

第59回

電車の制御方式

はじめに

電車は、電気をモーターに流して加速・減速する鉄道車両です。鉄道の発展のなかで、さまざまな電車の制御方式が登場してきました。我が国では、直流モーターや抵抗器と、両者の組み合わせを変えるための機械的スイッチにより構成された主回路の電車が、20世紀半ばまで広く使用されてきました。半導体技術の進展により、1980年代からは交流モーターとVVVFインバーター装置により構成された主回路の電車が登場し、現在では広く一般的に普

及しています。VVVFとは「Variable Voltage Variable Frequency：可変電圧可変周波数」の頭文字であり、インバーター装置が出力する交流の特長を端的に表現しています。ここでは、電車の制御方式に関する歴史と今後の展望について紹介します。

主回路とは

電車を加速・減速させるための走行用モーター（主電動機）は、電車に欠かせません。また、電車がA駅から出発してB駅に停車するためには、主

電動機の回転速度を連続的に変化（可変速制御）する必要があります。電車の主電動機を可変速制御するために必要となる、高い電圧の電気が流れる電気回路を「主回路」と呼びます（図1）。主回路は、外部から電気を取りこむための集電装置、主電動機に流す電圧や電流などを調整するための電力変換装置、電車の走行に不可欠な主電動機、レールに電気を流すための接地装置により構成されており、電

車の制御方式の歴史は、電力変換装置の歴史でもあります。電車の種類や外部から受け取る電気の種類（直流、交流）によって、主回路を構成する電気機器は変化します。ここでは、それらの代表的なものを例に、電気機器の構成や機能について紹介します。

直流モーターの可変速制御

世界初の電車の営業運転は、1881年のドイツのベルリン市電であったといわれています（図2）。日本初の電車の営業運転は、1895（明治28）年の京都電気鉄道です。路面電車を中心に電車の運行がはじまり、はじめて鉄道路線（路面電車は軌道）で電車が使用されたのは、1904（明治37）年の甲武鉄道（今の中央線の前身）飯田町～中野間でした。なお、甲武鉄道は1906年に鉄道国有法に基づいて国有化されています。

日本国内では、主電動機として直流モーターが長い間使用されてきました。この理由の1つは、モーターに流れる電流を調整（制御）することで、可変速運転を実現できるためです。直流モーターは、電流によって磁界を作る「界磁部（固定子）」と、磁界中にある金属（導体）に電流を流すことで力を受けて回転する「電機子（回転子）」で構成されます（図3）。電車の直流モーターには、電流を調整することでモーターが発生する力、つまり電車が必要

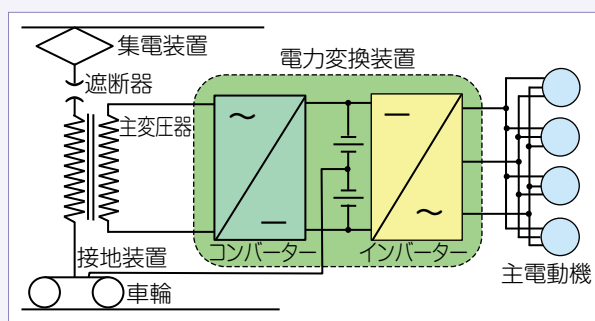


図1 電車の主回路の例

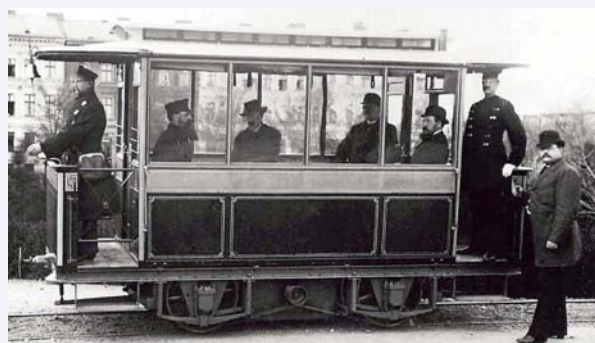


図2 ジーメンス電車

出典：Public domain, via Wikimedia Commons

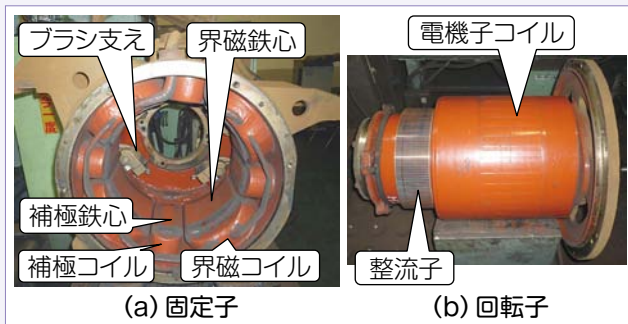


図3 直流モーター



図4 主制御器(一部)

とする加速度・減速度を得るための機能が必要です。これを実現するために、カムで動作するスイッチ類で構成された「主制御器」と呼ばれる装置と抵抗器を用いて、電車の速度や必要な加速度・減速度に応じてスイッチを開閉する「抵抗制御」が普及しました(図4、図5)。

抵抗制御は、電車の制御方式として長い間使われてきましたが、抵抗器での損失やスイッチの荒損などが課題でした。

半導体技術の進歩と電車への適用

半導体とは、オンとオフを切り換えることができる電気的なスイッチとして動作するもので、もっとも基本的なものがダイオードです。ダイオードは、加えられる電圧の向きによってオンとオフが切り換わります。交流を直流に変換する水銀整流器に代わる小型・軽量のシリコン整流器にダイオードが使用され、交流電車を実現するうえで大きな役割を果たしました。その後、オンさせる時期を制御可能なサイリス

ターが出現し、1960年代頃からMG(電動発電機)に代わるSIV(静止型電源装置)や、さまざまな種類のチョップパ制御へ適用されました。

チョップパ制御とは、抵抗とスイッチの開閉で実現していたモーター電圧の制御を、半導体のオン時間とオフ時間の長さの和に対する、オン時間の割合を通流率と呼び、出力平均電圧は、電源電圧と通流率の積で求めることができます。図6の例では、通流率が0.50、出力平均電圧が750ボルトになります。

オイルショックによる省エネ化の推進を背景に、半導体技術によって機械的なスイッチを電気的スイッチへ置き換えた、チョップパ制御などの新しい主回路方式の検討・実用化が進みました。この結果、回生ブレーキ(電車のモーターで発電した電気を、ほかの電車を使うことでブレーキ力を得る方法)の利用も拡大しました。

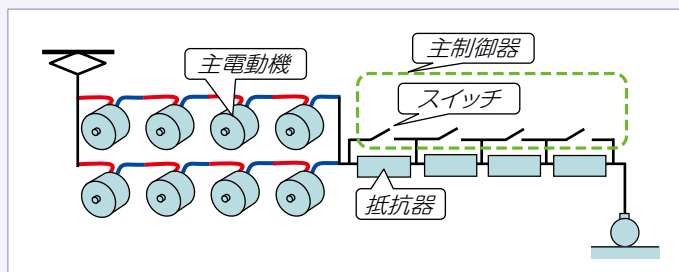


図5 抵抗制御

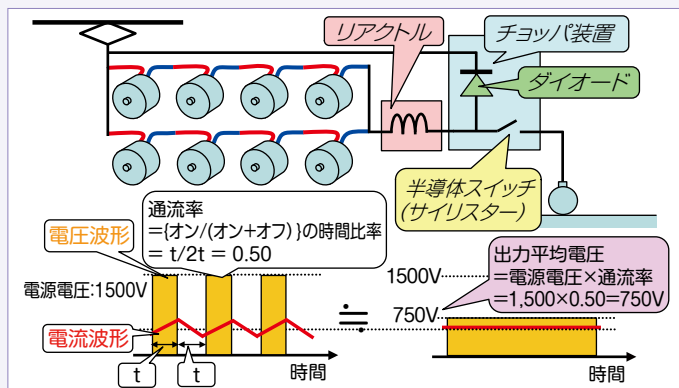


図6 チョップパ制御の概要

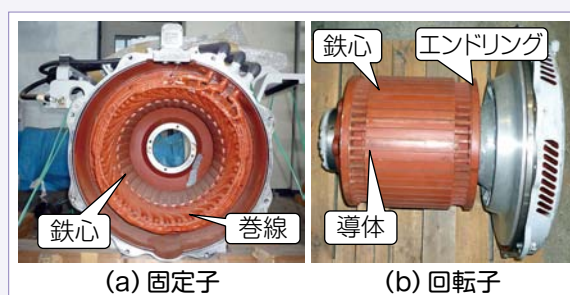


図7 交流誘導電動機

インバーター装置の出現

サイリスターはオンさせる時期だけ制御することができましたが、逆方向に電圧を加えることでしかオフさせる時期を制御できませんでした。サイリスターをオフさせるための回路が不可欠で構成が複雑となることから、直流電源に接続されたサイリスターの使用は用途に限られていました。

半導体技術の進歩により、オフさせる時期も制御できるGTOが登場したことで用途が大きく拡大しました。GTOとは、「Gate Turn Offサイリスター」の頭文字であり、ゲート端子に逆電流を流すことで、サイリスターに加える電圧の向きを変えることなく、サイリス

ターをオフさせる時期を制御できます。このGTOが出現したことで、VVVFインバーター装置と、交流誘導電動機を組み合わせた、インバーター制御が広く普及しました(図7)。インバーター装置は、電気的なスイッチである半導体のオンとオフを高速に切換えることで、直流を交流に変換しており、出力される交流電圧の制御にはPWM方式が広く使用されています。PWMとは、「Pulse Width Modulation:パルス幅変調」の頭文字で、半導体がオンしている割合(パルス幅)で電圧を制御する方法です(図8)。このように、半導体のオンとオフの時間割合や、1秒間に+と-が切り替わる回数(周波数)を調整することで、交流モーターへ出力する交流電圧の大きさと周波数を制御しています。

GTOを使用したインバーター装置は、1980年頃から2000年頃までに新製された車両で広く使用され、1秒間に500回程度のオン/オフ切換(スイッチング)ができました²⁾。大容量のGTOを使用することで、1台のインバーター装置で8台の誘導電動機を一括制御する電車も登場しています。モーター回転数に応じて、1秒当たりのスイッチング回数(スイッチング周波数)を段階的に変化させる「パルスモード切換」が行われ、速度によって磁歪音(通電による伸縮で発生する音)が変化していました(図9)。主電動機に電気を流す際にどうしても発生してしまうことから、

「ドレミ…」の音階を放つ、遊び心を感じさせるインバーター装置も登場して話題になりました。GTOインバーター装置の小型化・軽量化には、ゲート電流を流すための転流回路が大きな制約となっていました。近年では、電車で使用している耐圧・電流量クラスのものGTOは国内製造が終了しており、保守用部品の確保にも課題がでてきたこともあり、GTOを用いたインバーター電車の数が大きく減少しています。

IGBT+交流モーターの電車

現在走っているインバーター電車の大部分が、IGBTという半導体素子を使用したインバーター装置を搭載しています。IGBTとは、「Insulated Gate Bipolar Transistor:絶縁ゲートバイポーラトランジスター」の頭文字であり、ゲート端子に加える電圧の大きさだけで、スイッチングできる特徴があります。

IGBTのインバーター装置が導入されはじめた1995年頃は、IGBTの耐電圧が1,700V程度と低かったことから、直流1,500Vの電車では3レベル方式の回路構成が採用されていました²⁾。3レベル方式では、0、E/2、Eの3通りの電圧を出力できることから、正弦波に近い滑らかな交流を出力することが可能です。また、IGBTの耐電圧も電源電圧と同程度のものを使用できるため、3,300Vの高い耐電圧を持つIGBTが出現するまでは、3レベル

方式のインバーター装置が鉄道車両駆動用に広く使用されました。

IGBTの耐電圧が向上したことで、2000年頃より2レベル方式のインバーター装置に移り変わり、現在の主流となっています。2レベル方式では、0、Eの2通りの電圧のみが出力できますが、必要となる素子の数が半減するため、装置の小型化・軽量化には有利となります(図10)。

交流電車の制御

交流電車は、車上で交流を直流に変換し、それ以外は直流電車と同じ制御を使用しています。半導体技術の進歩により、交流を直流に変換する電気機器も、シリコン整流器からサイリスター位相制御整流器、PWMコンバーターへと変化しています。PWMコンバーターは、1990年に登場した300系新幹線を皮切りに普及しました。チョップ装置やPWMコンバーター、VVVFインバーターは、高速でオンとオフを繰り返すことから、電気的なノイズが発生します。これらの装置には、信号・保安装置といった鉄道地上設備

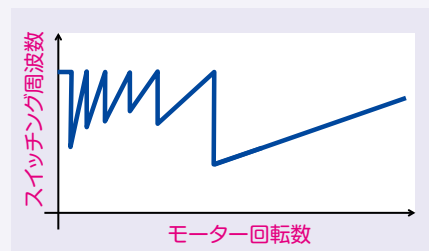


図9 パルスモード切換

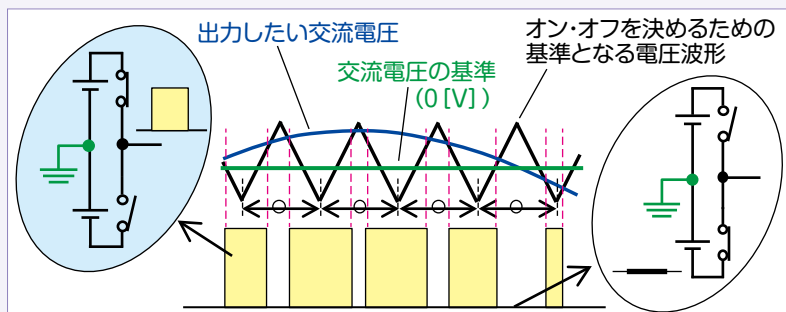


図8 PWM方式の概要

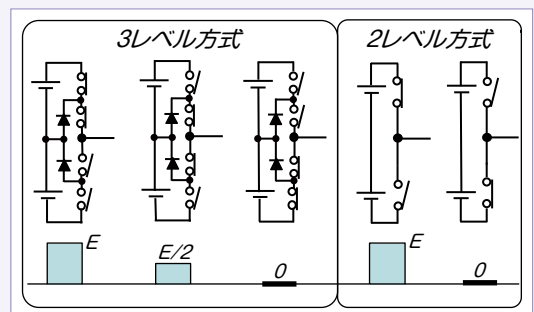


図10 回路方式と出力電圧レベル

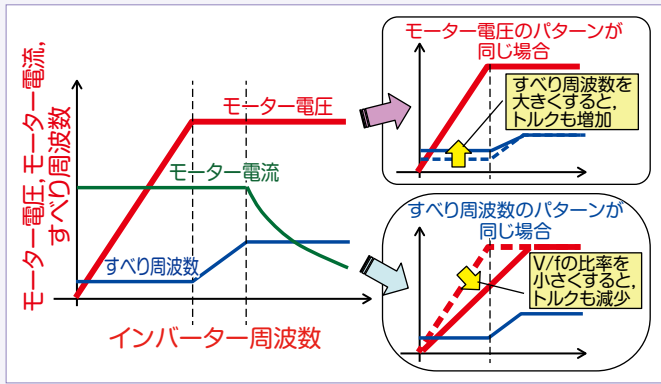


図11 V/f一定・すべり周波数制御

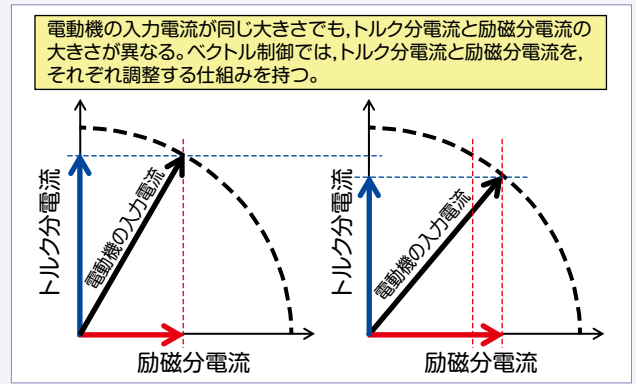


図12 ベクトル制御での電流成分

の動作に悪影響をあたえないことが求められます。このような背景もあり、現在の交流電車はコンバータ部が3レベル方式、インバータ部が2レベル方式の車両が主流となっています。

交流モーターのベクトル制御

主電動機に誘導電動機が使用された当初は、「V/f一定・すべり周波数制御」(以下、すべり周波数制御)と呼ばれる方法が使用されました。すべり周波数とは、モーターに加える周波数(インバータ周波数)とモーターが回転する電気的な速さ(周波数)の差で、誘導電動機が力を出すためには、欠かせないものです。すべり周波数制御(図11)では、モーターの回転速度(回転周波数)の上昇に応じてモーター電圧:Vを制御すると同時に、インバータ周波数:fを増加させます。また、モーターのトルク(力)は、V/fの比率(傾き)と、すべり周波数の大きさによって制御しています。この方式は、半導体のオン/オフを決めるための計算量が比較的少ない点が特徴です。

現在では、「ベクトル制御」と呼ばれる方法が広く使用されています。ベクトル制御では、モーター電流を、磁界に寄与する成分(励磁分電流)とトルクに寄与する成分(トルク分電流)に分解し(図12)、それぞれを個別に計算しながら、モーター電圧とすべり周波数な

どを制御してモーターを回しています。座標変換や各成分の個別計算が必要となることから計算量も多く、高い処理能力を持つマイコンが登場するまでは実現が困難でした。ベクトル制御では、すべり周波数制御よりも、速く細かなトルク調整が可能となっているため、車輪の空転や滑走によって加減速性能が低下してしまうことを防ぐための、再粘着制御の高性能化にも寄与しました。

制御方式の今後

2011年頃からは、シリコンをベースとしたIGBTよりも、オン/オフ切替が速くて高温条件下での動作性能が安定したSiC(炭化ケイ素)半導体を電気スイッチに利用した、インバータ装置の適用拡大が次第に進んでいます。SiCは動作温度範囲が高いことから、放熱器の冷却性能を見直すことで小型化・軽量化につなげることができ、また、1秒当たりのオン/オフ切替速度をシリコンベースの半導体素子よりも速くすることで、2レベル方式でも高いEMC性能の確保につながります。PMSM(永久磁石同期電動機)の適用と、回生ブレーキのみが動作する速度域の拡大(電気的なブレーキだけでは十分な減速度が得られない場合、機械ブレーキも同時に使用されています)などにより、従来のGTOインバータ車と比べて消費電力量を約30%

削減したとの報告もあります³⁾。今後も、しばらくの間はIGBTを使用したインバータ装置が主流であると予想されますが、GTOからIGBTへと大きく変化した時と同様に、高耐圧化・大電流化が実現されることで、SiCを使用したインバータ装置が主流となる日も近いと考えられます。

ハイブリッド自動車や電気自動車の普及が拡大するにつれて、電車の制御方式も高度化・高精度化に向かうとともに、IoT(モノのインターネット: Internet of Things)やICT(情報通信技術: Information and Communication Technology)をはじめとした、機械相互間での情報通信に関する技術の適用が、さらに拡大すると見込まれます。たとえば、これらの技術を組み合わせることで、加減速指令を受け取るための無線通信装置を内蔵したインバータ装置を主電動機に一体化した、全自動運転の無人電車が走る日も近いかもしれません。

(古谷勇真/車両制御技術研究部
動力システム研究室)

文献

- 1) 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
- 2) 曾根悟: インバータ制御の20年, 鉄道車両と技術, pp.2-6, No.76, 2002
- 3) 中口勝己, 山口健一ほか: DC1500V架線対応フルSiC適用VVVFインバータ装置実証結果について, 鉄道車両と技術, No.225, pp.10-14, 2015