

## 直流電鉄用変電所の設備利用率向上手法に関する基礎的検討

○ [電] 横村 尚吾 [電] 高木 亮 (工学院大学)

## Preliminary Study on the Methods to Improve Utilization of Supply Capacity of the Feeding Substations in DC Electric Railways

○Shogo YOKOMURA and Ryo TAKAGI (Kogakuin University)

The use of regenerative braking is now common in DC electric railways, contributing to reduced energy consumption. Recent years have seen introduction of railcars with even higher ability to regenerate power during braking. At the supply substations, however, peak supply current relative to the average current tends to increase, because current peak occurs when two or more accelerating trains coincide, in which case regenerative braking has little effect of reducing the current. The methods to reduce peak-to-average current ratio will therefore be beneficial for better utilization of supply capacity of the substations. In this paper, the authors give a preliminary discussion on the characteristics of the feeding system, which the authors expect will form the basis of the development of such methods.

キーワード：電気鉄道，饋電システム，電力回生ブレーキ，設備利用率，変電所容量

**Keywords:** electric railways, power feeding network for railways, regenerative brakes, capacity utilization, substation capacity

## 1. はじめに

最近の直流電気鉄道では，電力回生ブレーキを常用する車両（回生車）が一般的となっている。回生電力が有効利用されることで，列車の総消費エネルギーが減少することから，変電所の平均電力は非回生車のみであった時代に比べ減少するようになった。しかし，力行が競合する場合に生じる瞬時最大電力は従来とは大きく変わらないため，平均電力と瞬時最大電力の差である比電力係数が大きくなるという問題点があった<sup>1)2)</sup>。近年製造される車両は，従来の回生車と比べて電力回生能力がさらに高く，一層の省エネルギー化が図られているが，同時に力行性能も高くなったことで力行電力が増加している。したがって，変電所の平均電力は小さく，瞬時最大電力は大きくなることから比電力係数は従来よりも増加する傾向にある。このため，変電所設備利用率は低下していると考えられる。

このような傾向に歯止めをかける手法の開発につなげることを意図し，本論文では，変電所容量と饋電特性の関係など，変電所の設備利用率との関係が深い饋電システムの性質について，饋電特性シミュレータを用いた定量的評価を軸にした基礎的検討を行った。

まず，第2章では変電所の整流器の定格種別について紹介するとともに，近年の回生車が多く存在する一般的な饋電システム下の変電所の設備利用率について，従来の整流器の定格種別を適用した場合が生じている想定される事象について述べる。次に第3章では車両の回生性能を変更してシミュレーションを行い，変電所の負荷電流をもとに，設備利用率に関する検討結果を述べる。最後に，第4章では成果をまとめるとともに今後の課題について述べる。

## 2. 変電所の設備利用率と回生車の導入によって考えられる変化

## 2.1 変電所の整流器の定格種別

一般的に，電気鉄道の負荷は変動が激しく，ピーク値は高いが平均はそれに比べて小さい。整流器や変圧器など饋電用変電所の機器類の定格種別としては，電鉄負荷のこうした性質を考慮して，電気学会電気規格調査会標準規格 JEC-2410 で定められているもののうち表1に示すD種またはE種定格が主に用いられる。近年は比電力係数の増大に伴いD種およびE種に規定する300%より大きな過負荷を前提にしたい，といった場合もあり，その場合には個別にS種と呼ばれる特殊な定格を定義して用いる。なお，整流器を構成する半導体素子（ダイオード）の時定数が10秒程度であることを考慮すれば，表1における「300%負荷が1分間」というような条件を満たす整流器を製作することは，熱的には300%連続負荷に耐える整流器を製作することと等価であるといえる。変圧器など熱時定数がこれより長いものは必ずしもそうではない。

表1. D種およびE種定格の負荷条件

定格の種類	負荷条件
D種	定格出力連続の後， 定格出力電流の150%：2時間 更に300%：1分間
E種	定格出力連続の後， 定格出力電流の120%：2時間 更に300%：1分間

2.2 回生車導入に伴う比電力係数の増大

1 章で述べたとおり、近年国内で新造されるインバータ制御車では、電動車の回生ブレーキ力で付随車の分も負担する「T 車遅れ込めブレーキ」が普及しているし、回生絞込制御も従来より高速で行えるため絞込特性電圧も従来に比べ高い値とすることが可能になっている。こうした技術開発の成果により、1980 年代には典型的な回生車の回生率が 20%程度であったものが、近年の車両では 50%程度まで向上している場合も多くなっている。近年の車両はこれと同時に力行性能も向上し、力行時の消費電力も増加しているため、変電所の平均電力は低下傾向にあるものの瞬時最大電力は軽減が期待できず、結果として平均電力と瞬時最大電力の比である比電力係数は増加する傾向にある。この結果、省エネルギー電車が導入され、実際に消費エネルギーが減少しているにも関わらず、変電所の設備については従来と同じか、むしろ従来より増強されているケースさえある。この結果、D 種、E 種といった従来からの標準的な定格ではなく、S 種定格を採用するケースも増えつつある。この S 種定格については、各鉄道事業者ごとに固有の定格を定義して利用しているのが現状である。

3. 車両の回生性能と変電所負荷電流の関係

3.1 概要

2.2 節で述べたように、近年の高性能なインバータ制御電車が存在する饋電システムにおいて、変電所の瞬時最大電力と平均電力の差である比電力係数が大きくなっていると考えられる。そこで、車両の回生性能と変電所出力電流の関係をシミュレーションで明らかにする検討を行った。

3.2 シミュレーションの条件と方法

実在する路線のデータをもとにしたモデルデータによりシミュレーションを行い饋電特性を評価した。シミュレーションには、筆者らのグループが開発している饋電特性シミュレータ RTSS<sup>3)</sup>を用いた。

モデルデータの概要を以下に示す。なお、車両の回生性能については表 2 により後述する。

- ・路線長：37.8 km，複線（駅数：15）
- ・饋電システム公称電圧：1500 V
- ・饋電方式：上下別饋電方式
- ・饋電回路定数：R=0.03 Ω/km
- ・変電所：9 箇所(シリコン整流器，電圧変動率 6%)
- ・列車種別：急行，準急，各停（図 1 参照）
- ・運行頻度：30 分当たり急行 1 本，準急 1 本，各停 3 本
- ・列車編成：6 両（3M3T）
- ・重量：185 t（車体重量），240 t（総重量）
- ・最高速度：125 km/h

シミュレーションによって求められる饋電特性評価量にはさまざまなものがあるが、「変電所出力電流」の最大値、

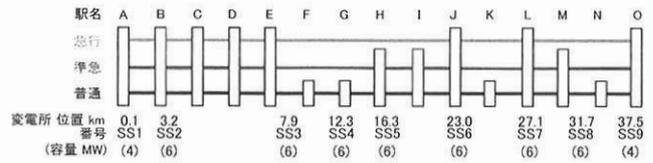


図 1. モデル路線と変電所配置

表 2. 仮定した 4 ケースの車両性能

ケース名	非回生車 (0 倍)	0.5 倍	1.0 倍 (既存)	1.5 倍	
倍率	0.0	0.5	1.0	1.5	
起動加速度 [km/h/s]	3.0				
減速度 (常用最大) [km/h/s]	4.2				
力行時	定トルク領域 終端速度 [km/h]	41.0			
	定電力領域 終端速度 [km/h]	67.0			
	引張力 [tf]	26.3			
	最大編成電流 [A]	2353.0			
回生時	定トルク領域 終端速度 [km/h]	0.0	33.0	66.0	99.0
	定電力領域 終端速度 [km/h]	0.0	38.5	77.0	115.5
	引張力 [tf]	0.0	19.1	19.1	19.1
	最大編成電流 [A]	0.0	1238.3	2476.7	3715.1

実効値、両者の差である比電力係数を主な評価量として用いる。変電所出力電流の最大値が増加、または実効値が減少することで比電力係数が大きくなり、設備利用率が悪化する。また、全変電所が交流系統から受け取るエネルギー量である「変電所総合入力エネルギー」も用いる。これは力行エネルギーから回生エネルギーを差し引き、補機エネルギーを加えた総列車消費エネルギーに、レールや饋電線で生じる饋電損失を加えたもので、回生エネルギーが力行車に供給され有効利用されることで、変電所総合入力エネルギーが減少し省エネルギー効果が現れる。このほか、電力回生ブレーキの動作状況を表す評価量として、回生率および回生失効率も用いる。回生率は、列車の運動エネルギーのうち、回生したエネルギーの割合を示す。回生失効率は、列車の回生可能なエネルギーのうち、実際に回生されたエネルギーの割合を示す。

ここでは、車両の性能を変更した場合の饋電特性の変化をみる。表 2 に示した 4 ケースの異なる回生ブレーキ性能を有する車両を用いて、変電所出力電流と、それから求められる比電力係数がどのように変化するかシミュレーションを行い、各ケースの比較を行った。力行性能は変更せず、回生性能についてのみ、定トルク領域終端速度、定電力領域終端速度、最大編成電流を、当該路線において用いられている既存の車両のデータをもとに、それに表中に示した倍率を乗じた値に変更する。既存車両とあるのは、近年の車両の典型的な例といえるものである。このケースに対し

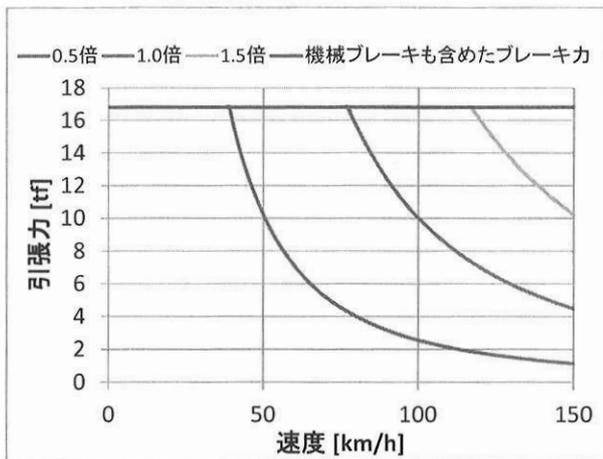


図 2. 0.5/1.0/1.5 倍の各ケースにおける車両の回生性能曲線

表 3. 変電所出力電流 (最大値, [A]) の比較

変電所 番号	ケース名			
	0 倍	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
No.2	3437	3435	3434	3433
No.3	3396	3295	3136	3109
No.4	3078	2898	2890	2889
No.5	3083	3078	3076	3075
No.6	3427	3424	3421	3415
No.7	2590	2418	2443	2493
No.8	2862	2853	2862	2860
平均	3125	3057	3037	3039

て各数値を 0.5 倍, 1.5 倍とした 2 ケース, および倍率 0.0 倍 (非回生車) のケースを考え, 合計 4 ケースについて検討を行った。

図 2 に, 非回生車以外の 3 ケースにおけるブレーキトルク-速度特性を示す。この図からわかるように, 回生車は低速では回生ブレーキによりすべてのブレーキ力を負担できるが, 高速では回生ブレーキ力が不足する。

### 3.3 シミュレーション結果

はじめに, 各ケースにおける各変電所の最大電流と平均電流, 比電力係数を示す。ただし, 両端の変電所は容量が異なるため除外してある。

表 3 に変電所出力電流の最大値を示す。力行性能を変更していないため, ケースによらず大きな変化は見られない。

表 4 に, 各回生性能時の変電所出力電流の実効値 (RMS 値) を示す。回生性能が高くなるにつれて値が小さくなっている結果が得られた。

表 5 に, 各回生性能時の比電力係数を示す。回生性能が向上すると, 変電所出力電流の平均値 (実効値) は減少するが, ピーク値があまり変化しないから, 比電力係数が大きく, 設備利用率は悪くなる。

表 6 に饋電特性評価量を示す。回生性能が向上するにつれ, 力行車のパンタ点電圧も高くなることから, 総力行時間, 力行エネルギーとも減少する。また, 回生性能が向

表 4. 変電所出力電流 (実効値, [A]) の比較

変電所 番号	ケース名			
	0 倍	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
No.2	1142	982	950	943
No.3	1246	1059	1017	1006
No.4	1324	1137	1074	1057
No.5	1551	1345	1266	1248
No.6	1595	1354	1266	1242
No.7	1344	1149	1062	1037
No.8	1347	1190	1121	1101
平均	1364	1174	1108	1090

表 5. 比電力係数の比較

変電所 番号	ケース名			
	0 倍	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
No.2	3.0	3.5	3.6	3.7
No.3	2.7	3.1	3.1	3.1
No.4	2.3	2.5	2.7	2.7
No.5	2.0	2.3	2.4	2.5
No.6	2.2	2.5	2.7	2.8
No.7	1.9	2.1	2.3	2.4
No.8	2.1	2.4	2.6	2.6
平均	2.3	2.6	2.8	2.8

表 6. 饋電特性評価量

ケース名	0.0 倍	0.5 倍	1.0 倍	1.5 倍
総力行時間 [s]	9443	9321	9201	9145
力行エネルギー [kWh/h]	14806	14392	14342	14325
回生可能エネルギー [kWh/h]	—	3488	5047	5538
回生エネルギー [kWh/h]	—	3043	4354	4675
総列車消費エネルギー [kWh/h]	14806	11350	9988	9651
饋電損失 [kWh/h]	478	549	651	690
変電所総合入力エネルギー [kWh/h]	15284	11899	10639	10341
回生失効率 [%]	—	2.7	6.4	9.8
回生率 [%]	—	21.1	30.3	32.6
パンタ点電圧 (力行車・平均) [V]	1475	1488	1497	1501
パンタ点電圧 (全列車・平均) [V]	1521	1545	1560	1565

上すると饋電損失も大きくなるが, これは回生電力の増加により電力潮流が変化することによると考えられ, 回生率が向上し, 変電所総合入力エネルギーも減少している。

次に, 変電所出力電流のヒストグラムを示す。

まず, 図 3 に示した 0.0 倍 (非回生車) ケースのヒストグラムより, 変電所電流が 1000~2000 A となる確率が 60% 程度に達している一方, 0~500 A となる確率は 0% となっている。

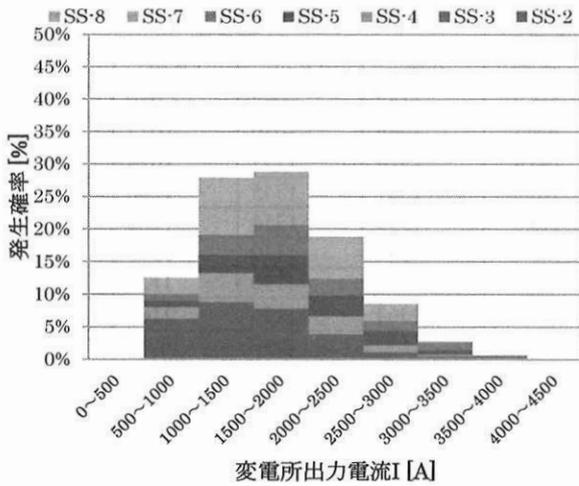


図 3. 0 倍ケース(非回生車)における変電所出力電流ヒストグラム

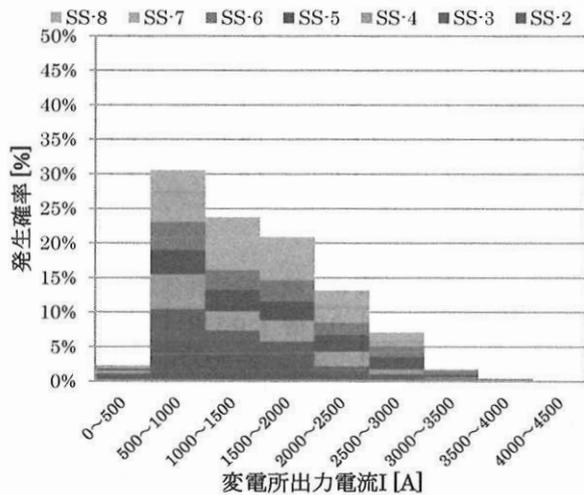


図 4. 0.5 倍ケースにおける変電所出力電流ヒストグラム

これと、図 4 に示した 0.5 倍ケースにおけるヒストグラムとを比較すると、図 4 では変電所電流が 500~1000 A となる確率が増加し、30% 程度となる。また、0~500 A となる確率もゼロではなくなっている。図 5 に示した 1.0 倍ケースにおけるヒストグラムでは、図 4 と比べ、変電所電流が 500~1000 A となる確率がさらに増大し、45% 程度となっている。

一方、図 6 に示した 1.5 倍ケースにおけるヒストグラムでは、図 5 と比較して変電所電流が 500~1000 A となる確率が 35% 程度に下落している。また、電流が非常に大きい領域 (3000 A 以上) になる確率も低くなっており、その分 1000~2000 A となる確率が多少増加している。RTSS に実装されている駅間走行時分一定化モデルの働きで、力行車パンタ点電圧の増加により列車位相が多少変化したが、このような変化の原因ではないかと考えられる。

4. まとめ

以上のように、回生車の導入による比電力係数の増大と、それに伴う変電所の設備利用率低下のようすを把握するた

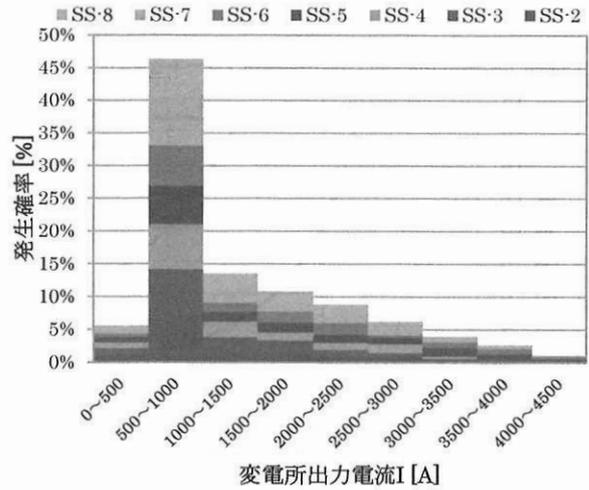


図 5. 1.0 倍ケースにおける変電所出力電流ヒストグラム

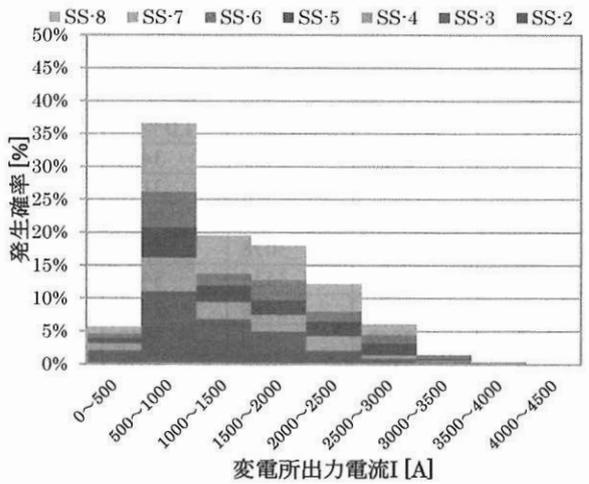


図 6. 1.5 倍ケースにおける変電所出力電流ヒストグラム

め、車両の回生ブレーキ性能を変化させたときの饋電特性の変化をシミュレーションによって解析した。

今後、シミュレーションによる評価をもとにこうした検討を異なるケースについて繰り返し行い、最終的には設備利用率の向上につながる各種手法の開発や、能力の向上した回生車に対応した変電所やその定格のあり方の議論につなげていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 電気学会：回生車を含む電システムの現状とあり方，電気学会技術報告(II)-296，(1989)
- 2) 電気学会：回生車両に対応した直流変電所容量設計法，電気学会技術報告(II)-360，(1991)
- 3) 高木 亮，曾根 悟：直流電システム駅の駅間走行時分一定化シミュレーション，電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌)，115-No.8，pp.975-983(1995)
- 4) 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 TER/LD 合同研究会資料，TER02-49(2002)
- 5) 横村 尚吾，高木 亮：直流電鉄用変電所 V-I 特性と饋電特性：近年の車両の典型的パラメータを用いた検討，平成 23 年電気学会産業応用部門大会，3-9，(2011)