

# 電車を動かす制御技術

秦 広  
車両制御技術研究部(主管研究員)



はた ひろし

## はじめに

電車を動かす、止めることは制御技術そのものです。モータによる加速力を制御するには電圧や電流などを調整します。ブレーキは空気ブレーキと電気ブレーキがあり、電気ブレーキはやはりモータを使うのでその制御が重要です。また、空気ブレーキと電気ブレーキを協調させる制御も必要になります。最近、電車や気動車にリチウムイオン二次電池などを載せて、回生ブレーキを有効利用しようとするトレンドがあります。この時にも電池の充放電の量をどう決めるかなど制御が重要です。

## モータ制御の歴史

電気鉄道の中で、モータには長い間直流モータが使われてきました。現在でも電車全体の数十%に使われています。電車が一定の加速度で起動するためには、直流モータの場合は加える電圧を徐々に上げていく必要があります。これを実現するため、モータの電源側に可変抵抗器を設けて速度に応じて少しずつ抵抗を抜いていく抵抗制御が使われてきました(図1)。抵抗制御では架線から取り入れた電

力の3分の1がこの抵抗器で熱として損失となってしまいます。また、抵抗器を冷やすためプロアという強力な扇風機を設けており、ここでもエネルギーを使ってしまいます。また、直流機は回転部に大電流を流すため、ブラシと整流子という接触部を持ちます。これは摩耗部品であるため保守の手がかり、故障原因になりやすい部品でした。

1970年代に大容量半導体素子が開発されると、チョップ制御という方式が実用化されました。チョップとは半導体によるスイッチでモータ回路を高速で(1秒間に数百回)切り入りするものです(図2)。入りの時に電圧がモータに加わります。起動時に速度の上昇に合わせて入りの時間をだんだん長くすることにより、モータに加わる平均電圧をだんだん高くすることができます。これにより抵抗器が不要になり、ここでの損失がなくなりました。

さらに1980年代にはインバータによる誘導モータの制御が電車の駆動に使われるようになりました(図3)。交流モータの一種である誘導モータは、ブラシと整流子がない構造なので小型・軽量化ができ、保守が楽で、故障が少ないというメリットがあります。これを電車のような速度が

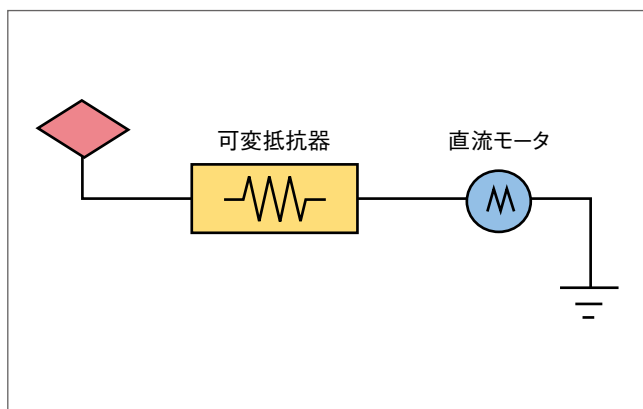


図1 抵抗制御

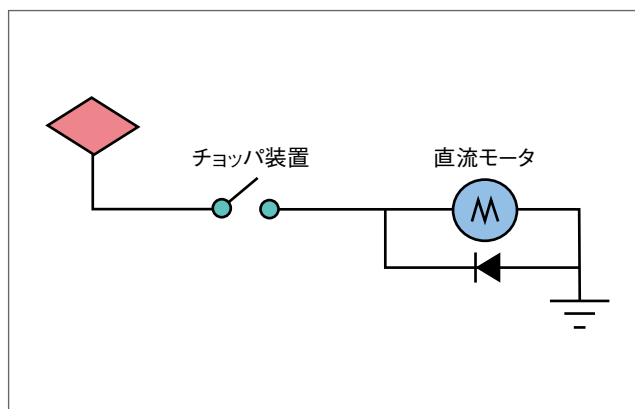


図2 チョップ制御

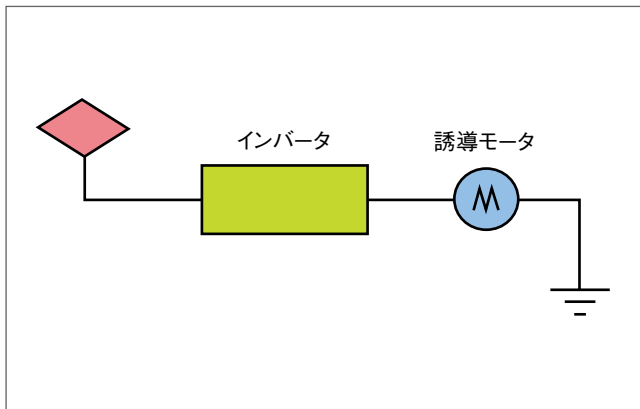


図3 インバータ制御

変わっていく用途で使うためには、モータに加わる電圧と周波数を速度に応じて変えていく必要があります。大容量半導体素子の開発により直流から任意の電圧、周波数の交流が作れるインバータができ、鉄道にインバータ制御が使えるようになりました。

運転士が主幹制御器のレバーの位置を変えることにより加速力の指令値を変えますが、この情報とモータの回転数の情報（速度情報）などをもらって、モータに加える電圧と周波数を時々刻々と決めていくのがインバータの制御です。

インバータ制御が取り入れられて三十年近くが経過しました。この間に半導体素子が進化して損失が少なくなり、

ベクトル制御という方法でより速い応答で精度の高い制御ができるようになりました。これは本誌の別稿で紹介している空転制御の時も有力な方法です。

### 回生ブレーキ制御

回生ブレーキとは電気ブレーキの一種で、ブレーキの時にモータに発生した電気エネルギーを、架線を通して近くで加速中の電車に供給する方式です（図4）。ちなみにモータとは電気エネルギーを機械エネルギーに変えるものことであり、加速中は架線から取り入れた電気エネルギーを回転する機械エネルギーに変えて輪軸に伝えています。ブレーキの時は輪軸から伝わる機械エネルギーを電気エネルギーに変えています。このときは発電機の状態と言えます。

以前は発生した電気を抵抗器で消費していましたので、回生ブレーキにより鉄道の省エネ性がさらに向上されました。回生ブレーキが広く使われるようになったのは、チョッパ制御が使われるようになった時です。ブレーキ指令に応じて半導体によるスイッチの入りの時間と切の時間を変えることにより、ブレーキ力を制御しています。インバータ制御でも半導体素子の入り切りのタイミングを制御することによりブレーキ力の制御ができます。

なお電流を架線を通じて他の電車に流すことは架線電圧を高くすることになります。これが一定値を超えたら、それ以上上がらないようにインバータが回生ブレーキ力を絞ります。これを回生絞り込み制御と称しています。

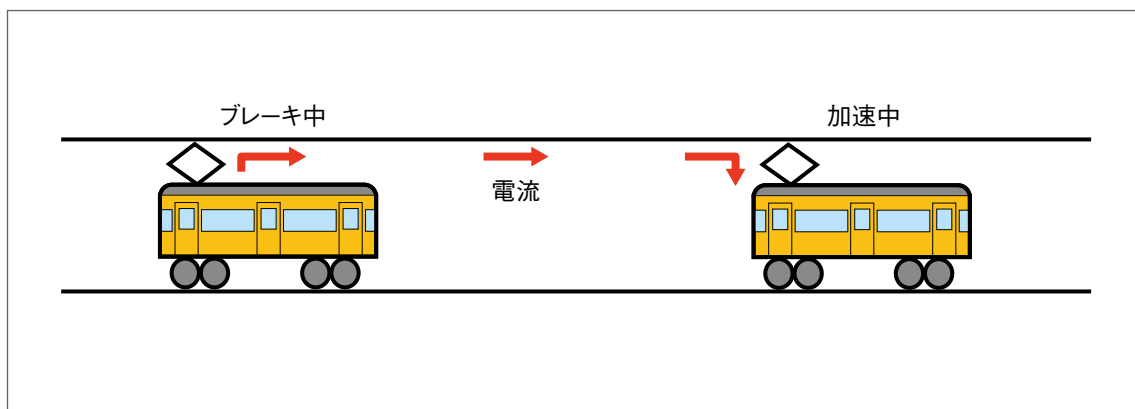


図4 回生ブレーキ

## 電空協調制御

電車のブレーキは歴史的には空気ブレーキが長いですが、回生ブレーキは先に述べた省エネ性やブレーキ力の精度良い制御ができること、摩耗する部品がないので保守性に優れることなどのメリットがあります。そこで通常は必要なブレーキ力のうち容量が許す範囲で回生ブレーキが負担し、足りない分を空気ブレーキが補足することになっています。このときに上手に制御しないと合計が必要なブレーキ力を超えたり、足らなかつたりということになります。これを電空協調制御と呼んでおり、ブレーキ制御装置が行います。具体的には運転台からのブレーキ力指令などによりブレーキ制御装置が回生ブレーキの負担すべき分を計算してインバータに伝えます。そして残りの空気ブレーキ負担分を空気ブレーキ装置に伝えます。なお、信頼性の点では空気ブレーキが回生ブレーキに勝っており、今後も両ブレーキが併用されていくと思われます。

## ハイブリッド制御

回生ブレーキには、ブレーキの時に近くに加速中の電車（エネルギーをもらってくれる電車）がないと使えないという欠点があります。このように回生ブレーキが使えないことを回生失効と呼んでいます。この時は空気ブレーキで減速しますから安全上は問題ありませんが、省エネという観点からは課題が残ります。運転頻度の少ない線区ほど回生失効が増えます。また、運転本数の多い線区でも早朝、深夜には起こりやすくなります。この対策として、車内に電気を蓄えて、次に加速する時に再利用するように大容量のリチウムイオン二次電池（図5）を載せた電車を2003年に開発しました。電池の電源側にチョップ装置と呼ばれる半導体電力変換装置を載せました。これは電池の電圧と架線電圧を調整するための装置ですが、電池に出入りする電流を制御するためにも使われます。インバータ制御に上記の機器を追加した状態を図6に示します。

ブレーキ中に近くに加速中の電車がいればインバータからの電流が架線に流れていきます。この時はリチウムイオン二次電池に電気が流れ込まないように制御します。そうしている時に近くで加速中の電車が惰行すると架線電圧が上昇します。これをすぐに検知して電池に電流を流しこむようにします。次に加速する時は、架線からの電流と電池



図5 リチウムイオン二次電池

からの電流をミックスします。このとき、架線からの電流を優先し、電池からは必要によりこれを補足する考え方や、電池からの電流を優先し、不足分を架線からの電流で補足する考え方、電池の残量によりこれらを切り換えるやりかたなどいろいろな考え方があります。線区の列車頻度、最高速度、駅間距離などによって最適なやり方が変わってくる可能性があります。そこでこれを任意に選べるようチョップ装置の制御ソフトを作りました。

これは、架線・バッテリーハイブリッド電車と呼ぶことができますが、最近はディーゼル車やディーゼル機関車にリチウムイオン二次電池を搭載して電車のように回生ブレーキを使えるようにするエンジン・バッテリーハイブリッド車が登場しています。この場合はエンジンに直結された発電機と電流とリチウムイオン二次電池の電流をどうミックスするかについて先の例と同様な制御が行われます。

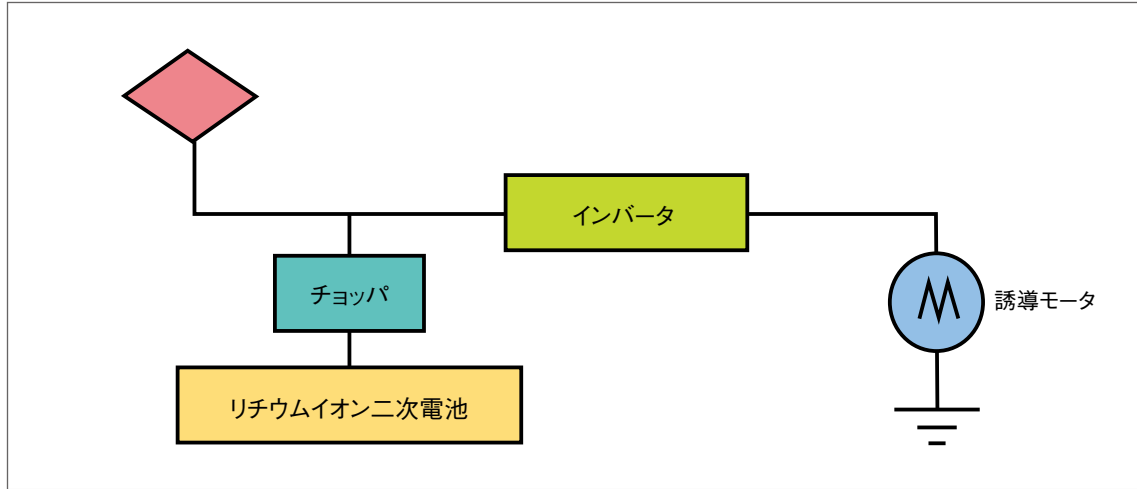


図6 インバータ制御車にリチウムイオン二次電池搭載

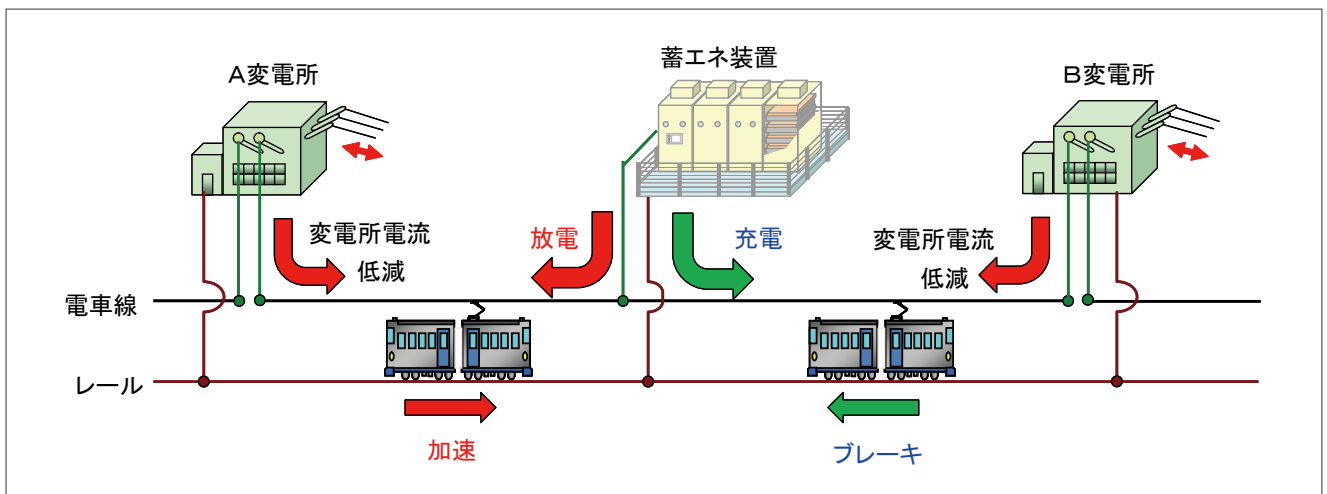


図7 地上に蓄エネ装置を設置

### 地上に蓄エネ装置を設置

地上に蓄エネ装置を置いて回生失効を防ぐ考え方もあります(図7)。鉄道総研では、コンデンサの一種である電気二重層キャパシタを地上に設置して架線と接続する研究開発を行い、既に実用化されています。電気二重層キャパシタのエネルギー密度はリチウムイオン二次電池ほど高くないですが、寿命の点で優れています。地上に設置する場合は、車両の質量増にならないというメリットがありますが、電流が流れる架線での損失が発生するというデメリットがあります。また、車両搭載と比べて次に力行(放

電)になるか回生ブレーキ(充電)になるかの予測が難しく、キャパシタの制御目標として腹何分目の充電状態を目標にするのが難しくなります。将来的にはこれを判断できる情報を車両から地上に送ることも考えられます。

### おわりに

本号の特集「制御技術」の中で、電車の加速、減速に関係するものを解説しました。興味を持っていただければ幸いです。RRR