通勤線区における回生有効率と閑散線区における 回生有効率及びその向上策の研究

正員 杉本 健 (前 財団法人 鉄道総合技術研究所)

A Study on Effective Coefficient of Regenerative Energy for Commuting Sections
and Deserted Railways, and Its Improvement Plan for the Latter.
Takeshi Sugimoto, Member (Pre Railway Technical Research Institute)

All vehicles used for commuting and deserted sections are the inverter control regenerative brake types. For the purpose of energy saving and maintenance, it is very important to grasp the value of effective coefficient of regenerative energy (the ratio of the regenerative energy to the total brake energy) in actual operation. Field tests proved that the value of effective coefficient of regenerative energy was quite low at deserted sections, while it was satisfactory high at commuting sections. It is required to discuss measures to improve the coefficient of regenerative energy for deserted sections. Therefore, we simulated measures to shorten lengths of train composition and to equip substations with inverters and a tie-feeding system.

Inverter control vehicles are used AC traction motors. On the other hand, the feeding system is direct current, therefore the alternating current of these must be changed into direct current. We theoretically defined the technique to change the AC electric power of those into DC electric power at the simulation.

キーワード：直流き電システム，回生車両，回生有効率

1. はじめに

現在、通勤線区においても、閑散線区においても新製車両はすべてインバータ制御の回生車両である。この回生車両の運転時における回生有効率（回生電力量／回生可能電力量）を把握し、向上させることは省エネルギー上及びメンテナンス上極めて重要である。本論文において初めて通勤線区及び閑散線区において回生有効率の実測を行った。測定した通勤線区においては回生有効率は高くほとんど問題はなかった。閑散線区においては回生有効率がかなり低く対策が必要であることがわかった。回生有効率向上のため、車両編成長

を短縮したり、各変電所にインバータ装置を設定したり、電車線路抵抗を低減したり、上下タイ・上下一括き電方式、高電圧化を行った場合の研究をシミュレーションによりおこなった。測定した通勤線区・閑散線区の回生有効率は前述した通りであり、一般的な傾向である。しかし具体的には、各通勤線区・閑散線区において列車本数、車両編成長などまちまちであるため、各線区ごとに具体的に回生有効率を把握した上で、対策などをたてて行く必要がある。

またシミュレーションをおこなうためには車両システムを適切にモデル化しなければならない。パンタ点電圧が変

われば引張り・制動力の特性も変化する。このため、パンタ点電圧が変化した時にそれが引張り・制動力に与える影響を分析した。またインバータ制御車両は主電動機に交流電動機を採用しているが、き電回路は直流であるため、主電動機に入出力する電力を直流電力に変換しなければならない。このため直流電力に変換する方法を理論的に明確化した。

2. インバータ制御車両のモデル化

インバータ制御車両の特性として、速度—引張り特性がある。この特性は、性能値（性能が試験で保証されている）として車両取扱説明書⁽¹⁾などに示されている。しかしながら、一般的にこれらの特性はパンタ点電圧が一定の定格電圧での特性である。パンタ点電圧は時々刻々変化しており、パンタ点電圧が変わることによりこれらの特性は変化するため、パンタ点電圧に応じた動的な速度—引張り特性を求めなければならない。このため、今後大幅に使用されると考えられるインバータ制御車両の例として 209 系車両でパンタ点電圧に応じた引張り・制動力特性を検討した。

<2.1> パンタ点電圧の変化にともなう引張り・制動力の特性 209 系車両⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾の主回路構成は、図 1 のとおりである。力行時はパンタグラフからの直流電力は、フィルタリアクトルを通りインバータユニットにより可変周波数可変電圧の三相交流電力に変換され、これにより誘導電動機が駆動される。回生時は、誘導電動機は誘導発電機となり回生制動力を発生し、生じた交流電力は、直流電力に変換し電車線側へ返される。フィルタリアクトルとフィルタコンデンサを組み合わせることによって、インバータユニットで発生した高調波成分が除去される。

図 1 インバータ制御車両の主回路構成の例

Fig.1 Example of main circuit composition of inverter control vehicle

図 2 (2) のとおり、力行時においては、速度の上昇に伴い、主電動機電圧を制御することにより回転磁束を一定に保ち、かつ滑り周波数も一定に保ち主電動機の定トルク制御をおこなう。主電動機電圧が最大値になれば、滑り周波数を制御することにより主電動機電流を一定に保ち、主電動機の定出力制御をおこなう。滑り周波数が限度値に到達後は、主電動機電圧は最大値で、滑り周波数は限度値の特性領域にはいる。

図 2 インバータ制御車両の力行特性（概念図）

Fig.2 Powering characteristic of inverter control vehicle (concept figure)

回生時は図 3 (2) のとおり、速度の上昇に伴い、主電動機電圧を変えることにより回転磁束を一定に保ち、また滑り周波数も一定に保ち、定トルク制御をおこなう。主電動機電圧が最大値になった後は、滑り周波数を変えることにより主電動機電流も変え、定トルク制御をおこなう。滑り周波数が限度値に到達後は、主電動機電圧は最大値で、滑り周波数は限度値の特性領域にはいる。209 系車両においては定トルク領域の拡大をはかり減速力を大きくするようにしている。

誘導電動機のトルク、引張り、電圧、電流、電源周波数の関係は滑り周波数の低い範囲では下式で記述できる。

$$T = k_1 \cdot \Phi \cdot I \quad (1)$$

$$\Phi = k_2 \cdot V_m / f \quad (2)$$

$$I = k_3 \cdot \Phi \cdot f_s \quad (3)$$

$$N = 120 \cdot (f - f_s) / P \quad (4)$$

$$v = k_4 \cdot N \quad (5)$$

$$F = k_5 \cdot T \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 T : 主電動機のトルク(N・m), Φ : 主電動機の回転磁束(Wb), I : 主電動機の電流(A),
 V_m : 主電動機電圧(V), F : 主電動機の引張力(kgf),
 f : 主電動機の電源周波数(Hz), f_s : 主電動機の滑り周波数(Hz), V_n : パンタ点電圧(V), v : 車両速度(km/h), P : 主電動機の極数(-), N : 主電動機の回転数(rpm), k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 は定数(-)

図3 インバータ制御車両の回生制動特性 (概念図)

Fig.3 Braking characteristic of inverter control vehicle (concept figure)

(1) 力行時の特性

(a) 定トルク領域

図2の定トルク領域においては、パンタ点電圧（インバータ制御車両においてはフィルタコンデンサ電圧と記述するのが正確であるが、統一をとり本論文ではパンタ点電圧とする。）が1500Vから V_n に変化しても、(2)式において回転磁束が一定になるように主電動機電圧が制御される。また、滑り周波数は一定のため(3)式において主電動機電流も変わらない。このため(1)、(6)式から求められるトルク・引張力はパンタ点電圧1500Vのときと変わらない。

(b) 定出力領域

図2の定出力領域においては、パンタ点電圧が1500Vから V_n に変化しても、主電動機電流が一定になるように滑り周波数が制御される。また力行時は、主電動機電圧は1100Vで飽和する。このため、パンタ点電圧 V_n 、速度 v_1 、電源

周波数 f_1 、滑り周波数 f_{s1} においても回転磁束は(2)式から次式となる。

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= k_2 \cdot 1100 \cdot (V_n / 1500) / f_1 \\ &= k_2 \cdot 1100 / (f_1 \cdot 1500 / V_n) \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

さて、 f_0 を次式とする。

$$f_0 = f_1 \cdot 1500 / V_n \dots\dots\dots (8)$$

そうすればこの領域においては主電動機電流は一定で制御されるため、パンタ点電圧 V_n の時の引張力は、(1)、(7)、(8)式よりパンタ点電圧1500V、電源周波数 f_0 の引張力となる。

今、パンタ点電圧を1500V、電源周波数 f_0 の時の速度を v_0 、滑り周波数を f_{s0} とすれば、主電動機電流が一定に制御されるため(2)、(3)式より、

$$f_{s0} \cdot 1500 / f_0 = f_{s1} \cdot V_n / f_1 \dots\dots\dots (9)$$

となる。

(9)式に(8)式を代入すれば、次式のとおり滑り周波数は同じとなる。

$$f_{s0} = f_{s1} \dots\dots\dots (10)$$

また、 f_1 に比して f_{s1} は小さく、かつ V_n は1500Vに近いから、

$$\begin{aligned} v_0 &= k_4 \cdot 120 / P \cdot (f_0 - f_{s0}) = k_4 \cdot 120 / P \cdot (f_0 - f_{s1}) \\ &= k_4 \cdot 120 / P \cdot 1500 / V_n \cdot (f_1 - f_{s1} + f_{s1} \cdot (1 - V_n / 1500)) \\ &\approx 1500 / V_n \cdot v_1 \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

となる。

よってパンタ点電圧が1500Vから V_n になれば、パンタ点電圧1500Vの速度-引張力特性において速度 v_0 のときの引張力を採用すればよい。

(c) 特性領域

図2の特性領域においては、滑り周波数は一定になるように制御される。パンタ点電圧が1500Vから V_n になれば回転磁束は、(7)式であらわされる。

この領域においては滑り周波数一定で制御されるため、回転磁束が同じであれば主電動機電流も同じとなり、回転磁束と主電動機電流の積に比例するトルク・引張力も同じになる。今 f_0 を(8)式で定義しているため、パンタ点電圧 V_n の時の引張力は、パンタ点電圧1500V、電源周波数 f_0 と同じ引張力となる。

この領域では、滑り周波数 f_{s0} 、 f_{s1} は数Hzであり、一定に保たれ同じであり、また f_0 、 f_1 に比して小さく V_n は1500Vに近い。したがって(11)式と同様になる。

よって、定出力領域と同様にパンタ点電圧1500Vから V_n

になれば、パンタ点電圧 1500V の速度—引張力特性において速度 v_0 のときの引張力を採用すればよい。

以上を総合すれば、図 4 にあるようにパンタ点電圧が定格電圧の 1500V より上昇すれば右へ移動し、下がれば左へ移動する。なお正規化は、パンタ点電圧が定格電圧の 1500V の場合で、定トルク領域の引張力を 1.0 とする、速度は最高速度を 1.0 とする。

図 4 パンタ点電圧を変えた時の速度—引張力特性
(209 系車両)

Fig. 4 Speed-traction characteristic for different pantograph voltage (type 209 inverter control car)

・ (2) 回生時の特性

回生時の制御モードも力行時とほぼ同様のモードであるが、209 系車両においては高速からの有効な制動力を得るために、図 3 のように定出力領域をなくし、定トルク領域の拡大を図っている。定トルク領域を 2 つに分け、回転磁束一定領域を定トルク領域(1)；他の領域を定トルク領域(2)とする。

(a) 定トルク領域 (1)

回生時の特性は力行時の定トルク領域と同様の特性であり、パンタ点電圧 1500V の速度—制動力特性となる。

(b) 定トルク領域(2)

定トルク領域においては、パンタ点電圧が 1500V から V_n に変化しても、回生制動力は一定になるように滑り周波数

が制御されるため、パンタ点電圧 1500V のときと変わらない。そのため制動力は、定トルク領域(1)と同様になる。

(c) 特性領域

パンタ点電圧が 1500V から V_n になれば、回生時は主電動機電圧の飽和値は 1300V のため、回転磁束は(7)式の主電動機電圧の最大値の 1100V を 1300V に置き換えて表わすことができる。そして、力行時の特性領域と同様にパンタ点電圧が 1500V から V_n になれば、1500V の時の速度—制動力特性において速度 v_0 のときの制動力を採用すればよい。

<2・2> 直流電力への変換 インバータ制御車両の主電動機は交流電力が使われているが、直流き電回路は直流電力が使われているため、交流電力を直流電力に変換しなければならない。一般的にインバータ制御車両のパンタ点電圧が定格電圧の速度—引張力特性、速度—制動力特性は与えられている。図 5 の通りである²⁾。なお正規化は入力電力が定出力領域の時を 1.0 とする。また、速度は最高速度の時を 1.0 とする。前節においてパンタ点電圧が変わった時の引張力・制動力を求めた。ここではこの引張力・制動力からパンタ点電流を求める。

図 5 速度—入力電力特性

Fig. 5 Speed-input power characteristic of inverter control vehicle

一般的に主電動機の機械出力は下記の通り計算できる。

$$P_o = v \cdot F / 367.2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 P_o ：主電動機機械出力(kW)，

v ：速度(km/h)，

367.2：変換係数 (kgf→N, km→m, 時間→秒)

主電動機機械出力をモータ効率、インバータ効率、ギヤ効率、及びパンタ点電圧で除すると下記の通り直流入力電流

(以降パンタ点電流と述べる。)となる

$$I_p = P_f / \eta_1 \cdot 1 / \eta_2 \cdot 1 / \eta_3 \cdot 1 / V_n \cdots \cdots (13)$$

ここで、 I_p : パンタ点電流(A), η_1 : モータ効率(-),
 η_2 : インバータ効率(-), η_3 : ギヤ効率(-)

ギヤ効率は速度が変わっても大きな変化はない。モータ効率・インバータ効率は速度とともにかなり変化がある。

回生有効率の比較検討、き電システムの比較検討などがこのシミュレーションの目的である。速度などの走行条件は同一にして検討を行うため、ギヤ効率、モータ効率、インバータ効率を一定として比較しても、厳密に計算した時に比較して大差がないと考えられ、このシミュレーションの使用目的から考慮して十分妥当であると考えられる。

また同様に回生時の主電動機の機械入力下記のとおりである。

$$P_f = v \cdot F_B / 367.2 \cdots \cdots (14)$$

ここで、 P_f : 主電動機機械入力(kW), F_B : 制動力(kgf)

主電動機機械入力にモータ効率、インバータ効率、ギヤ効率を乗じ、パンタ点電圧で除すると下記の通りパンタ点電流となる。

$$I_p = P_f \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot 1 / V_n \cdots \cdots (15)$$

このような手法でインバータ制御車両のモデル化を行っても基本的に問題ないとする。以降シミュレーションにおいてはインバータ制御車両においてこのモデル化によってシミュレーションをおこなう。

なお、JR 中央東線においては EC351 系インバータ制御車両が使われているが、基本的な特性は 209 系インバータ制御車両と同様であり、EC351 系インバータ制御車両のシミュレーションはこの章のモデル化した手法でおこなう。

3. 通勤線区における回生有効率

<3・1> 実測結果 1996 年 12 月 10, 13, 16 日において表 1 の通り大宮～蒲田間において回生有効率の測定をおこなった。パンタ点電圧を測定し、その結果から回生有効率を計算した。回生制動時のパンタ点電圧の測定結果は表 2、図 6 の通りである。12 月 10 日に若干回生失効があるものの、3 日の平均では回生有効率はほぼ 100%であり、回生失効はほとんどなかった。また完全失効電圧 1790V 以上の度数はほとんどなかった。図 7 に制動位置と制動時の平均パンタ点電圧を示す。大宮から東京方面に移動するにつれてパンタ点電圧が低下する様子がわかる。これは東京付

近は 3 複線になっていることもあり、回生車の近辺に力行車が走行している確率が高いため、制動時のパンタ点電圧が低くなると考えられる。一方大宮付近は 2 複線程度であり、回生車の近くに力行車が走行している確率が低いため、制動時のパンタ点電圧が比較的高くなると考えられる。しかしながら回生失効にはほとんど到っていない。

表 1 JR 京浜東北線における回生有効率測定の試験概要
 Table 1. Outline of the test measure the effective coefficient of regenerative energy at the JR Keihintohoku line

日時	1996 年 12 月 10 日(火), 13 日(金), 16 日(月)
時間帯	10 時 30 分～16 時 00 分
線区	JR 京浜東北線 大宮～蒲田間 (44.7km)
車両	209 系インバータ制御車両 (4M6T)
行程	大宮～蒲田間 2 往復/日
回生失効電圧	失効開始電圧 1765V 完全失効電圧 1790V (1765～1790V 間は比例でしぼり込む)

表 2 制動時のパンタ点電圧の度数分布

Table 2. Frequency distribution of pantograph voltage at braking

平均電圧範囲 (V)	12月10日	12月13日	12月16日	total	
1200-1225	0	0	0	0	0%
1225-1425	0	1	0	1	0%
1425-1450	0	0	0	0	0%
1450-1475	0	10	0	10	0%
1475-1500	0	10	1	11	0%
1500-1525	4	34	8	46	1%
1525-1550	28	53	27	108	2%
1550-1575	162	142	128	432	6%
1575-1600	402	405	408	1215	17%
1600-1625	389	589	447	1425	20%
1625-1650	346	520	483	1349	19%
1650-1675	302	395	436	1133	16%
1675-1700	274	156	279	709	10%
1700-1725	171	85	106	362	5%
1725-1750	71	50	24	145	2%
1750-1775	35	6	11	52	1%
1775-1800	3	0	0	3	0%
1800-1825	0	0	0	0	0%
1825-2000	0	1	0	1	0%
total	2187	2457	2358	7002	100%

(単位 : 秒)

図 6 制動時のパンタ点電圧の度数分布

Fig. 6. Frequency distribution of pantograph voltage at braking

図 7 制動位置と制動時の平均パンタ点電圧

Fig. 7. Braking spot and average pantograph voltage at braking

<3・2> シミュレーション結果 表 3 の前提条件もとに回生有効率のシミュレーションを実施した。複線・複々線で列車本数を変え、シミュレーション範囲を変えた時の回生有効率のシミュレーション結果は、図 8 の通りである。

複線で 1 時間に往復 24 本の電車を走行させても図にある通り回生有効率は 90% 程度である。複々線となり 1 時間に合計往復 48 本の電車が走行する場合は、回生有効率はほとんど 100% 近くになる。前述したように京浜東北線の実測の回生有効率はほぼ 100% であった。これは京浜東北線が東北線、山手線または東海道本線と並行し、複々線なり、3 複線になっており同一変電所からき電しているためや、他線区と交差・分岐し同一変電所からき電している。このため、近傍の力行車に回生電力が吸収される確率が高くなり、結果的にほとんど回生失効しないと考えられる。

今までの回生有効率のシミュレーション結果は若干低い

傾向があった⁽⁶⁾。これは、シミュレーション条件として複々線としなかったことや交差線・分岐線を考慮しなかったことが、大きな原因と考えられる。

シミュレーション範囲は大宮を起点とし、大船方面へシミュレーションする範囲のことである。現実にはシミュレーション範囲などはなく起点方向、終点方向に直流電化区間の続く限り伸びて行くと考えられる。シミュレーション範囲が狭いと実際に適合した回生有効率にならない。図 8 にあるようにシミュレーションする範囲を拡大するにつれて電車本数は増加し、回生有効率は増加する。シミュレーション範囲が狭いと、電車本数が少なすぎて現実合った回生有効率がシミュレーション結果として出ない。このためシミュレーション範囲は 40km 程度以上の範囲を行う必要がある。

また複線で電車を 24 本/時間走行させるよりも同じ 24 本/時間でも、複々線で 1 複線当たり 12 本/時間、合計 24 本/時間電車を走行させる方が図 8 にあるように回生有効率は高くなる。これは複々線になることによりき電回路抵抗が複線の時より低減することと、回生車からの力行車への距離が複線の場合より短くなるためと考えられる。

今までシミュレーション範囲が狭いことや、複々線条件等を入れないことで、シミュレーション結果の回生有効率が低い場合があったが、このような条件を改善することにより現実合ったシミュレーションが行えるようになった。

表 3 JR 京浜東北線のシミュレーションの前提

Table 3 Conditions for the simulation of train operation on the JR Keihintohoku line.

条件	内容
コンピュータ条件	(1)サンプリングタイムは 1 秒とする。 (2)シミュレーション時間は 10:30~16:00 の 4 時間 30 分
線路条件	(1)JR 京浜東北線 (大宮~大船間) 81km とする。 (2)勾配は最大 34‰で JR 京浜東北線の値を採用した。 (3)速度制限条件は JR 京浜東北線の値を採用した。
電車条件	(1)209 系 (インバータ制御車両) 1 編成は車両重量は 325.4t (100%乗車効率) 1 編成 4M2T (2)速度-引張力、速度-電流特性は設計性能値を採用した。 (3)その他 力行時は 5 ノッチ ブレーキ時は 7 ノッチ (2.9km/h/s) とした。 M-T 車は 7 ノッチで 1 部空気ブレーキで補完しているため回生電流に 0.9 を積した。 失効開始電圧 1765V (100%荷重) 完全失効電圧 1790V 架線電圧変動時も回生エネルギーは 1500V の時と同様とした。
運転条件	(1)最高速度 110km/h とする。 (2)ダイヤは平成 5 年改訂のものによる。 (3)電車本数往復 24 本/時間
地上電気設備条件	(1)変電所 19 箇所、容量、位置は JR 京浜東北線の値を採用した。 (1)き電回路の定数: 0.0342Ω/km 硬アルミより線 510mm ² x 2, シンプル カタナリ 110 mm ² x 2, 50kg レール

図 8 複々線・複線で列車本数、シミュレーション範囲を変えた時の回生有効率

Fig. 8 The effective coefficient of regenerative energy on four-track lines and the double-track lines for different frequencies or train operation and different simulation ranges

4. 閑散線区における回生有効率

<4・1> 実測結果 1997年11月5日(水)、6日(木)の2日間、表4の通り塩尻～甲府間でのスーパーあずさ号の回生有効率の実測を行った。この区間は勾配が大きく、上り列車・下り列車で勾配が大きく異なるため、上り列車・下り列車で別々にデータを整理した。下りスーパーあずさ号の各種電力量等と回生有効率は表5、図9の通りである。回生有効率は同一列車であっても日によってかなり異なっており30%～61%であり平均は44%であった。上りスーパーあずさ号の各種電力量等と回生有効率は表6、図10の通りである。回生有効率は42%～68%であり平均は54%であった。上りスーパーあずさ号は、下り勾配のため制動頻度が多く回生可能電力量は大きい、対抗列車が上り勾配のため力行の可能性が高いため、下りスーパーあずさ号より回生有効率も高くなっている。前章の通勤線区は回生有効率が100%近くであったが閑散線区は列車本数が少ないため、また当該線区を走行している他の列車が9両編成もしくは3～4両編成のため、スーパーあずさ号の車両編成長が他の列車に比して長く、回生電力が大きいため回生有効率は50%前後と大幅に低下していた。

表4 JR中央東線における回生有効率測定の試験概要

Table 4 Outline of the test measure the effective coefficient of regenerative energy at the JR Chuotosen line

日時	1997年11月5日(水)、6日(木)
時間帯	8時27分～19時40分
線区	JR中央東線 甲府～塩尻間(85.83km)
車両	E351系インバータ制御車両(6M6T)
測定列車	スーパーあずさ号 1M, 9M, 11M, (下り)(1M;列車名) 6M, 8M, 14M, (上り)
回生失効電圧	失効開始電圧 1780V 完全失効電圧 1830V (1780～1830Vは比例でしぼり込む)

表5 下りスーパーあずさ号(甲府～塩尻)の各種電力量と回生有効率

Table 5 Electric power consumed and the effective coefficient of regenerative energy of down Super Azusa train (Kofu-Shiojiri)

(1997/11/5,6 甲府～塩尻間)

	消費電力量 (kWh)	力行電力量 (kWh)	回生電力量 (kWh)	損失電力量 (kWh)	回生可能電 力量 (kWh)	回生率 (%)	回生有効率 (%)
1M (11/5)	1942	2165	223	264	487	10.3	45.8
1M (11/6)	1672	1864	192	253	445	10.3	43.1
3M (11/6)	2214	2353	139	329	468	5.9	29.7
9M (11/5)	2082	2252	170	296	466	7.5	36.5
9M (11/6)	1823	1998	175	199	374	8.8	46.8
11M (11/5)	2001	2152	151	133	284	7.0	53.2
11M (11/6)	1743	1982	239	152	391	12.1	61.1
平均	1925.3	2109.4	184.1	232.3	416.4	8.7	44.2

図9 下りスーパーあずさ号(甲府～塩尻)の回生有効率

Fig. 9 The effective coefficient of regenerative energy of down Super Azusa train (Kofu-Shiojiri)

図 10 上りスーパーあずさ号（塩尻～甲府）の回生有効率
Fig. 10 The effective coefficient of regenerative energy of up Super Azusa train (Sioziri-Kofu)

表 6 上りスーパーあずさ号（塩尻～甲府）の各種電力量と回生有効率

Table 6 Electric power consumed and the effective coefficient of regenerative energy of up Super Azusa train (Shiojiri-Kofu)

(1997/11/5, 6 塩尻～甲府間)							
	消費電力量 (kWh)	力行電力量 (kWh)	回生電力量 (kWh)	損失電力量 (kWh)	回生可能電 力量 (kWh)	回生率 (%)	回生有効率 (%)
6M (11/5)	698	1086	388	339	727	35.7	53.4
6M (11/6)	541	1016	475	225	700	46.8	67.9
14M (11/5)	1011	1286	275	371	646	21.4	42.6
14M (11/6)	647	1161	514	260	774	44.3	66.4
8M (11/5)	803	1199	396	404	800	33.0	49.5
8M (11/6)	946	1258	312	424	736	24.8	42.4
平均	774.3	1167.7	393.3	337.2	730.5	33.7	53.8

<4.2> シミュレーション結果 シミュレーション結

果を検証するために、実測結果とシミュレーションの比較をおこなった。表 7 の前提条件のもとにシミュレーションを行った。結果は表 8 の通りであった。

力行電力量、回生可能電力量などは実測よりシミュレーション結果は多くなった。これはシミュレーションにおいては実際の運転操縦ほど省エネルギーを考慮した運転が出来ない。すなわち列車が多少遅れていても前方に下り勾配がある場合、実際の場合は惰行のまま走行し下り勾配でゆるやかな制動をするが、シミュレーションにおいては前方に勾配があることなどを考慮した運転論理になっていないため、遅れていれば力行し、勾配になれば強い制動をすることとなるためである。

しかしながら回生有効率は実測の下り、上りの平均が 44.2,

53.8%であったが、シミュレーションにおいては、下りの平均が 46.7%, 上りの平均が 52.4%でありほぼ合っていた。

力行電力量等は実測結果とシミュレーション結果に若干の差異があった。しかしながら回生有効率はほぼ合っていたため、このシミュレーションモデルで回生有効率向上の研究を行っても傾向はつかめると考えられる。このため次章においてこのモデルで回生有効率向上の研究を行う。

表 7 JR 中央東線のシミュレーションの前提

Table 7. Conditions for the simulation to train operation on the JR Chuotosen line

条件	内容
コンピュータ条件	(1)サンプリングタイムは1秒とする。 (2)シミュレーション時間は400～2400とする。
線路条件	(1)JR 中央東線（甲府～塩尻間）85.83kmとする。 (2)勾配は最大 25‰でJR 中央東線の値を採用した。 (3)速度制限条件は最高 130km/h でJR 中央東線の値を採用した。
車両条件	速度-引張力・速度-電流特性（インバータ制御車）、速度-電流・電流-引張力特性（抵抗制御車）は設計性能値を採用した。 (1)EC351系（スーパーあずさ号）電車 12列車 ○1編成は12両(6M2T)とし重量は474.5t(100%荷重)とする。 ○インバータ制御車で回生をおこなう。 ○失効開始電圧 1780V, 完全失効電圧 1830V とする。 ○定速制御・抑速制御をおこなう。 ○制動時高速で高ノッチの時、空気ブレーキ補完しているため回生電流に0.85を乗じた。 (2)EC183系電車 35列車 ○1編成は9両(6M3T)とし重量は380t(100%荷重)とする。 ○抵抗制御車で直・並列制御とし限流値は440Aとする。 (3)EC115系電車 129列車（平均3.6両編成） ○1編成は3両(2M1T)とし重量は126.22t(100%荷重)とする。 ○抵抗制御車で直・並列制御とし限流値は440Aとする。 ○以上、各電車とも補機電流:8A/両とする。6両(4M2T)も一部あり (4)EF64系電気機関車 ○機関車は重連で、機関車重量は96t, 荷重は1000tとする。 ○抵抗制御車で直・並列・並列制御とし限流値は650Aとする。 ○補機電流 50A/両とする。
運転条件	(1)最高速度 130km/hとする。 (2)ダイヤは平成6年11月改訂のものによる。
地上電気設備条件	(1)変電所9箇所、容量、位置はJR 中央東線の値を採用した。 (2)き電回路の定数は下記とする。0.0394Ω/km

M: 電動車, T: 付随車等, 限流値: 直流電動機を一定トルクに制御するための下段電流値

表 8 スーパーあずさ号（塩尻～甲府）の各種電力量と回生有効率のシミュレーション結果

Table 8 Simulation results of the electric power and the effective coefficient of regenerative energy of all Super Azusa trains (Sioziri-Kofu)

	消費電力量 (kWh)	力行電力量 (kWh)	回生電力量 (kWh)	損失電力量 (kWh)	回生可能電 力量 (kWh)	回生率 (%)	回生有効率 (%)
下り平均 (1, 9, 11M)	1903	2160	257	294	551	11.9	46.7
上り平均 (5, 8, 14M)	839	1234	395	358	753	32.0	52.4

5. 閑散線区における回生有効率向上策

<5.1> 車両編成長を変えた場合 この線区は大半が3両編成の抵抗制御車であり、1部9両編成の抵抗制御車、電気機関車が走行している。スーパーあずさ号は12両編成であり、車両編成長が長く、制動時長大編成の大きな制動パワーが大きな回生電力となる。短編成の力行車両ではこの回生電力を1部しか吸収できないため回生有効率は低下する。この対策としてスーパーあずさ号の車両編成長を短くした場合の回生有効率に与える影響をシミュレーションした。結果は図11の通りであった。なお関連する力行電力量と回生電力量の比、回生率（回生電力量／力行電力量）も示した。

表7の前提にあるように、4時から24時までシミュレーションを行い、12両編成の上り下り全スーパーあずさ号の平均回生有効率は、50%前後であるが、編成車両数を短くするにつれて回生有効率が向上し、4両編成にすれば80%程度まで向上することがわかる。しかしながら車両編成長を低減すれば乗務員の数が増加しコスト増となる問題がある。両編成長を短くしなくても運転操縦時において、制動・惰行、制動・惰行というような断続的な制動を行わずに抑速制御等を多く用い、連続的に制動をおこない制動パワーを小さくし、回生電力を小さくすれば回生有効率は向上すると考えられる。

図11 車両編成長を変えた回生有効率

Fig. 11 The effective coefficient of regenerative energy for different lengths of train composition

<5.2> インバータを設置した場合 各変電所にインバータを設置した場合の回生有効率の研究をおこなった。インバータ容量を変えた時の結果は、図12の通りである。

各変電所にインバータを設置した場合は約10%強の回生有効率の向上があった。インバータ容量を増加させても、この容量の範囲では余り効果の変化はなかった。

インバータ電圧（これと同等以上の電圧になればインバータが回生電力を吸収する）を変えた時の回生有効率の研究を行った。図13の通りである。インバータ電圧を極力低下させる方が、回生車のパンタ点電圧が回生失効に到らず、回生有効率が向上することがわかる。しかしながら変電所における無負荷送り出し電圧は、閑散線区などにおいては変電所間隔が長いこともあり、1700V程度にしている。このためインバータ電圧を低下させるにしても、1730V程度が限界となる。

図12 インバータ容量を変えた時の回生有効率など

Fig. 12 The effective coefficient of regenerative energy and other measurements for different inverter capacities

図13 インバータ電圧を変えた時の回生有効率など

Fig. 13 The effective coefficient of regenerative energy and other measurements for different inverter voltages

<5・3> インバータ設置の限界 前節で述べたインバータを設置しても回生有効率は 100% にならず、せいぜい 60% 前後でありかなりの限界がある。この問題を単純化した変電所・回生車両の配置で研究した。図 14 に変電所間に回生車両のみが走行している単純化した図を示した。変電所間隔など各値は JR 中央東線（甲府～塩尻間）の平均的な値である。

図 14 単純化した変電所・回生車両の配置図

Fig. 14 Simplified distribution of d.c. substations and regenerative vehicles

今、回生車両が変電所中間を走行しているとする。表 7 の前提で示したように回生失効開始電圧 1780V、完全失効電圧 1830V とすると、

$$\text{回生有効率 (\%)} = (1830 - \chi) / (1830 - 1780) \times 100 \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで χ は、回生車両のパンタ点電圧 (V) 今、インバータ電圧は 1730V であるため、パンタ点電圧はインバータ電圧に電圧降下を加えるため下式となる。

$$\chi = 1730 + (1830 - \chi) / 50 \times 1300 / 2 \times 0.0394 \times 5.5 \quad \dots\dots\dots (17)$$

(17) 式を解けばパンタ点電圧は 1804V となり、これを (16) 式に代入すれば回生有効率は求まり、52% となる。このようにインバータを設置しても、回生有効率は 100% になるのではなく、電車線路抵抗の電圧降下の影響により一定の限界があるのである。特に閑散線区においては変電所間隔が長い場合、電圧降下は大きくなりこの傾向は大きくなる。この問題を別の角度から研究をおこなった。電車線路抵抗の電圧降下の影響を相殺するために回生車両の失効開始電圧を上昇させた時の検討をおこなった。

回生車両の失効開始電圧を上昇させた時の回生有効率等は図 15 の通りである。ここで、完全失効電圧は回生失効開

始電圧 + 50(V) とした。失効開始電圧を上昇させれば大幅に回生有効率は向上することがわかる。特にインバータを設置した場合は、電車線路の電圧降下の影響を打ち消すためインバータを設置しない場合に比して、効果は特に大きくなる。ここで示したように電車線路抵抗の電圧降下の影響がインバータを設置した場合の回生有効率の向上を妨げているのである。なお、現行車両設備等の高電圧の許容範囲は 1900(V) 前後であり、これ以上にパンタ点電圧を上げるためには、設備の改良をおこなう必要がある。

図 15 失効開始電圧を変えた時の回生有効率など

Fig. 15 The effective coefficient of regenerative energy and other measurements for different starting voltage of regeneration cancellation

<5・4> 上下タイ、上下一括き電方式にした場合等 変電所間隔を半分にした場合や上下タイ、上下一括き電方式などき電方式を変えた場合で、電車線路抵抗を変化された場合やインバータの設置の有無の場合の検討をおこなった。

現在き電方式の場合は複線の上下線を変電所で接続しているだけである。上下タイき電方式は、変電所間隔の中間付近で上下線を接続する方式であり、上下一括き電方式は上下線を例えば、約 200m 間隔に接続する方式である。これらの方式は、き電回路の抵抗を下げるるとともに回生電流が上下線に相互に流れ易くし、回生有効率を高めるのに効果がある。検討結果は図 16 の通りである。

電車線路抵抗を低減すれば、インバータの有無に拘らず回生有効率は向上する。図から見てわかるようにインバータを設置した場合は、インバータを設置しない場合に比べ

て、電車線路抵抗の低減の効果がより大きくあらわれる。特に上下一括電方式等においては効果が顕著である。これは<5.3>節で述べたように電車線路抵抗の低減により回生電力がインバータに吸収され易くなるためである。

インバータを設置しない場合、変電所間隔を 1/2 にしても上下タイキ電システムより効果が下まわるのは、回生車より、増加した変電所から力行車に多く電力を供給するためであると考えられる。

インバータを設置すれば、変電所間隔を 1/2 の場合、上下タイキ電システムより効果が上まわる。

図 16 各種き電方式の回生有効率

Fig. 16 The effective coefficient of regenerative energy and for different feeding system

<5.5> 高電圧化をおこなった場合 現在 1500V でき電をおこなっているが、線路抵抗は変えないで 3000V 等高電圧化を行った場合の研究を行った。図 17 にあるように高電圧化を行うと大幅に回生有効率が改善することがわかる。これは高電圧化することによりき電々流が減少し、(回生車より力行車までの電圧降下が半減するとともに、回生車のパンタ点電圧から回生失効開始電圧までの余裕が大きくなるためである。) 4500V と昇圧するにつれて徐々に飽和している。各変電所にインバータを設置した場合は同様の理由で回生有効率が 100% に近づいている。当然電圧を上昇させるにつれてき電損失等は半減する。

図 17 き電電圧を変えた時(昇圧)の回生有効率など

Fig. 17 The effective coefficient of regenerative energy and other measurements for different feeding voltages

6. まとめ

インバータ制御車のモデル化、回生有効率の測定及び向上等の研究をおこない下記のことを明確にした。

- (1) インバータ制御車はパンタ点電圧により引張り・制動力が変化するが、その引張り・制動力の変化の特性、及びその値より直流パンタ点電流を算出する方法を理論的に明確にした。
- (2) 回生有効率の測定及びシミュレーションを行ったが、列車本数、車両編成、複々線等線区の状況によって回生有効率が大幅に異なることがわかった。列車本数が多く複々線、3 複線の JR 京浜東北線では回生有効率はほぼ 100% であった。一方列車本数が少なく回生車の編成両数の長い JR 中央東線では回生有効率は約 50% 前後であった。
- (3) 閑散線区の回生有効率の向上策としては車両編成をその線区で走行している列車と同等程度の編成にすれば回生有効率は向上する。
- (4) 各変電所にインバータ装置を設置すれば回生有効率は改善するが、変電所間隔が長い場合限界がある。インバータ装置を設置する場合も電車線路抵抗を低減するなり、上下一括電にするなどき電回路抵抗を低減すれば効果が大きくなる。き電々圧を高電圧化すればさらに回生有効率は大幅に向上する。

閑散線区においては、設備投資に大きな経費のかかるイ

ンバータを設置しても回生有効率の向上には一定の限界がある。このため今後回生有効率の向上をはかるためには、車載抵抗器に代わる回生可能な方式の開発や高電圧化の検討をする必要がある。

謝辞

最後に、JR 京浜東北線、JR 中央東線における回生有効率の測定にあつて、JR 東日本運輸部車両課菅谷氏はじめ関係各位、及び長野支社など関係各位に協力していただいたことを述べ深く謝意を表します。

(平成 10 年 12 月 28 日受付、平成 11 年 11 月 02 日再受付)

杉 本 健

(正員)1944 年 9 月 15 日生。67 年京都大学工学部電子工学科卒業。同年 4 月国鉄入社。87 年鉄道技術研究所入所。電気エネルギー研究室長、主幹。現在三原菱重エンジニアリング技術顧問。主として、き電システム、エネルギー、制御関係の業務に従事。

文 献

- (1)日本国有鉄道・車両設計事務所，“207 系通勤形直流電車説明書”，(1986.10)
- (2)金原弘道，“JR 東日本 901 系通勤形直流電車”，電気車の科学，Vol.45，No.3，pp34-42，(1992.5)
- (3)中戸川貫二，鈴木康夫，川端俊夫，“次世代通勤電車の開発”，東急車両技法第 42 号，pp28-39，(1992.9)
- (4)前川義雄，“JR 東日本における VVVF インバータ制御車両の開発 (上) (下)”，電気車の科学，Vol.45，No.1，pp23-29，Vol.45，No.2，pp18-22，(1992.1,2)
- (5)園木武雄，“207 系通勤形直流電車 (上) (下)”，電気車の科学，Vol.40，No.1，pp17-23，Vol.40，No.2，pp26-36，(1992.1,2)
- (5)杉本健，“省エネルギーのための直流変電所の電圧制御”，電学論 D，115 巻-8 号，pp1053-1063，(1995.8)