

電力貯蔵装置の効果的な制御手法の開発

電力技術研究部 き電研究室
副主任研究員 小西 武史

1 はじめに

近年、電圧降下対策あるいは回生電力の有効利用を目的とした電力貯蔵装置が、直流電気鉄道の地上設備として適用され始めている。しかしながら、電力貯蔵装置の制御手法については、充電および放電の開始電圧（充放電電圧）を固定した制御手法がほとんどであり、電圧降下対策と回生電力の有効利用を両立させて機能させることは容易ではない。

そこで、電力貯蔵媒体の充電状態に応じて充放電させることで、電力貯蔵装置の多機能化を図ることが可能な制御手法を開発し、妥当性をシミュレーションならびに実機を用いた検証試験によって評価した。

2 電力貯蔵装置の制御手法の検討

本研究における電力貯蔵装置は、貯蔵媒体として電気二重層キャパシタ（以下 EDLC と略す）、充放電制御として双方向チョップで構成されるものとして、以下検討を進めた。なお、EDLC の代わりに二次電池等の他の貯蔵媒体を適用した場合においても、上記に示した制御を採用することは基本的に可能である。

(1) 固定電圧制御

従来から適用されている電力貯蔵装置の「固定電圧制御」の概念を図 1 に示す。電力貯蔵装置は外線電圧を検出して充放電動作を判断する。外線電圧が「充電開始電圧」を上回ると、電力貯蔵装置の近傍において電車回生が発生したと判断して充電動作を行う（固定電圧充電）。逆に、外線電圧が「放電開始電圧」を下回ると、電力貯蔵装置の近傍において電車力行が発生したと判断して放電動作を行う（固定電圧放電）。この制御方式では、電力貯蔵装置が満充電状態に近い状態ではそれ以上の充電はできないこと、あるいは逆に空充電状態では放電できないことが生じる可能性がある。

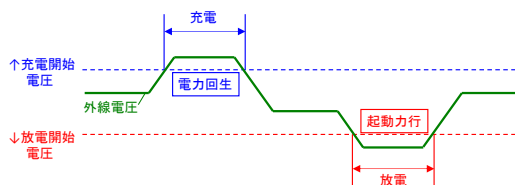


図 1 固定電圧制御の概念

(2) 可変電圧制御

待機時の充電状態を安定に制御することが、電力貯蔵装置の適用効果をも高める上で重要である。そこで、まず図 2 に示す「可変電圧制御」について検討した。貯蔵媒体の充電状態に応じて、充電開始電圧 (V_{pU}) ならびに放電開始電圧 (V_{pD}) を変化させることにより、充電状態 (E) を中間付近 (E_{S_M}) に安定させることができれば、常に充電、放電の対応が

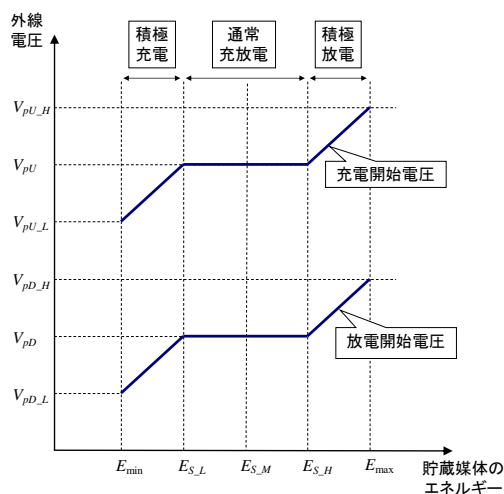


図 2 可変電圧制御の概念

可能になる。以下に図 2 の詳細を示す。

(a) 充電状態が高い状態 ($E_{S,H}$)から低い状態 ($E_{S,L}$)の間の場合は、通常の開始電圧とする。

(b) 充電状態が最大 (E_{max})から $E_{S,H}$ にかけては、積極的に放電を行うことにより、エネルギー状態が中間付近 ($E_{S,M}$)になるように制御する。すなわち、充電開始電圧と放電開始電圧を一時的にともに上げ ($V_{pU} \rightarrow V_{pU,H}$, $V_{pD} \rightarrow V_{pD,H}$), 充電の機会を少なくし放電の機会を多くすることで、積極放電を可能にする。

(c) 充電状態が $E_{S,L}$ から最小(E_{min})にかけては、積極的に充電を行うことにより、充電状態を $E_{S,M}$ 近くまで上昇させる。つまり、充電開始電圧と放電開始電圧を一時的にともに下げ ($V_{pU} \rightarrow V_{pU,L}$, $V_{pD} \rightarrow V_{pD,L}$), 充電の機会を多くし放電の機会を少なくすることで、積極充電を可能にする。

(3) 補充電・補放電制御

前(2)項と同様に、貯蔵媒体の充電状態に応じた充放電制御を行う目的で、図 3 に示す「補充電・補放電制御」を検討した。以下、その具体的内容を述べる。外線電圧が充電開始電圧以下で放電開始電圧以上の場合 (図 3 の例では 1,300 V ~ 1,650 V), 電車と電力をやりとりする必要性が少ない。その際、貯蔵媒体を設定した中間充電状態になるように「補充電」「補放電」を行う。貯蔵媒体の充電状態が中間よりも高いほど放電電流を大きくし、低いほど充電電流を大きくすることにより、早期に中間充電状態に近づけるとともに、中間充電状態に近づいた時の貯蔵媒体の内部抵抗の影響を抑える。外線電圧が充電開始電圧以上もしくは放電開始電圧以下となり、力行もしくは回生する電車が付近に存在することが外線電圧から明確に確認される場合 (図 3 の例では 1,300 V 以下もしくは 1,650 V 以上), 従来通り固定電圧制御を行う。

なお、補充電・補放電制御方式を適用すれば貯蔵媒体の最大充電エネルギーを定格より大きく設定することができる。電車の回生電力の充電に伴い定格を上回る充電状態に達しても、補放電の機能によって中間充電状態になるように制御される。つまり定格を上回る充電状態が短時間に限定されるため、上記の設定が可能になる。

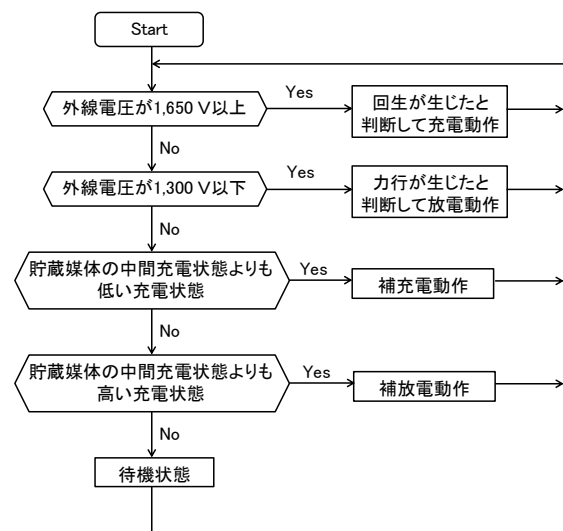


図 3 補充電・補放電制御の概念

3 シミュレーションによる検証

固定電圧制御と可変電圧制御の充放電特性の相違を、過渡解析シミュレーションにより検証した。一例として直流 750 V の線区データをもとにシミュレーションを実施した。

シミュレーションの対象モデルを図 4 に示す。そのモデルに適用したのは 1 変電所の 11 回線 ~ 14 回線 (11F ~ 14F) の各回線電流データである。直流変電所の各回線に電流源を設けた。電力貯蔵装置を適用しない場合の各回線の電流特性を、各電流源が出力するように指令した。また、電車の移動を模擬するため、可変抵抗を列車ダイヤにあわせて変動させた。さらに、電力貯蔵装置を 13 回線 (13F) に適用した。

固定電圧制御と可変電圧制御を適用した場合の電力貯蔵媒体の充放電特性を図 5 に示す。

固定電圧制御適用時では、充電の機会が放電を上回ることによって充電状態が高くなり、120 秒後には満充電状態に至った。その後は放電の機会がなく、装置の適用効果が得られなくなった。

一方、可変制御適用時の充電状態は、40～80%前後で安定して推移し、充放電の継続が可能であった。また、外線電圧の上下変動に伴い充放電動作が行われた。

図 5 に示した電力貯蔵装置の充放電によって有効活用された回生エネルギーは、固定電圧制御が 3.78 kWh であるのに対し、可変電圧制御では 4.05 kWh に向上した。

以上により、可変電圧制御手法の適用により、充電と放電のバランスを得ることが可能になり、有効活用可能な回生エネルギーが増加することをシミュレーションで確認した。

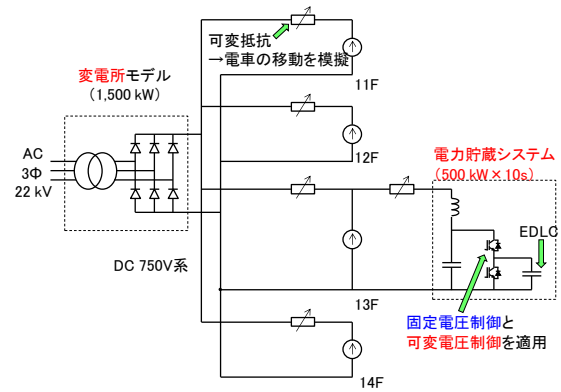
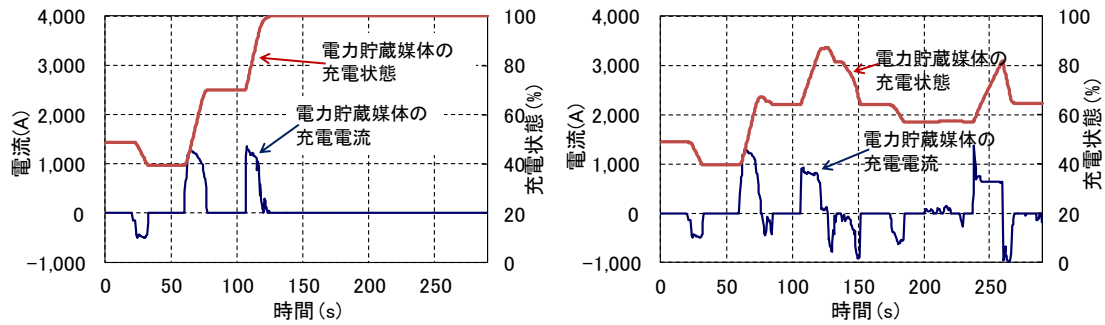


図 4 シミュレーションの対象モデル



(a) 固定電圧制御

(b) 可変電圧制御

図 5 固定電圧制御と可変電圧制御のシミュレーション結果の比較

4 実機による検証

実機による試験では、固定電圧制御と、補充電・補放電制御を評価した。直流 1500V 対応の電力貯蔵装置と整流器（直流変電所）、2両編成の電車、複合負荷模擬装置、試験線を用いて検証試験を実施した。試験回路を図 6 に示す。

電力貯蔵装置は、最大 500 kW で 10 秒間の連続充電または放電が可能な容量を有する。

複合負荷模擬装置はリチウムイオンキャパシタを電力貯蔵媒体とし、双方向チョップで充放電制御するものである。リチウムイオンキャパシタが充電することで電車の力行を、逆に放電することでその電力回生を模擬する。試験においては、電車が力行を開始するのに合わせて、複合負

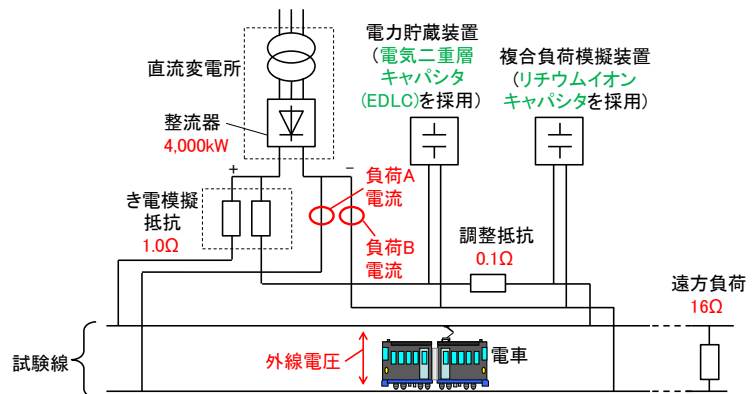


図 6 実機を用いた試験回路

荷模擬装置が最大 250 A で力行模擬するように指令した。

図 7 は電力貯蔵装置を固定電圧制御ならびに補充電・補放電制御によって動作させたときの特性 (10 分間) である。

固定電圧制御適用時では、複合負荷模擬装置の回生と電車の力行が重なるため、電車力行時の電圧降下が小さい。そのため電力貯蔵装置の放電深度と充電深度も小さくなり、回生エネルギーを十分に吸収しきれず、電車は回生失効に至った。

補充電・補放電制御適用時では補充電、補放電の機能によって待機時の EDLC を中間充電状態に制御できるため、2 回目の電車走行時においても、1 回目と同等の回生エネルギーを吸収することができた。さらに、外線電圧も 1,800 V 以内に抑制し、電圧安定化に寄与することができた。

電車一往復走行時の複合負荷模擬装置を含めた電車負荷の総消費エネルギーは、固定電圧制御適用時が 8.4 kWh であるのに対し、補充電・補放電制御適用時は 7.9 kWh であった。この数値は電車の回生率が增大したことに起因する。また、補充電・補放電制御適用によって変電所の送り出しエネルギーが低減、総合効率が増加し、省エネルギー化を実現することができた。

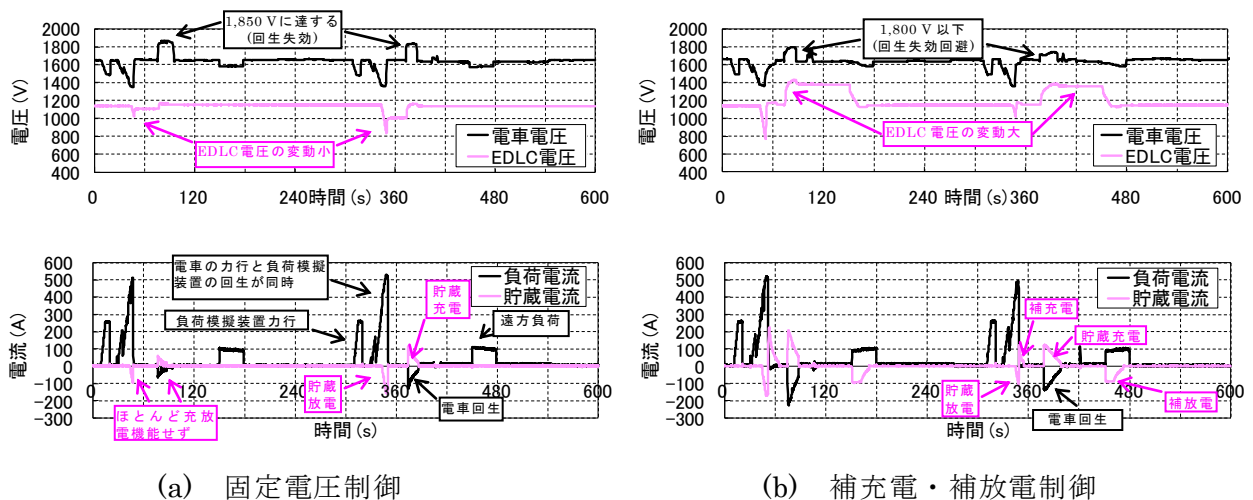


図 7 実機による試験結果の比較

5 まとめ

本研究で実施した内容を以下に要約する。

- 電力貯蔵媒体の蓄電状態の安定制御かつ外線側との充放電を行う可変電圧制御手法を過渡解析シミュレーションにより検証した。従来の固定電圧制御では、電力貯蔵媒体の充電状態が上昇または低下傾向になり、充放電の継続が困難になるが、可変電圧制御では、充電状態が安定し、充放電を継続することが可能であることを確認した。
- 固定電圧制御に補充電・補放電の機能を追加した制御手法を検証するため、電力貯蔵装置、整流器、電車、複合負荷模擬装置を組み合わせた試験を実施した。複数の電車の力行・回生が混在すると、固定電圧制御では電力貯蔵媒体が満充電に陥りやすくなり、電車が回生失効した。一方、補充電・補放電制御では、同様の負荷の状況においても、電力貯蔵媒体を安定した中間充電状態に待機できるため、電車の回生エネルギーを吸収し、き電システムのエネルギー効率を高め、同時に外線電圧を安定化できることを示した。

なお、本研究の一部は国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施したものである。