

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 地上蓄電装置による省エネ化

各地の鉄道事業者において実用化が進みつつある地上蓄電装置について、蓄電媒体の各種方式と、導入により得られる省エネ効果について紹介します。また、電力貯蔵装置の制御手法を改良することにより、省エネ効果をより高めることができる最近の状況を紹介します。



小西 武史  
Takeshi Konishi  
電力技術研究部  
き電研究室  
主任研究員  
[専門分野] き電設備

## はじめに

公共輸送機関としての鉄道の担う役割は、地球環境保全意識の高まりとともに、近年その重要性はますます増えています。鉄道事業者にとって、安定した電力供給の確保、節電(省エネ)に対する取り組みが一層求められています。その中で、2012年7月には国土交通省「エコレールラインプロジェクト推進会議」にて、鉄道の消費エネルギーを、2030年までに2010年度比で2割程度削減することが提案されています。直流電気鉄道における地上蓄電装置の適用は、その解決手段の一つとされており、近年は導入事例が増えつつあります。地上蓄電装置導入による省エネの実現イメージを図1に示します。

## 蓄電媒体の各種方式

かつては電源が弱かった明治末期・大正・昭和初期に、短時間の電力を増強するために鉛蓄電池が地上蓄電装置として適用されていました。当時は使用された電池に蓄積できるエネルギー密度、出力密度は現在と比べて非常に小さいため、電力貯蔵設備は非常に大きな設備でした。昭和以降、電源事情

が良くなったことに伴い、廃止に至りました。

その後、新たな蓄電媒体の技術向上が図られ、最近の約20年間に、フライホイール、二次電池、電気二重層キャパシターを適用した地上蓄電装置が日本の電気鉄道へ本格的に実用化されるようになりました。以下、それらの蓄電媒体を紹介します。

### ・フライホイール

直流電気鉄道の電車線から吸収した余剰回生電力により装置内部のモーターを駆動し、この電動機と同軸のフライホイールを回転させます。すなわち、電気エネルギーを回転エネルギーに変換して貯蔵します。直流電圧が低下した場合には、電動機を発電機として使用し、回転エネルギーを電気エネルギーに再変換して電車線へ放電する動作を行います。

### ・リチウムイオン電池

リチウムは最も原子量の小さな金属であり、原理的にエネルギー密度が大きくなります。リチウムイオン電池は、正極にリチウムなどの金属酸化物の各種セラミックス、負極にカーボンあるいはグラファイトで金属リチウムを含

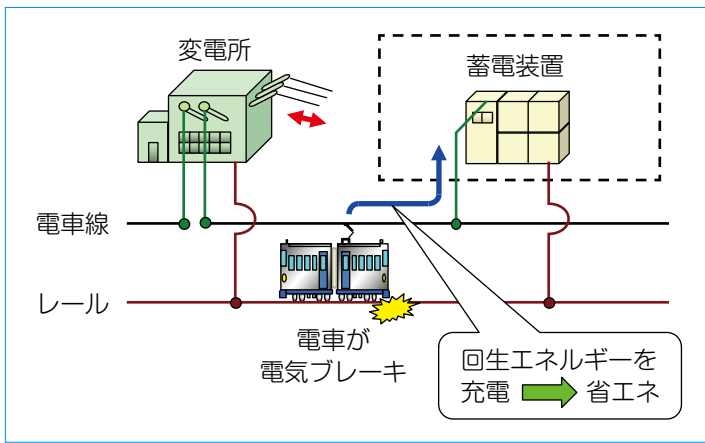


図1 蓄電装置導入による省エネのイメージ



図2 蓄電媒体の外観例

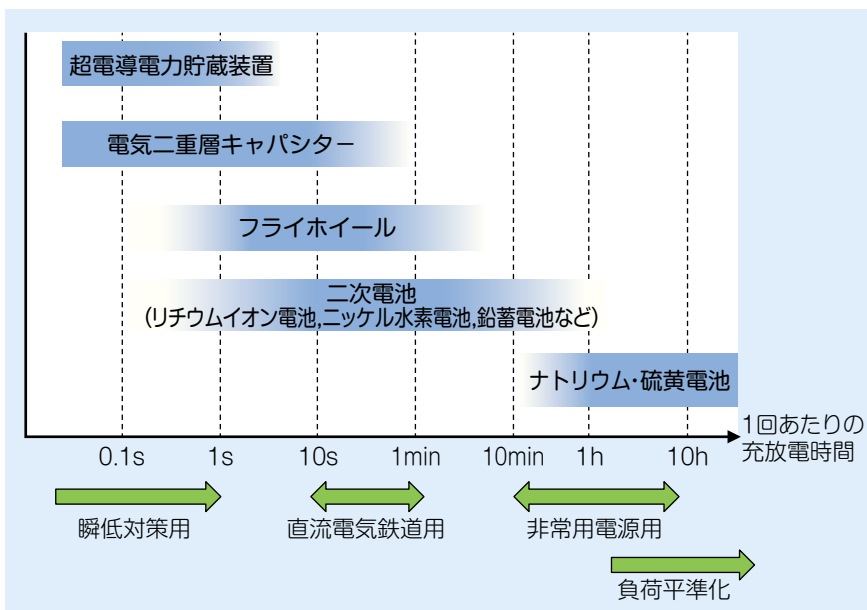


図3 蓄電媒体の種類と充放電時間の目安

んだ化合物を組み合わせた構造となっています。リチウムイオン電池は、従来の電池と異なり、充放電の際にリチウムイオンが両極間を移動するだけで電解液は化学反応を起こさないことに加え、水溶液を使用せず有機溶媒を用いています。したがって、充放電による劣化が少なく、高エネルギー密度化を実現できます。また、構成材料が低

公害であり、資源も豊富という利点もあります。一般にサイクル寿命が他の貯蔵媒体より短いとされてきましたが、近年は充電率の適切な管理により、長期間の使用も可能となりました。

#### ・ニッケル水素電池

リチウムイオン電池と同様に二次電池の一種で、正極に水酸化ニッケル、負極に水素吸蔵合金、電解液に水酸化カリウム水溶液を用いたもので、環境への影響が少ない材料で構成されているのが利点です。また破裂などの危険性は、リチウムイオン電池と比較して低く、大電流、大電力時の放電特性に

優れています。一方でリチウムイオン電池にはないメモリー効果(※参照)を有するのが難点でしたが、近年は特性が飛躍的に改善されています。

#### ・電気二重層キャパシター

活性炭電極、電極を物理的に分離するセパレーター、電極にイオンを供給する電解液で構成されます。固体と液体の相違する二相が接すると、その界面に正負の電荷が極めて短い距離を隔てて相対して分布する原理を利用しています。充放電のサイクル寿命が長い、使用材料が環境負荷に対して優しい、化学変化を伴わないため急速充放電が可能といった利点を有しています。反面、エネルギー密度は二次電池よりも低く、近年は電極材料の改良などによる高エネルギー密度化の開発が進められています。図2に、鉄道総研内に設置した電気二重層キャパシターの外観例を示します。

蓄電媒体の種類と充放電時間の目安<sup>1)</sup>を図3に示します。地上蓄電装置のさらなる導入に向けて、現在よりも高い出力・エネルギー密度を有する蓄電媒体が求められます。

#### 省エネ効果

地上蓄電装置の導入は、電車線電圧低下の抑制や変電所負荷の平準化、変電所停電時の非常用電源としての活用

#### ※メモリー効果

浅めの放電を長時間繰り返すと、容量が見かけ上少なくなる現象を指します。

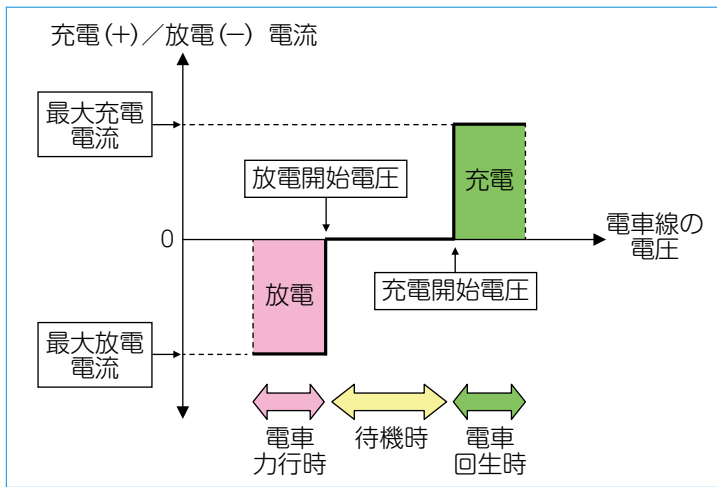


図4 従来の制御手法

など、多岐の目的にわたるものの、省エネ施策が主目的である事例が多いのが実情です。特に、線路勾配が大きく強いブレーキ力が要求される線区や、無負荷時の電車線電圧が高めで電車の回生絞り込み電圧の余裕が少ない線区では、地上蓄電装置の省エネ効果が大きくなります。

現在実用化されている地上蓄電装置の導入による年間の省エネ電力量は、設備規模などにもよりますが1台あたり100MWh～700MWh程度とされています。これは、1変電所の年間電力量の数%程度に相当し、一定の省エネ効果は期待できると言えます。さらに効果を高めるためには、地上蓄電装置の容量を大きくするだけでなく、充放電制御を改良することが重要になります。

### 地上蓄電装置の制御

電車が加速力行すると、変電所から電車に向かって電流が供給されるため、電車線の抵抗分によって電圧降下が発生し、電車線の電圧は標準値を下回ります。一方、電車が回生すると、他の電車へ電流を供給するため、電車線の電圧は標準値を上回ります。したがって、電車線の電圧が高くなると回生電力が、逆に低くなると力行電力が生じていると判断することが基本的に可能です。地上蓄電装置の制御としては、

この現象を利用して、従来は図4に示す手法が採用されていました。電車線の電圧が「充電開始電圧」を上回ると充電し、逆に「放電開始電圧」を下回ると放電動作を行います。充電開始電圧と放電開始電圧の設定は、負荷実態に合わせて微調整した上で固定した値に設定されていました。

ところが、図4の制御手法では効果的に充放電しないことが多く発生します。最初の充電状態が中間であっても、充電と放電を繰り返していくと、少しずつ両者のエネルギーバランスを保つことが難しくなり充電状態が偏る傾向になります。図5(a)のように蓄電媒体が満充電ならば回生エネルギーが発生しても充電できず、図5(b)のように空状態ならば電車が加速しても放電することができません。地上蓄電装置のエネルギー容量が充分大きい場合でも、(a)、(b)のような状況に陥ると、電力貯蔵装置の適用効果が大きく低減します。回避するためには、図5(c)に示すように、充電状態が上限または下限付近に偏ることなく、常に電車との電力のやりとりを行えるように制御する必要があります。そこで、以下の2例のような制御手法が考えられます。

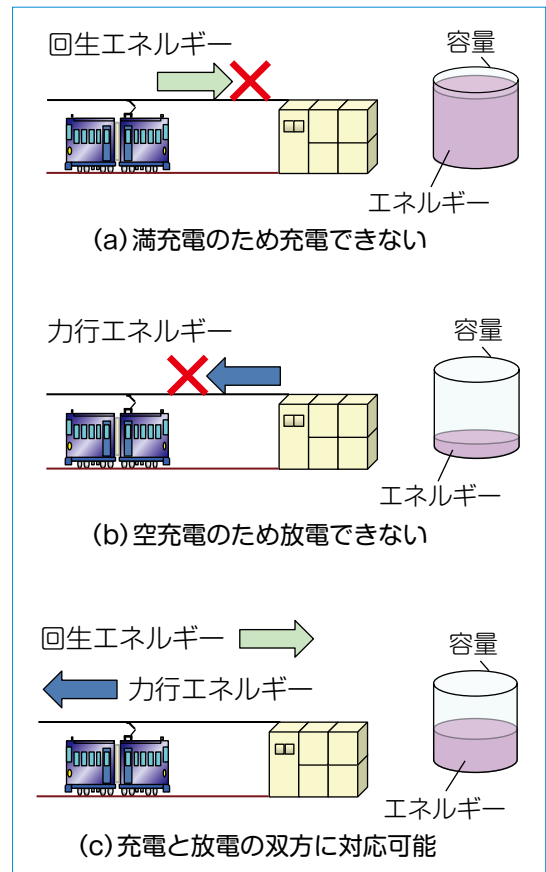


図5 充電状態を考慮した制御手法

### (1) 可変電圧制御手法

蓄電媒体の充電状態に応じて、充電開始電圧ならびに放電開始電圧を適宜変化させることにより、充電状態を中間付近に安定させるように制御します。図6(a)に可変電圧制御手法の概略を示すとともに、具体的方法を以下に示します。

- 充電状態が中間付近の場合は、通常の充放電開始電圧とします。
- 充電状態が上限に近づく場合は、積極的に放電を行うことにより、充電状態を中間付近に戻すように制御します。すなわち、充電開始電圧と放電開始電圧を一時的にとも上げ、充電の機会を少なくし放電の機会を多くします。
- 充電状態が下限に近い場合は、積極的に充電を行うことにより、充電状態を中間付近に戻すように制御します。すなわち、充電開始電圧と放電開始電圧を一時的にとも

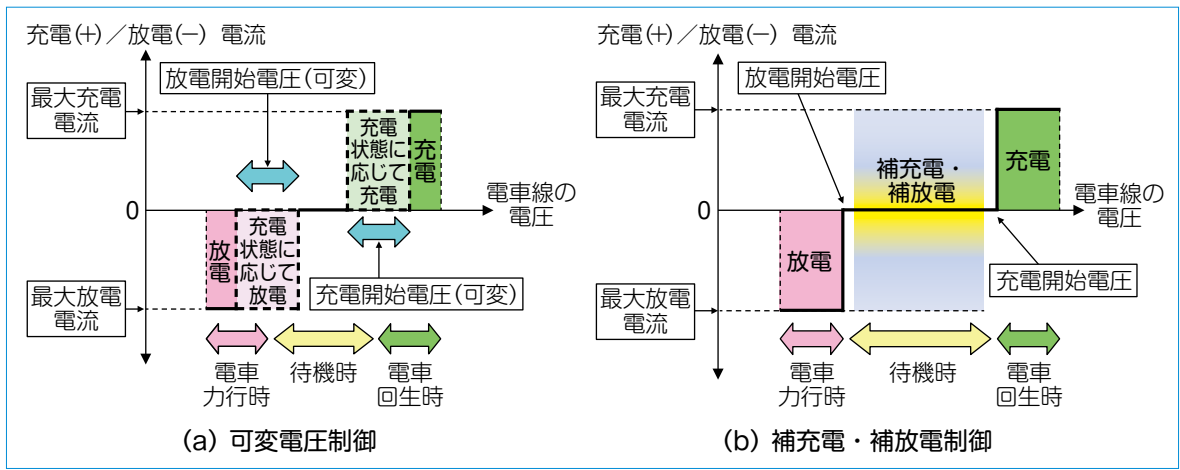


図6 充電状態を考慮した電力貯蔵装置の制御例

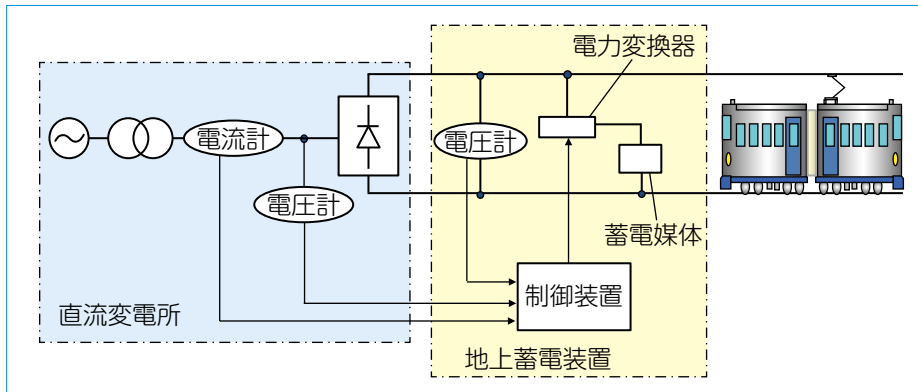


図7 受電電圧の変動を考慮した制御例

が低減しました。それに伴い、変電所の消費エネルギーも低減する効果を確認しました<sup>2)</sup>。

### 今後の動向

近年は地上蓄電装置の省エネ効果を高めるために、図6や図7の例を含めた種々の制御の改良が行われていま

に下げ、充電の機会を多くし放電の機会を少なくします。

なお、変電所の受電電圧が時間帯に応じて変動する場合でも、電車線の電圧に影響し、適切な充電開始電圧、放電開始電圧も変動します。一般に、電力需要が少ない深夜・早朝の標準電圧は高めに、日中は低めに推移する傾向になります。そこで、図7に示すように、直流変電所の交流側の電圧、電流を計測し、標準電圧の推移を把握するなどにより、時間帯に応じた適切な充電開始電圧、放電開始電圧を選択する手法も実用化されています。

### (2) 補充電・補放電制御手法

電車線の電圧が放電開始電圧以上かつ充電開始電圧以下の場合、電車が地上蓄電装置の付近に存在しないか、惰行している場合が多いため、通常は充電する必要はありません。一方で、

蓄電媒体を中間充電状態に制御する絶好のタイミングでもあります。そこで、次の充放電の機会に対応するため、強制的に「補充電」「補放電」を行う手法が考えられます。図6(b)にその概略を示します。中間より高い充電状態であるほど放電電流を大きくし、低い充電状態である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ます。

一方、電車線の電圧が放電開始電圧以下もしくは充電開始電圧以上であり、力行もしくは回生する電車が付近に存在することが明確に確認される場合は、従来通りの充放電を行います。

図6(b)に示した制御手法を適用した地上蓄電装置を実験線に適用して検証試験を実施した結果、従来制御と比較して有効活用できる電力回生エネルギーが増加し、電車の消費エネルギー

す。将来は、地上設備と電車のデータを組み合わせることにより地上蓄電装置の最適な充電開始電圧、放電開始電圧をリアルタイムで演算するといった、より高度な制御が採用される日も近いかもしれません。

なお、本内容の一部は、鉄道総研が国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施しました。[RRR]

### 文献

- 1) 小西：連載講座「直流き電回路の現状と今後の課題」(17) 直流き電回路の電圧降下対策と省エネ対策、鉄道と電気技術、Vol.22, No.1, pp.60-65, 2011
- 2) 小西, 吉井, 重枝, 高橋, 平松：地上用電力貯蔵装置の適用効果向上を目指した制御手法、鉄道総研報告, Vol.27, No.8, 2013