

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 電気車制御技術の変遷と動向

国内の鉄道車両の代表格である電車は電気車の1種です。外部からの集電で取り入れた電気でモーターを駆動して走行します。1990年代以降新製の電気車はブレーキ時の電力回生機能も標準装備です。車両の速度を制御するため、モーターへの電圧や電流を調整して車輪に加える力を変化させ、加速や減速を行います。モーターの種類と性質に応じて力や速度を制御する方法と装置は、電気車制御技術として時代の技術水準に応じて発展してきました。電気車制御技術の変遷と今後について概説します。



**小笠 正道**  
Masamichi Ogasa  
車両制御技術研究部  
主管研究員  
【専門分野】電気鉄道車両の性能設計、回生有効活用の研究、蓄電形車両の開発

## 電気車制御技術の目的と要件

電気車制御の本質は、モーターの種類と特性に応じて電圧電流を調整して車輪に加える力（粘着式の場合）や推力（リニアモーターの場合）を変化させるモーター制御です。そして、車両の加速や減速を行うことで列車の速度を制御することが電気車制御技術の目的です。つまり電気車制御技術に要求されるのはひとことで言えば「与えられた走行条件下で、滑らかに起動、加速し、所定の速度で走行できること<sup>1)</sup>」です。

この要求を満たす主な技術の工夫と変遷をみてみましょう。

## 主な電気車制御方式と変遷<sup>1)2)3)</sup>

加速制御は速度に対するモーターの電圧や磁束の状態を調整しながら行います。図1に、主な電気車制御方式を示します。

### (1) 抵抗制御

電車を加速するには、速度に応じてモーター電圧を上げていく必要があります。これを実現する方法として、直流モーターと直列に可変抵抗器を設け、モーター電流が一定値以上を維持

するよう抵抗段を徐々に抜いていくのが「抵抗制御」方式です。この方式は「電気車の父」と呼ばれるスプリング (Frank Julian Sprague : アメリカ 1857-1953年) がバージニア州リッチモンド (Richmond) に17.2kmの電気鉄道を開業した1888年以降から使われ、パワー半導体が登場するまでの長い間主流でした。

どの抵抗をどのタイミングで短絡するかを回転円筒周上の凹凸による論理として実現した接点群がカム軸制御器です。その構成や抵抗段数、最小の接点動作回数で済む進段順序論理などが設計者の腕の見せ所でした。国内では1963 (昭和38) 年投入の国鉄103系電車が代表例として有名です。

### (2) 電機子チョッパー制御

パワー半導体スイッチであるサイリスター (Thyristor : 逆阻止3端子サイリスター) を直巻モーターと直列に接続し、数百Hzでオンオフして平均電圧を調整することで電機子電流を変えるのが「電機子チョッパー」方式です。サイリスターは1957年にGE (General Electric : アメリカ) 社が発表し、国内では1961 (昭和36) 年から

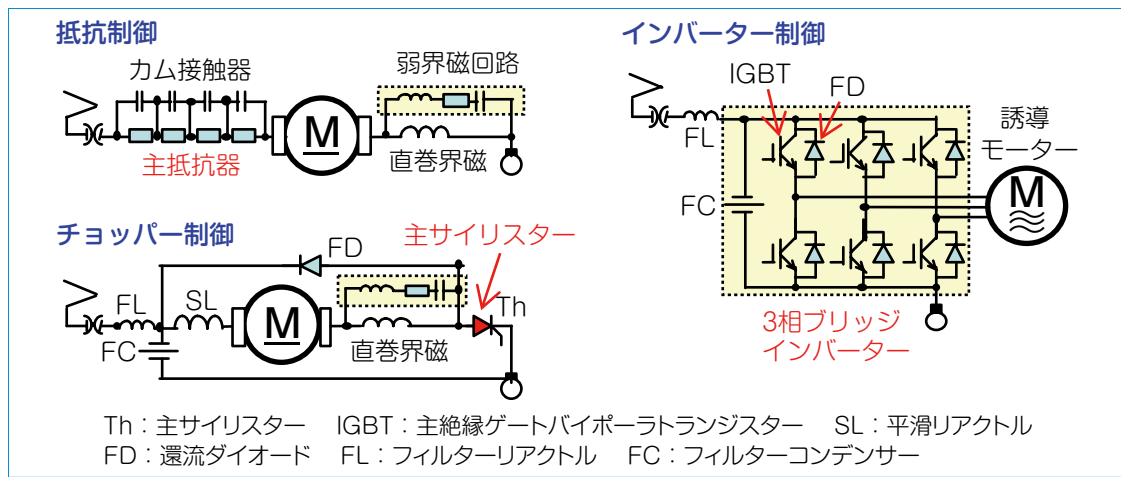


図1 主な電気車制御方式

生産が始まりました。無接点スイッチであるサイリスターのオン、オフ動作が電流を切り刻む(チョップする)様子からチョッパーの名が付いています。オンとオフを合せた周期に対するオン時間の比である「チョッパー通流率(0から1の値)」によって電圧や電流を調整します。モーター電圧の調整に抵抗器が不要なため抵抗器での電力損失が無く、その分省エネルギーです。抵抗進段時のトルク急変が無い連続制御のため、期待粘着係数も抵抗制御電車の12%程度から16%程度まで向上でき、また回生ブレーキも可能となりました。なお、弱め磁束領域では、直巻界磁巻線にのみ並列分流路を設け、抵抗制御を行って界磁電流のみを段階低減します。

世界初の営業投入は1970(昭和45)年の阪神7000系で、力行時のみのチョッパー制御でした。回生ブレーキ付きでは1971(昭和46)年からの営団地下鉄6000系電車が最初です。1979(昭和54)年営業投入(量産は1981(昭和56)年以降)の国鉄201系電車も有名です。

### (3) 誘導モーターのインバーター制御

誘導モーターの定常特性では、トルクはすべり周波数 $f_s$ に交流電圧 $V$ を乗じて周波数 $f$ で除した値に比例します。この関係に基づく誘導モーター制御が、「 $V/f$ 一定・すべり周波数制御」と呼ば

れるものです。

誘導モーターではブラシ、整流子が無いので保守が大幅に削減され、フラッシュオーバーの発生もなくなります。複数台モーターを1台のインバーターで駆動できるのも利点です。

これを実現するインバーターとして種々の方式が考案されましたが、現在の主流は電圧形3相ブリッジPWM(Pulse Width Modulation:パルス幅変調)インバーターに取れんし、パワー半導体もその後RCT(Reverse Conducting Thyristor:逆導通サイリスター)から自己消弧形のGTOサイリスター(Gate Turn Off Thyristor:ゲート消弧形サイリスター)、さらにIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor:絶縁ゲートバイポーラトランジスター)へと主流素子が変わりました。それに伴ってスイッチング周波数が上がり、低次高調波に起因する無効電力や波形ひずみは低減しました。

インバーター駆動は1960年代から英米ソ独の各国で実験が行われました。本格的な最初の営業投入はドイツ連邦国鉄120形電気機関車で1979年に試験営業に投入されました。電流形インバーターと呼ばれるものです。

国内では電圧形インバーターに的を絞った開発が行われ、営業投入の最初は1982(昭和57)年の熊本市電8200形路面電車パワー半導体はRCTでし

た。直流1500Vの電気車では、1984(昭和59)年に2ヶ月間営業試用した東急6000系改造車や同年営業投入した近鉄1251(現1420)形が皮切りで、GTOサイリスターが採用されました。その後国内では1990(平成2)年末時点で2000両を超える勢いで進展し、現在ではほぼ全ての新製車両がインバーター車両です。

### (4) ベクトル制御

1971年にドイツのブラシュケ(Felix Blaschke)が公開した方式が「ベクトル制御」です。交流モーターの3相電圧や3相電流を瞬時ベクトルとして捉え、それを磁束成分とトルク成分に分解し、制御で電氣的な直交性を維持します。負荷変動に対する高速で精度の高いトルク応答が実現しました。高速スイッチングが可能なIGBTパワー半導体と、処理容量と速度が向上した32ビットCPUの制御コンピューターの採用で、この方式が具現化し、広く普及しました。

最初の国内営業投入は、ジーメンス製ベクトル制御インバーターを搭載した1995(平成7)年のJR東日本E501系で、国産では1997(平成9)年のJR西日本223系1000台です。2000年代以降の新車はベクトル制御が標準で、チョッパー制御車を超える期待粘着係数18~20%程度(電車の場合)が得られています。回生絞込み制御が安定化し、回生

効率の向上にもつながりました。

### (5) 同期モーターのインバーター制御

1989年開業のフランスTGV大西洋線車両で実用化されたのは、電流形インバーターで電磁石形の同期モーターを駆動する方式でした。回路構成は簡単でしたが、励磁用スリップリングが残り、ブラシ交換保守は必要、といった課題がありました。

1990年代以降になると強力な永久磁石を用いた同期モーターの開発が本格化しました。永久磁石同期モーターは誘導モーターに比べて磁束を作る電力を使わない分だけ、原理的に高出力で高効率です。また小型化、軽量化が可能です。一方で同期モーター1台ごとにインバーターが必要で、複数台モーターの一括駆動はできません。

最初の営業投入は2003(平成15)年に約半年間だけ京葉線に投入されたJR東日本の改造103系電車です。抵抗制御の編成中1両だけがベクトル制御された同期モーター駆動で、かつ減速歯車の無いダイレクトドライブ(DDM: Direct Drive Motor)方式でした。現在も走行中の最初の営業車は2010(平成22)年投入の東京メトロ02系(600V架線)および16000系(1500V架線)で、こちらは通常の減速歯車方式です。

### (6) 交流電気車における整流器による間接駆動方式

整流器で直流を生成して直流モーターを駆動する間接方式は、海外で1930年代以降に車載水銀整流器が使われ位相制御まで行われていました。しかし水銀整流器は温度や真空度の制御が重要で出区準備に時間を要し、走行中振動によるアーク不安定化や点弧子脱落などの課題がありました。

一方で1950年代後半にシリコンダイオード整流器が実用化されました。国内では1955(昭和30)年に国鉄ED45形交流機関車(図2)が水銀整流器式で登



図2 ED45-1機関車(整流器式、低圧タップ切替式)

場して1957(昭和32)年から営業運用に就き、1959(昭和34)年にシリコンダイオード整流器に換装されています。

以降、変圧器タップ切換え後にシリコンダイオード整流器を介して直流直巻電動機を駆動する方式は1つの流れとなりました。1964(昭和39)年登場の国鉄0系新幹線電車では、カム軸駆動による低圧タップ切替え器を用いて主変圧器出力を25段階に降圧し、整流器で直流電圧を作っていました。

なお、PWMコンバーター登場以前の交直流車両では主変圧器タップ切換えは行わず、直流区間と交流区間で使用する回路をなるべく共通化しています。つまり主変圧器出力端子を固定し、ダイオード整流器で直流生成後に抵抗制御を行っていました。

### (7) サイリスター位相制御(混合ブリッジ・純ブリッジ)

交流電圧の正弦波1波形の中のある位相角でサイリスターを点弧して導通することで、位相角に応じた平均電圧を制御できるのがサイリスター位相制御です。整流動作と平均電圧調整を同時に行う機能を持ちます。主変圧器で降圧後の複数タップ段にサイリスターによるブリッジ回路を構成し、その出力を縦属接続することで、タップの無接点化とタップ間の連続制御を実現しました。

### (8) PWMコンバーター制御(PWM整流器)

1980年代までの交流電気車では、主変圧器で降圧後に、ダイオード整流器またはサイリスター位相制御で直流を作っていました。交流を直流に変換する整流動作の際に、電圧と電流の正弦波波形の開始点のタイミングが異なる「位相ずれ」が起こり、電力の有効成分の割合が減少する「力率悪化」が発生する欠点がありました。また、高調波ひずみと称する、波形が完全な正弦波からひずむ現象があり、これが原因で近くの通信線へ誘導障害を起こす懸念があり対策が必要でした。

PWM整流器によるコンバーター制御はドイツで開発された技術ですが、自己消弧形のパワー半導体を用いることでさらに制御性が向上しました。電圧と電流の波形の位相を合わせる力率1制御ができるようになり、無効電力を低減しました。またPWM方式で交流電源1周期の間に半導体スイッチを10~20回程度入り切りすることで、交流電圧の波形をほぼ正弦波に維持しつつ直流を作る動作が可能となり、電源の高調波を減らしました。さらに交流から直流への順変換だけでなく、直流側から交流への逆変換つまり回生動作も容易になりました。

これらによって地上設備の増強を行



図3 「Hi-tram (ハイ！トラム)」(架線・バッテリーハイブリッドLRV)

うことなく速度向上ができた実績があります。電圧形PWMコンバーターの国内初の営業車は1992(平成4)年の300系新幹線電車です。

## 電気車制御における鉄道技研、鉄道総研の役割

### (1) 交流電車用PWM整流器方式の黎明期の研究開発(1980年代)

もともと北陸新幹線用に国鉄が開発を開始したのがPWMコンバーターで、1985年頃から本格化しました。鉄道技研、鉄道総研ではJR移行前後の1985年から1990年頃にかけて、交流回生車が架線停電時においても力行車とバランスして架線停電を認識できず、緊急ブレーキが動作しない懸念を提示しました。実際にサイリスター位相制御による力行車とPWMコンバーター制御による回生車がほぼ同じ電力でバランスする状況の発生を、新旧それぞれの車両試験台に載せた試験車両を同時走行させて実証しました。停電検知手法の必要性が認識され、その後の停電時の周波数ずれを検知する方式などにつながった重要な試験でした。

### (2) 回生蓄電併用による蓄電池駆動方式の黎明期の研究開発

鉄道総研では1990年代末以降、車載蓄電による回生有効活用の研究開発を進めました。架線レス走行、架線ハ

イブリッド制御技術や剛体架線からの急速充電を開発しました。2007(平成19)年登場のLRV試験電車LH02「Hi-tram (ハイ！トラム)」を用いた札幌市内軌道線、JR予讃線、万葉線などでの走行で、無給電航続距離、省エネ効果、ピーク電力抑制効果などを確認しました(図3)。

これら一連の技術をベースに同様な蓄電搭載形車両が各事業者やメーカーなどから登場しています。2014(平成26)年にはJR烏山線で蓄電池駆動電車が営業走行を始めています。

## 電気車制御技術における国内外の動向と今後の研究開発

### (1) ハイブリッド電源形車両

蓄電装置を搭載した電車、気動車、機関車が増えており、海外でもハイブリッド気動車や架線とバッテリーのハイブリッド電車が登場しています。2015年6月には台湾・高雄で距離22.1km、36停留場の全線架線レスLRTが営業開始予定で、2014年8月にスペイン製の超低床LRVが現地に搬入されています。今後この種の車両の導入が進むでしょう。

### (2) SiCパワー半導体素子を用いた電力変換器

SiC(シリコンカーバイド)材によるパワー半導体(図4)は、Si(シリコン)



図4 フルSiCモジュール

材によるパワー半導体と比べて、①より高い周波数で使える、②より高い温度環境で使える、③より高い耐電圧まで使える、といった特長があります。同一寸法の変換器ならパワーを上げて車両性能を向上し、同一パワーの変換器なら小型軽量化して車載空間を有効活用できます。鉄道車両への適用は日本が早く、2012(平成24)年に東京メトロ銀座線1000系で600V架線用のSi-IGBTとSiCダイオードのハイブリッド形インバーターが、2014(平成26)年には小田急1000系で1500V架線用のフルSiC(FET, ダイオードともにSiC)インバーターが営業投入され、長期耐用での確認が行われています。

## おわりに

今後も新しいパワーまたはエネルギー変換素子や媒体の投入で、新たな電気車制御方式が登場する可能性があります。先人の業績を謙虚に学んだ上で新しい価値を付加していくことは、私たちに課せられた重要な使命の1つと考えています。[RRR]

## 文献

- 1) 油谷浩助：電気車の速度制御方式の変遷，鉄道技術140年のあゆみ，pp.139-160，2012
- 2) 野本浩：走る，電車基礎講座，pp.5-91，2012
- 3) 川添雄司：交流電気車発達史・種類と諸元，交流電気車両要論，pp.1-50，1971