

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14725

研究課題名（和文）分散型地上蓄電システムによる直流電気鉄道の省エネルギー化に関する研究

研究課題名（英文）Research on Distributed Wayside Energy Storage System for Energy Saving in DC electric Railway

研究代表者

小林 宏泰（Kobayashi, Hiroyasu）

千葉大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：30844063

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、蓄電システムによる直流電気鉄道システムの高エネルギー効率化を目的として、分散型地上蓄電システムを提案すると共に、その電力制御法を新たに提案した。具体的には、まず地上蓄電システムの充放電制御系設計法の確立を行うことで、制御系の安定性と省エネルギー効果のトレードオフを考慮した充放電制御ゲイン設計を可能にした。加えて、車両の速度や位置といった情報を積極的に用いることで、時々刻々変化するき電回路に合った可変電圧源動作を実現し、充放電電力の向上や効果範囲の拡大が可能な手法を提案した。また、提案手法を分散型地上蓄電システムに適用することで、省エネルギー効果向上が可能であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、鉄道システムの省エネルギー性の源泉である回生エネルギーの有効活用を促進する点で、輸送部門のカーボンニュートラルへの貢献度を高めることが可能である点で社会的意義を有する。これまで主に検討されてきた集中型地上蓄電システムは、大容量の蓄電装置を回生パワー利用率が低い箇所にピンポイントで設置することが前提であった。一方、車上蓄電システムによる広範囲での回生パワー有効利用も提案されているが、車両に蓄電装置を搭載するスペースは限られる等の懸念がある。それに対し、本研究では上記の従来システムの利点を併せ持つ革新的な分散型地上蓄電システムに着目し、その電力制御法を提案している点で学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose a distributed wayside energy storage system (WESS) with the aim of achieving high energy efficiency in a DC-electrified railway system. We also propose a novel power control method for the system. Specifically, we first establish a design method for the charge/discharge control system of the WESS, enabling the design of charge/discharge control gains considering the trade-off relationship between control system stability and energy saving effect. Furthermore, by actively utilizing information such as the speed and position of the vehicles, we propose a method that enables variable voltage source operation adapted to the constantly changing feeder circuit, thereby improving the charging and discharging power and expanding the effective range of WESS. Furthermore, we verified the potential for improved energy efficiency by applying the proposed method to a distributed WESS.

研究分野：パワーエレクトロニクス，電気機器

キーワード：直流電気鉄道 省エネルギー 蓄電装置 地上蓄電システム 回生エネルギー 安定性解析

1. 研究開始当初の背景

直流電気鉄道では、車両駆動用モータによる「回生ブレーキ」が用いられる。回生ブレーキによって発生する回生パワーを有効利用することで、直流電気鉄道は高エネルギー効率を実現している。しかし、直流電気鉄道は上位の交流系統とダイオード整流器を介して接続され、系統側へ電力を逆流させることができないため、前述の回生パワーは加速中の列車によってのみ消費される。すなわち、回生パワー有効利用の成否には、列車同士の加減速タイミングという不確定要素が存在し、現状では全ての回生パワーは有効活用されていない^[1]。

2. 研究の目的

本研究では、蓄電システムによる直流電気鉄道システムの高エネルギー効率化を目的とし、分散型地上蓄電システムを提案し、その協調制御法およびシステム設計法の確立を目指す。直流電気鉄道システムでは、システム内の電圧変動が非常に大きく、絶縁等の観点から決まるシステム内の電圧の適正範囲の制約から、流せる電流が制限されるという課題を抱える。このため、回生電力が制限され、エネルギー効率の低下を招く。そこで本研究では、蓄電装置を複数に分散して設置することで、1箇所に設置した場合よりも広範囲にわたって回生パワー吸収・加速アシスト効果が得られる分散型蓄電システムを提案する。

3. 研究の方法

具体的に、本研究では下記2点に関して検討を行った。

- ①地上蓄電システムの充放電制御系設計法の確立
- ②き電回路計算に基づく地上蓄電システムの電力制御法の提案

①では、まず単体の地上蓄電システムの充放電制御系設計法の確立を実施した。ここで提案する設計法は、制御系の安定性と省エネルギー効果のトレードオフを考慮し、最適な充放電制御ゲインを決定することが可能となる。また、地上蓄電システムの充放電制御において、その効果範囲を拡大することは大きなインパクトがある。従来の制御法では、理想的な定電圧源としての動作を志向した架線と地上蓄電システムの接続点電圧のみを指標にして充放電制御を行う方法である。しかし、この従来手法では、定電圧源動作に基づいているが故に、充放電電力や充放電可能な物理的距離に制約があった。そこで②では、地上蓄電システム地上一車両間の相互通信を利用し、車両の速度や位置といった情報を積極的に用いることで、時々刻々変化するき電回路に合った可変電圧源動作を実現し、充放電電力の向上や効果範囲の拡大が可能な手法について検討を実施し、本研究で提案する分散型地上蓄電システムにも適用可能であることを明らかにした。

4. 研究成果

上記①および②に関して、本研究で得られた成果をまとめる。

(1) 地上蓄電システムの充放電制御系設計法の確立

図1に示す一般的な地上蓄電システムの充放電制御系ゲイン K_{ref} に関して、安定性と省エネルギー効果のトレードオフがあることが知られている。しかし、このトレードオフ関係を陽に考慮した解析的な設計法はこれまで明らかにされておらず、試行錯誤的に保守的な値に設定しているのが現状である。そこで、本研究では、変電所・車両・地上蓄電システムから構成される対象システムについて、蓄電システムの充電・放電それぞれのケースについて解析モデルを導出して安定性解析を行うことで、安定性を損ねない範囲で最大の充放電制御ゲインの設計が可能となった。提案手法の妥当性は、ミニモデル実験によって検証を行い、設計したゲインを適用した場合でも、不安定になることなく充放電が可能であることを確認した。また、実スケールのき電シミュレーションを実施し、提案決定法による省エネルギー効果を検証した。この決定手法により、充放電制御ゲインの決定手順の簡略化につながるとともに、安定な条件で省エネルギー効果が高い充放電制御が可能となるだけでなく、本研究で提案する分散型地上蓄電システムの協調制御法を検討するうえで、安定性を陽に考慮することが可能となることが期待される。提案する設計法によって、制御系の安定性と省エネルギー効果のトレードオフを考慮し、最適な充放電制御ゲインを決定することが可能となった。

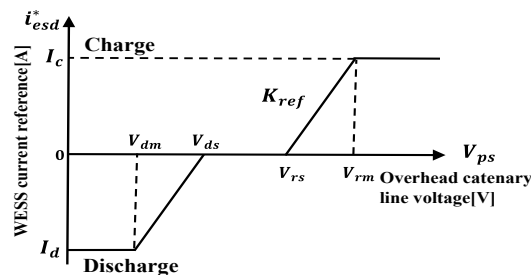


図 1. 一般的な地上蓄電システムの充放電制御パターン^[2]

(2) き電回路計算に基づく地上蓄電システムの電力制御法の提案

図 2 および図 3 に示すようなき電回路モデルおよび蓄電システム電圧制御系を想定し、最大の回生パワー回収効果が得られるような電圧指令値 v_e^* の決定方法を提案した。提案した決定方法を図 4 に示す。Step.1 は Area ごとの指令値の決定である。図 3 の回路モデルの対称性を考慮すると、図 5 に示す回路モデルが連結している状態と考えることができるため、Area-1 と Area-2 に分けられる。各 Area(Area-X)での指令値の決定は変電所の導通状態によって図 5 の (a), (b) のような 2 つの回路パターンに分類される。指令値の導出過程は図 5(a)を例に示す。この時、(1)式のような v_{tss} , v_{ttr} , v_{te} に関する節点電圧方程式を立てることができる。

$$\begin{bmatrix} y_{ss} + y_1 & -y_1 & 0 \\ -y_1 & y_1 + y_2 & -y_2 \\ 0 & -y_2 & y_e + y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{tss} \\ v_{ttr} \\ v_{te} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ss}y_{ss} \\ -i_{tr} \\ v_e^*y_e \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式を解くと、 v_e^* の指令値の(2)式、(3)式が得られる。

$$v_e^* = (1 + k_1)v_{ttr} - k_2i_{tr} + k_1V_{ss} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{y_1y_s(y_2 + y_e)}{y_2y_e(y_1 + y_s)} \\ k_2 = \frac{y_2 + y_e}{y_2y_e} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

(b)についても同様の手順で節点電圧方程式を計算すると各 Area の指令値 v_{eX}^* を示す(4)式が得られる。

$$v_{eX}^* = \begin{cases} (1 + k_1)v_{ttrX} - k_2i_{trX} + k_1V_{ss} \dots (a) \\ v_{ttr} + k_2i_{trX} \dots (b) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

また、 v_{ttrX} には、列車電圧変動抑制の観点から変電所無負荷出力電圧を(4)式に代入し、指令値を決定する。Step.2 は、各 Area の指令値の合成である。(5)式のように両 Area の指令値の平均を最終的な指令値 v_e^* とする。

$$v_e^* = 0.5(v_{e1}^* + v_{e2}^*) \dots\dots\dots (5)$$

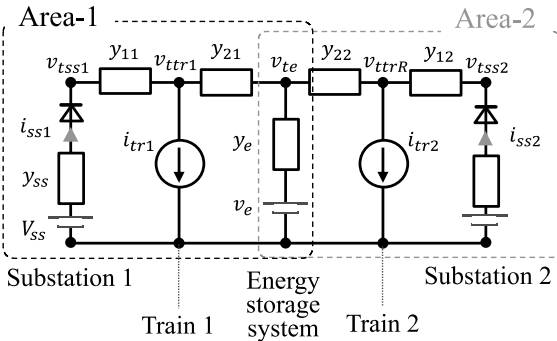


図 2. き電回路モデル^[3]

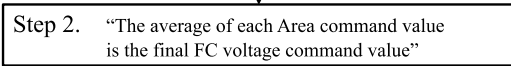
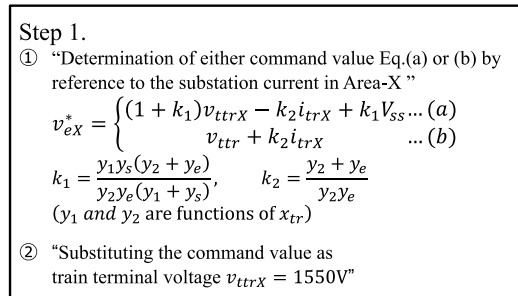


図 4. 蓄電システム FC 電圧指令値決定までの流れ^[3]

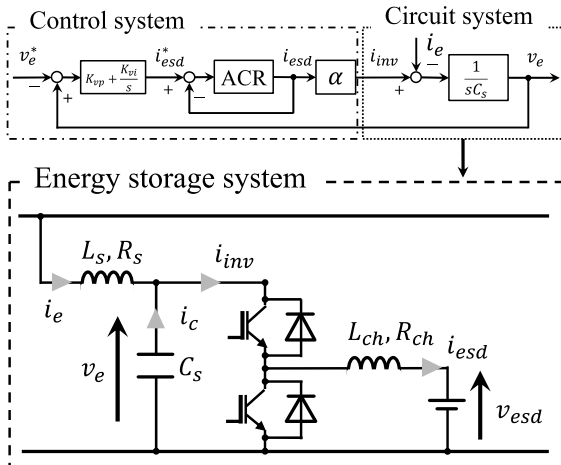


図 3. 電圧制御系の構成^[3]

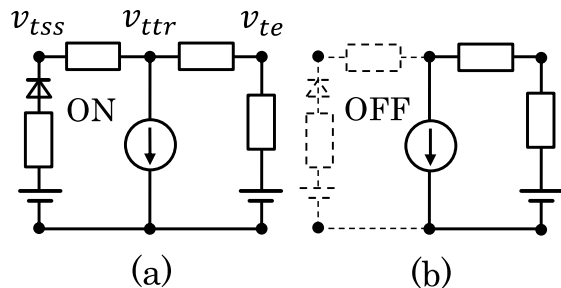


図 5. 各変電所状態における回路モデル^[3]

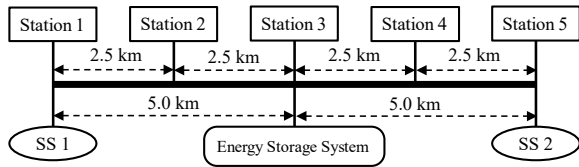


図 6. シミュレーションで検討する路線^[3]

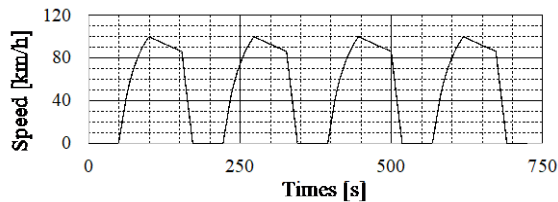


図 7. 列車ランカーブ^[3]

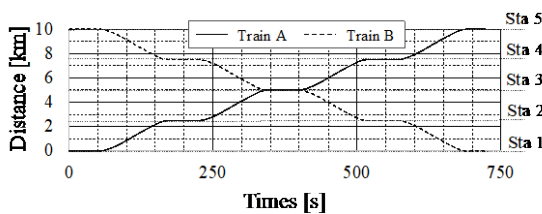


図 8. 列車ダイヤ^[3]

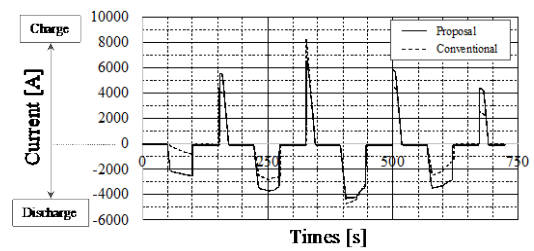
上記制御法の消費エネルギー削減効果を検証するため、図 6 に示すような路線を想定し、数値シミュレーションを実施した。図 6 で示した路線において Station 1 を始点とし、Station 5 を終点とする列車 A と Station 5 を始点とし、Station 1 を終点とする列車 B を想定する。シミュレーションでの列車 A および B のランカーブおよびダイヤは図 7 および図 8 に示す通りである。

図 9(a) に蓄電システムの充放電電流、図 9(b) および図 9(c) にモータ電力および列車の FC 電の時間波形を示す。また、表 1 には変電所総出力エネルギー、列車総回生エネルギー、蓄電システム充放電エネルギーを示す。提案制御法では従来制御法より、変電所総出力エネルギーを約 1.68% 低減、列車の回生エネルギーを約 15.75% 増加させることができた。特に充電アシストについて、図 9(b) および図 9(c) より 650-700s 間では列車の FC 電圧上昇の抑制によって、回生絞り込み制御による回生エネルギーのロス低減しており、最大約 1.7 倍の回生電力増加を確認できる。図 9(a) および図 9(b) より、提案制御法は従来制御法と比較して、遠方の列車に対しては高い充放電アシスト効果を得ることができる。

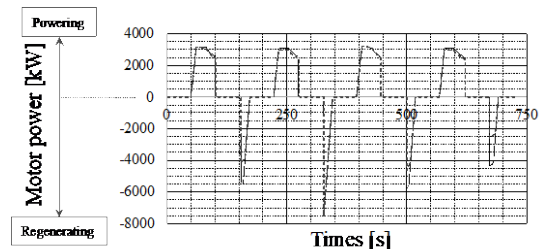
また、上記提案手法を分散型地上蓄電システムに適用することで、分散設置した蓄電システム間の不要な充放電を引き起こすことなく、省エネルギー効果向上が可能であることも明らかにした。

<引用文献>

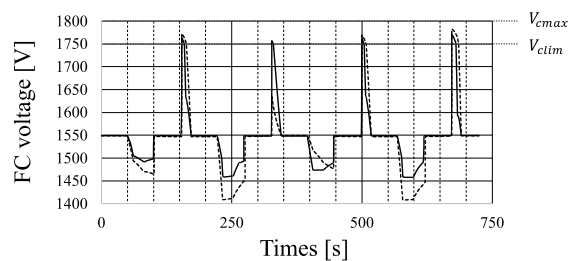
- [1] 林屋・宮武：「鉄道におけるエネルギーマネジメント」, 電気学会誌, Vol.133, No.12 pp.817-820 (2013).
- [2] K. Sato, K. Kondo, **H. Kobayashi** and M. Chida, "A Method to Design Power Control System of Wayside Energy Storage System for Energy Saving in DC-electrified Railway," 2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'22 ECCE Europe), 2022, pp. 1-10.
- [3] 一ノ瀬雄介, **小林宏泰**, 早乙女英夫, 宮城大輔, 「直流電気鉄道システムの省エネルギー化を目的としたき電回路計算に基づく地上蓄電システムの電力制御法」, R4 電気学会産業応用部門大会, pp. V-113-116, 2022 年 8 月



(a) Charge/discharge current of energy storage system



(b) Train motor power



(c) Train filter-capacitor voltage

図 9. シミュレーションによる結果の波形^[3]

表 1. シミュレーション結果^[3]

System	Quantity	Conventional	Proposal
Substation	Total output energy [kWh]	284.67	279.88
Energy storage system	Charging energy [kWh]	199.99	292.32
	Discharging energy [kWh]	96.11	106.70
Train	Total Regenerative energy [kWh]	103.38	119.66

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kota Sato, Hiroyasu Kobayashi, Keiichiro Kondo and Makoto Chida
2. 発表標題 A Method to Design Power Control System of Wayside Energy Storage System for Energy Saving in DC-electrified Railway
3. 学会等名 24th European Conference on Power Electronics and Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 佐藤滉太, 近藤敬一郎, 小林宏泰, 明石大輔, 千田誠
2. 発表標題 直流電気鉄道の地上蓄電システムにおける充放電制御系のゲイン決定法
3. 学会等名 【D】産業応用部門 交通・電気鉄道 / 【E】センサ・マイクロマシン部門 マイクロマシン・センサシステム合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 一ノ瀬雄介, 小林宏泰, 早乙女英夫, 宮城大輔
2. 発表標題 直流電気鉄道システムの省エネルギー化を目的としたき電回路計算に基づく地上蓄電システムの電力制御法
3. 学会等名 R4電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------