

## 車載エネルギー蓄積装置の充放電制御に用いる

## リファレンス SOC カーブの最適化

○ [電] 天野 哲生 [電] 高木 亮 (工学院大学)

## Optimization of Reference SOC Curves for the Charge / Discharge Control of Energy Storage Systems On-board DC Electric Railcars

○ Tetsuo AMANO and Ryo TAKAGI (Kogakuin University)

The authors have proposed the use of pre-calculated reference SOC curves for the charge/discharge control of on-board energy storage systems. The performance of the proposed control can be improved by using the numerically optimized SOC curves. In this paper, the technique to get the numerically optimized SOC curves is presented in detail, together with the results obtained by applying the technique.

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，最適化

**Keywords :** electric railways, pure electric brake, power feeding network for DC electric railways, energy storage systems, simulation, optimization

## 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には，エネルギー蓄積装置(ESS : Energy Storage Systems)を車載した高速回生車の導入が効果的である<sup>1)</sup>。著者らは，車載 ESS の導入効果を最大化するため，SOC カーブに基づく充放電制御を提案してきた<sup>2)</sup>。その効果を評価するため，車載 ESS の充放電制御モデルを組み込んだシミュレータを開発し<sup>3)4)</sup>，評価も行ってきた<sup>5)</sup>。

この制御手法では，与える SOC カーブの良し悪しが制御の良否に直結する。そこで，著者らは，最適な SOC カーブを数値的に求める手法について基礎的な検討を行ってきた<sup>6)</sup>。本研究では，これらの数値的最適化手法を実際に適用し，SOC カーブの求解を試みたので，報告する。

## 2. SOCカーブに基づく充放電制御

## 2.1 SOCカーブの必要性

現状の車載 ESS は，重量と設置スペースの制約から，蓄積容量を大きくとれない。少ない容量で最大限の導入効果が得られるような高度な充放電制御が必要である。そのため，列車が現在位置を ESS の SOC に反映するシステムを持っているべきであると考えられる。そうしたシステムの1つとして，著者らは，SOC カーブに基づく充放電制御を提案してきた<sup>2)</sup>。

## 2.2 SOCカーブの定義

SOC カーブとは，列車が鉄道路線のある位置  $x$  に存在す

るときの ESS の「あるべき SOC 値」を定めたものである。これを関数  $SOC^*(x)$  と表すことにする。SOC カーブは事前に用意し，車上に記憶しておく。列車は，走行時に現在位置を常に把握し，その位置に対応する SOC 値を SOC カーブから求め，充放電制御の目標値として利用する。

## 3. SOCカーブの設計と評価の方法

## 3.1 これまでの設計方針

SOC カーブを設計するには，実際に高速回生車が走行した時の列車の入出力電力を推定する必要がある。著者らは，単一列車走行時のシミュレーションの出力データをもとに，rule-based な方法で SOC カーブを求める方法を検討してきた。以下に，ルールの決め方の一例を説明する。

駅間のランカーブから，SOC カーブを設計する手法の概略を，図1に示す。

図中の2つのパラメータは以下のような意味を持つ：

(1) アシスト閾値 ( $P_{at}$  [W])

列車の力行電力  $P(x)$  が， $P_{at}$  を上回ったとき，車載 ESS は，放電を始める。放電電力は， $P(x) - P_{at}$  である。

(2) 充電閾値 ( $R_{ct}$  [W])

列車の回生電力  $R(x)$  が， $R_{ct}$  を上回ったとき，車載 ESS は，充電を始める。放電電力は， $R(x) - R_{ct}$  である。

これらのパラメータは，列車進行方向ごと，および駅間ごとに独立に定めることができる。これらの値を定めれば，SOC カーブは単一列車走行時のシミュレーションの出力データから自動的に生成される。そこで，試行錯誤を何回か繰り返すことによって，これらパラメータの値を調整し，よい SOC カーブを生成することができる。

この設計手法によって、放電深度(DOD : Depth of Discharge)を小さくとり、車載 ESS の導入効果が高めることができた<sup>6)</sup>。

3.2 SOCカーブの評価方法

SOC カーブに基づく ESS の充放電制御においては、SOC カーブの善し悪しがシステムの導入により得られる効果に大きな影響を及ぼすことは明らかである。従って、何らかの手法によって最適な SOC カーブを求めるには、定量的な評価を行わなければならない。SOC カーブの評価基準としては、以下のようなものがある<sup>7)</sup>。

- (a) 変電所総合入力エネルギーが最小となる
- (b) リファレンス SOC 値と実際の SOC 値の乖離二乗積分値が最小となる

3.3 本論文で用いる数値的最適化手法

動的計画法のような数値的最適化手法を使えば、(a)と(b)を結合して評価関数とすることで、厳密に最適な SOC カーブを直接求めることができる可能性がある。しかし、このような手法では最適化すべき変数の数が非常に多くなるを得ず、場合によっては解を得ること自体が困難となる可能性もある。また、筆者らがすでに開発し、饋電特性シミュレータに実装した詳細モデル<sup>3)4)</sup>を動的計画法においてそのまま利用する方法も必ずしも明らかとはいえない。

そこで、著者らは 3.1 節で述べた方法をベースに最適化を行うことを考えた。この方法は、3.1 節では手動で調整していた、列車進行方向ごと、および駅間ごとのアシスト閾値  $P_{at}$  と充電閾値  $R_{ct}$  を最適化対象の変数とすることで、最適な SOC カーブを求めるものである。

この方法によれば、最適化すべき変数の数を、3.4 節の場合に比べて格段に少なくすることができる。例えば、 $N+1$  箇所の駅がある複線鉄道では、列車進行方向毎に  $N$  回の駅間走行があるから、最適化すべきパラメータの数は路線全体で  $4N$  となる。

本研究では、3.3 節で述べた手法に基づいて、簡単なアルゴリズムを使って、SOC カーブを最適化する。具体的には、最適化プロセスにおける評価値の算出のため、饋電特性シミュレータを用いることとする。このような手法は、最適化プロセスにシミュレーションを embed することから「エンベデッド・シミュレーション」と呼ばれる。

4. 前提条件

4.1 モデル路線

本論文で示すケーススタディに利用した路線は、実在する複線の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。高速回生化前の列車性能を表 1 に示す。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。列車種別はすべて急行で、運行頻度は上下線とも 7.5 分間隔とした。

4.2 最適化の前提条件

3.1 節の rule-based な設計では、単一列車走行時のシミュ

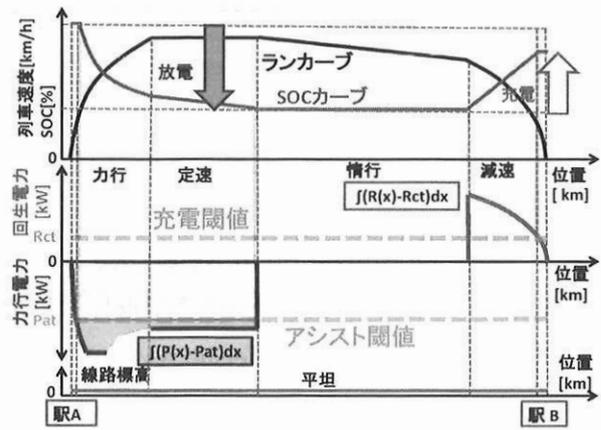


図 1. 駅間走行のための SOC カーブの rule-based な設計

表 1. 従来車と高速回生車の性能

項目	単位	従来車	純電気ブレーキ車	
起動加速度	km/h/s	3.0	3.0	
減速度(常用最大)	km/h/s	4.2	4.2	
力行時	定トルク領域 終端速度	km/h	41.0	41.0
	定電力領域 終端速度	km/h	67.0	67.0
	引張力	tf	26.34	26.93
	最大編成電流	A	2353.0	2405.1
回生時	定トルク領域 終端速度	km/h	66.0	125.4
	定電力領域 終端速度	km/h	77.0	146.3
	引張力	tf	24.79	25.35
	最大編成電流	A	2476.7	4812.0

レーションを行う前に、高速回生車化の設計思想、ESS のパワー容量およびエネルギー容量を決める<sup>6)</sup>。これらが最適化の前提条件となる。本研究では、参考文献 6) の純電気ブレーキ車の設計を、そのまま用いることにする。純電気車の走行性能を、表 1 に合わせて示す。よって、ESS のパワー容量は 3.0 MW、エネルギー容量は 585 MJ とした。

5. 最適化の方法と評価関数

5.1 最適化するパラメータ

4.1 節に述べたモデル路線の急行列車は、列車進行方向毎に 7 個の駅間走行がある。よって、3.3 節に述べたように、最適化すべきパラメータの数は 28 個である。

5.2 滑降シプレックス法の利用

本論文で示す最適化には、滑降シプレックス法<sup>8)</sup>を用いる。これは、 $n$  個の変数を有する多変数関数があるとき、 $n$  次元空間において  $n+1$  個の頂点を有するシプレックスと称する図形を考え、頂点の位置によって定まる変数値に対応する評価量に応じてシプレックスを拡大もしくは縮小する手順を繰り返すことにより、当該多変数関数の最小

値を得る方法である。このアルゴリズムのフローチャートを図2に示す。この方法は、初期値となるシンプレックスと評価関数を決めれば、比較的簡単に最適解を得ることができる。前節に述べたように、定めるべきパラメータは28個あるから、29個の頂点を持つシンプレックスを初期値として与える必要がある。

5.3 評価関数

SOC カーブの評価関数は、リファレンス SOC 値と実際の SOC 値の乖離二乗積分値と変電所総合入力エネルギーの合計に、後述する SOC 周期係数を掛けた値とし、これを最小化する。評価関数を(1)式に示す。

$$E_f = S_C \times \left( \int_{x(t_{start})}^{x(t_{end})} \left| SOC^*(x(t)) - SOC_r(x(t)) \right|^2 dx + S_A E_A \right) \dots (1)$$

ただし、 $t_{start}$  [s] はシミュレーション開始時刻、 $t_{end}$  [s] はシミュレーション終了時刻、 $E_A$  [MJ] は変電所総合入力エネルギーである。また、 $S_A$  は  $E_A$  の重み係数である。乖離二乗積分値と変電所総合入力エネルギーは単位と数値の桁数が異なることから、 $S_A$  によって桁数を調整する。乖離二乗積分が  $E_A$  より、一桁小さくなるように、 $S_A = 10000$  と設定した。

また、(1)式において、 $S_C$  は SOC 周期係数であり、(2)式によって示される：

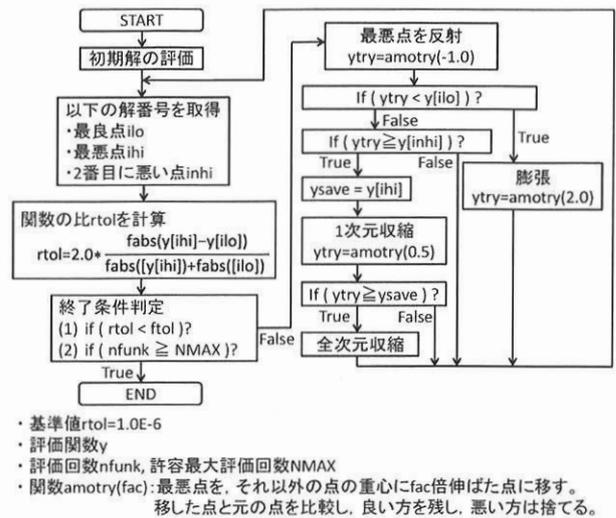
$$S_C = 1.0 + \frac{|SOC^*(x_{departure}) - SOC^*(x_{terminal})|}{SOC^*(x_{departure})} \dots (2)$$

SOC カーブは、4.1 節に述べたモデル路線で、下り列車で始発駅を初期 SOC 値 50.0 % で出発して末端駅まで走行するカーブと、折り返し上り列車で始発駅に戻るカーブを作る。 $S_C$  は、下り列車がその始発駅を出発後、上り列車がその終着駅 (=下り列車の始発駅) に戻ったときリファレンス SOC 値がもとの値である 50.0 % からどの程度乖離しているかを表す。乖離ゼロの場合 1.0、乖離が大きくなると 1.0 より大きい値をとる。(2)式において、 $SOC^*(x_{departure})$  は初期リファレンス SOC 値 (50.0 %),  $SOC^*(x_{terminal})$  は終端リファレンス SOC 値を表す。

5.4 パラメータの制約条件

滑降シンプレックス法に限らず、数値的最適化は一般に局所最適に陥る危険がある。そこで、本研究で対象とする問題に対する解としてまともなものが得られるように、3.1 節に述べた 2 種類のパラメータに制限値を作ることとした。アシスト閾値に対する制限値をアシスト制限値、充電閾値に対する制限値を充電制限値と、それぞれ呼ぶ。

図2のフローチャートで、amotry 関数によって新しい探索点が作られる。この後、以下の操作を加えることとした。  
(a) いずれかのパラメータの値がそれに対応する制限値を上回った場合、その値と当該制限値の差の絶対値を、



- ・基準値  $rtol=1.0E-6$
- ・評価関数  $y$
- ・評価回数  $nfunc$ , 許容最大評価回数  $NMAX$
- ・関数  $amotry(fac)$ : 最悪点を、それ以外の点の重心に  $fac$  倍伸ばした点に移す。移した点と元の点と比較し、良い方を残し、悪い方は捨てる。

図2. 滑降シンプレックス法のフローチャート

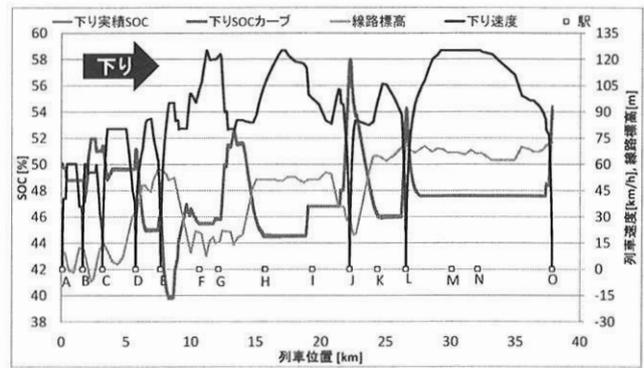


図3. 最適解の下り列車 SOC カーブと SOC 推移

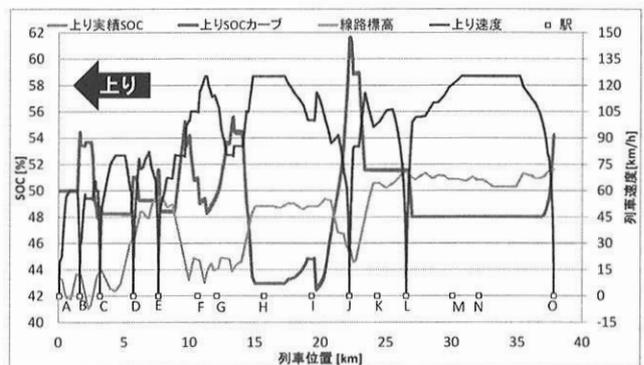


図4. 最適解の上り列車 SOC カーブと SOC 推移

当該制限値から引いた値に変更する。

- (b) いずれかのパラメータが負値をとったとき、その値の絶対値に変更する。
- (c) (a)(b)を繰り返す、両者を共に満たさなくなったとき、新しい探索点とする。

制限値の値は、3.1 節の設計で、手動での調整の際に得られたパラメータの最大値を用いることとし<sup>6)</sup>、アシスト制限値は 4.5 MW、充電制限値は 3.5 MW とした。

5.5 その他の条件

最適化の条件を以下に示す。

- ・最大許容評価回数：10000 回
- ・基準値： $1.0 \times 10^{-6}$

- ・ 初期値：辞書式に並べた数値 (29 セット)

SOC カーブを用いた制御の詳細は、文献[5]に示されるが、最適化を行うときは、乖離補正制御を用いないことにする。

## 6. 最適化の結果と検討

### 6.1 最適化の結果

5 節に述べた方法で最適化を実行した。その結果、評価回数 2781 回で、関数の比が基準値を下回り、最適化が終了した。得られた最適解のうち、下り列車の SOC カーブと SOC 推移を図 3 に、上り列車の SOC カーブと SOC 推移を図 4 に示す。

### 6.2 最適解のふるまいの定性的な検討

図 3 と図 4 より、リファレンス SOC 値と実績 SOC 値の乖離が比較的小さい SOC カーブが得られている。

リファレンス SOC の最大遷移は、上りが 22.2km 地点の J 駅を出発した後の力行アシスト動作による SOC 値減少 ( $\angle 20\%$ ) である。また、下りが J 駅を出発した後の力行アシスト動作による SOC 値減少 ( $\angle 12\%$ ) も大きい。これは、J 駅の標高が低いため、下りも上りも、上り勾配上において 115 km/h まで加速することから、ここでの力行エネルギーが大きいことが原因と考えられる。したがって、J 駅を出発するときに SOC 値が大きくなることから、J 駅到着前に予め SOC 値を高めておくことが望ましい。図 3 より、下りは J 駅に向けて停車のためにブレーキを掛けているときの充電動作による SOC 値上昇で、SOC=58%まで上がっている。同様に、図 4 より、上りにおいても、J 駅に向けて停車のためにブレーキを掛けているときの充電動作による SOC 値上昇で、SOC=62%まで上がっている。これらは、各方向のリファレンス SOC の最大値を決めている。

以上のように、定性的には「よい」解を求解することができていると考えられる。

### 6.3 最適解とそれ以外の解の評価量の比較

最適解の純電気ブレーキ車のシミュレーション結果と、 $SOC^*(x) = 50\%$  一定のカーブを用いた場合の純電気車および従来車のシミュレーション結果から、饋電特性評価量<sup>3)</sup>を比較し、表 2 に示す。ここでは、純電気車のシミュレーションにおいて乖離補正制御を動作させている。

最適解の純電気車は、従来車と比較して、回生可能エネルギーが 407 kWh/h (15.1%) 増加し、主回路回生エネルギーは 694 kWh/h (29.1%) 増加している。これらは、高速回生能力向上の効果である。

また、最適解の純電気車は、 $SOC^*(x) = 50\%$  一定のカーブを用いた場合と比較して、饋電損失が 116 kWh/h (33.8%) 小さく、充放電損失が 27 kW (60%) 大きい。これは、ESS の放電アシスト動作によって、パンタ点入力エネルギーが減少し、一方、充放電エネルギーが増えた結果と考える。饋電損失と充放電損失の合計では、最適解の純電気車の方が 89 kWh/h (23%) 小さい。

変電所総合入力、従来車と比較して 622 kWh/h (8.6%)

減少し、 $SOC^*(x) = 50\%$  一定のカーブを用いた場合と比較しても、100 kWh/h (1.4%) 小さい。

## 7. まとめ

Rule-based な設計におけるパラメータを最適化する設計手法に基づいて、SOC カーブの最適化を試みた。最適解のふるまいを定性的に検討したが、今後さらに解の正当性を確認することが必要である。

表 2. 饋電特性評価量

	単位	従来車	純電気車 (50%一定)	純電気車 (最適解)
総加速時間	s	1672	1658	1652
回生可能エネルギー	kWh/h	2693	3118	3100
主回路回生エネルギー	kWh/h	2385	3093	3079
主回路力行エネルギー	kWh/h	7576	7706	7729
総列車消費エネルギー	kWh/h	6690	6159	6172
饋電損失	kWh/h	334	343	227
充放電損失	kWh/h	—	45	72
変電所総合入力	kWh/h	7024	6502	6402
回生失効率	%	11.4	0.8	0.7
主回路回生率	%	31.5	40.1	40.1
パンタ点電圧実効値	V	1589	1595	1584

## 参考文献

- 1) 安部・遠藤・小室・近藤・佐藤・福田・曾根・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：「直流饋電系と列車群制御の統合インテリジェントシステム化」, 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, pp.175-178 (2010)
- 6) 天野・高木：「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」, 第 17 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2010)講演論文集, pp.233-236
- 7) 天野・高木：「車載エネルギー蓄積装置の充放電制御に用いるリファレンス SOC カーブの最適化の基礎検討」, 平成 23 年電気学会産業応用部門大会, No.3-97, pp.443-444 (2011)
- 8) Press, W. H., et al.: "Numerical Recipes in C", Cambridge University Press (1992)