

電力回生ブレーキ技術の変遷

佐々木 拓 二

鉄道はもともとエネルギー効率の良い輸送機関である。鉄道車両において走行に要するエネルギーは車両の質量や走行抵抗や走行速度に依存している。さらにブレーキ時に、それまでに消費したエネルギーの内のいくらかを返却できれば、総合的な消費エネルギーはさらに低減できることになる。このために使われるのが「電力回生ブレーキ」である。この電力回生ブレーキが、なぜ「回生」と呼ばれるのか、どのような背景と技術的な変遷を経て、今日のように当然のように採用されるようになったか、その原理と歴史を振り返る。

キーワード：省エネルギー、回生ブレーキ、チョップ制御、インバータ駆動、VVVF インバータ、PWM コンバータ

1. はじめに

鉄道は輸送機関の中ではエネルギー効率が良く、CO₂排出量も少なく、エネルギー消費の面からは優等生であると言える。これは硬い鉄のレールの上を、硬い鉄の車輪が転がるという鉄道システムでは、走行に伴って生ずる走行抵抗が小さいためである。すなわち小さな力（牽引力）で重い物（人や貨物）を運ぶことができることを意味している。

この走行抵抗をさらに小さく抑えるには車両の軽量化が大きく影響することになる。このため、最近の車両の車体はアルミニウムやステンレスを使って軽量化が図られており、これにより更なる省エネルギー化を達成している。

さらに最近の電車では、ブレーキ時に発生するエネルギーを電気に変換したうえで架線に返す「電力回生ブレーキ」が当たり前の機能になっている。高速走行の新幹線電車でも交流での電力回生ブレーキが採用されるようになった。新幹線車両では空気抵抗の低減と車両質量の大幅な軽量化、そしてこの回生ブレーキによって、消費電力量を増やすこと無く、すなわち地上変電所設備の容量アップをすること無く速度向上を達成することができた。

一方、バッテリーを車両に搭載した架線無しでも走れる路面電車の開発も試みられており、この場合もブレーキ時の回生エネルギーをバッテリーの充電に使うように考えられている。また気動車でも電気駆動とのハイブリッドで構成し、ブレーキ時の回生エネルギー

を有効に使うことで実用化されている。

2. 「回生ブレーキ」という言葉

（財）鉄道総合技術研究所でバッテリー電車の開発をプレス発表した際に、取材に来ていた記者から、「なぜ回生ブレーキと呼ぶのか」、「再生ブレーキとなぜ呼ばれないのか」との質問があったとのことである。後日回答することとなり、それが巡り巡って私にその回答を求められる事態が生じた。

「回生ブレーキ」という用語は、英語では接頭語 'Re' の付いた「Regenerative Brake」が対応しており、確かに「再生」の方が素直な表現なのかもしれない。また鉄道以外の分野では、「資源の再生」とか「エネルギーの再生」といった言葉が一般的であり、「回生」という言葉を使っているのは、我々鉄道技術者だけのように見受けられる。

さらにマズイことに、お隣の中国、漢字の本家・本元である中国の鉄道技術者は、我々の言う「回生ブレーキ」を「再生制動」と表現し呼んでいるためますます厄介である。我々日本の鉄道技術者だけが「回生」という言葉を固守し、孤立しているのが実態なのである。

そもそも何故、我が国の鉄道の世界だけが、「回生」という日頃使い慣れない言葉を使うようになったのか、その理由は定かではない。しかし、かなり古い文献でも、我が国の鉄道界では昔から「回生」という言葉を使い続けてきており「再生」が使われなかったのは事実である。何の迷いもなくこの「回生」が使われ

てきたのには、それなりの理由があると考えられる。

これは当時の「回生ブレーキ」の使用目的が、現在の「回生ブレーキ」の使い方と大きく異なっていたからだとは私は推測している。今でこそ「回生ブレーキ」は列車の停止のためのブレーキだと思われて当然であるが、昔の「回生ブレーキ」は列車の停止のために使うものではなかったのである。

最初の回生ブレーキは、下り勾配での列車の加速を抑えるための「抑速ブレーキ」として開発・使用された。すなわち、速度を持って走る列車の「運動エネルギー」をブレーキ時に電力として戻すのではなく、上り勾配を苦労して登った、列車が標高の高い位置にたどり着いたことで得た、その「位置エネルギー」を、下り勾配走行時に「抑速ブレーキ」という手段で電力に変換して戻す、それが当初の「回生ブレーキ」だったのである。「運動エネルギー」の回収ではなく「位置エネルギー」の回収が目的であり機能であった。

位置エネルギーの回収の場合、エネルギーの蓄積（登り勾配走行）と、その放出（下り勾配での抑速）との間には時間的な遅れ（ずれ）が生じる。これが「再生」ではなく「回生」という言葉を選んだ、昔の技術者の見識だと、私は推測している。

3. 「機械的回生制動」という言葉

回生ブレーキというと電気技術の世界の話と思いがちであるが、実はルート選定を含む鉄道線路の基本設計とも大きく関係している。昔の権威ある鉄道の教科書には「機械的回生制動」という項目があった。

これは、下り勾配を利用して加速し、上り勾配を利用して減速するような線路断面形状を設定すれば、位置エネルギーを加減速に利用でき、動力に要するエネルギーは極力節約でき、機械ブレーキ関係の消耗も減じることができることを目的としたものである。しかしこれを実現するには線路断面形状が制約され、線路の建設費も高くなるため広くは採用されなかった。

小生が鉄道に関係するようになった1970年の頃、海外の鉄道雑誌でロンドンの地下鉄ビクトリア線建設を紹介記事があり、その中で駅を地表近くの浅いところに建設し、駅出発後は下り勾配で自然に加速が加わるようにし、次駅に近づくと登り勾配となり自然減速を期待できるように設計しており、省エネルギーの線路断面設計を行っているとの論文を読んだことを思い出す。

しかし実態としては既に地下鉄網が張り巡らされていた歴史ある大都市ロンドンでは、新しく建設する地

下鉄路線は、既にある路線の下を通らざるを得ず、このような線路断面形状にせざるを得なかったと言うのが正直な理由であったと考えられる。わが国の東京の地下鉄大江戸線でも同様な制約で「機械的回生制動」に適した線路断面形状とならざるを得なかったのが現実である。

4. 電力回生ブレーキを採用する理由

今でこそ電力回生ブレーキ（以下、回生ブレーキと呼ぶ）の採用の目的は、省エネルギーや省資源を目指しているが、開発当時の回生ブレーキの目的は省エネルギーや動力費の削減などではなかった。連続する下り勾配区間を、機械ブレーキだけで速度を制限しながら走ると、車輪と制輪子との摩擦で熱が発生し、この熱で車輪のタイヤ緩みを生じたり（当時の車輪は一体車輪ではなかった）、温度の上昇とともにブレーキ力が低下したりした。また制輪子と車輪の摩擦も激しく、その保守も大変であった。

もし電気ブレーキが使えるなら、これらの問題は解決できることになる。電気ブレーキ、すなわち発電抵抗ブレーキを採用したとしても、このような長い区間の抑速ブレーキは一定時間の連続使用となるため、熱容量の大きな抵抗器が必要となりその重量も大きくなってしまふ。このため軸重を厳しく制約された我が国の鉄道における電気機関車では、重量的にも取付けスペース的にも、大きな抵抗器を搭載することができなかったのが現実であった。

一方、回生ブレーキなら、重い大きな抵抗器は不要となるため、電気回路は少々複雑になっても、そのメリットを生かすことができたのである。さらに当時の地上変電所では、現在のような整流器による整流ではなく回転変流機で電気鉄道用の直流を作っていたため、直流側から電力会社（交流）側への逆変換も可能であり、同一線区に負荷となる列車が存在しなくとも、エネルギーの回生が期待できた。このような理由で、勾配線区専用の電気機関車に回生ブレーキは最初に採用されるようになった。一方、このような電力の逆変換を期待する変電所の方も「回生変電所」と呼ばれていた。

5. 直巻電動機のブレーキ時のみ分巻制御

回生ブレーキは連続勾配区間のある線区およびその線区を走る電気機関車に1930年代にまず採用された。碓氷峠の機関車（ED42）や中央線の機関車（EF11）

である。さらに電車でも京都と大津の間の逢坂ノ関を越える京阪電鉄京津線の電車などにこの時期に採用されることになった。その後、1950年代になって、奥羽線福島・米沢間の電気機関車（当初は直流電化でありEF16）、上越線の機関車（EF16の二次車）などが活躍することになる。

これら線区はいずれも直流電化区間であり、機関車の主電動機は直流直巻電動機が使われている。この直巻電動機は抵抗で電力を消費する発電抵抗ブレーキではそのまま発電機として使えるが、速度に関わらず発電電圧を一定電圧に制御する必要のある回生ブレーキではそのままでは使うことはできない（電機子チョッパ制御で初めてそのまま使えるようになったが、それは後述する）。

このため、回生ブレーキを使用する場合は電動機の回路を組替えて界磁を制御できるようにする必要がある。よってブレーキ時には界磁を独立に制御する分巻電動機（発電機）として使用することになる（写真一1）。



写真一1 中央線 EF11 形直流電気機関車 (1934年製造)

6. 交流電化での位相制御による回生ブレーキ

交流電化が実用化され交流電気機関車が誕生した。交流電気機関車で回生を行う場合は、直流機関車と異なり、界磁の分巻制御だけでなく、さらに直流を交流に変換する機能の追加が必要である。半導体素子サイリスタのブリッジ構成によって、これを可能にしたのが、奥羽線福島・米沢間（1968年に交流電化に変更）のED78形とEF71形交流電気機関車である。

しかしこのサイリスタ・ブリッジによる位相制御での回生ブレーキは、多くの高調波を伴い、力率も良くできないという欠点がある。主変圧器二次側の巻線を分割しブリッジを多段に接続することで、制御に伴う電圧変化量を抑えることや、ブリッジのサイリスタの

非対称制御により制御を細分化するなど、いろいろな技術手段を加味して改善を行なったものの、それでも高調波と力率の問題は残ることになった。

このため地上側での対応策を設備できる特定の線区にしか交流回生の電気機関車は投入できなかったのが現実であった（写真一2）。



写真一2 ED78 形交流回生ブレーキ付電気機関車 (1968年製造)

7. 複巻電動機と界磁チョッパ制御の組合せによる回生ブレーキ

それまでの回生ブレーキは主として勾配線区専用の電気機関車での「抑速ブレーキ」としての採用が主流であった。その後、電車の「停止ブレーキ」にも回生ブレーキの採用がいろいろ試みられるようになった。1960年代からは直巻界磁と分巻界磁を持った複巻直流電動機を使った回生ブレーキが実用化され始めた。1970年代になって半導体技術の進歩により直流を応答良く制御できるチョッパ制御が開発されるようになると、これを複巻直流電動機に分巻界磁制御に使った界磁チョッパ制御電車が急速に普及するようになった。この結果、通勤電車など、一般の電車にも広く回生ブレーキが採用されるようになった。この場合は、主電動機は複巻電動機を採用し、架線電圧の急変などに対する過渡特性を直巻界磁に期待し、他励分巻界磁にはチョッパ制御による制御を持たせる使い方となる。発電抵抗ブレーキの場合は、架線電圧の制約を受けないため、ブレーキ時の発電電圧は力行時の3倍近い高い発電電圧まで許容して使用してきた。しかし回生ブレーキの場合は架線電圧の制約が生じるため、発電電圧をむやみに高くはできず、高速からのブレーキ時は発電電圧を抑えるため界磁を弱めることとなるが、これには直流機の整流の制約が存在する。一方、速度が低下すると発電電圧を上げるため界磁を強めることとなるが、これも磁気飽和の制約を受け、むやみ

に低速までカバーすることはできない。このように回生ブレーキ使用の速度域に制約が生じるものの、かなり広い中高速の速度域を一定パワーでの回生ブレーキでカバーできるため、この複巻電動機を採用した界磁チョップ制御電車は民鉄を中心に幅広く使われることとなった（写真—3）。



写真—3 東急電鉄 8000 形界磁チョップ制御電車

8. 電機子チョップ制御による回生ブレーキ

半導体素子の大容量化に伴い、電車の主回路そのものをチョップで制御する電機子チョップ制御の電車も実現可能となった。電機子チョップ制御は当時の営団地下鉄（現 東京地下鉄）で精力的に開発され、1970年には実用化され、チョップ電車 6000 形が誕生した。これは世界的に見てもこの分野では最先端を行っていたとすることができる（写真—4）。



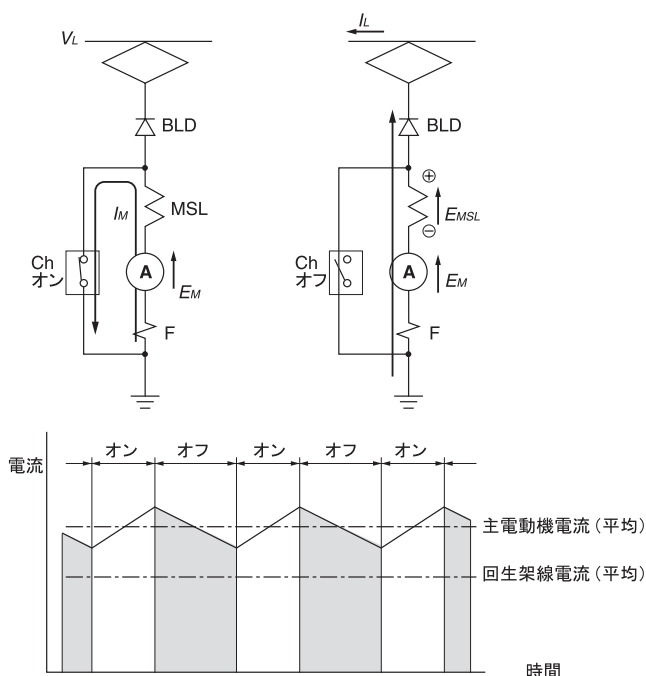
写真—4 営団 6000 形電機子チョップ制御電車

電機子チョップ制御により、回生ブレーキは新たな局面を迎えることになった。なぜなら、これまでは不可能だった直巻電動機をそのまま発電機に使う電力回生ブレーキ制御ができるようになったためである。分巻ではなく直巻のまま回生ブレーキが使える

ことは画期的なことであった。電機子チョップ制御の出現により、回生ブレーキは停止直前まで使えるようになった。また、起動時の抵抗ロスのない、カム軸の進段のような電流のステップ変化の無い連続制御が可能になり、さらに主回路の接点も減り保守が簡易となる、など、いろいろなメリットがあるため、地下鉄車両を中心に電機子チョップ制御電車は急速に普及することとなった。

9. 電機子チョップ制御の限界と弱点

電機子チョップ制御での回生ブレーキ制御の原理とその特性については一般には正しく理解されていない感がある（図—1）。



図—1 電機子チョップブレーキ制御原理図

回生ブレーキと言うと、発電電圧が架線電圧よりも高いから電気が架線側に戻ると考えるのが素直ではあるが、電機子チョップでは様子が少し異なる。電機子チョップでの回生は、チョップのオン状態で直巻発電機をリアクトルを介して短絡状態にし、発電電流を増加させる。そしてチョップのオフ状態でリアクトルに生じる端子電圧と発電電圧との和が架線電圧より高くなることで架線側に電流を返すとともに電流は減少する。このオン（電流増）とオフ（電流減）との瞬時的な繰り返しと、オン時間とオフ時間の時間比率の制御で直巻電動機であるにも関わらず、電流と電圧の制御が可能となるのである。よってブレーキ時の電動機の

発電電圧は架線電圧よりも常に低い状態で使用することとなる。仮にブレーキ時の電動機の発電電圧が架線電圧よりも高い状態となると、チョップのオンで電流増加、オフでも電流増加となり、発電電流は増加・発散してしまい、制御不能の状態に陥ってしまう。さらには、架線電圧の急降下などにも配慮すると、この電圧に余裕を持たせて使うことになり、高速度での回生ブレーキは苦手という特性になってしまう。

速度が高い状態では電動機の回転数も高く、発電電圧も高くなる。しかし上記の発電電圧の制約を守るためには、発電電流（ブレーキ電流）そのものを小さく絞って発電電圧を抑える必要が生じる。連続した弱め界磁制御を併用できるシステムにしない限り、一定パワー制御もできない。極端な言い方をすれば、その電車の定格速度以上では回生ブレーキ電流は絞って使用せざるを得ず、それだけ電気ブレーキ力は小さくなってしまふ。

この欠点をどのような方法でカバーするかが電機子チョップの技術開発の根幹だった。地下鉄電車のように駅間距離が短く、走行速度が比較的低い場合は致命傷にはならないものの、郊外線区のように駅間距離の長い、高速走行の場合には、この制約は致命傷と言えるほどの弱点になってしまうのである。

対応策としては、列車としての定格速度を高く設計する（特急電車の歯車比で通勤電車に使う）、この場合は加減速度が不足するため主電動機の容量をアップする（大容量の主電動機とする）、ブレーキ時は一定弱め界磁として発電電圧を抑える（電圧でなく電流で仕事をする事になり主電動機の容量を上げることになる）、ブレーキ時には直列抵抗を挿入して発電電圧の許容値を高くする（抵抗の損失分だけ回生電力は期待できなくなる）、などがあり、これらを組み合わせ

て対応していたのが現実である。

私が開発を担当した国鉄のチョップ制御電車 201 系では、これらの対応策を全て採用したシステムにしている。それでもまだ高速域での電気ブレーキ力は不十分なのが実態であった。

中央線で快速列車として活躍したオレンジ色のこの電車も、今ではインバータ駆動の新しい電車に置き換えられ、消えゆく状況にある（写真—5）。

10. 添加励磁方式による回生ブレーキ

電機子チョップ制御電車 201 系は国鉄ではそれまでの 103 系に代わる久々の新形式通勤電車であった。その後の通勤電車の標準形式になるはずであったが、車両価格が高くなってしまったこともありその後の採用は制限される結果となった。このため国鉄においては、電機子チョップ制御電車は 201 系からさらに拡大・発展することはなく、その代替として誕生したのが添加励磁方式による 205 系電車である。これは直巻電動機の界磁コイルを別電源から添加励磁することで、複巻電動機と同様な特性を実現したものであり、特急電車などに搭載してきた大型電動発電機（MG）での制御と使用実績から、これを主回路にも適用したものだと言える。山の手線の電車にはこの 205 系が投入されることになった。

11. VVVF インバータ制御による主電動機の誘導電動機化

大容量半導体素子の開発がさらに進み、電流のオン・オフを自由にできる GTO 素子（Gate Turn-Off Thyristor）などの大容量化も実現し、直流から 3 相交流を作るインバータ装置も床下搭載が可能な小型化が実現できるようになった。それに伴い、主電動機をそれまでの直巻機ではなく、整流子やブラシの無い、保守が楽な、誘導電動機で構成することも夢でなくなった。そして 1985 年前後からはインバータ電車が続々登場するようになった（写真—6、図—2）。

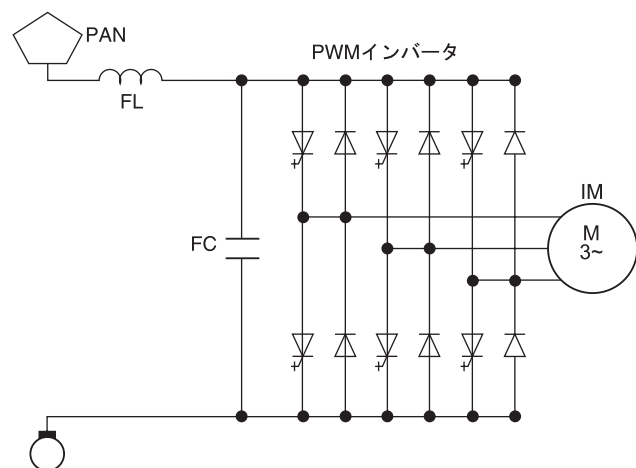
鉄道車両の駆動用に使われるインバータは一般に「VVVF インバータ」と呼ばれている。これはインバータの出力が、誘導電動機の制御に合わせて、電圧を変える（VV は Variable Voltage の略）と周波数を変える（VF は Variable Frequency の略）との組合せから成立っているからである。しかしインバータの動作原理から言えば「PWM インバータ」と呼ぶことになる。これは上記の VVVF を達成するために



写真—5 国鉄 201 系試作電車公式試運転記念写真
（左端が若かりし頃の筆者）



写真—6 大阪市交 20 形インバータ制御電車



図—2 インバータ電車回路概念図

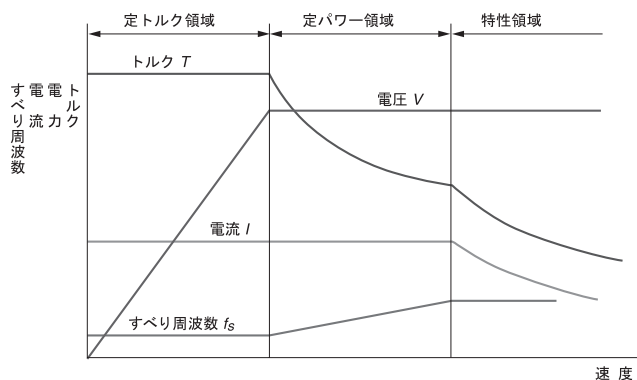
通電パルス幅を制御すること（PWMはPulse Width Modulationの略）でVVVFの出力を作っているからである。

一般に定格速度までは、すべり周波数は固定して、電圧と周波数を比例させ、電流が一定、すなわちトルクが一定になるように制御する。これを定トルク領域と呼ぶ。

インバータの出力電圧が上限に達し、それ以上は上げられない点が定格速度となり、ここからは、すべり周波数を制御することで電流一定となるように制御することになる。電圧一定で電流一定であるため、掛け合わせた電力も一定値になり、この領域を定パワー領域と呼ぶ。

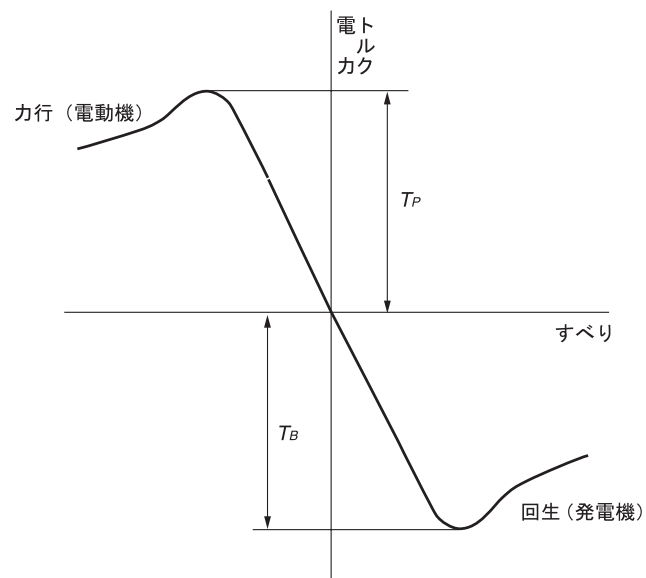
さらに速度が上がると、一定電流制御もできない領域に入り、電流は速度の上昇とともに低減することとなる。この領域を特性領域と呼んでいる。新幹線電車のように最高速度で走行する時間割合が多い電車の場合、特性領域は使わずに、最高速度でも定パワー領域になるように設計するのが一般的である（図—3）。

インバータの出力周波数と電動機の回転数（周波数に換算）とトルク特性から、回転周波数より低い周波



図—3 誘導電動機制御特性

数を与えるとトルクの方は逆転して、回生ブレーキが働くことになる。この場合のブレーキ力特性も、力行の場合の引張り特性を逆向きにした特性となる（厳密に言えば駆動装置の伝達損失分が力行では減ずる方に、ブレーキでは加算する方に働き、この分が異なる）。この結果、インバータ駆動での回生ブレーキ特性は、複巻電動機での高速での性能と、電機子チョップパでの定格速度以下での、停止までのブレーキ性能とを併せ持ったような特性となり、幅広い速度域を回生ブレーキでカバーできることになる（図—4）。



図—4 すべり周波数と力行制御、回生ブレーキ制御

インバータの出力は3相の交流であるため、この出力の相の位相を変えると電動機は逆転することになる。よって、インバータ制御の電車では、力行・ブレーキの切替と、前進・後進の切替、これら全てがインバータの制御だけで可能になり、有接点の転換器や制御器は全く不要になる。構成機器が大幅に減り、保守が大幅に簡易化される。

最近ではこれらの性能をさらに生かして、最新型の

路面電車「LRV」や常電導磁気浮上の「リニモ」などでは、停止までの全ブレーキを電力回生ブレーキのみで行う「純電気ブレーキ」も実用化されるようになった。これまでの電車では「ブレーキのためには圧縮空気が必要」というのが常識であったが、これまでの常識を覆す、圧縮空気無しで車両を構成することも可能になったのである。

12. PWM コンバータの開発による交流回生ブレーキ

主電動機の誘導電動機化は多くのメリット、特に保守上のメリットが大きいため、急速に採用が広まり、現在では主回路というとVVVFインバータによる誘導電動機駆動が当たり前になっている。しかし、新幹線電車のような交流車両ではさらに回生時の直流を交流に変換する機能の追加が必要となる。

直流電車のVVVFインバータの回路をじっくり眺めてみると、回生ブレーキ時はエネルギーは電動機(交流)側から電源(直流)側に流れていることが判る。この原理を用いれば、PWM制御で、交流を電圧制御しながら直流に変換することもできることが判る。

サイリスタ・ブリッジによる位相制御による変換で



写真一七 新幹線 300系「のぞみ」

はなく、このPWMコンバータによる交流・直流変換とVVVFインバータとを組み合わせることで主回路を構成した最初の交流電車が新幹線300系「のぞみ」なのである。

一般には新幹線でも300系から主電動機が交流機(誘導電動機)になった点だけが強調されているが、技術的に見れば、このPWMコンバータの開発が最大の成果なのである。鉄道車両ではセクションでの電力中断、セクションでの位相変化などがあり、また電圧変動幅も非常に大きい。このような電気鉄道の過酷な条件下で、PWMコンバータを実用化したことは画期的な技術開発だと言える。このおかげで、低次の高調波も小さくなり、ユニット間の位相差運転などで高次の高調波も小さく抑えることができるようになった。また回生ブレーキが可能になっただけでなく、交流側の力率も自由に制御・設定できるようになったのである。この結果、速度向上に伴い本来なら地上の変電設備の容量増強も必要になるところを、回生ブレーキの採用と力率改善により、変電設備など電力設備の増強無し(むしろ以前より電力消費量は減少したと報告されている)で速度向上が可能になったのである。

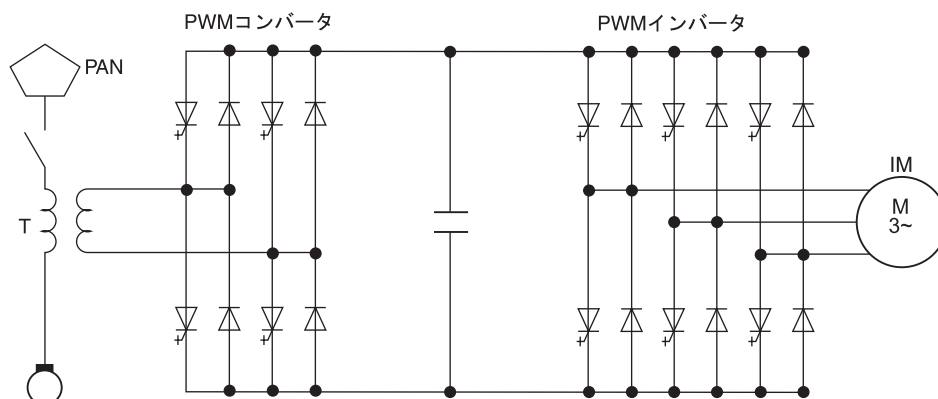
その後の交流車両は新幹線車両は当然のこと、在来線の電車・電気機関車を含めて全てこのPWMコンバータ方式が採用され現在に至っている(写真一七、図一五)。

13. 今後の課題

最後に、電力回生ブレーキに関連した地上設備と関連した今後の課題について私見を述べさせていただく。

(1) 変電所と回生車両との電圧協調

チョップ制御電車201系投入当初、思っていたより



図一五 PWMコンバータ電車主回路概念図

回生率が上らず、「お前は嘘つきだ」と非難されたことがある。実際に電車の運転台に添乗して様子を見てみると、架線電圧は絶えず上限の1650V近くにあり、これではフルには回生できないのは当たり前だと反論したことを懐かしく思い出す。せっかく回生しようと思っても、架線電圧が高い場合はそれ以上電圧を上げないように電流絞込みが働き、本来持っている回生能力は発揮できずに終る。このため、回生車両の走る線区の変電所の送出電圧は、昔のように力行時の運転性能確保のために上限近くに電圧を高く設定する考えを変え、回生ブレーキ時の電力をいかに有効に回生させるかを考慮して、適正な値に設定する必要がある。場合によっては、列車の走行密度や時間帯に応じて送出電圧を変えるなどの配慮も必要になる。

一方、大きなパワーを必要とする新幹線の場合は、交流電化であり回生電力は変電所から電力会社側に戻ることができるため、直流回生のような負荷が無くなり回生電流が架線電圧を押し上げることがあまり考慮する必要はない。このため、変電所送出電圧は上限に近い30kVのままとし、車両側のパンタ点での電圧上昇を32kVまで許容することで対応している。

(2) 回生電力の有効活用

回生ブレーキ機能が当たり前になった昨今、せっかく回生ブレーキ機能もその電力を受け入れてくれる他の負荷がなければ回生の意味も無くなる。現在の直流き電では、整流装置で直流に変換しているため、変電所から電力会社側への逆変換を期待することはできない。よって自社の系統内でこの回生電力を消費することが基本となる。回生電車誕生当初は、回生電力をいかに有効に活用するか、列車の運行ダイヤ、変電所の位置・間隔、前述した変電所送出電圧など、電気鉄道システム全体として真面目に検討を行っていた。しかしそのような検討は近年ではあまり行われていないように見受けられる。

変電所に直流から交流に逆変換する装置を設置することも考えられる。実運用となると、装置価格や効率の面で問題も多く、特定の勾配線区に設置する程度に止まるのが現実である。このため回生電力を他の車両の走行に使うことを期待するだけでなく、余剰となる電力を地上設備で一時的に蓄積するなり、他に活用するなどの検討も今後行っていく必要がある。

(3) 電力系統の保護の協調

回生ブレーキの機能はある意味では小さな変電所があちこちにある状態だと言える。このため、電力系の

異常時には回生車両はすみやかに、その異常を検知して、自らの回生電力も即遮断する必要がある。現在の回生車両は架線電圧や架線の周波数や波形を絶えず各車両独自で観測しており、この変化を捉えて事故を判断・検知する個別の検知システムを採っている。しかし将来的には地上設備と一体となって、地上からの情報・指示でアクションをとる総合システムの検討も必要となると思われる。

(4) セクション位置への配慮

回生ブレーキはパンタグラフの離線や電力中断が苦手である。ブレーキという保安機能であるため、回生がダウンしてもしばらく様子を見るといった時間的猶予は無い。回生ブレーキがダウンすると即バックアップの別のブレーキ（一般には機械ブレーキ）に移行して停止まで使い、回生ブレーキは途中で回復使用しないのが一般的である。

従来の交・交セクションは、力行条件を基本に場所が決められてきた。回生ブレーキが作用する区間にセクションがあると、そこで回生失効を生じてしまうことになる。このためセクションの位置決定は従来のような力行条件からではなく、今後はATCによるブレーキ作動区間を避けるなどを優先して決める必要がある。

(5) 停電検知システムとの共存

新幹線システムでは、架線電圧の中断を「異常」として検知し、早急に非常ブレーキをかけ、すみやかに列車を停止させるという、世界にも例を見ない保安システムを採用している。外国の技術者などは、停電すれば走るための電力は無くなるのだから停止するのは当たり前、程度にしか理解しておらず、この件の説明はいつも苦勞してきた。外国の技術者だけでなく、最近の我が国の鉄道技術者の中にも、この点を正しく理解していない人が多く見受けられる。

この停電検知による非常停止システムは架線系を鉄道線路全体の異常検知センサーとして活用する素晴らしい保安システムなのである。線路への落下物や飛翔物があり、これで地絡が生じた場合や、地震発生などの緊急事態で意識的に変電所からの送電を停止すると、車両は0.5秒以上の停電を「異常」と検知して(交・交セクションでの中断と識別するため0.5秒としている)、0.7秒後には非常ブレーキ指令を出し、停電から僅か1.2秒後には実際にブレーキが働くことになる。地上のATC信号電源の断や、ATC電源同期信号の断など、新幹線システムでは非常ブレーキを指示する

回路は複数仕組まれているが、この停電検知が一番早く、フェールセーフで、確実に動くシステムなのである。

車上からの対向列車への緊急停止の指令も、沿線からの列車緊急停止の指令も、いずれも架線を地絡させ停電状態をつくり、この停電検知機能を働かせて非常停止させることにしている。

しかし停電状態では回生ブレーキは使えない。回生ブレーキが主流となった現在の新幹線電車では、機械ブレーキだけでの高速からの非常ブレーキは、極力使いたくないのが実態である。今後は、この素晴らしい保安システムと、機械ブレーキのみでの非常ブレーキとを、どのように共存し解決していくかが、大きな課題になると私は考えている。

以上

JCM/A

【参考文献】

- 1) 山下善太郎：電気車工学，オーム社（昭和23年10月）
- 2) 佐々木拓二：電力回生ブレーキ，電気鉄道，Vol.29, No.4(昭和50年4月)

- 3) チョッパ制御方式専門委員会編：チョッパ制御ハンドブック，電気学会（昭和51年6月）
- 4) 曾根悟ほか：講座 電力回生について，電気鉄道，Vol.31, No.12（昭和52年12月）からVol.32, No.6（昭和53年6月）まで
- 5) 川添雄司：交流電気車要論，電気車研究会（昭和46年12月）
- 6) 高原英明ほか：鉄道車両用PWMコンバータの技術，鉄道車両と技術，No.46（1999.5）からNo.51（1999.10）まで
- 7) 高木亮ほか：特集 回生ブレーキをめぐる，鉄道車両と技術，No.78（2002.7）
- 8) 飯田秀樹・加我敦：インバータ制御電車概論，電気車研究会（2003年8月）
- 9) 佐々木拓二：電力回生ブレーキ技術の変遷，鉄道と電気技術（2006年3月）

【筆者紹介】

佐々木 拓二（ささき たくじ）

（1945年4月23日生）

1968年4月 日本国有鉄道に就職

元、国鉄車両設計事務所主任技師

元、(財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道開発本部 車両部長

元、(株)東芝 交通システム事業部 技監

前、(財)海外鉄道技術協会 (JARTS) 常務理事

現、(財)日本鉄道車両機械技術協会 専務理事



「建設機械施工ハンドブック」改訂3版

近年、環境問題や構造物の品質確保をはじめとする様々な社会的問題、並びにIT技術の進展等を受けて、建設機械と施工法も研究開発・改良改善が重ねられています。また、騒音振動・排出ガス規制、地球温暖化対策など、建設機械施工に関連する政策も大きく変化しています。

今回の改訂では、このような最新の技術情報や関連施策情報を加え、建設機械及び施工技術に係わる幅広い内容を取りまとめました。

「基礎知識編」

1. 概要
2. 土木工学一般
3. 建設機械一般
4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令

「掘削・運搬・基礎工事機械編」

1. トラクタ系機械
2. ショベル系機械
3. 運搬機械
4. 基礎工事機械

「整地・締固め・舗装機械編」

1. モータグレーダ
2. 締固め機械
3. 舗装機械

● A4版/約900ページ

● 定 価

非 会 員：6,300円（本体6,000円）

会 員：5,300円（本体5,048円）

特別価格：4,800円（本体4,572円）

【但し特別価格は下記◎の場合】

◎学校教材販売

〔学校等教育機関で20冊以上を一括購入申込みされる場合〕

※学校及び官公庁関係者は会員扱いとさせていただきます。

※送料は会員・非会員とも沖縄県以外700円、沖縄県1,050円

※なお送料について、複数又は他の発刊本と同時申込みの場合は別途とさせていただきます。

●発刊 平成18年2月

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>