

# 直流電気鉄道用地上設置型エネルギー蓄積装置のファジィ充放電制御の検討

～フィードフォワード制御～

Fuzzy Charge/Discharge Control of Trackside Energy Storage System for DC Electric Railways

~Fuzzy Feed-Forward Control~

大槻 紘平 (電気システム工学科)

Kohei OTSUKI

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

我々の研究グループでは、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 System : 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共に、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きた。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、少ない容量のESS設置で最大限の効果を得るため「賢い」充放電制御の開発が求められている。そうした充放電制御の1つとして我々の研究グループでは昨年、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)<sup>(1)</sup>を提案した。しかし、提案されたスキームではSOCカーブデータの保守が困難なうえ、複数列車・複数変電所が存在する直流饋電回路においては制御の精度も不十分と考えられる。

そこで、ファジィ制御の考え方を導入し、よりよい充放電制御を行う可能性があるか、検討を行った。本研究では、昨年検討された「フィードフォワード制御」をファジィ化した「ファジィフィードフォワード制御」について議論した。

## 2. フィードフォワード充放電制御

道路上を走る自動車と異なり、鉄道線路上を走行する列車は走行路についての情報を事前に精密に知ることが可能である。また、通常その走行パターンは標準ランカーブから大きく外れることはない。従って、ESSの充電度や充放電電力は列車の位置により望ましい値がおおむね定まると考えられる。この考えのもと、列車の位置に対してESSの充電度や充放電電力を予めデータとして与えておき、それに基づき充放電制御を行う「フィードフォワード充放電制御」を、我々の研究グループでは提案している。

車載ESSのフィードフォワード充放電制御の場合<sup>(2)</sup>、列車位置に対し当該列車に車載されるESSのSOCがフィードフォワードデータ(以下「SOCカーブ」と称する)どおりになるよう制御を行う。一方、地上設置ESSの場合<sup>(1)</sup>、路線上に存在する複数列車及び複数ESSが関係することになるので、まず1列車のみ存在する場合について各ESSごとに当該列車の位置に対するSOCカーブを用意する。複数列車が存在する場合、各列車の位置に対してこれらSOCカーブから求めたリファレンスSOC値の線形和が「望ましいSOC推移」と考えられるので、それを制御に用いることが提案されている。

なお、車載ESSの場合、もしくは地上設置ESSで1列車しか存在しない場合、列車位置 $x$ に対し当該ESSのSOCカーブ関数 $SOC^*(x)$ が与えられているとすれば、当該ESSの充放電電力は次式で与えられる:

$$P_{CD}(x) = C_{ESS} \cdot \frac{dSOC^*(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

ただし $P_{CD}(x)$ は列車位置 $x$  [m]のときの充放電電力 [W]、 $C_{ESS}$ はESSのエネルギー容量 [J]、 $t$ は時間 [s]である。

## 3. フィードフォワードデータ関数のファジィ化

2章で述べたフィードフォワード充放電制御をファジィ化する方法としてはいろいろなものが考えられるが、まずSOCカーブ関数 $SOC^*(x)$ および(1)式で与えられる充放電パワー関数 $P_{CD}(x)$ の値をファジィ化することを考えてみる。

非ファジィフィードフォワード充放電制御においては、これらの関数は定義域・値域とも実数(またはその部分集合)であるが、ファジィフィードフォワード充放電制御においてはこれらの値域のみがファジィな変数群となるものとしてみる。それらの集合を、例えば:

$$V = \{ \dots, N4, N3, N2, N1, ZR, P1, P2, P3, P4, \dots \} \dots\dots\dots(2)$$

と記述する。ここで、充放電電力についてはZRはゼロ、N1, N2, N3, …は充電電力、P1, P2, P3, …は放電電力を表し、Pn, Nnとも整数nが大きいほど電力の絶対値が大きいことを表すものとする。また、SOCカーブについてはZRは50%などの「中くらいの値」を表し、N1, N2, …はZRより低めの値、P1, P2, …はZRより高めの値をそれぞれ表し、Pn, Nnとも整数nが大きいほどZRからの乖離が大きいことを表すものとする。このような値域を持つファジィなSOCカーブ、および充放電パワー関数を、フィードフォワードデータとして事前に与える。非ファジィフィードフォワード制御のときと異なりふたつのデータを与えるのは、非ファジィの場合と異なりファジィ制御の場合はSOCカーブから充放電パワー関数を簡単に計算できないと考えられるからである。

このような関数を用いれば、ファジィフィードフォワード制御についても容易に非ファジィ制御の場合と同様の特性を与えることが可能になる。

なお、複数列車が存在する場合、非ファジィ制御において行っていた線形和によるリファレンス生成についても、例えば $P3 + P1 = P4$ といったルールでファジィ変数同士の加算を集合 $V$ の上で定義すればよく、容易に対処が可能である。

## 4. おわりに

昨年のSOCカーブに基づくフィードフォワード充放電制御で行われた手法を本研究ではフィードフォワードデータ関数をファジィ化することで、よりよい制御を行える可能性を示せた。

文献

- (1) 寺島光哉:「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～」工学院大学卒業論文(2012)
- (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) 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)