

3215 蓄電装置を用いた高効率回生システム

○荒木 大二郎 (日立製作所)

嶋田 基巳 (日立製作所)

豊田 瑛一 (日立製作所)

High Efficiency Regeneration Braking System using Energy Storage Device

Daijiro ARAKI, HITACHI, Ltd. 1070 Ichige, Hitachinaka-shi, Ibaraki

Motomi SHIMADA, 1070 Ichige, Hitachinaka-shi, Ibaraki

Eiichi TOYOTA, 1070 Ichige, Hitachinaka-shi, Ibaraki

Hitachi had developed 'Sequential Regenerative Absorber' that charges the regenerative power which cannot be returned to the power line at in light load condition to batteries, and this developed system had been able to improve the regeneration factor. In order to improve the regeneration factor moreover, we propose 'High Efficiency Regeneration Braking System' that combines 'Sequential Regenerative Absorber' and the function that expands velocity area of regeneration braking by bumping up the input voltage of the inverter with batteries and increasing power of the motor and inverter. In this paper, we show the circuit and the control of 'High Efficiency Regeneration Braking System' and the result of its operation test by simulation.

Keywords: Battery, Regenerative power, Regeneration braking, Regeneration factor

1. はじめに

近年、地球温暖化問題や化石燃料枯渇問題の深刻化により CO₂ 削減や省エネルギーのための技術開発が世界規模で求められている。これは、他の交通機関と比べ CO₂ 排出量が少ないと言われる鉄道においても例外ではない。

鉄道では、これまでも回生ブレーキ技術による省エネルギー化を積極的に進めてきた。回生ブレーキは、減速時に駆動用モータを発電機として使用し、発電した電気エネルギーを架線に戻すことで他の力行車両が力行エネルギーとして再利用する技術である。

日立では、鉄道事業における省エネルギー化・CO₂ 削減のため蓄電池制御技術を適応した鉄道システムの開発を進めており、これまでにディーゼルエンジンと蓄電池を組み合わせたハイブリッド駆動システム[1]や軽負荷回生時に架線へ戻せない回生電力を蓄電池に吸収する回生吸収装置[2]などを開発してきた。

今回、日立は回生ブレーキの弱点を克服し、さらなる省エネ効果の向上を図る技術として、インバータ装置の入力電圧を蓄電池で昇圧し、電動機やインバータの出力を増加させて回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大する機能（以下「高速域電気ブレーキ機能」と回生吸収機能を組み合わせた「高効率回生システム」を提案する。

本稿では、「高速域電気ブレーキ機能」及び「回生吸収機能」を実現する「高効率回生システム」の構成、直流部電圧の制御方法、両機能の使い分け(切替え制御)方針、シミュレーションによる動作検証について報告する。

2. 回生ブレーキの動作原理と課題

2.1 回生ブレーキの動作原理

図2.1に示すように回生ブレーキは減速時に駆動用モータを発電機として使用する。発電したエネルギーを架線に戻して他の力行車両が力行エネルギーとして再利用する。

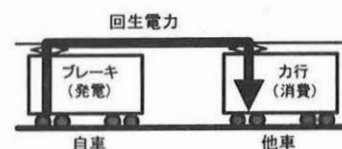


図2.1 回生ブレーキの動作原理

2.2 回生ブレーキの課題

2.2.1 軽負荷回生

閑散時間帯など、回生ブレーキ中に回生電力を消費する他の力行車両が少ないと回生電力の行き場がなくなり軽負荷回生ブレーキ状態となる。このときフィルタコンデンサ電圧が上昇するため、これを抑えるためにインバータ装置の軽負荷回生抑制制御が動作して回生電流を絞る。このため、フィルタコンデンサ電圧の上昇は抑えられるが、回生電力が減少するため不足するブレーキ力を空気ブレーキで補足する必要があり、回生率が低下する(軽負荷回生、図2.2)。

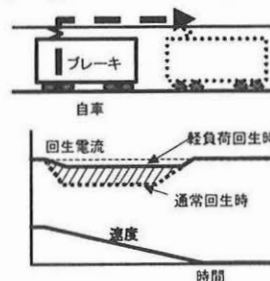


図2.2 軽負荷回生

2.2.2 機器仕様による回生性能制限

回生ブレーキは、走行速度から停止までの全速度域で動作したときに省エネ効果が最大となる。しかし、回生ブレーキは図2.4に示すように高速域では電動機の出力

特性やインバータ装置の仕様により回生性能が制限されてしまう。故に、高速域では必要となるブレーキ力のうち回生ブレーキ力分をさし引いた不足ブレーキ力分だけ空気ブレーキで補う必要があり、省エネ効果は低下する。

2.3 課題に対する解決策

課題①「軽負荷回生」に対する解決策として軽負荷時に架線へ戻せない回生電力を蓄電池に吸収する「回生吸収機能」(図2.3)が挙げられ、既に効果を実証済である[2]。

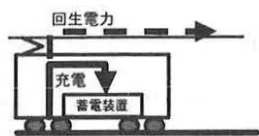


図2.3 回生吸収機能

課題②「機器仕様による回生性能制限」に対する解決策として、蓄電池でインバータ装置の入力電圧を加算して、各機器を流れる電流量は変えずに電動機やインバータの出力を増強させ、回生ブレーキの動作速度域を高速側に拡大する(図2.4のようにV/f終端速度を高速域側へシフトさせる)「高速域電気ブレーキ機能」が挙げられる。



図2.4 回生ブレーキ力特性

「高効率回生システム」は「回生吸収機能」及び「高速域電気ブレーキ機能」を共に実現するシステムである。図2.5に各課題に対する解決策をまとめる。



図2.5 回生ブレーキの課題と解決策

3. 高効率回生システム

3.1 システム構成

今回検討した『高効率回生システム』のシステム構成を図3.1に示す。「回生吸収機能」を実現するシステムと「高速全電気ブレーキ機能」を実現するシステムを組み合わせシステムであり、FL(フィルタリアクトル)、FC(フィルタコンデンサ)、VVVF(インバータ)、蓄電池、CHP(DC/DCコンバータ)で構成される。なお、CHP部に示したMSLは電流平滑リアクトルである。

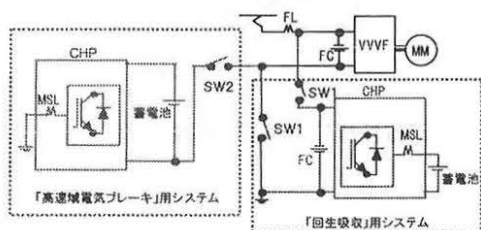


図3.1 システム構成

3.2 動作原理

図3.1において、「高速域電気ブレーキ」動作時は、SW1をオフ、SW2をオンする。従来のインバータ主回路において、接地点とインバータ装置のマイナス側入力端子の間に蓄電装置を直列に挿入する構成であり、インバータ装置基準電位が接地点の電位から電池電圧分(ΔV)が減算される。つまり、インバータの印加電圧を電池電圧分(ΔV)だけ昇圧できる。チョップ動作により、蓄電装置の端子間電圧(ΔV)を上限に、加算(昇圧)電圧を0Vから ΔV まで連続的に制御し、フィルタコンデンサ電圧(直流部電圧)を一定に保つ定電圧制御を行う。

一方、「回生吸収」動作時は、SW1をオン、SW2をオフする。従来のインバータ装置の主回路に、蓄電装置および昇降圧チョップを並列に挿入する構成である。これにより、回生時は昇降圧チョップを降圧チョップとして動作させ、回生電力を蓄電池に充電する。回生時にフィルタコンデンサ電圧が上昇して所定値を超えた時点で軽負荷状態と判断し、所定値を上回らないように制御する。

3.3 基本動作

「高効率回生システム」は、図3.2に示すように、電圧条件、速度条件により「高速全電気ブレーキ機能」と「回生吸収機能」、「通常回生」を使い分ける。

- (1)高速域(V/f終端速度: A[km/h]以上)かつ架線電圧が所定値(V_{ref})以下であれば、「高速域電気ブレーキ機能」が動作する。ただし、速度がV/f終端速度(A[km/h])以下になると「高速域電気ブレーキ機能」を停止し、通常回生動作に戻る制御とした。
- (2)軽負荷回生状態となり、架線電圧が所定値(V_{ref})を上回ると「回生吸収機能」が動作する。



図3.2 基本動作

4. シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

「高効率回生システム」の動作シミュレーションを行った。シミュレーション条件を以下に示す。

4.1.1 車両諸元

対象車両は一般的な通勤電車を想定した。車両諸元を表4.1に示す。

表4.1 車両諸元

編成	6M4T
車両重量	M車平均 52.3[ton] T車平均 55.7[ton]
減速度	1.0[m/s/s]
走行抵抗	なし

表4.2にインバータ、モータ、ギアの効率を示す。インバータの入出力電力は各機器の効率を考慮して算出した。

表4.3に蓄電池の仕様を示す。電池電圧は340[V]とした(仕様1)。これは、「高速域電気ブレーキ機能」が動作し、インバータ直流部電圧を電池電圧分だけ昇圧した際に、直流部電圧が既存のインバータ装置の仕様(最大値2000[V])を超えない範囲で決定した値である。また、最

大電池通流電流は最大回生電流640[A]以下を満たす必要がある(仕様2)。上記仕様1, 2を満たす電池容量として15.2[kWh]を設定した。これは最大充放電電力量から算出した充放電容量を満たす。

表4.2 機器仕様

機器	効率
インバータ	97.5[%]
モータ	92.0[%]
減速機	97.5[%]

表4.3 蓄電池仕様

項目	仕様
電圧	340[V]
許容通流電流	800[A]
容量	15.2[kWh]

4.1.2 走行パターン

図4.1に走行パターン(時間vs速度)を示す。
最高速度115[km/h]まで力行し、速度115[km/h]に達したら惰行(25[s]間)し、速度110[km/h]からブレーキ(減速度 β :1.0[m/s/s])をかける。このときの力行時間は98.1[s]、回生時間は30.6[s]である。

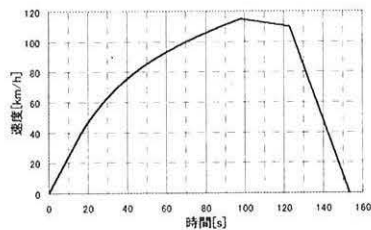


図4.1 走行パターン

4.1.2 制御仕様

表4.4に「回生吸収機能」、「高速域電気ブレーキ機能」動作時のそれぞれのチョップ制御の考え方を示す。

表4.4 チョップ制御仕様

	制御	考え方
回生吸収	リミット制御	フィルタコンデンサ電圧が基準値(1800V)を超えないように降圧
高速域電気ブレーキ	定電圧制御	フィルタコンデンサ電圧を指令値(1800V)まで昇圧

4.1.3 回生ブレーキ力特性

図4.2に回生ブレーキ力特性(架線電圧1650V時)を示す。
40[km/h]から57[km/h]までは定電力領域であり、回生ブレーキ力は速度に反比例して減衰する。また、57[km/h]以降は特性領域であり、回生ブレーキ力はモータ特性で制限され、速度の2乗で減衰する。
なお、図4.2中の太線は架線電圧1650Vのときの特性であり、「高速域電気ブレーキ機能」によりフィルタコンデンサ電圧が1800Vまで昇圧されると、図4.2中の細線で示すように、定電力域の開始速度が40[km/h]×1800/1650=44[km/h]となり、高速側へ移動する。

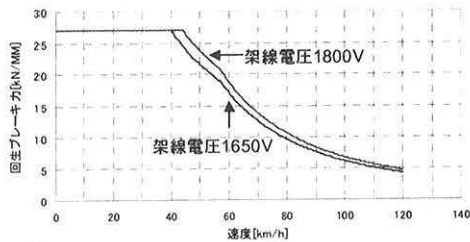


図4.2 回生ブレーキ力特性

4.2 シミュレーション項目

シミュレーション項目を表4.5に示す。今回は、回生動作のみシミュレーションした。

試番Aでは、軽負荷状態における「回生吸収機能」及び「高速域電気ブレーキ機能」の効果を検証する。
試番Bでは、全負荷状態における「回生吸収機能」及び「高速全電気ブレーキ機能」の効果を検証する。

軽負荷とは、回生エネルギーを消費する負荷(他の力行車に相当)が少なく、架線電圧の上昇が起きる状態を指す。本検討では、架線側の負荷に流れる電流分だけ架線電圧が上昇するものとした。負荷は負荷車(他の力行車)及び架線抵抗分を考慮し、 $R_L=0.85[\Omega]$ と設定した。

一方、全負荷とは回生エネルギーを消費する負荷が十分に存在し、架線電圧の上昇が起きない(回生電力を全て消費できる)状態を指す。故に、全負荷では $R_L=0[\Omega]$ である。

試番A,Bそれぞれにおいて、①「回生吸収機能」及び「高速域電気ブレーキ機能」が共に停止(動作しない)の場合、②「回生吸収機能」のみ動作する場合、③「回生吸収機能」及び「高速域電気ブレーキ機能」が共に動作する場合について評価を行った。

表4.5 シミュレーション項目

項目	試番	負荷状態	回生吸収	高速域電気ブレーキ
A	A-1	軽負荷	停止	停止
	A-2		動作	停止
	A-3		動作	動作
B	B-1	全負荷	停止	停止
	B-2		動作	停止
	B-3		動作	動作

4.3 シミュレーション結果

試番 A,B に対するフィルタコンデンサ電圧(直流部電圧)を図4.3(a), 図4.3(b)にそれぞれ示す。試番 A,B に対する回生電力を図4.4(a), 図4.4(b)にそれぞれ示す。

試番 A においては、軽負荷状態であるため、試番 A-1 ではフィルタコンデンサ電圧が1800[V]を超えると、軽負荷回生抑制制御が動作して回生電流が絞られ、回生電力が減少している。一方、試番 A-2 では、フィルタコンデンサ電圧が1800[V]を超えると回生吸収動作し、回生電力が蓄電池に充電するため、試番 A-1 よりも回生電力が増加している。試番 A-3 では、フィルタコンデンサ電圧が1800[V]を超えるまでは「高速域電気ブレーキ機能」が動作し、その後、架線電圧が1800[V]を超えると「回生吸収機能」が動作する。このため、試番 A-3 では、試番 A-2 よりも「高速域電気ブレーキ機能」の動作分だけ回生電力が増加している。

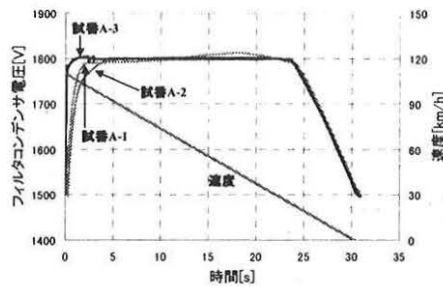
試番 B においては、全負荷状態であるため、試番 B-2 では、「回生吸収機能」は動作せず、試番 B-1 と同じ結果となっている。試番 B-3 では、「回生吸収機能」は動作せず、「高速域電気ブレーキ機能」のみが動作し、試番 B-1(B-2)より回生電力が増加している。

4.4 回生電力量の比較

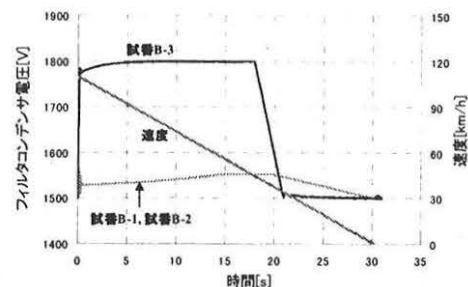
表4.6に各試番に対する回生電力量及び回生電力量の増加率(試番1に対する増加率)を示す。

表4.6 回生電力量の比較

試験項目	試番	回生電力量[kWh]	増加率(効果)
A	A-1	4.71	—
	A-2	6.33	34.4%up
	A-3	6.35	34.8%up
B	B-1	5.68	—
	B-2	5.68	0%
	B-3	6.31	11.1%up

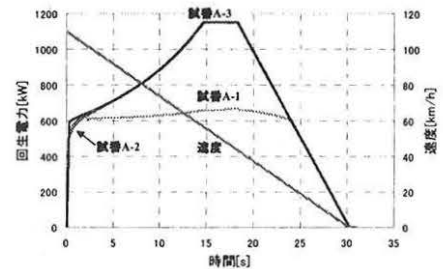


(a) 試番 A

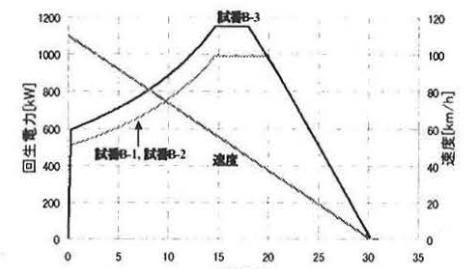


(b) 試番 B

図4.3 フィルタコンデンサ電圧



(a) 試番 A



(b) 試番 B

図4.4 回生電力

試番Aにおいては、試番A-2では試番A-1に対し「回生吸収機能」により回生電力量が約34.4%向上した。試番A-3では試番A-1に対し「回生吸収機能」及び「高速域電気ブレーキ機能」により回生電力量が約34.8%向上した。試番A-3では、試番A-2よりも「高速域電気ブレーキ機能」の動作分(0.4%)だけ回生電力が増加している。

試番Bにおいては、試番B-2は試番B-1と同じ回生電力量であった。これは、試番Bは全負荷状態であり、「回生吸収機能」が動作しないためである。また、試番B-3では試番B-1(B-2)よりも「高速域電気ブレーキ機能」により回生電力量が約11.1%向上した。

試番A-3では、フィルタコンデンサ電圧が1800[V]を超えるまでは「高速域電気ブレーキ機能」が動作するが、すぐにフィルタコンデンサ電圧が1800[V]を超え、「回生吸収機能」が動作するため、「高速域電気ブレーキ機能」による効果は殆どなく、「回生吸収機能」による効果が支配的となる。一方、試番B-3は、全負荷状態であるため「回生吸収機能」は動作しない。故に、試番B-3による効果が「高速域電気ブレーキ機能」のみを動作させた場合の本来の効果である。

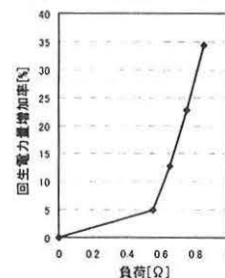
4.5 負荷条件による効果の比較

4.2節から4.4節では負荷の条件を $R_L=0.85[\Omega]$ (軽負荷)、 $R_L=0[\Omega]$ (全負荷)と設定し、各条件における「回生吸収機能」及び「高速域電気ブレーキ機能」による効果を検証した。本節では、各機能の回生負荷条件の変化に対する効果の違いを比較するため、 $R_L=0.85[\Omega]$ よりも小さい負荷としたときの回生電力量をシミュレーションした。

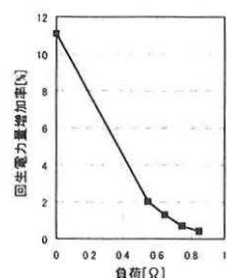
$R_L=0, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85[\Omega]$ における「回生吸収機能」の効果(「回生吸収機能」停止時に対する「回生吸収機能」動作時の回生電力量の増加率)を図4.5(a)に示す。また、「高速域電気ブレーキ機能」による効果(「高速域電気ブレーキ機能」停止時に対する「高速域電気ブレーキ機能」動作時の回生電力量の増加率)を図4.5(b)に示す。

負荷が少なく(R_L が大きくなる)に伴い、「回生吸収機能

能」による効果が大きくなる一方で「高速域電気ブレーキ機能」による効果は小さくなることわかる。すなわち、回生負荷条件より「回生吸収機能」と「高速域電気ブレーキ機能」を適切に動作させることで、回生電力量の向上が可能といえる。



(a)回生吸収機能



(b)高速域電気ブレーキ機能

図4.5 負荷条件における各機能の効果の比較

5. まとめ

回生ブレーキの弱点を克服し、さらなる省エネ効果の向上を図る技術として、「回生吸収機能」と「高速域電気ブレーキ機能」を組み合わせた『高効率回生システム』を提案し、シミュレーションによる動作検証を行った。

これにより、軽負荷状態で「回生吸収機能」により、また全負荷状態では「高速域電気ブレーキ機能」によりそれぞれ回生電力量を向上できることを確認した。

今回は、『高効率回生システム』の構成は「高速域電気ブレーキ機能」用回路と「回生吸収機能」用回路を別々に設けることで両機能を実現できるシステムとした。今後は、回生負荷条件に応じて両機能の動作を適切に判断する制御論理を開発するとともに、システムの低コスト化、小型化を目指した検討を進める予定である。

参考文献

- [1]篠宮健志, 他 3 名: J R 東日本キハ E 200 型用主回路システム, 第 44 回鉄道サイバネティクス・シウム, CD-ROM, 2007
- [2]大石亨一, 他 5 名: 連続回生装置による離線時の回生失効防止, 第 45 回鉄道サイバネティクス・シウム, CD-ROM, 2008