

S3-1-4

直流電気鉄道へのエネルギー蓄積素子導入の検討 — 高速回生能力向上時のシステムの概要設計 —

[電] 佐藤 司*, [電] 神山 純一, [電] 福田 真顕, [電] 曾根 悟, [電] 高野 奏 (工学院大学)

A Study of Introducing Energy Storage Devices for Railway Power System — Relation Between Required Performance and Outline Design of the System —

Tsukasa SATO, Student Member, Junichi KOUYAMA, Student Member, Satoru SONE, Senior Member, Masaaki FUKUDA, Student Member, and Susumu TAKANO, Senior Member, Senior Member (Kogakuin University)

This paper examines outline design of the system that combines multi-inverter with energy storage devices for improved performance of regenerative braking over high speed region

キーワード：エネルギー蓄積素子，複数インバータ，過電圧耐量の活用，高速回生能力向上，列車の要求性能

Keyword : Energy storage device, multi-inverter, usage of over-voltage durability, improved regeneration over high-speed region, demand performance of the train

1. はじめに

近年摩擦ブレーキの使用軽減，エネルギーコストの軽減などから鉄道のブレーキ方式は電空併用ブレーキから純電気ブレーキへと徐々に移り変わっている。その第一ステップとして，現在では完全に停止するまで電気ブレーキを使用することが実現化されている。しかし回生失効，高速時に強いブレーキ力が出せないなどの問題がまだ残っている。そこで純電気ブレーキの第二ステップとしてモータの過電圧耐量の活用及びエネルギー蓄積素子の導入によって，高速回生能力向上及び回生失効の軽減の検討が行われている。^{*(1)}本研究はその高速回生能力向上及び回生失効の軽減等の要求性能から，複数のインバータとエネルギー蓄積素子を組み合わせたシステムの設計論であり，本稿ではその第二報として，列車の要求性能とシステムの概略設計の関係から，電車線は従来並みの回生電力を受け入れ可能と仮定して，高速回生能力向上のみを考慮したシステムの概略設計を検討する。

2. 高速回生能力向上の方法

これまでにいくつかの高速回生ブレーキ方式が提案されている。^{*(2)}本稿ではその各種高速回生ブレーキ方式の中でも図1のような変圧器を使用する交流電圧加算方式を用いた議論をしており，この高速回生能力向上策の基本的な考えは，回生電流を増やさずにモータの過電圧耐量を活用して，架線側に架線電圧と回生電流の積に相当する電力を回生し，残りの電圧と回生電流の積に相当する電力はエネルギー蓄積素子が充電する。つまり架線とエネルギー蓄積素子の2種類の電源で同一周波数のインバータを動作させ，交流側で電圧の和を取ってモータに接続する方法である。図1-aは架線側(INV1)がモータに直結した回路で，エネルギー蓄積素子側(INV2)は変圧器を介して動作する。また停止間際の回生失効対策としてINV3を用いる。図1-bはINV2がモータに直結しており，INV1は変圧器を介して動作する。

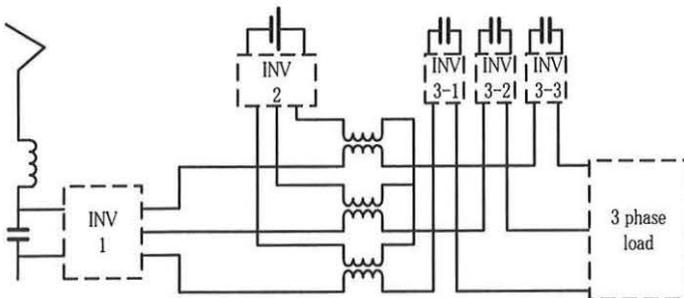


図1-a: 架線直結回路 (交流電圧加算方式)

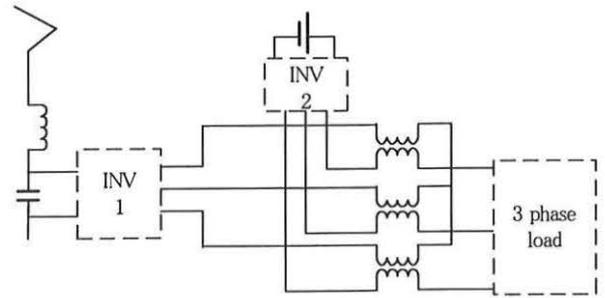


図1-b: エネルギー蓄積素子直結回路 (交流電圧加算方式)

3. 要求性能とシステムの概略設計との関係

本研究では高速回生能力向上及び回生失効の軽減を目的としているため、列車の要求性能を以下のように想定する。*(3)

・ **非常に楽な要求性能：type1**

平坦線で通常時の最高ブレーキ初速度からブレーキを掛け、高速時には減速度を減らすパターンを用い、全て電気ブレーキでまかなう。この際架線側で回生失効は起こらないとする。

・ **楽な要求性能：type2**

平坦線で通常時の最高ブレーキ初速度からブレーキを掛け、全て電気ブレーキでまかなう。この際架線側で回生失効は起こらないとする。

・ **比較的楽な要求性能：type3**

平坦線で通常時の最高ブレーキ初速度からブレーキを掛け、全て電気ブレーキでまかなう。この際架線側で回生失効が起こると摩擦ブレーキを使用する。

・ **厳しい要求性能：type4**

平坦線で通常時の最高ブレーキ初速度からブレーキを掛け、高速時には減速度を減らすパターンを用い、全て電気ブレーキでまかなう。この際架線側で回生失効が起こってもエネルギー蓄積素子が吸収する。

・ **非常に厳しい要求性能：type5**

平坦線で通常時の最高ブレーキ初速度からブレーキを掛け、全て電気ブレーキでまかなう。この際架線側で回生失効が起こってもエネルギー蓄積素子が吸収する。

列車の要求性能に適した車両の設計を行うために、回路方式・走行区間・列車の要求性能を考慮したシステムの概略設計を全パターン行い、その中でも実用的な組合せだけを示したものが表1である。列車の要求性能とシステムの概略設計の関係を調べると、実用的な組合せの中でも列車のシステム構成を4種類に分類できる。本稿では回路方式・走行区間・列車の要求性能を以下のように想定する。

- ・ 回路方式：架線直結回路（交流電圧加算方式）
- ・ 走行区間：電化区間・平坦区間
- ・ 列車の要求性能：type2（高速回生能力向上）

なお電車線は従来並みの回生電力を受け入れ可能と仮定して議論を行うためINV3は不要である。

4. 車両諸元とエネルギー蓄積素子

4-1. システムの概略設計における車両諸元

車両の要求性能に合わせたシステムの概略設計を行うために、車両諸元を以下のように想定する。

- (1) 乗車率：250%を想定 (2) 減速度：3.3km/h/s
- (3) 定員：M車127人、T車127人 (Tc122人)
- (4) 車両総質量：366t (4M4T車両に乗車率250%)
- (5) ブレーキ初速度：80km/h及び120km/h
- (6) 変圧器の巻数比：1対1

なお車両総質量は使用機器の質量の変化に応じて変える必要があるが、エネルギー蓄積素子の質量が種類によって大きく異なるので、本稿では車両総質量を4M4T車両1編成に乗車率250%の質量を用いる。

4-2. エネルギー蓄積素子

エネルギー蓄積素子は原理的に電気二重層キャパシタ（以後EDLCと称す）のような電圧変動が大きいものと、2次電池のような電圧変動が小さいものの2種類あり、選択によってINVの容量が変わる。また同じエネルギー蓄積素子でも種類によって特性の違いがあり、例えばEDLCにはパワー密度が高いものはエネルギー密度が低く、エネルギー密度が高いものはパワー密度が低くなる違いがある。この他に充放電深度の違いでもメリット・デメリットがあり、例えば同じリチウムイオン電池でも充放電深度を深くすると損失が大きく寿命が短くなり、浅くすると同じエネルギーを得るのに質量を重くする必要があり、エネルギー蓄積素子を搭載する場合にはこの他に軽量なものを選択しなければならない問題もある。以上のことを注意して本稿で用いるエネルギー蓄積素子を選定すると、参考文献5及び6より現状では同じパワー及びエネルギーを充放電するのにリチウムイオン

表1: 要求性能とシステムの概略設計との関係

回路方式	走行区間	要求性能			使用システム			システム構成
		type	高速回生能力向上	失効対策	INV1	INV2	INV3	
架線直結回路	電化	2	○	×	○	○	×	1
		3	○	×	○	○	×	1
		4	×	○	○	○	○	2
		5	○	○	○	○	○	2
	両用	2	○	×	○	○	○	2
		3	○	×	○	○	○	2
4		×	○	○	○	○	2	
エネルギー蓄積素子直結回路	電化	2	○	×	○	○	×	3
		3	○	×	○	○	×	3
		5	○	○	○	○	×	3
	両用	2	○	×	○	○	×	3
		3	○	×	○	○	×	3
		5	○	○	○	○	×	3
	非電化	1	×	×	×	○	×	4

必要なもの:○, 必要でないもの:×

システム構成1:INV1, INV2 システム構成2:INV1, INV2, INV3

システム構成3:INV1, INV2 システム構成4: INV2

電池よりも EDLC の方が軽く、また EDLC の損失特性を効率と充放電時間の関係に置き換えた図 2 から、制動・力行所要時間を 30~50 秒と想定すると高効率で充放電できる高パワータイプの EDLC を使用する。EDLC の充放電深度は電圧変動に依存し、充放電深度が大きいと電圧変動も大きくなり INV 容量も大きくなる。そのため本稿では多少のエネルギーロスを考慮したうえで充放電深度を 75% (電圧を満充電から 1/2 まで使用) とする。本稿で用いるエネルギー蓄積素子 1 セル当りの性能を以下に示す。

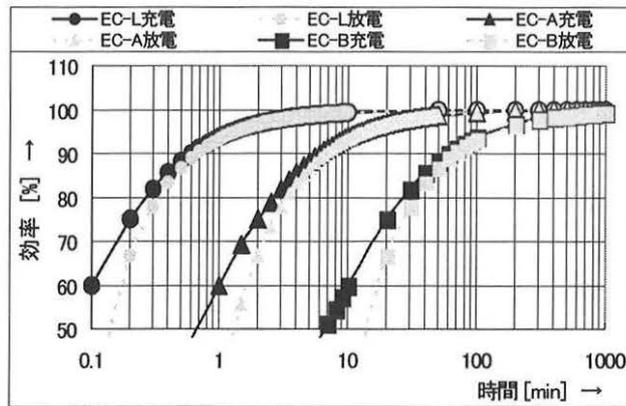


図 2: EDLC の充放電効率

エネルギー蓄積素子：

- ・電気二重層キャパシタ：高パワータイプ
- ・定格電圧：2.7 V ・静電容量 1350 F
- ・定格電流：60 A ・0.21 セル/kg
- ・内部抵抗：2 mΩ
- ・充放電深度：75 % (電圧を満充電から 1/2 まで使用)

なお本稿で用いるエネルギー蓄積素子は 2005 年時点での技術レベルのエネルギー蓄積素子を選択するが、今後の発展により使用するエネルギー蓄積素子は異なるものを採用する。

5. 高速回生能力向上車両設計と評価方法

5-1. 高速回生車両の機器容量

回路方式・走行区間・列車の要求性能及び車両諸元から、回生失効・回生絞込が全く起こらず電車線は従来並みの回生電力を受け入れ可能とした場合に、想定速度から摩擦ブレーキを使用せずに電気ブレーキのみで停止させる高速回生能力向上車両の機器容量を算出したものが表 2、エネルギー蓄積素子の容量と質量が表 3 である。

この表 2 から高速回生能力を向上した車両は在来車両と比べてインバータ容量の増加、変圧器・エネルギー蓄積素子の追加が必要となる。

表 2: 追加機器容量

ブレーキ初速度	使用機器	機器容量
80 km/h	INV2	1530 kVA
	変圧器	5800 kVA
120 km/h	INV2	5250 kVA
	変圧器	5800 kVA

表 3: エネルギー蓄積素子の機器容量と質量

ブレーキ速度	使用機器	機器容量	質量
80 km/h	EDLC	1450 kW	1.3 t
		8.0 MJ (2.3kWh)	
120 km/h	EDLC	5000 kW	2.3 t
		64.6 Mj (18 kWh)	

5-2. 高速回生車両の評価方法

高速能力向上車両の評価方法として、在来車両から高速回生車両に改造する場合の各機器質量とコストを、単位容量あたりの機器質量とコストから評価する。またこれまでの車両は乗車率 250% を想定して車両性能を考えてきた。しかし近年では車体軽量化技術の進歩や混雑率の緩和により、車体質量は在来車両が鋼製車時代の車両よりも車両性能をほぼ変えずに空車時で 1 割程度軽くなり、また乗車率では現在とほぼ同じ乗車人数の 10 年前の最大混雑時間の乗車率 (首都圏内) と比較して 1 割程度減少している。^{*(7)} 以上のことから在来車両 (空車時) の 1 割程度の質量と乗車率の 1 割程度の質量以内であれば、機器を追加しても従来並みの性能で走れると考え、高速能力向上車両の実現可能として評価する。本稿の場合、車体軽量化分と乗車率緩和分の質量は 37 t 以内であれば実現可能となる。今回選定した EDLC のセルだけの質量は 1.3 t 及び 2.3 t であるため EDLC のセルの追加だけであれば実現可能であるが、セルだけ積んでも電圧のバラツキなどの問題が生じるため、並列モニタ回路や制御装置、また新たに追加する変圧器や INV2 の質量も加えて 37 t 以内であれば実現可能である。

6. まとめ

本稿では高速回生能力向上車に必要な機器の容量から質量とコストを算出し、また高速回生車両の乗車率を変化させることで従来車両の総質量と等しくなる高速回生車両の乗車率を比較することで、高速回生車両の実現可能性を評価した。今後は回生失効の軽減も含めた高速回生能力向上車の定量的な議論を行う。

参 考 文 献

- (1) 曾根 悟 佐藤 司 神山 純一：「高速回生ブレーキ実現化に向けて－真の純電気ブレーキ実現のために－」電気学会研究会 TER-05-26 (2005. 5)
- (2) 福田 真顕 佐藤 司 神山 純一 川田 恭志 西 恵吾 曾根 悟 高野奏：「各種高速回生ブレーキ実現方式の基本特性の比較」電気学会研究会 (2005. 10)
- (3) 佐藤 司 神山 純一 曾根 悟 高野奏：「直流電気鉄道へのエネルギー蓄積素子導入の検討－要求性能とシステムの概略設計の関係－」電気学会産業応用部門大会 3-31 p. III-191 (2005. 8)
- (4) 岡村 迪夫：「電気二重層キャパシタと蓄電システム第二版」日刊工業新聞社 (2001. 3)
- (5) 佐藤 司 神山 純一 曾根 悟 高野奏：「直流電気鉄道へのエネルギー蓄積素子導入の検討－車載の可能性－」電気学会全国大会 5-173 p. 5-248 (2005. 3)
- (6) 神山 純一 佐藤 司 曾根 悟 高野奏：「直流電気鉄道へのエネルギー蓄積素子導入の検討－地上側における導入の有効性について－」電気学会全国大会 5-206 p. 5-300 (2005. 3)
- (7) 財団法人運輸政策研究機構：「平成 15 年版都市交通年報」