列車の主回路電力制御を応用したインテリジェント化 直流鉄道電力システム

正員 高 木 亮 (東京大)

正員 曾 根 悟 (東京大)

More Intelligent DC Railway Electrical Power Systems with Traction Power Control

Ryo Takagi, Member, Satoru Sone, Member (The University of Tokyo)

The load of a dc railway has very large peaks, while the average power is low. This makes the capacity of wayside power equipments larger. Recently the ratio of peak power to average power is even higher because of the introduction of a large number of electric multiple units with regenerative brake system. Such introduction has also made the contact system's unreceptiveness of the regenerated energy a significant problem. To solve these problems, researchers are trying to add intelligence to the power system.

In this paper, the authors describe a novel method of intelligently controlling traction power of trains. In this system the trains reduce their accelerating power to cut current peaks in wayside substations. With the proposed method we can reduce load peaks by up to 31%, which means that the characteristics of railway load has been changed drastically. The delays of the trains involved are negligible. Also the unreceptiveness of the regenerated power can be almost eliminated.

In the first part of this paper, we describe the idea of traction power control. Then we describe how the idea is applied to wayside substation load peak suppression or receptiveness improvement, with some simulation results to prove the method. Finally, we discuss the possibility of further improvement of the system by adding communication capability between trains and wayside equipments.

キーワード：電気鉄道，き電システム，主回路電力制御，ピークカット，回生失効防止制御

1. はじめに

電気鉄道の負荷電流は，その最大値と平均値の比が非常に大きい性質をもつ。このため地上に置かれる電力機器の稼働率は低くならざるを得ない。電力回生ブレーキをもつ電気車の大量導入は，この傾向に拍車をかけたうえに，車両のもつ電力回生能力が十分生かされない，いわゆる回生失効という問題も浮き上がり，これを解決することが考えられている⁽¹⁾。例えば，何らかの制御により負荷電流のピーク

を抑制すれば，電力機器の稼働率は上昇する。また，直流き電システムでは回生失効は回生電力が付近に存在する別な負荷によって消費されないと起こるので，回生電力がより遠くの負荷まで届くようにすれば回生失効は防止できる⁽²⁾。

電力システムインテリジェント化に関する従来の研究では，地上の電力機器に対して制御をかける方法（変電所の電圧制御など）がもっぱら研究されてきた^{(2)~(4)}。これに対して，本論文では列車の主回路電力を制御する新しい方法を提案する。この方法では，ある変電所の電流が大きい場合に付近を力行中の列車

が主回路電力を抑制することで変電所電流の抑制を図る。これによれば、変電所電流のピークは従来の手法では考えられないほど(最大約 31%)激減し、電鉄負荷の様相は一変する。また、主回路電力を制御することにより生じる列車の運行乱れは無視できるほど少ない。また、この手法を応用して回生失効についてもほぼなくすることが可能である。

本論文では、列車主回路電力制御の概念を述べる。次いで、これを応用して変電所電流のピーク抑制および回生失効防止を行うシステムを列車・地上間通信を行わずに実現する方法を述べ、制御の効果をシミュレーションによって明らかにする。その後、列車・地上間通信を行った場合のシステムの改良可能性についても検討する。

なお以下の議論では、列車はすべてインバータ制御または界磁チョップを除くチョップ制御の電気車で、回生ブレーキをもつものを前提とする。また、駅間での運転パターンは「加速(力行)→惰行→ブレーキ→停車」という簡単なものを仮定する。

2. 列車主回路電力制御の概念

〈2・1〉 列車力行電力の制限と列車遅れ⁽⁵⁾ 例題として、電鉄用変電所の負荷電流のピーク抑制制御について検討しよう。ある変電所の負荷電流のピークを減少させるには、

- (1) 変電所の電圧制御により付近の変電所に救済させる。
- (2) 変電所付近の列車の力行電力を減少させる。
- (3) 変電所付近の列車の運動エネルギーを、減速が必要ない場合であっても回生ブレーキにより電システムに返させる。

という三つの方法が考えられる。従来の研究では(1)のみがもっぱら研究されてきたのだが、この方法によって得られる効果はそれほど顕著ではなかった⁽²⁾⁽³⁾。

もし、(2)および(3)が使えるならば、ピーク抑制をより効果的に実現できる。しかし、これを行えば当然列車は遅れると懸念される。そこで、列車の力行引張力を一定時間減少させたときの列車遅れを計算した。結果を図1に示す。加速開始後15秒から25秒までの10秒間、力行引張力および電流を最大加速時の60%に落としたケースである。絞込み量が大きいにもかかわらず、遅れは最大1.3秒程度と小さく、通常の列車運行においては無視できる。

このことから、比較的高速域にある列車ならば、主回路電力の絞込みによる遅れは通常の列車運行における乱れと比べて非常に小さく、効果的かつ大幅なピー

図1 主回路電力制御と列車遅れ
Fig. 1. Calculated delay with main circuit power reduction.

ク抑制を行う可能性があることがわかる。なお、より低速域での絞込みは大きな遅れにつながるおそれがあるが、低速では主回路電力も小さく、主回路電力制御の効果も小さくなるので、問題は少ない。

〈2・2〉 列車の状態遷移による救済 前節の結果から、低速域以外であれば惰行中の列車が一時的に電力を回生して減速したり電力を消費して力行することも同様に可能と考えることができる。これを列車状態遷移と呼ぶ。この方法を用いることによって、列車それ自体の運動エネルギーを電力の融通に使うことが可能となる。

これを実現するときには、効率を不必要に下げないように列車が、「回生のみ」なる状態を新たにもつ必要がある。通常の「ブレーキ」状態では回生ブレーキ力が不足すれば、空気ブレーキによる補足が自動的に行われる。そこで、「回生のみ」状態では回生ブレーキのみでブレーキをかけるものとするれば、空気ブレーキによる運動エネルギーのロスを防ぐことができる。

また、列車状態遷移を回生失効防止制御に応用することもできる。回生失効が起きそうな場合には惰行中の列車を力行状態に転じさせて負荷を増やせば、回生失効を防止できる。

3. 列車・地上間通信を行わない場合の制御法

〈3・1〉 定性的な制御ルールの記述 前章で述べた列車主回路電力制御の考え方を、変電所ピークカット制御および回生失効防止に応用した場合の制御ルールを検討する。

まず、変電所電流のピークを抑制するためには、列車は次のようなルールに従って行動すればよい。

- (1) 変電所電流が過大ならば、速度の高い力行列車は力行電流を絞る。

(2) 変電所電流が過大ならば、速度の高い惰行列車は回生状態に転移する。

また、回生失効を防止するためには、列車は次のようなルールに従って行動すればよい。

(3) 回生車が多ければ、惰行列車は力行状態に転移する。

なお、このモデルでは列車が力行ないしは惰行状態からブレーキ状態に遷移する条件は「一定減速度で減速して所定の位置に停止できること」である。従って、ブレーキ状態の列車は必ず駅の停止目標をねらってブレーキをかけているので、列車がブレーキ状態にある間はこのような制御は行わない。

〈3・2〉 フルノッチ比 インバータ制御またはチョップ制御(界磁チョップを除く)の電気車であれば、出しうる最大の牽引力より小さければどんな値でも自由に好きな牽引力を出せる。また、パンタ点からみた効率が牽引力の値によらず一定と仮定する。このとき、列車速度 v のときに、列車がその速度における最大牽引力 $T_{\max}(v)$ を発揮している(これを「フルノッチで加速している」と呼ぶ)ときの電流を $I_{\max}(v)$ とすれば、牽引力 T を出しているときの電流 I は

$$I = \left(\frac{T}{T_{\max}} \right) I_{\max} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここで、 $T/T_{\max} = r$ とすれば、

$$T = r T_{\max} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$I = r I_{\max} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と与えられる。 r は牽引力および電流のフルノッチ時に対する比率を表すことになるので、これをフルノッチ比と定義する。なお、フルノッチ比は力行時には0~1、回生時は0~-1の範囲の値をとるものとする。従来の走行パターンにおいては、フルノッチ比は力行時には1、惰行時には0、最大減速度でのブレーキ時には-1となる。

以下では、この量を用いて制御アルゴリズムを記述する。

〈3・3〉 フルノッチ比を用いた制御方針の記述

まず、列車・地上間通信は行わないから、「変電所電流が過大」、「回生車が多い」というき電システム側の状態は、き電線電圧から推定する。列車が知ることができるき電線電圧はパンタ点のものだけなので、結局パンタ点電圧をもとに推定することになる。

変電所電流が大きくなれば一般に送出し電圧が下がるので、パンタ点電圧が「低い」とときには変電所電流が「過大である」と、パンタ点電圧が「低くない」とときには変電所電流は「過大でない」と、それぞれ判断する。また、回生車が多ければき電線電圧が上昇する

ので、パンタ点電圧が「高い」とときには「回生車が多すぎる」と、パンタ点電圧が「高くない」とときには「回生車は多すぎない」と、それぞれ判断する。

また、力行電流を絞ることはフルノッチ比を下げることである。同様に、惰行列車が回生状態に転移するのはフルノッチ比を下げることであり、惰行車両が力行状態に転移するのはフルノッチ比を上げることである。

これらから、〈3・1〉節の制御ルールはフルノッチ比およびパンタ点電圧を用いて次のように書き換えることができる。

(1) パンタ点電圧が低くなったら、速度の高い力行・惰行列車はフルノッチ比を下げる。

(2) パンタ点電圧が高くなったら、惰行列車はフルノッチ比を上げる。

〈3・4〉 フルノッチ比決定アルゴリズム 前節の制御ルールに従った制御を実現するためには、力行列車・惰行列車についてフルノッチ比を従来の走行パターンとは違う値にする必要がある。そのためのアルゴリズムとして、次のようなものを提案する。

(1) 力行列車 力行中の列車は、フルノッチ比を図2もしくは(4)式のように、パンタ点電圧によって変更する。

$$r = \begin{cases} r_{\min} & \text{for } V \leq V_1 \\ r_{\min} + (1 - r_{\min}) \frac{V - V_1}{V_2 - V_1} & \text{for } V_1 < V < V_2 \\ 1 & \text{for } V \geq V_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 V : パンタ点電圧、 V_1, V_2 : 「電圧が低い」領域の上限を表す電圧定数

図2 提案方式における力行車のフルノッチ比-パンタ点電圧特性

Fig. 2. Full-notch ratio-pantograph voltage characteristics of accelerating trains.

図 3 提案方式における最小フルノッチ比-速度特性

Fig. 3. Minimum full-notch ratio-velocity characteristics.

図 4 提案方式における惰行車のフルノッチ比-パンタ点電圧特性

Fig. 4. Full-notch ratio-pantograph voltage characteristics of coasting trains.

(4) 式中的変数 $r_{\min}$ は最小フルノッチ比と呼ぶ。これが 1 であれば「電圧が低い」領域でも力行電力の絞込みは行われない。また、これが 0 であれば絞込みがフルに行われる。そこで、この最小フルノッチ比を速度 v の関数として図 3 もしくは (5) 式にて与えることにより、「速度の高い」列車に対してだけ絞込みを行うようにすることができる。

$$r_{\min} = \begin{cases} 1 & \text{for } v \leq v_1 \\ 1 - \frac{v - v_1}{v_2 - v_1} & \text{for } v_1 < v < v_2 \quad \dots\dots (5) \\ 0 & \text{for } v \geq v_2 \end{cases}$$

ここに、 v_1 、 v_2 ：「速度が低い」領域の上限を表す速度定数

(2) 惰行列車 惰行中の列車は、フルノッチ比を図 4 もしくは (6) 式のように、パンタ点電圧によって変更する。「惰行」状態は、従来全く牽引力を発揮しない状態であったが、提案するシステムでは「電圧が低いと弱い回生ブレーキをかけ、電圧が高いと弱い

力行をし、電圧が低くも高くもないと何もしない」状態と再定義される。

$$r = \begin{cases} -r_{\max} & \text{for } V \leq V_1 \\ -r_{\max} \left(1 - \frac{V - V_1}{V_2 - V_1} \right) & \text{for } V_1 < V < V_2 \\ 0 & \text{for } V_2 \leq V \leq V_3 \\ r_{\max} \frac{V - V_3}{V_4 - V_3} & \text{for } V_3 < V < V_4 \\ r_{\max} & \text{for } V \geq V_4 \end{cases} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 V 、 V_1 、 V_2 ：(4) 式と同じ、 V_3 、 V_4 ：

「電圧が高い」領域の下限を表す電圧定数

(6) 式における $r_{\max}$ は最大フルノッチ比であり、

(5) 式の $r_{\min}$ を用いて次式のように与えられる。

$$r_{\max} = 1 - r_{\min} \quad \dots\dots (7)$$

4. 列車・地上間通信なしの場合のシミュレーション

〈3・3〉節で述べたように、列車の主回路電力を制御した場合と、しない場合とについて、シミュレーションを行い結果を比較した⁽⁶⁾。

〈4・1〉 シミュレーション条件 シミュレーションの条件は以下のとおりとした。

- (1) 路線：JR 山手線
- (2) ダイヤ：144 秒周期、完全に周期的なダイヤ
- (3) 車両：小田急 1000 系インバータ電車
 - ・5 M 5 T 高加速 最大力行電流 4,400 A
 - ・本数 50 本
- (4) 変電所：整流器に半導体ダイオードを使用
 - ・等価内部抵抗 0.025 Ω (7,200 kW 相当)
 - ・無負荷時送出電圧 1,600 V
- (5) き電方式：全線並列き電、変電所母線で上下線を接続
- (6) き電定数：0.0327 Ω/km
- (7) その他：

・山手線は独立な系とする。

・列車表定速度は一定とする。ただし、オフブレーキ運転(駅間走行パターンにおいて惰行がなく「力行→ブレーキ→停車」となる運転パターン。このパターンが最短の駅間走行時分を与える)でも所定の駅間走行時分を下回らない場合はこの限りでない。

〈4・2〉 変電所数通常時 まず、変電所数が山手線全線で 11(現状と同じ)の場合について、〈3・4〉節のアルゴリズムにおける電圧定数 V_1 、 V_2 の値を変更し

図 5 変電所ピーク電流(変電所数 11)
Fig. 5. 11 S. S.'s—substation peak current.

図 6 変電所 RMS 電流(変電所数 11)
Fig. 6. 11 S. S.'s—substation RMS current.

図 7 力行車パンタ点電圧のヒストグラム
(変電所数 11)
Fig. 7. 11 S. S.'s — pantograph voltage histogram of accelerating trains.

てシミュレーションを行った。その結果、変電所電流の 1 ダイヤ周期(144 秒)あたりの二乗平均平方根(以下、これを変電所 RMS 電流と呼ぶ)・変電所入力エネ

図 8 変電所電流ヒストグラム(変電所数 11)
Fig. 8. 11 S. S.'s—substation current histogram.

表 1 その他の評価量(変電所数11)
Table 1. 11 S. S.'s—other evaluations.

項 目	制御あり	制御なし
変電所入力エネルギー (MW)	31.917	31.948
総力行時間 (s)	4052	2793
回生失効率 (%)	0.761	8.80
回生率 (%)	37.6	33.4

- (i) エネルギーは山手線 1 周分(1 時間)の平均とし、単位 MW で表示した。この値はエネルギーを単位 MWh で表した場合と数字のうえでは同一になる。
- (ii) 総力行時間は内外回り各 2 列車が 1 周したときの力行時間の合計。
- (iii) 力行時間とはフルノッチ比が 0 より大である時間とした。

ルギーの評価量が同時に最小となる値が存在したので、その点 ($V_1=1,350$ V, $V_2=1,450$ V) を最適な点として、制御を行わなかった場合と比較した(図 5～図 8, 表 1)。

ピークカット制御の効果は、ピーク電流値の減少で最大約 31%と、非常に顕著である。RMS 電流についても最大約 10%減少している。このようにピークを大幅に抑制することができると、変電所などの機器設計の考え方が変更でき、容量低減ないしはコストダウンが可能である。また、ピーク率を低く抑制できると電気鉄道負荷の電力系統からみた性質が従来より良くなるから、電源が弱い地域での鉄道電化に対する障害が少なくなる。

また、従来のピークカット制御では、救援される変電所の電圧を周囲より下げるために力行車パンタ点電圧が低くなる確率が増す。しかし、このシステムでは力行車の回生状態への遷移による救援も加わるために、電圧がごく低くなる確率はむしろ減少する。一方、ピークカット制御の結果、変電所入力エネルギーは上昇するのが普通だが、ここで提案する列車主回路

図 9 変電所ピーク電流(変電所数 6)
Fig. 9. 6 S. S.'s—substation peak current.

電力制御によるピークカットでは、後述する回生失効防止制御の効果もあって変電所入力エネルギーはわずかながら減少している。

総力行時間が非常に大きいのは、回生失効防止制御を同時に行ったためである。この回生失効防止制御の効果で、回生失効率はほとんど 0 になっている。回生失効防止のため加速した列車は、走行時分合せのためあとで回生のみ状態に転じるので、回生失効率低下分は一部をのぞいて変電所入力エネルギーの低下にも寄与している。

〈4・3〉 変電所数減少時 変電所数が 6 と、通常より少ない場合についても、同じ手法でシミュレーションを行った。ほぼ等間隔に従来と同一容量の変電所を配置して、〈4・2〉節と同じく V_1 , V_2 の最適値を探した。その最適値 ($V_1=1,260$ V, $V_2=1,360$ V) でのシミュレーション結果を図 9, 図 10 に示す。

このケースでも、ピーク電流値の抑制割合は最大約 28% と大幅である。RMS 電流値も最大約 9% 減少しているが、変電所の連続定格以上の電流が流れている変電所もある。シミュレーション条件は現状のラッシュ時を想定しているが、1 日すべてがこのような重負荷であるわけではない。変電所の遮断器が過電流を検知して動作するほどに大きな負荷電流は流れないことが保証される。そこで、このシミュレーション結果から短時間ならばこの方法によって変電所半減でも運転可能ということができる。

また、熱時定数が小さい半導体ダイオードなどは、ピーク電流値が大幅に減少することから実質的に容量を低減できる可能性がある。熱時定数が大きい変圧器などについても、定格を E 種などのピーク率の高いものからピーク率の低いものへ変更できることによるコスト低減や、容量低減の可能性があると見える。

図 10 変電所 RMS 電流(変電所 6)
Fig. 10. 6 S. S.'s—substation RMS current.

5. 列車・地上間通信による定数 V_1 , V_2 の自動調整

このシステムに列車・地上間通信を付加することにより、システムの更なる改善が期待できる。特に、列車群制御システムとのトータル化が実現できれば、非常に大きな効果が得られる可能性がある。しかし、ここではより簡単な改善の可能性として、定数を路線条件に合わせて自動的に調節することを試みる。

〈3・4〉節に示したアルゴリズムでは、パンタ点電圧のみを見て制御を行うが、これでは変電所側で絞込みの必要ほど大きな電流が流れていないときに列車が電流を減らす行動に出る、またはその逆で絞込みが必要ときに列車が行動を起こさない、ということがあり得る。その確率が小さくなるように (4) 式および (6) 式の定数 V_1 , V_2 を選ぶべきだが、変電所の配置は路線の全長にわたって等間隔・等容量とは限らないことから、定数値は列車の位置により変えたほうがよい。また、地上変電所の容量も常時一定とは限らず、工事や故障などにより容量が変化するから、定数もそれに合わせて変化させる機構があるほうがよい。

一方、エネルギー消費の面からはむだな絞込みは行わず、なるべく変電所電流のピークは高い状態で使うほうが、エネルギー消費は少なくなる。電流絞込みは列車の性能を等価的に下げるため、ノッチオフが遅く、ブレーキ初速が上がるため、エネルギー消費が多くなる。

そこで、本章では列車・地上間通信を導入し、列車がそれから得られる情報により定数を簡単なアルゴリズムで自動調整することを考慮し、そのための制御ルールおよび制御の実現手法を検討する。

〈5・1〉 通信すべきデータと通信量 変電所から

列車に対して、変電所の全電流を送信すればよい。通信量は、山手線のケースについて考えると、全列車に対して全 11 変電所の電流値を 0.25 秒に 1 回の割合で送信するとき

$$4(\text{回/s}) \times 11 \times 16(\text{bit}) = 704 \text{ bit/s} \dots\dots\dots (8)$$

となり、電話線 1 本分の容量とされる 9,600 bit/s に遠く及ばないので、特に問題はないと考える。

〈5・2〉 制御ルール 定数 V_1, V_2 が過大であると、変電所の電流が過大でないのに列車が電流を絞込む確率が多くなる。一方、定数が過小であると電流が過大なのに列車が電流を絞込まない確率が多くなる。また、省エネルギーの観点からは、絞込みはなるべく行わないのがよい。

そこで、次のようなルールが考えられる。

(1) 列車の周囲の変電所電流が過大でなければ、その列車の定数 V_1, V_2 を下げてフルノッチ比を上げる。

(2) 列車の周囲の変電所電流が過大ならば、その列車の定数 V_1, V_2 を上げてフルノッチ比を下げる。

〈5・3〉 定数調整アルゴリズム 前節で述べた制御ルールに従った制御を具体化するために、次のようなアルゴリズムを考えた。時刻 t における変電所電流を $I_{sp}(t)$ 、その変電所の許容最大電流を I_{sm} 、電流が過大である領域の下限値を I_{sc} 、電流が過大とはなり得ない領域の上限値を I_{st} 、と書くことにする。このとき次式が成り立つ。

$$0 < I_{st} < I_{sc} < I_{sm} \dots\dots\dots (9)$$

力行車だけが存在するシステムについて考える。ある時刻 t における列車配置において、変電所電流が $I_{sp}(t)$ である。列車は電流源に近く、変電所は電圧源に近いから、列車配置が時刻 t と同一で、すべての列車の電流が t における値の

$$C_c = \frac{I_{sc}}{I_{sp}(t)} \dots\dots\dots (10)$$

倍である場合を考えると、変電所電流はおおよそ I_{sc} となろう。同様に

$$C_t = \frac{I_{st}}{I_{sp}(t)} \dots\dots\dots (11)$$

倍である場合、変電所電流はおおよそ I_{st} となろう。

通信は Δt 秒ごと(シミュレーションでは 0.25 秒とした)に行うものとする。力行車は、ある時刻 t における C_c, C_t の値から、次の時刻 $t + \Delta t$ には定数 V_1, V_2 を下のルールに従って変更する。

なお、絞込みが問題になるほど負荷が大きいときには、力行車負荷の影響が支配的であろう。また、定数の変更アルゴリズムを力行車と惰行車で別にもつこと

も合理的ではない。そこで、惰行車についても、下の同じルールを適用する。

(i) $V_2 - V_1 = V_d$ は一定の値とする。

(ii) $I_{st} < I_{sp}(t) < I_{sc}$ の場合は定数調整は行わない。

(iii) ある列車が仮に力行しているとしたときのフルノッチ比 r_p を定める。その列車の時刻 t におけるパンタ点電圧を V_p とする。また、その列車が時刻 t において保持している電圧定数 V_1, V_2 の値をそれぞれを V_{1p}, V_{2p} とする。 r_p は(4), (5)式より、

$$r_p = \begin{cases} r_{\min} & \text{for } V_p \leq V_{1p} \\ r_{\min} + (1 - r_{\min}) \frac{V_p - V_{1p}}{V_{2p} - V_{1p}} & \text{for } V_{1p} < V_p < V_{2p} \\ 1 & \text{for } V_p \geq V_{2p} \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 $r_{\min}$: (5)式で与えられる定数と与えられる。

(iv) $I_{sp}(t) > I_{sc}$ の場合、フルノッチ比 r_p を $C_c (< 1)$ 倍に減らすことを目標とする。(12)式から、定数を調節してもフルノッチ比は $r_{\min}$ を下回ることではないことを考慮し、定数調節の目標とするフルノッチ比 r_t を

$$r_t = \begin{cases} C_c r_p & \text{for } C_c r_p \geq r_{\min} \\ r_{\min} & \text{for } C_c r_p < r_{\min} \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

とする。

(v) $I_{sp}(t) < I_{st}$ の場合、フルノッチ比 r_p を $C_t (> 1)$ 倍に減らすことを目標とする。(12)式から、定数を調節してもフルノッチ比は 1 を上回ることではないことを考慮し、定数調節の目標とするフルノッチ比 r_t を、

$$r_t = \begin{cases} 1 & \text{for } C_t r_p > 1 \\ C_t r_p & \text{for } C_t r_p \leq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

とする。

(vi) 列車が時刻 t 現在のその列車の速度およびパンタ点電圧のもとで力行していると仮定したとき、フルノッチ比が、(13), (14)式で定めた値になるように、定数 V_{1p}, V_{2p} を変化させる。変化後の値 V_{1t}, V_{2t} は下の式で定められる。この値を、時刻 $(t + \Delta t)$ におけるその列車の V_1, V_2 として定める。

$$V_{1t} = V_p - V_d(r_t - r_{\min}) \dots\dots\dots (15)$$

$$V_{2t} = V_{1t} + V_d \dots\dots\dots (16)$$

〈5・4〉 シミュレーション結果 シミュレーションは、〈4・1〉節にて示した条件で、変電所数 11 の場合

図 11 電圧定数の調整と変電所ピーク電流
 Fig. 11. Voltage constant adjustment and substation peak currents.

図 12 電圧定数の調節と総力行時間
 Fig. 12. Voltage constant adjustment and total accelerating time.

について行った。結果を図 11, 図 12 に示す。

ケース 1 は $I_{sl}=9,600$ A, $I_{sc}=12,000$ A の場合で、容量が十分のためほとんど絞込みが行われていない。

ケース 2 は変電所 No. 4 のみ $I_{sl}=4,800$ A, $I_{sc}=7,200$ A とした場合で、この変電所だけ電流ピークが抑えられており、他の変電所が影響を受けてピーク電流値が大きくなるような現象も現れていない。このように、変電所の特性のある程度の変化に対しても、列車・地上間通信を付加すれば簡単なアルゴリズムで柔軟に対処が可能であることがわかる。

ケース 3 は全変電所について $I_{sl}=3,600$ A, $I_{sc}=4,800$ A とした場合で、この場合でもピーク電流は抑制されている。しかし、列車の総力行時間が増大し、列車は遅れ、エネルギー消費が増加している。このように、大幅に変電所の容量が減少した場合には、この

制御ルールでは変電所ピーク電流の抑制については有効であるが、それ以外の評価量を最適化することができないことがわかる。

列車・地上間通信の存在を前提とした列車群制御システムと電力システムの協調により、より大幅な改善の可能性が開けてくる。ケース 3 のような場合にも対応してエネルギー消費などの異常な増加を防ぐには、余裕時分の再配分や適切な遅れ指示など、列車群制御システムとの関係がどうしても必要である。一方、列車群制御を適切に行えば、列車の性能が等価的に上がったような効果が得られ、生み出された余裕を電力システム最適化のためにまわすことも可能になる。

6. ま と め

本論文では、

(1) 列車主回路電力制御による鉄道電力システムのインテリジェント化の可能性を示した。次いで、変電所電流ピーク抑制および回生失効防止制御にこれを応用したシステムを提案し、このシステム導入による効果は非常に大きいことを示した。また、副作用としての列車の運行乱れが無視できるほど小さいことを同時に明らかにした。

(2) このシステムに列車・地上間通信を組み合わせ、列車がもつ制御用のパラメータを自動調整するアルゴリズムを提案し、変電所容量が変化した場合でも、このアルゴリズムによればピーク電流を確実に抑制することが可能であることを示した。しかし、列車群制御システムとの協調がないと、ピーク電流を抑制すること以外のパラメータを最適にすることは難しいことも述べた。

本論文の成果は、インバータ制御またはチョップパ制御(界磁チョップパを除く)の電気車が走るほとんどの直流電気鉄道に適用可能であり、その効果も大きい。変電所容量が不足して鉄道の輸送力増強を阻んでいるケースは多く、それらへの適用により輸送力不足を 1 日も早く解消することが期待される。

(平成 4 年 6 月 22 日受付, 同 4 年 12 月 8 日再受付)

文 献

- (1) 「電気鉄道のインテリジェント化」, 電気学会技報 (II 部), No. 341 (平 2)
- (2) 松富・曾根: 「回生車能力の有効利用について」, 第 4 回日本シミュレーション学会研究発表会 (昭 58)
- (3) 松富: 「回生車を含む電システムの最適化」, 東大工学部電子工学科修士論文 (昭 59)
- (4) 「回生車を含む電システムの現状とあり方」, 電気学会技報 (II 部), No. 296 (平元)
- (5) 高木・曾根: 「インテリジェンスの導入による電鉄負荷のピークカット」, 電気学会交通・電気鉄道/道路交通合同研究,

TER-91-1; RTA-91-1 (平3)

- (6) 高木・曾根:「鉄道電力システムのインテリジェント化(その2)」, 電気学会交通・電気鉄道研資, TER-91-36 (平3)

高 木 亮 (正員)

昭和42年6月14日生。平成4年3月
東京大学大学院工学系研究科電気工学専
攻修士課程修了。同年4月同専攻博士課
程に進学, 現在に至る。鉄道電力システ
ムおよび鉄道のインテリジェント化に関する研究に従事。
IEEE Student member。

曾 根 悟 (正員)

昭和14年4月23日生。42年東京大
学大学院博士課程修了。59年東京大学
電気工学科教授, 現在に至る。工学博
士。パワーエレクトロニクスと交通シス
テム工学の研究に従事。電気学会論文賞, JREA 賞, 市村
賞, 交通図書賞受賞。電子情報通信学会会員。