リファレンス SOC カーブに基づく 車載エネルギー蓄積装置の充放電制御の評価

天野 哲生* 高木 亮 (工学院大学)

Evaluation of the Charge / Discharge Control of On-board Energy Storage Systems
Based on Reference SOC Curves
Tetsuo Amano*, Ryo Takagi, (Kogakuin University)

In the present railcar design, regenerative capacity at high speed is almost always insufficient. Giving railcars the combination of higher regenerative capacity and the on-board energy storage system would be effective for energy-saving. A simulation model to evaluate such railcars has been added to the existing multi-train power network simulator for DC electric railways. Evaluation results using the new model are presented in this paper.

キーワード:電気鉄道, 純電気ブレーキ, 饋電システム, エネルギー蓄積装置, シミュレーション (electric railways, pure electric brake, power feeding network for DC electric railways, energy storage systems, simulation)

1. はじめに

現状の直流電気鉄道における電力回生ブレーキは、回生失効の発生、ならびに高速域における回生能力そのものの不足という問題を抱えている。これらの問題を解決するため、著者らの研究グループでは、エネルギー蓄積装置(ESS: Energy Storage Systems)の車載、大電流駆動方式による高速回生車化⁽¹⁾、およびリファレンス SOC カーブに基づいた充放電制御⁽²⁾の導入を提案してきた。これらの導入効果を評価するため、車載 ESS の充放電制御モデルを開発し、既存の饋電特性シミュレータ⁽³⁾に組み込んだ⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本論文では、開発したモデルを用いたシミュレーション によって、効果の評価を試みた結果について報告する。

2. 用語の定義

〈2・1〉大電流駆動方式 大電流駆動方式^②とは、高速回生能力を向上させる方式のひとつである。いま、高速回生能力が不足する車両があるとする。このとき、この車両の駆動用誘導電動機ならびにインバータを新たなものに換装することを考える。新たな電動機は、元々のものと比べて定格電流が X 倍、定格電圧が 1/X 倍に変更されている。このような電動機は、もとのものとほぼ同一の体格を有している。また、インバータは出力電圧が現状と同一で、最大電流が現状の X 倍のものを用いる。このようにすれば、電動機の過電圧耐量を活用して高速回生能力を向上させる

ことができる。

なお、このようなシステムにおいては、回生性能だけでなく力行性能も同時に向上させることができる。本論文では、純電気ブレーキ化のために回生性能だけ向上させた車両を、以下では純電気ブレーキ車と呼ぶ。回生性能だけでなく、力行性能も向上させた車両は、以下では高速力行車と呼んで区別することとする。

〈2・2〉SOC カーブ 路線のある位置における ESS が 取るべき SOC 値を定め、車上で記憶し、実際の列車走行時 に呼び出して充放電制御の目標値(リファレンス SOC)として利用する⁽²⁾。位置に対するリファレンス SOC の関数を SOC カーブと称する。SOC カーブは、ある条件における主 回路入出力電力から設計される。SOC カーブの微分値から リファレンス充放電電力が求まり、これを充放電制御に用いる。

3. シミュレーションの流れ

第4章と第5章で、それぞれの走行性能とSOCカーブを 設計し、車載ESSの充放電制御モデルを用いたシミュレー ションを行う。

第6章でシミュレーション結果を評価する。

〈3・2〉モデル路線 シミュレーションを行うために、ケーススタディに利用した路線は、実在する通勤路線をベースにしたもので、路線長は37.8 km、列車は6両編成で最高速度125 km/hである。高速回生車化前の列車性能を表1に示す。列車のパンタ点最大入出力電力は、力行時3.5 MW、回生時3.7 MWである。変電所は9箇所すべてシリコン整流器を使用し、定格容量は6 MWとした。列車種別はすべて各駅停車で、運行頻度は上下線とも6分間隔とした。

4. 高速力行車のシミュレーション

〈4·1〉走行性能の設計 表 1 の従来車の車両性能をベースに、高速力行車の性能を次のように決めた。

回生時は、最高速度から回生ブレーキがブレーキカー定 で作用するように設計するため、定トルク領域と定パワー 領域の終端速度を 1.9 倍に変更した。力行時は、回生性能と 同じだけ性能を上げ、各々の終端速度を 1.9 倍に変更した。

一般的に、応荷重制御によって列車混雑率によらず加速 力および減速力が一定に保たれる。〈4·3〉で後述する ESS の重量を加算後、引張力と編成当たりの最大パンタ点電流 を再計算した。設計結果を表 2 に示す。

〈4・2〉SOC カーブの思想 力行時は、列車の力行電力が駅間毎に定めたアシスト閾値を超えた時にアシストを行う。回生時は、回生失効を防止するため、回生エネルギーを全て充電する。惰行時と停車中は充放電を行わない。ESSのパワー容量は、回生エネルギーを全て ESS に充電するため、高速力行車の最大回生電力を上回る値とする。

 $\langle 4\cdot 3 \rangle$ ESS の各容量の決定 モデル路線に高速力行車を走行させた場合のシミュレーションを行った結果,回生電力の最大値は $6.8\,\mathrm{MW}$ となった。 $\langle 4\cdot 2 \rangle$ に述べた設計思想から,車載 ESS のパワー容量とエネルギー容量はそれぞれ7.0 MW, 1365 MJ とした。エネルギー蓄積素子の重量は5.8 t, DC-DC コンバータの重量は1.0 t とした。これらを,列車の中間付随車(T1)に車載することとした。

〈4・4〉基準運転時分 従来車に比べて力行性能が向上すれば、駅間走行時分が短縮できる。そこで、高速力行車の基準運転時分を設計した。従来車と高速力行車の基準運転時分を表3に示す。

〈4・5〉SOC カーブの設計 設計した高速回生車を走行させた場合のシミュレーションを行い、得られた列車の入出力電流とパンタ点電圧を基に、列車位置毎の入出力電力を計算する。次に、単位時間の列車の速度変化により、充放電制御パターンを場合分けする。充放電制御パターンを表4に示す。アシスト閾値,充電開始閾値、追充電最大電力は、駅間毎に定める。アシスト閾値 Pa [MW]は、従来車最大力行電力の3.5 MWを、充電開始閾値は0.0 MWを基本とする。充放電制御パターンによってESSの蓄積エネルギーを算出する。エネルギー推移をSOCに換算すると、SOCカーブが完成する。

〈4·6〉車載 ESS の充放電制御モデルを用いたシミュレーション 設計した SOC カーブと車載 ESS の充放電制御

表 1. 前提とした高速回生車化前の従来車の性能

編成形態	Tc1	M1	T1	M2	МЗ	Tc2	
定員[t]	147	158	158	158	158	147	
自重[t]	30.3	33.6	26.5	33.8	31.3	30.9	
起動加速度	3.0 km/h/s						
減速度	4.2 km/h/s (常用最大)						
定トルク領域 終端速度	力行時 41 km/h 回生時 66 km/h						
定パワー領域 終端速度	力行時 67 km/h 回生時 77 km/h						
引張力	力行時 26.34 tf 回生時 24.79 tf						
編成当たりの 最大パンタ点電流	力行時 2353.0A 回生時 2476.7 A						

表 2. 従来車と高速回生車の比較

項目		単位	従来車	純電気 ブレーキ車	高速 力行車
起動加速度		km/h/s	3.0	3.0	3.0
N.	或速度(常用最大)	km/h/s	4.2	4.2	4.2
力行時	定トルク領域 終端速度	km/h	41.0	41.0	77.9
	定電力領域 終端速度	km/h	67.0	67.0	127,3
	引張力	tf	26.34	26.93	27.23
	編成当たりの 最大パンタ点電流	А	2353.0	2405.1	4620.7
終 回 定 管 生 終 号 編成	定トルク領域 終端速度	km/h	66.0	125.4	125,4
	定電力領域 終端速度	km/h	77.0	146.3	146,3
	引張力	tf	24.79	25.35	25.64
	編成当たりの 最大パンタ点電流	А	2476.7	4812.0	4867.8

表 3. モデル路線の終着駅間の運転時分

	従来車	短縮後	短縮分
下り	0:33:40	0:31:20	0:02:20
上り	0:33:30	0:31:10	0:02:20

表 4. 速度変化による充放電制御パターンの選択

速度変化	充放電制御パターン		
加速	Α		
定速	Α		
惰行	В		
抑速	С		
減速	С		

A: 力行電力がアシスト関値 Pa を超えた時にアシストする。力行電力が追充電最大電力 Pmax(add)以下の時に Pmax(add)となるように追充電する。

B: 充放電を行わない。

C: 主回路回生電力が充電開始閾値 Ps 超過時に充電。 Ps=0 且つ充電電力 P(ess)に余力があれば追充電する。追充 電最大電力は Pmax(add)までとする。 モデルを用いてシミュレーションを行う。シミュレーション条件の充放電制御パラメータ⁽⁴⁾は、以下の値とした。

- ・ESS の最大放電電流 IDmax = 4667 A
- ・ESS の最大充電電流 Icmax = 4667 A
- ・乖離補正特性の放電電流 Idmax = 1167 A
- ・乖離補正特性の充電電流 Icmax = 1167 A
- ・乖離補正特性の放電閾値 Sa = 10 %
- ・乖離補正特性の充電閾値 Sb = 10 %
- · 力行時の電流リミッタ: 2431.9 A
- ・回生時の電流リミッタ: 2562.0 A

〈4·7〉シミュレーション結果 シミュレーション結果の うち、下り列車を図1に示す。

SOC カーブと実績 SOC が部分的に乖離している箇所が 見られる。実際に列車が走行するときは、一般的に電車線 電圧などの条件が SOC カーブの設計時と異なるため、乖離 が存在すること自体は問題ない。乖離が生じた場合、乖離 補正制御によってリファレンス値への引き戻しが問題なく 行われている。

5. 純電気ブレーキ車のシミュレーション

〈5・1〉走行性能の設計 〈4・1〉と同様に、表 1 の従来車の車両性能をベースに、回生時は定トルク領域と定パワー領域の終端速度を 1.9 倍に変更した。力行時は、従来車のままとした。応荷重制御として、〈5・3〉で後述する ESS の重量を加算後、引張力と編成当たりの最大パンタ点電流を再計算した。設計結果を表 2 に示す。

〈5・2〉SOC カーブの思想 回生時は、回生電力が従来 車の最大回生電力を超えたときに、ESS に充電する。力行 時は、従来車の最大力行電力をアシスト閾値の基準とし、 充電によってリファレンス SOC 値が高めになったら、アシ スト閾値を下げる。

 $\langle 5\cdot 3 \rangle$ ESS の各容量の決定 モデル路線に純電気ブレーキ車を走行させた場合のシミュレーションを行った結果,回生電力の最大値は 6.46 MW となった。 $\langle 5\cdot 2 \rangle$ に述べた設計思想から,車載 ESS のパワー容量とエネルギー容量はそれぞれ 3.0 MW,585.0 MJ とした。エネルギー蓄積素子の重量 2.5 t,DC·DC コンバータの重量は 1.0 t とした。これらを,列車の中間付随車(T1)に車載した。

〈5・4〉SOC カーブの設計 設計した純電気ブレーキ車を用いてシミュレーションを行う。〈4・5〉と同様に、充放電制御パターンによって ESS の蓄積エネルギー推移を算出し、SOC カーブを設計する。アシスト閾値 Pa [MW]は、従来車最大力行電力の 3.5 MW を、充電開始閾値は従来車最大回生電力の 3.7 MW を基本とした。

〈5·5〉車載 ESS の充放電制御モデルを用いたシミュレーション 設計した SOC カーブと車載 ESS の充放電制御モデルを用いてシミュレーションを行う。シミュレーション条件の充放電制御パラメータは以下の値を設定した。

- ・ESS の最大放電電流 IDmax = 2000 A
- ・ESS の最大充電電流 Icmax = 2000 A

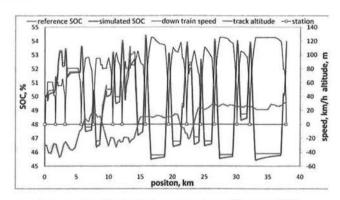


図 1. 下り高速力行車の SOC カーブと SOC 推移 Fig1. Train speed, SOC curve and simulated SOC of the down high-performance train

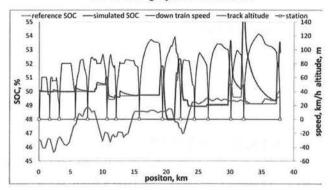


図 2. 下り純電気ブレーキ車の SOC カーブと SOC 推移 Fig2. Train speed, SOC curve and simulated SOC of the down pure electric brake train

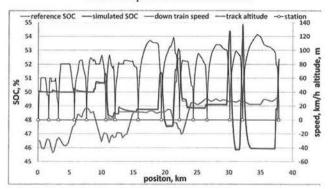


図 3. 回生失効対策を施した場合の下り純電気ブレーキ車 の SOC カーブと SOC 推移

Fig3. Train speed, SOC curve and simulated SOC of the down pure electric brake train

- ・乖離補正特性の放電電流 Idmax = 667 A
- ・乖離補正特性の充電電流 Icmax = 667 A
- ・乖離補正特性の放電閾値 Sa = 10 %
- ・乖離補正特性の充電閾値 Sb = 10%
- ·力行時の電流リミッタ:2431.9A
- ・回生時の電流リミッタ: 2562.0 A

〈5·6〉シミュレーション結果 シミュレーション結果の うち,下り列車を図2に示す。

30 km と 32 km 地点で、実績 SOC 値がリファレンス値

から大きく乖離している。同地点を含む駅間では、充電開始関値を 3.7 MW と設定し、常に電車線に 3.7 MW 返せると期待して SOC カーブを設計しているが。しかし、実際の列車走行時は、電車線電圧が上昇し、回生失効防止のために主回路優先制御が動作して ESS に充電した。こうして乖離が発生したことから、主回路優先制御が正常に動作していることが分かる。

乖離を小さくするため、乖離が大きい駅間の充電開始閾値を下げて、回生失効対策を施したSOCカーブを設計した。そのシミュレーション結果のうち、下り列車を図4に示す。図3よりも、リファレンスSOC値との乖離が比較的小さい実績SOC値が得られた。

6. シミュレーション結果の評価

〈6·1〉饋電特性評価量 第4章と第5章のシミュレーション結果から、饋電特性評価量⁽³⁾を表5に示す。5章は、回生失効対策を施したSOCカーブを用いた場合の結果を用いている。

高速力行車と純電気ブレーキ車と比較するため、従来車 のシミュレーション結果を合わせて示す。

〈6・2〉純電気ブレーキ車の評価

回生可能エネルギーは従来車と比べて 504 kWh/h (9%) 増加し、主回路回生エネルギーは 1103 kWh/h (22%) 増加している。高速回生能力向上の効果が見られる。

電気的輪周ブレーキエネルギーは 1316 kWh/h (25%) 増加した。変電所総合入力は 909 kW h/h (9%) 減少している。

以上から、純電気ブレーキ車の導入によって、電気的輪 周ブレーキエネルギーが増加し、機械ブレーキの制輪子保 守コストの削減が期待できる。また、変電所総合入力の減 少は、鉄道会社が電力会社から買う契約電力料の削減が期 待できる。

〈6・3〉高速力行車の評価

回生可能エネルギーは従来車と比べて 2399 kWh/h (42%) 増加し、主回路回生エネルギーは 3051 kWh/h (61%) 増加している。表 3 の走行時分を短縮していることから、ブレーキ初速が高くなり、純電気ブレーキ車よりも高速回生能力向上の効果が大きい。

主回路力行エネルギーは従来車と比べて 3469 kWh/h (28%) 増加した。変電所総合入力は437 kWh/h (約4%) 増加した。表3からモデル路線の両端駅間を片道約2分短縮していることに対して、変電所総合入力の増加は約4%となった。

表 5. 饋電特性評価量

	田位 流平市		純電気 ブレーキ車	TOTAL CONTRACTOR	
総加速時間	s	17798	17550	16243	
回生可能エネルギー	kWh/h	5648	6152	8046	
主回路回生エネルギー	kWh/h	4995	6099	8046	
主回路力行エネルギー	kWh/h	12240	12432	15710	
電気的輪周ブレーキ エネルギー	kWh/h	5285	6601	8831	
総列車消費エネルギー	kWh/h	9495	8665	10162	
饋電損失	kWh/h	662	583	431	
変電所総合入力	kWh/h	10157	9248	10594	
回生失効率	%	11.5	0.9	0.0	
主回路回生率	%	40.8	49.1	51.2	
パンタ点電圧実効値	V	1523	1529	1526	

7. まとめ

本論文では、開発したリファレンス SOC カーブに基づく 車載 ESS の充放電制御モデルを使って、純電気ブレーキ車 と高速力行車のシミュレーションを行い、その結果から評価を行った。

ESS 車載の高速回生車の導入効果を、ESS 自体も含めて ライフサイクルコストベースで評価することが課題であ る。また、数値的最適化手法を用いて、SOC カーブの最適 化を行うことが課題である。

対 対

- (1) 安部・遠藤・小室・近藤・佐藤・福田・曽根・高野:「大電流駆動方式による高速回生能力向上の検討及びモデル実験の検証」, 平成 18 年電学全大, No.5·145 pp.213·214 (2006)
- (2) 奥平・鈴木・高木:「SOC カーブに基づいた高速回生車搭載エネルギー蓄積装置の充放電制御」、平成 21 年電学全大、No.5·103 pp.169·170 (2009)
- (3) 高木:「直流續電系と列車群制御の統合インテリジェント」,東京大 学(学位論文) (1995)
- (4) 天野・高木:「エネルギー蓄積装置搭載車を含む直流饋電システムの 饋電特性シミュレーション」、平成 22 年電学全大、No.5-060 pp.100-101 (2010)
- (5) 天野・高木:「エネルギー蓄積装置を車載した純電気ブレーキ方式電気車のシミュレーション」、平成22年電気学会産業応用部門大会、No.3·13、pp175·178 (2010)