

直流電気鉄道用地上設置型エネルギー蓄積装置のフィードフォワード制御の検討

～制御系の設計と饋電特性シミュレーションプログラムへの組み込み～

Feed-Forward Control of Trackside Energy Storage Systems for DC Electric Railways

～Control System Design and Implementation of the simulation model～

寺島 光哉(電気システム工学科)

Teruya TERASHIMA

交通・電力・環境システム研究室 指導教員 高木 亮 准教授

1. はじめに

当研究室では、直流饋電システムに地上設置型エネルギー蓄積装置(Energy Storage Systems: ESS)を導入し、余剰回生電力を充電して回生失効を防止するとともに、電圧降下時には放電して電圧降下を抑制する手法について検討を行っている。しかし、ESSの蓄積容量は近年の蓄積素子のめざましい研究開発の進展にもかかわらず十分ではなく、少ない容量で最大限の効果を得るための「賢い」充放電制御の開発が求められている。

そうした制御の1つとして、当研究室では車載ESS向けに充電度(State of Charge: SOC)カーブに基づく充放電制御(フィードフォワード制御)⁽¹⁾を提案するとともに、シミュレーションによる評価や最適化まで行ってきた⁽²⁾。そこで、これと同様の考え方を地上設置型ESSを導入することを提案し、その基礎となるSOCカーブの設計方法を議論してきた⁽³⁾が、定めたSOCカーブに基づく制御方法の提案を行っていない。本研究では、制御方法の検討を行う。

2. SOCカーブによる地上設置ESSの充放電制御

我が国の鉄道において、振り車両の制御手法として開発された手法に、予め走行する路線の曲線位置を車上に記憶しておき、そのデータと列車の現在位置に基づいて制御を行う「フィード・フォワード制御」がある。当研究室の先行研究では、同様の考え方を車載ESSの充放電制御に適用し、予め用意したデータと列車位置によるESSの充放電制御を行う手法について検討している⁽²⁾。

これと同様の手法は、地上設置ESSの制御にも活用できるはずである。一般に路線には複数の地上設置ESSが存在すると考えられるが、各ESSごとに異なるSOCカーブを用意しておけば、当該路線内に1列車のみが存在する場合には各ESSのリファレンスSOC値は文献(2)における車載ESSのそれと同様に定めることができる。さらに、一般に当該路線には複数列車が存在するから、ある瞬間の列車位置に対応した地上設置型ESSのリファレンスSOC値は:

$$T_j = T^* + \sum_{i=1}^n (T_{ij}(x_i) - T^*) \quad (1)$$

となる。ただし T_j [%] は j 番目のESSのリファレンス値、 T^* [%] は当該ESSのSOC基準値、 x_i は i 番目の列車の位置、および $T_{ij}(x_i)$ [%] は i 番目の列車が持つ j 番目のESSについてのSOCカーブデータを与える関数である。

3. SOCカーブの設計

基本的な考え方として、SOCカーブの設計の手順は以下のとおりである。

- (1) 充放電制御の考え方を定める。
- (2) 分担比率を定める。ESSの受け持つ範囲を指定し、各ESSのエリアごとに分割する。隣接したESS間の充放電電力は列車とESS間に流れる電流の距離を按分する。図1に複数のESSが分担割合を行う例を示す。ESSが行う最大の分担比率を100%とし、隣接するESSに近づく程、分担する割合は減少する。

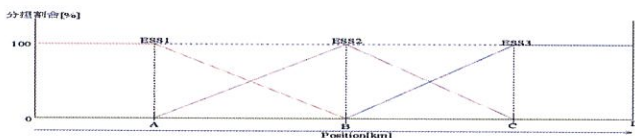


図1 各ESSの分担割合例

- (3) 饋電システム内に1列車のみが存在する場合についてシミュレーションを行い、当該列車のパンタ点入出力電力を求める。
- (4) (1)・(2)・(3)より、各ESSの充放電電力が定まる。
- (5) (4)を積分することで各ESS内の蓄積エネルギー推移が求められ、これからSOCカーブが得られる。

4. 地上ESSの充放電制御モデルへの組み込み

<4.1>フィードフォワード制御の充放電電流の算出

リファレンスSOC関数から充放電電流値を求める。 I_j [A] は j 番目のESSの充放電電流、 P_j [W] は j 番目のESSの充放電電力、 V_{ij} [V] は i 番目の列車が持つ j 番目のESSの列車パンタ点電圧、 E_{qj} [J] は j 番目のESSの蓄積エネルギー、 v_{ij} [km/h] は i 番目の列車が持つ j 番目の列車速度、時間 t [s] として、SOC値を時間微分して1列車における充放電電流値を求める。路線には複数列車が存在するから、ある瞬間における j 番目のESSのリファレンスSOC値の充放電電流値は:

$$I_j(t) = \frac{P_j(t)}{V_j(t)} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{V_{ij}(t)} \times \frac{E_{qj}}{100} \times v_{ij} \times \frac{d}{dx} T_{ij}(x_i) \right\} \quad (2)$$

となる。ただし、 x_i は i 番目の列車の位置、および $T_{ij}(x_i)$ [%] は i 番目の列車が持つ j 番目のESSについてのSOCカーブデータを与える関数である。

<4.2>乖離補正制御

(1)式で求めたリファレンスSOC値に実測SOC値が追従するように充放電動作を行う。リファレンスSOCと現在SOCに乖離が生じた時に、充放電を行って目標値に引き戻す乖離補正制御を図2に示す。実測SOCがリファレンスSOCより大きい時は放電を行い、小さい時は充電を行う。

<4.3>ESSに与える充放電電力

充放電電力は(1)式で求めたリファレンスSOC値を、列車の位置毎に必要な充放電電力の情報をESSが受け取り、充放電を行う。ESSのSOC値に上下限を設けることによってESSの過充電と過放電を防止する。乖離が生じた場合は<4.2>の制御を用いて乖離補正を行う。

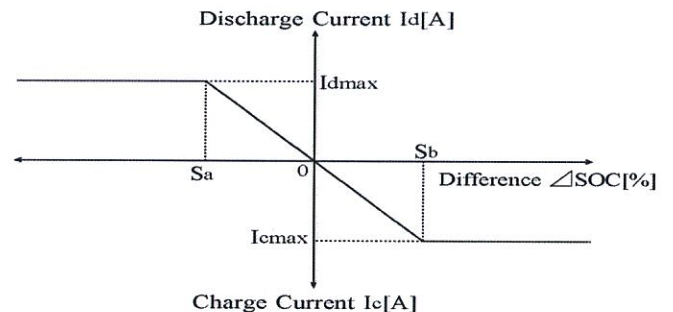


図2. 乖離補正制御

5. まとめ

以上のようにすることで、地上ESSにおいてもフィードフォワード制御を行うことができる。この制御方法を用いて、ESSを実線路に導入し評価を行う必要がある。

文献

- (1)天野哲生・高木亮:「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年電気学全大, No.5, p.p.100-101 (2010)
- (2)天野哲生・高木亮:「車載エネルギー蓄積装置の充放電制御に用いるRef_SOCカーブの最適化」,第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-Rail 2011), S3-3-4 (2011)
- (3)山下智大・長島匡太郎・高木亮:「SOCカーブに基づいた地上設置型エネルギー蓄積装置の充放電制御」平成23年電気学会全国大会, 5-089 (2011)
- (4)高木亮:「直流饋電系と列車群制御の統合インテリジェント化」,東京大学学位論文(1995)