

直流電気鉄道用地上設置型蓄電装置のファジィフィードフォワード充放電制御

～理論～

Fuzzy Feed-forward Charge/Discharge Control of Stationary Energy Storage Systems for DC Electric Railways:

The Theory

菊地 拓哉 (電気システム工学科)

Takuya KIKUCHI

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、直流饋電システム向け地上設置型蓄電装置(Energy Storage System : ESS)のための「賢い」充放電制御の1つとして充電度(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⁾を提案した。しかし、文献(1)で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であるという課題が挙げられる。そこで、我々はファジィ制御の考え方を導入することでこの問題の改善を図る研究を進めている⁽²⁾。本研究では、提案する「ファジィフィードフォワード制御」の詳細についての検討を行ったので報告する。

2. フィードフォワード充放電制御

鉄道線路上を走行する列車は事前に走行路や走行パターンなどが明らかなことから、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のがフィードフォワード充放電制御⁽³⁾である。

地上設置ESSの場合⁽⁴⁾、まず饋電システム内に1列車のみが存在する場合についてESSごとに当該列車の位置に対するSOCカーブを用意する。当該列車の位置 x に対しESS No. i のSOCカーブ関数 $SOC_i^*(x)$ が与えられているとすれば、当該ESSの充放電電力は(1)式で与えられる:

$$P_{CDi}(x) = C_{ESSi} \cdot \frac{dSOC_i^*(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \dots\dots\dots(1)$$

ただし $P_{CDi}(x)$ は列車位置 x [m] のときのESS No. i の充放電電力 [W], C_{ESSi} はESS No. i のエネルギー容量 [J], t は時間 [s] である。

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。

しかし、この手法では列車の種類数と路線上のESS設置箇所数の積で決まる数のパターンごとに数多くのデータを作成・保守せねばならないという課題が挙げられている。

3. ファジィフィードフォワード充放電制御の提案

本研究では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、SOCカーブ関数 $SOC_i^*(x)$ および(1)式で与えられる充放電パワー関数 $P_{CDi}(x)$ の値をファジィ化することを提案する。

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、

$$P_{CDi}(x) \in P \equiv \{\dots, P_{N2}, P_{N1}, P_{ZR}, P_{P1}, P_{P2}, \dots\} \dots\dots\dots(2)$$

$$SOC_i^*(x) \in S \equiv \{\dots, S_{N2}, S_{N1}, S_{ZR}, S_{P1}, S_{P2}, \dots\} \dots\dots\dots(3)$$

とする。ここで、充放電電力について、 P_{ZR} はゼロ、 P_{Nn} は充電電力、 P_{Pn} は放電電力を表し、 P_{Pn}, P_{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。SOC値についても同様に、 S_{ZR} は50%などの「中くらいの値」を表し、 S_{Nn} は S_{ZR} より低めの値、 S_{Pn} は S_{ZR} より高めの値をそれぞれ表し、 S_{Pn}, S_{Nn} とも整数 n が大きいほど S_{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カーブ関数 $SOC_i^*(x)$ および充放電パワー関数 $P_{CDi}(x)$ を、フィードフォワードデータとして事前に与える。

文献(2)のフィードフォワード制御モデルは、広く用いられているESSのI-V特性制御⁽⁴⁾において、浮動充放電の目標SOC値を固定値ではなく $SOC_i^*(x)$ として動的に与えられる値に変更するとともに、I-V特性により定まる充放電電力に加えて(1)式で定まるフィードフォワード充放電電力を加えた値をESSの充放電電力とするよう変更するものである。本研究で提案するファジィフィードフォワード制御は、目標SOC値をファジィ化された $SOC_i^*(x)$ 関数により定まる値とするとともに、フィードフォワード充放電電力は(1)式のような計算によるのではなくSOCカーブとは別にデータとして与えたファジィ化された $P_{CDi}(x)$ 関数により定まる値とすればよい。

なお、複数列車が存在する場合に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は、ファジィ変数同士の加算を集合 P および S の上で定義することにより容易に再現可能である。

4. おわりに

本研究では、一昨年のSOCカーブに基づくフィードフォワード充放電制御をファジィ化し、フィードフォワード充放電制御と同様な特性を持つファジィフィードフォワード充放電制御を提案することができた。

この理論を基に、饋電特性シミュレーションプログラムへ実装し定量的評価を行うことが課題である。

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込み～」工学院大学卒業論文(2012)
- (2) 大槻紘平:「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制御の検討～フィードフォワード制御～」工学院大学卒業論文(2013)
- (3) 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)
- (4) 遠藤正樹:「地上設置のエネルギー蓄積装置の導入による直流饋電システムの電圧平準化～エネルギー蓄積装置を分散設置した場合～」工学院大学卒業論文(2008)
- (5) 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)