

性の範囲を広げるだけでなく、情報交換を行うことによって、回生負荷に応じた電力回生を行うことが必要であると言える。言い換えると、自車の測定データのみを用いて絞り込みを行う現在の回生絞り込み制御では、パンタ点が過電圧となるのを防ぐために、本来回生できる電力の一部を犠牲にしているため、情報交換によって回生負荷の状態を把握し、適切な回生絞り込みを行うことにより、回生エネルギーを20[%]以上増加させる可能性がある。

< 5 . 5 > 変電所出力エネルギーの評価

図9に、10分間の回路計算での、CASE 0 ~ CASE 4 の回生絞り込み特性における変電所出力エネルギーの総量を示す。この結果から、以下の点が考察される。

CASE 0 と CASE 1 との比較、および、CASE 2 と CASE 3 との比較から、絞り込みの対象を電動機電流から主回路電流に変更しても、変電所出力エネルギーはあまり変化しない。

CASE 1 と CASE 4 の比較から、回生絞り込み特性の範囲を広げ、かつ、情報交換を行うことで、変電所出力エネルギーを約12[kWh](約8[%])削減できる。

CASE 0 と CASE 2 との比較、および、CASE 1 と CASE 3 との比較から、情報交換を行うことで、変電所出力エネルギーを約8[kWh](約5[%])削減できる。

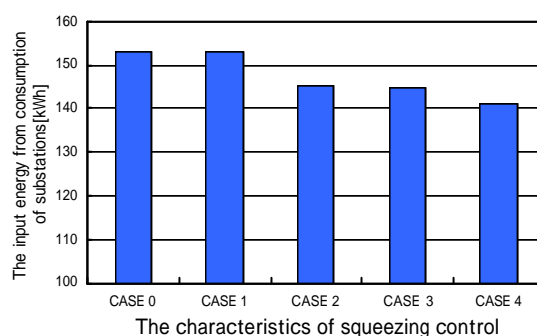


図9 : 10 分間での変電所出力エネルギー総量
Fig. 9 Amount of input energy from substations

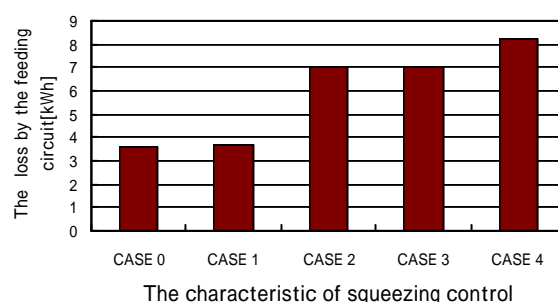


図10 : 10 分間でのき電損失エネルギー総量
Fig. 10 The Loss by Feeding Resistance

< 5 . 6 > 電損失エネルギーの評価

図 1 0 に、10分間の回路計算での、CASE 0~CASE 4の回生絞り込み特性における電損失エネルギーの総量を示す。

この結果から、回生エネルギーが増加するに従って、電損失エネルギーも増加することが分かる。これは、回生電力の増加により、回生電流が増加したため、線路抵抗での損失が増加したためと考えられる。

6 . 交流回路における検討

以上の検討は、図 4 に示した直流回路によるものであったが、実際の電回路には、線路のインダクタンス等のリアクタンスが含まれる。従って、直流回路の計算で最大電圧の制限をクリアしても、回路のリアクタンスを考慮した交流計算では、これをクリアできない可能性がある。そこで、CASE 4での各列車の電力の推移を用いて、交流回路での計算を行った。

< 6 . 1 > 交流回路としての等価回路

交流回路としての等価回路を図 1 1 のように考える。交流回路と直流回路との違いは、線路のインダクタンスと、列車のフィルリアクトルおよびフィルタコンデンサを考慮に入れたことにある。

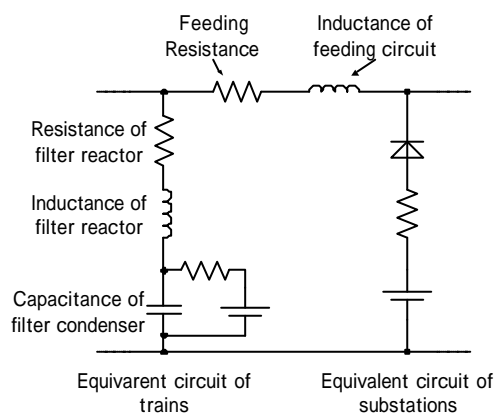


図 1 1 : 交流回路としての電回路の取り扱い
Fig. 11 Alternating current circuit for feeding circuit

< 6 . 2 > 微分方程式の取り扱い

次に、微分方程式の取り扱いであるが、本検討では、計算機上の離散化した計算により回路計算を行っているので、微分方程式を式 (1) に示す漸化式として取り扱い、計算を行った。なお、 \mathbf{x} は、回路内の全列車のフィルタコンデンサ電圧と電流、および、変電所の送出電流からなる状態ベクトルで、 A は回路方程式から決まる係数行列、 \mathbf{u} は、列車および変電所直流電圧源により構成される入力ベクトルである。また、計算のタイムステップ T は $0.025[s]$ とした。

$$\frac{\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n}{T} = A_n \mathbf{x}_{n+1} + \mathbf{u}_{n+1} \quad (1)$$

< 6 . 3 > フィルタコンデンサ電圧および主回路電流の推移

図 1 2 および図 1 3 に、CASE 4での電力推移を用いた交流回路の計算結果として、計算開始から200[s]での列車1のフィルタコンデンサ電圧および主回路電流の推移を示す。

この結果から分かるように、交流回路において回路計算を行った場合には、直流回路でのそれに対して、主回路電流の推移にはあまり違いは見られないが、フィルタコンデンサ電圧の推移に関して、以下の点で差異が見られる。

フィルタリアクトルの抵抗の影響により、力行時の電圧が低下している。

回路のリアクタンスの影響により、回路が許容する最大電圧を超える場合がある。

力行終了時や回生立ち上げ時にフィルタコンデンサ電圧が振動的になっている。

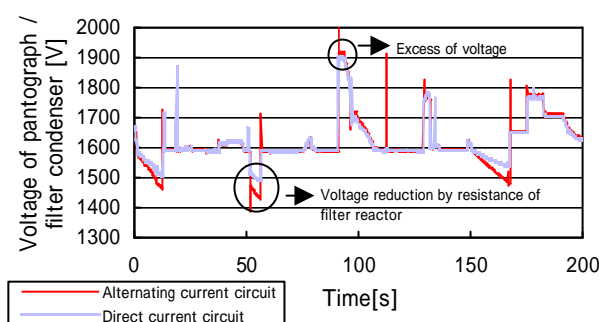


図 1 2 : 列車 1 のフィルタコンデンサ電圧の推移
Fig. 12 Transition of voltage of filter condenser of TRAIN 1

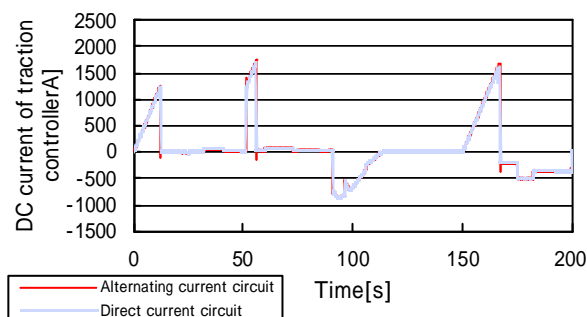


図 1 3 : 列車 1 の主回路電流の推移
Fig. 13 Transition of DC current of traction controller of TRAIN 1

7 . まとめ

本研究は、以下のようにまとめられる。

回生絞り込みを行う対象を電動機電流から主回路電流に変化させても、回生性能にはあまり影響しない。

現在の回生絞り込み特性を改善して、回生ブレーキを最大限活用できるように絞り込み特性を変更した場合、約 29[%] 増加させることができる。なお、その効果のうち、約半分は回生絞り込み特性を広げたことによる得られる効果で、残り約半分は回生負荷の状況を把握することによって得られる効果である。

現在の回生絞り込み特性を改善して、回生ブレーキを最大限活用できるように絞り込み特性を変更した場合、約 8[%] 削減できる。なお、その効果のうち、その約 4 割が回生絞り込み特性の範囲を広げることの効果で、残り約 6 割は情報交換を行うことの効果であって、後者のもたらす効果が大きい。

回生負荷が大きく、回生車と回生負荷との距離が遠い場合には、回生絞り込みの範囲を広げ、情報交換を行うことの効果大きい。

交流回路での回路計算では、直流回路での計算結果に対して、フィルタリアクトルでの電圧降下や、回路のリアクタンスによる電圧の超過等の差異が見られるものの、電圧および電流の推移はほぼ一致している。

7. 今後の課題

今後、本研究を進めるにあたり課題となる内容は、以下の通りである。

- 運転間隔を変えた場合の評価
- 補機電力（列車の加減速に関わる電力以外の電力）を考慮した計算
- 回生変電所が存在した場合の評価
- 駅での停車時間の変動を考慮したシステム
- 交流回路のモデル化の再検討

まず、について、本論文のシステムでは、列車の運行が 10 分の等間隔ダイヤとなっているが、これは、大都市鉄道では、比較的長い運転間隔であり、き電システム内の回生負荷の存在確率を考えると、回生ブレーキを使用するには、比較的不利な状況になっている。従って、今後の研究では、他にいくつかの運転間隔において、回生車の挙動を分析する必要がある。

次に、について、本論文では、補機電力を無視して計算を行っているが、実際のき電システムでは、補機電力も重要な電力消費の一部であるので、これを考慮した電力計算が必要である。

また、に関して、本論文のシステムでは、変電所に回生用インバータはないものとしたが、回生ブレーキを有効活用するという点では、回生変電所が存在した場合の検討も必要である。

に関して、本検討では、き電回路の計算を簡単にするため、列車の駅での停車時間を固定した場合を考えが、

実際の運行では、駅での停車時間を固定することは困難であるため、停車時間が変化した場合を検討する必要がある。

最後に、本検討では、交流回路のモデル化を行い、漸化式を用いて回路計算を行ったが、この漸化式にはさまざまな形があるので、き電回路の計算に適した漸化式を検討する必要がある。また、解が振動的にならないよう、計算のタイムステップに関して検討する必要がある。

参考文献

- (1) S. Sone: "Re-examination of Feeding Characteristics and Squeezing Control of Regenerative Trains"; The Papers of Joint Technical Meeting Transportation and Electric Railway and Linear drives, TER-02-49/LD-02-64, pp. 13-16(25/07/2002) (in Japanese)
曾根 悟: 「回生車時代のき電特性と絞り込み特性の再検討」, 交通・電気鉄道、リニアドライブ合同研究会資料, TER-02-49/LD-02-64, pp. 49-55(2002年7月25日)
- (2) Y. Okada, T. Koseki: "Evaluation of maximal reduction of electric energy consumed by DC-fed electric trains", NATIONAL CONVENTION RECORD I.E.E. JAPAN, 5-219, pp307-308(2003) (in Japanese)
岡田万基、古関隆章: 「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」, 平成15年電気学会全国大会 講演論文集, 5-219, pp307-308 (2003年)