

《営業マンのための鉄道技術講座》

電気車の駆動制御のしくみ

三菱電機(株) 交通システム事業所 車両システム部 菊池 高弘
三菱電機コントロールソフトウェア(株) 伊丹事業所 加我 敦

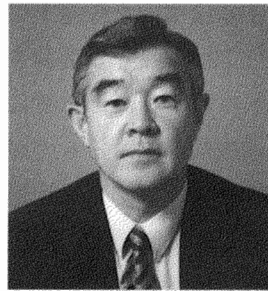
はじめに

電気鉄道の始まりは1879年にベルリンの博覧会場で、ベンチを背中合わせにして車輪をつけた6人乗りの客車3両を直流電気機関車で牽引して走行したものとされている。わが国ではその11年後1890年に、上野公園で催された博覧会で路面電車方式の電車が走った事が最初である。以来100年ほど直流電動機を用いたシステムが主流を占めていた。

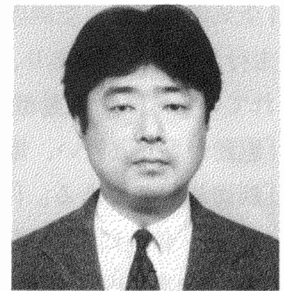
しかしながら「直流電動機」は回転しながら磁極を切り替えて回転力を得る方式のため、図1に示す整流子やブラシ、軸受など機械部品の保守を頻繁にしなければならない上に信頼性もあまり高いものではなかった。(図1：直流電動機の構造 「図解電気の大百科」オーム社)

一方誘導電動機は交流の誘導作用を利用して磁極を移動(回転)する方式で、構造も単純なことから保守部分も少なく、信頼性も高いために鉄道車両に適用しようという考えがあった。図2に示す例は代表的工業用の誘導電動機である。図1の直流電動機に比較して整流子やブラシは無く、簡単な構造であることがわかる。(図2：「図解電気の大百科」オーム社)しかし、誘導電動機を駆動制御するためには大容量の変圧装置の交流発生装置が必要であるが、車両に搭載できる大きさや重量でまとめる技術を提供できる時代はなかなか到来しなかった。

漸く1970年頃から数千ボルトの電圧に耐えられ、数千アンペアの電流を遮断できる半導体が実用化された。1980年代になって誘導電動機を駆動制御する「交流可変速制御(VVVFインバータ制御)」が実用化され、今日では既に車両の制御の方式として一般になっ



加我 敦



菊池 高弘

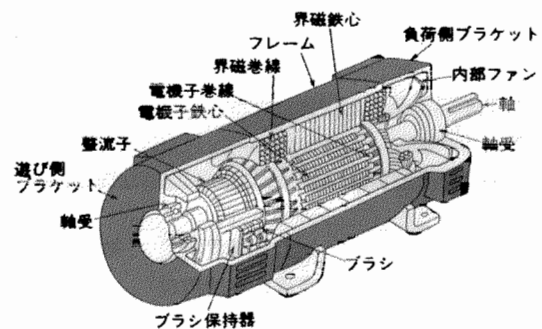


図1 DCM

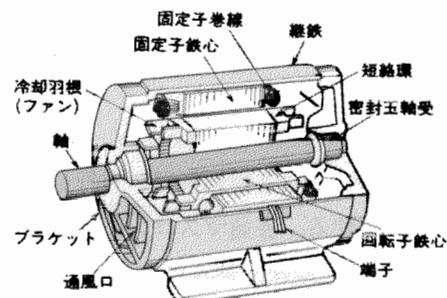


図2 ACM

ている。

本論はこうした電気車両の電動機と制御の原理ならびに実際のシステムをできるだけ平易に説明してみたい。平素車両制御に興味のある方々に車両駆動制御の技術的な理解の一助になれば幸いである。

1. 電気車の実態

1-1 電気車の構成

初めに電気車のシステムの概要を紹介する。図3は代表的な通勤電車の俯瞰図で、屋根の上にある装置が「空気調和装置（空調機）」、床下には車両を線路上で走行させる台車があり、この全てにブレーキが装備されている。また電動機が装架されている台車を特に「駆動台車」と言い、電動機と速度制御をするものが「制御装置」である。「空気圧縮機（コンプレッサ）」は減速・停止に用いる圧力空気を込める装置で、低圧の電力を車両内に供給する機器が「補助電源」である。その他には「車両情報制御装置」や「無線機」などが装備され、これらの機器が役割分担をしながら一つの車両編成をシステムとして安全に走行させている。

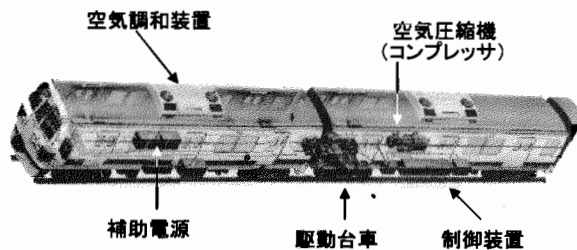


図3 車両の機器構成

1-2 電気車実際の運転

電気車では、編成内に装備されている制御装置は運転士からの指令によって総括的に制御されるシステムになっている。まず運転士がどのようにして車両の加速減速を行っているか、装置はどのように反応しているかを説明する。

(1) 加速モード

運転士はマスコン（主幹制御器／力行ハンドル(注)）を操作して運転する。普通マスコンには4つのハンドル位置（「ノッチ（Notch/刻み）」）があって、それぞれのノッチには各々の「最高速度」が決められている。

(注)：「力行」はカタカナの「カ」ではなく、「ちから」と「行」で「りきこう」と言い、「加速」を意味している。

① 1ノッチ：

車両は起動するが、ほとんど加速しないように設定されている。このノッチは駅や基地での連結や、他車または車止め直前で、自車両の位置をほんの少し修正する時（インチング）に用いる。起動しても大きく加速せずに、徒歩程度の速度でしか走行しないため、微妙な位置決めの場合に危険を伴うことなしに操作することができる。

② 2ノッチ：

40km～50kmほどの速度域で均衡する。車両の前方に何か制限がある場合など、様子をみながら運転する場合に用いる。

③ 3ノッチ

80km～90km近傍で均衡する。2ノッチと同等な扱いであるが、更に高速まで運転できる場合に用いる。

④ 4ノッチ

最高速度まで、自由に走ることでできるノッチで、通常の走行に用いられる。

このように電気車の加速は自動車のマニュアル運転で行う、「1st」「2nd」～「4th」までのギヤシフトと均衡速度の関係は大変似ている。しかし、自動車の場合はアクセルにより自在に加速度を変えることが出来るが、電気車の場合は定時走行のため、一定の加速を行うようになっている。また自動車の場合は速度域に応じてギヤを切り替えて行かなければならないのに対し、電気車はそれぞれのノッチはそれぞれの最終速度に向けて一括して加速できるようになっている。

図4に示すグラフがノッチ対応の電気車のトルク特性で、乗車率が200%の場合のものである。トルクが一定のところ（約33km）までは一定の加速度で加速するが、その後の加速度は落ちて空気抵抗などの走行抵抗や勾配と均衡する速度になる。

この「加速特性」は乗客が閑散な場合でも満員でも自動的に電流を補正し、加速度（トルク）が一定になるように制御されている。自動車の場合には乗員が多

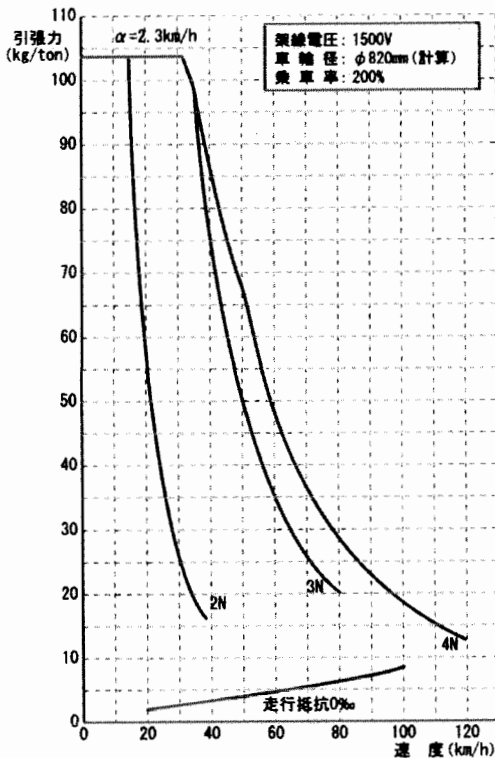


図4 ノッチ曲線

くなるとアクセルの踏み込みを大きくする必要があることと比べて戴きたい。運転士は起動時、その時点で走るべき最高速度に見合ったノッチを選ぶと、車両は図4の特性に従って加速して行くことになる。

状況によってはノッチを順次進める場合もあるが、この場合選択された上位のノッチが最終特性を決める。一般にはノッチを下位に戻してもその特性に復帰することはできないので、下位のノッチを選択するには一度ノッチをオフの位置にして再度設定しなおす必要がある。

(2) 減速（ブレーキ）モード

車両の減速・停止（ブレーキ）には「ブレーキハンドル」を操作する。現在のブレーキハンドルのノッチ数はデジタル的に7段のものが多く、アナログ的に無段（連続）の方式も存在する。

減速力（ブレーキ力）はハンドルの位置によって指令されるようになっており、前述の「力行ハンドル」のノッチの指令が「最高速度」である事と大きく異なる。段数の低いノッチまたは、ハンドルを浅く引いた場合は低い制動力で、ノッチが高くなるかハンドルを

深く引くにつれて制動力は強まる。

さて、ブレーキハンドル位置からの指令も荷重（乗車率）の変化によって制動力が変動しないように制御されている。すなわちブレーキハンドルの指令を「ブレーキ制御装置」がそれぞれのノッチに対応した減速度になるよう補正し、最終的には台車のブレーキ装置の空気圧を制御する。

空気ブレーキの基本原理である「車輪の鉄板を押し付ける」という方式には、常時安定なブレーキ力を得られないという難点がある。理由は車輪と鉄板のすり合わせ面は速度、温度や水などの要素によって、摩擦力（粘着力）が変わってしまうからである。たとえば温度が上昇したり水分があったりすると摩擦力が小さくなって滑りやすくなる。運転士はこうした走行状態を認識しながら目標の減速度になるように、ハンドル位置を調節しながら停止して行く。

余談になるがこのブレーキ力は、乗客の込み具合、天気の状態、速度などで変化する。例えば雨天の日のラッシュ時では、雨に濡れたブレーキシューは滑り易い上に車両重量が重いために所望の減速度が得られず、所定のブレーキハンドル位置で駅に進入すると時として行き過ぎてしまうことになる。この時に停車位置を修正したりするとここで遅延を招く。そこで次の駅で慎重になって低速で進入すると、今度は停止までに時間がかかって更に遅れが重なり、減速力の調節が過度になると乗り心地が悪くなって乗客からも文句がでる。

加速は滑らかであるのに、減速は乗り心地が悪い時があるのはこのような理由である。この対策として、最新のインバータシステムでは電気ブレーキを十分に活用できる状況をつくり、摩擦（粘着）に依存しない安定したブレーキを実現している。

2. 電動機の回転制御

停止している車両を加速する場合には徐々に電動機の回転を速める必要がある。急発進を行えば、乗客の乗り心地は悪くなるし、電動機を含めた台車や車輪、線路に大きな力がかかり損傷を与えることになる。ましてや車輪も空転して加速できないことになる。以下

に実際に行っている車両の加減速（電動機の制御）の概念を紹介する。

2-1 直流システムと回転体の加速

直流電動機を加速する基本原理は図5に示す水車による回転体の加速を思い浮かべて戴きたい。基本的には、水車があってその羽の近傍に水の噴射口があり、そこから吹き出た水が水車の羽に当たって回転力となる。

ここで、停止している水車を「徐々に」加速させる方法として水量を徐々に増やして行けばよいが、それには2つの方法が考えられる。

第一は図5の制御Ⅰになる。水の取り入れ口の大きさを制御して、水量を変えるのである。噴出口の水量を初めは少なくし、徐々に取水口を広げて水量を多くする。（図6 a）

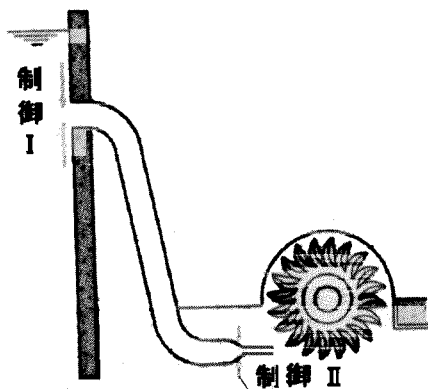


図5 水車と水流制御

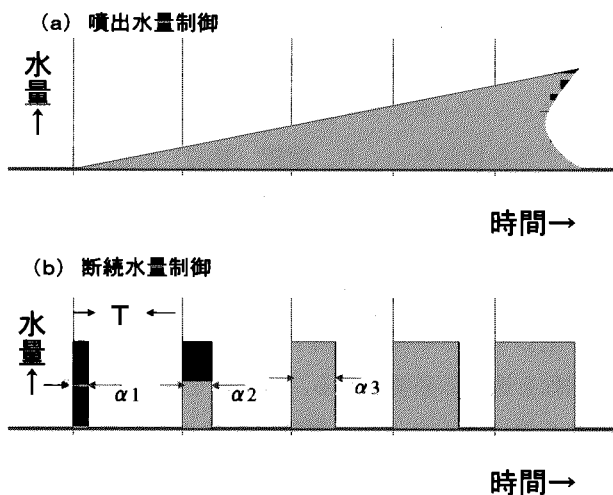


図6-a.b 噴出時間制御

この方式は「カム式制御システム」に相当し、水量を変化させるのが抵抗器と機械的な「カム」を用いたスイッチ群操作の方式である。

第二は図5の制御Ⅱで、噴出口から流れる水を一定の時間ごとに噴出、断続させるものである。ただし注水時間は速度によって変化し、低速時は注水口の開く時間は短く、加速するにつれて徐々に開口時間は延びて行く。（図6 b）

この概念は「チョップ制御システム」に相当する。

2-2 交流システムと回転体の加速

交流は図7のように、時間とともに大きさと向きが周期的に変化する。図の交流の電圧（電流）曲線には方向「±」の変化の境に「0」になる瞬間がある。蛍光灯も交流で点灯していることから当然この「0」の瞬間があるので、人間の目には感知してはいないが実際には点滅を繰り返している。

こうした特長を持つ交流であるが、変圧器（トランス）のように二本の独立の電線を鉄心に巻いて片方に交流を流すと、もう一方の電線にも交流を誘起させることができる。これを交流における「誘導作用」と言い、図8に示す。

この現象を利用して誘導電動機は回転するが、ここで交流で速度制御をする概念を説明する。図9のように往復する水流によって動くピストンがあり、これが

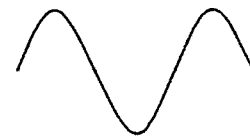


図7 交流波形

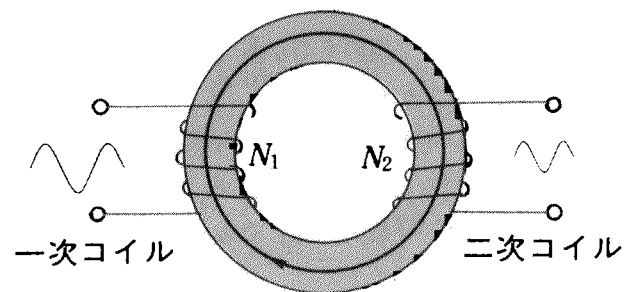


図8 変圧器

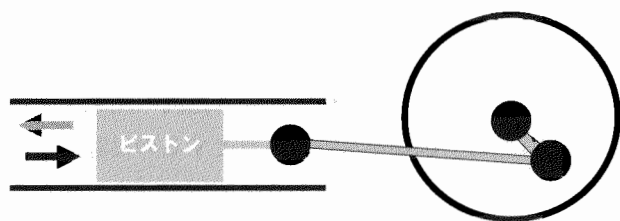


図9 ピストン機関

クランク軸を介して円盤を回転させる概念になるだろう。しかし回転体はこの左右の動きの速さ（波の動き）以上に速くなることは出来ない。そこで、加速には往復水流の周期を初めは長く、徐々に短くしていかなければならない。

図10は往復水流を作る概念で、水が流れ込む上流のバルブから左右に水を分留するパイプ「①」「②」の2本に分かれる。これら「①」「②」のパイプの根元にはバルブがあって、一定の時刻ごとにどちらかのバルブを締め切る。これによって水は左右交互に流出する。図では「①」のパイプに水が流れる状態にある。この水流はピストンをその流れの方向に押し出すことにより、ピストンの移動によって排水孔が開いて排水される。その後バルブが移動して「②」に流れ込むことになる。ところでこのバルブの切り替えで往復水流を発生させて歯車を回転させる場合においても、停止から加速までの途中は徐々に往復水流を強めないで機械的な損傷を与える恐れがある。したがって図10のように開閉の「時間」と「周期」を変化させて行くこ

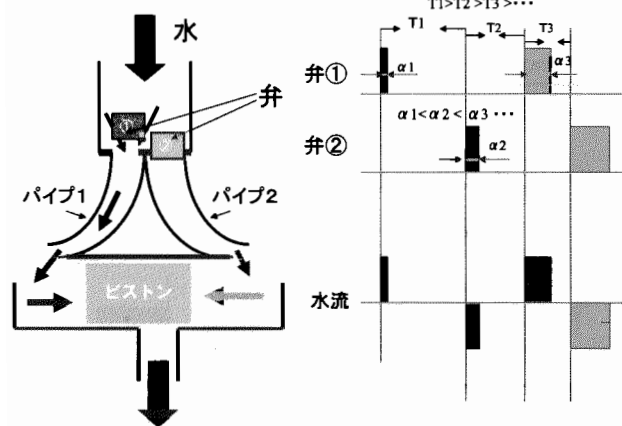


図10 往復水流

とで可変速が可能になる。実際にはインバータシステムがこの可変の水流にあたる交流を生み出している。

3. 実際の車両の制御

電車を走行させる電力源は直流と交流とがある。架線（電車線）からどちらかの電力が供給されて制御装置を介して直流電動機また交流電動機を駆動制御している。

しかし、図11に各制御システムを示すように、整流器以外のシステムでは架線の電源の種類と電動機の種類とにかかわらず、制御装置の入力は「直流」になっている。

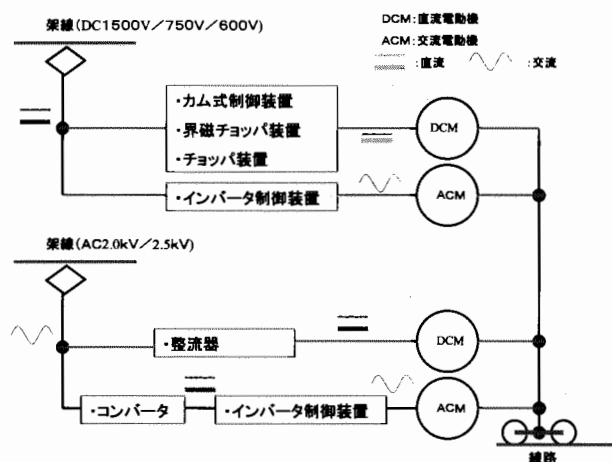


図11 制御システム一覧

3-1 直流電動機駆動システム

(1) カム式制御システム

通常、車両の電源は1500Vである。水車の説明と同じようにこの1500Vを突然に停止している電動機に印加するわけにはいかない。直流電動機でも回転の止まっている状態から徐々に加速するには、やはり水車の加速と同じ感覚で、電気の強さ（流れ）を初めは制限して少しずつ強くし（増やし）て行くことになる。

図12に示すものが「カム式制御システム」の概念図である。電気は架線からパンタグラフを介して抵抗器と直流電動機とが直列に接続された回路があり、最後は台車から線路に帰って行く。この抵抗器にはスイッチがあって、低速時は「A」の位置にあり、順次「B」の位置から「C」の位置に移動する。「A」の位置では抵抗の全てが直列に接続された状態になってい

る。この状態では挿入された抵抗のために直流電動機に流れる電流が少ないので電動機の力は小さく、車両は徐々に加速し始める。スイッチはこの回転状態を見ながら図の右の方向に接点を切り替えて行く。この結果「B」の位置では抵抗は半分くらいとなり、最後は「C」の位置になって抵抗は完全に短絡され、パンタグラフから直接直流電動機に電気が流れ込むことになる。図13は実際に抵抗の切り替えをするスイッチの一例である。

(2) チョップパ式制御システム

水車による例えで、噴出孔を定期的の開閉することを説明したが、実際のチョップパシステムの基本構成は図14のように、パンタグラフからスイッチを経由して直流電動機に接続されている。

このスイッチは一定の周期 (T) でON/OFFし、そのON時間 (α) は電動機の回転数に応じて拡大していく。チョップパ (Chopper) は動詞のチョップ (Chop) の名詞形で斧、鉋などで叩き切るもの、ぶつ

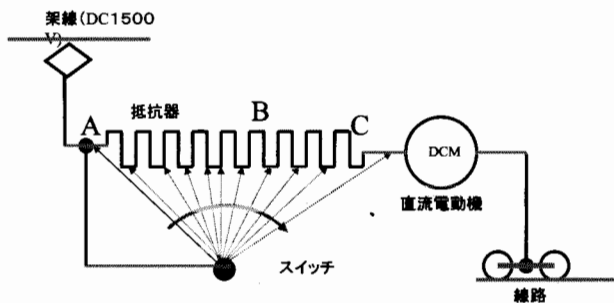


図12 カム式制御の概念

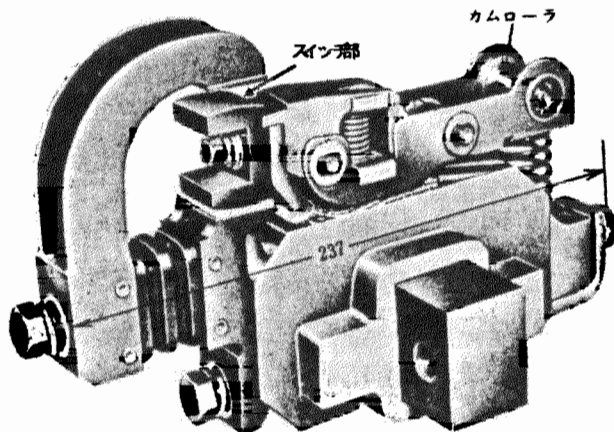


図13 カムスイッチ

た切るものという意味である。しかもこの動作を繰り返す意味合いが含まれている。

ところで、こうした1500Vという直流の高電圧回路で「切り刻む」制御を実行しようとするのは容易ではない。交流は方向が変わるときに電圧が「0」になるモードが必ずあるが、直流は電気の流れる方向が常に一定であるため、この変わらない電気の流れを強引に遮断する作業は容易なものではない。ちょうど水の流れを止める場合に「川」では大変だが、「海辺」では波の「寄せ」と「引き」の間を狙えば比較的容易に止めることができるという概念になる。

それでも図13に示した機械的なスイッチを強化すれば強引に遮断できるであろうが、実際には1秒間に300回以上のON-OFFをしなければ電動機は安定な動きを得られない。このような機能には半導体があって初めて可能になる。

図15にチョップパ制御システムの代表例を示す。図において、「チョップパ」が半導体による主回路システムである。電機子チョップパ全体の構成は電機子と直列にチョップパを接続し、架線の直流電力を可変の直流電力に「直接」変換するシステムで、抵抗器やスイッチなどの大型部品が大幅に削減された。したがってカム式制御システムに比較すると保守項目も姿を消したが、直流電動機に起因するシステムの複雑さはまだ残っていた。しかし抵抗器からの発熱は解消され、环境温度の上昇を防ぐ効果は大きい。

チョップパシステムには「電動機の界磁コイルを独立にしたもの」「複巻にして界磁制御に機能拡大したも

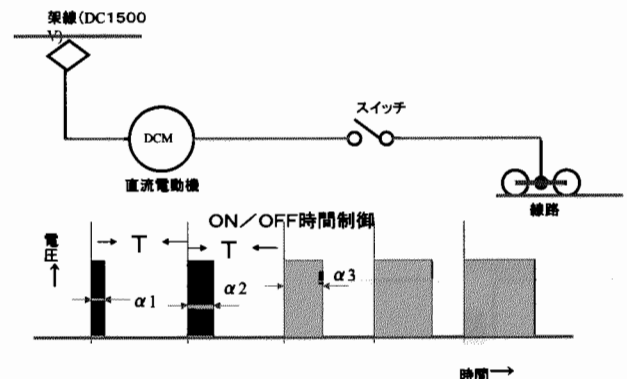


図14 ON/OFF制御

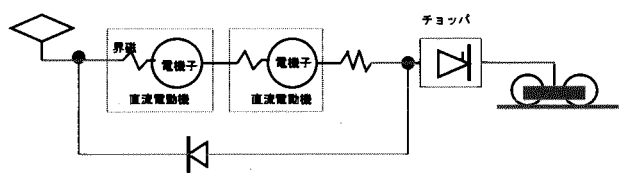


図15 チョップ制御

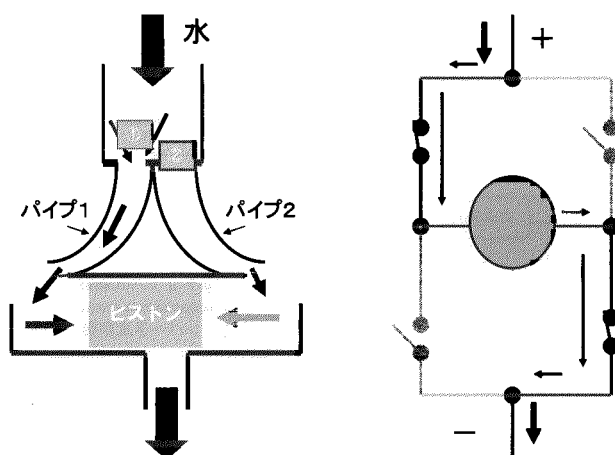


図17 インバータ制御システム

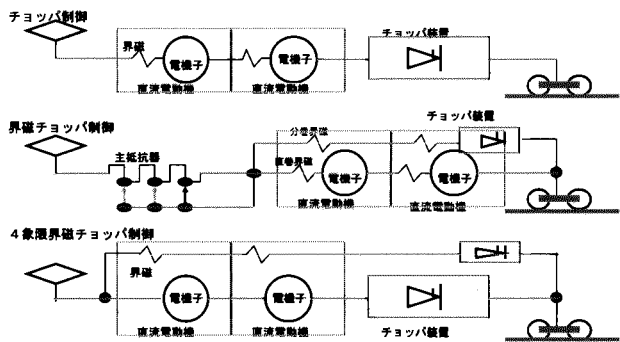


図16 各種チョップ制御

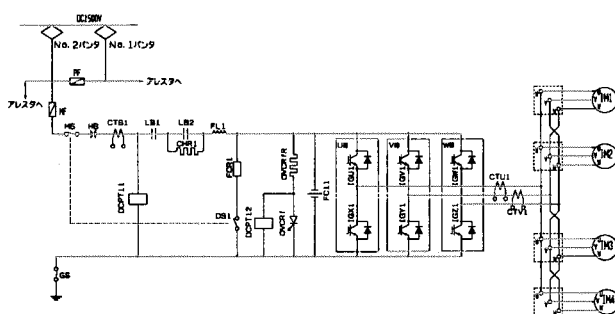


図18 インバータ制御システムの主回路

の」がある。図16チョップ制御システムの応用例を示す。

3-2 インバータシステム

直流から交流への電力変換を行う装置を一般にインバータと呼び、電動機へ回転数と対応した周波数と、必要なトルクを発生するための電流を供給するものである。

(1) インバータによる交流電動機の回転の原理

誘導(交流)電動機は電源の周波数に相対した回転数にしかならない(注)。これは、2.2節で説明した歯車が往復水流の速度以上にはならないのと同様である。したがって車両にこの交流(誘導)電動機を適用する場合、電圧と周波数双方を回転数(速度)にあわせて同時に変化させなければならない。(注)：「交流電動機」は誘導電動機と同期電動機とに分類できるが、本論では現在主流である誘導電動機を対象としている。

(2) インバータの主回路方式

実際にはインバータによって交流を発生させるが、図17に示すように左右の負荷に接続された4個のスイッチによる回路で、斜め対向のスイッチがON状態になることにより、負荷に流れ込む電流の方向が切り

替わる。実際の三相のIGBT(注)を適用したインバータの主回路とその動作を示す。図18は実際のインバータ制御システムの主回路である。パンタから幾つかのスイッチを経て3相の主回路になる。

(注)IGBT：Insulated Gate Bipolar Transistor

4. 半導体の歴史

先に示した図13はカム式制御装置の抵抗を短絡するスイッチである。こうした機械的な仕組みで回路を接続したり開放する時には、金属面の接触部で電流の断続が行われる。そこには機械的な磨耗がある上に電気化学的な効果も加わって接触面の荒損が進行する。このために定期的な保守・修繕が不可欠である。しかもこの機械的スイッチの動作時間は100分の一秒から10分の一秒ほどで、その性能の劣ることは言うまでもない。

1902年に米国で水銀蒸気の放電が一方しか電流を流さないことが発見され、ようやくパワーエレクトロ

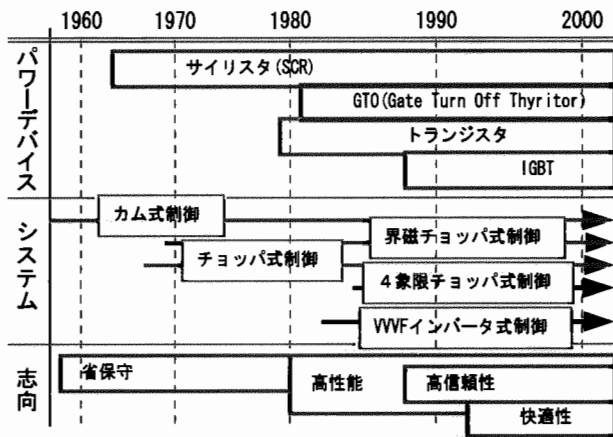


図19 半導体の進化

ニクスの時代の幕明けとして「水銀整流器」が発明された。以来改良が重ねられ戦後わが国の機関車にも採用されたが、特性上も保守面でも課題があった。

1948年に米国でトランジスタの原理が発見されて以降サイリスタが開発され、ようやく機械的な開閉機構の無い、電流を物理的に制御できる半導体の時代に入ることができた。図19にパワーエレクトロニクス、高圧大電流の半導体の進化の経緯を示す。デバイスも逆阻止型サイリスタ、逆導通サイリスタ、そしてGTOなどの電流駆動形の素子から、IGBTという電圧駆動形の素子が今や主流になっている。

4-1 サイリスタ

1958年にサイリスタが米国のGE社により発明されて以来、大容量サイリスタの開発は、1965年代初頭の鉄鋼業界の大規模な設備投資に伴って行われた。

サイリスタは正確な技術名としては逆阻止三端子サイリスタ (Silicon Controlled Rectifier) と言い、機械スイッチを単純に半導体にしたようなものである。図20に示すように、何もしていない状態では電流は流れないが、ゲート (Gate) に数100ミリアンペア程の信号を送ることによって、半導体内部の絶縁状態が変化し電流が流れるようになる。この時間は10万分の数秒である。しかし、サイリスタでは一度流れてしまった電流を止めることはできない。

交流を直流に整流する場合は交流の電圧の逆転でサイリスタの電流は「0」になって元の状態に復帰でき

るが、直流では電圧の逆転がないので、強制的にサイリスタの電流を「0」にしなければならない。主回路に数千アンペアが流れている場合、逆方向に数千アンペア流そうとする仕組みは大掛かりになる。図21に示すそのモードは、別に用意した電源をサイリスタと並列に接続し、電流を遮断する瞬間にスイッチ2を入れて逆電流を流すものである。この阻止状態に戻るには100分の一秒ほどで済み、この時間は機械的スイッチに比べると確かに短い、一秒間に数百回繰り返す必要がある。このようにサイリスタ応用の方式は理想に近づいたものの、結構大掛かりな仕組みとなっていた。

しかも電気鉄道では直流架線電圧が600V、750V、1,500Vと高く、変換装置容量が数10KVAから数1,000KVAと大きい、幾つかのサイリスタを直列/並列に接続して使用しなければならなかった。チョップ装置として車両の床下に搭載できる構成とするのが漸くのことであったが、技術の進歩はこうした幾つかの課題を少しずつ克服し、1960年代後半には高加速減速で電力消費量の少ない電機子チョップ制御方式が実用化され、駅間距離が短く頻繁に起動・停止を行う地下鉄電車に適用された。しかし、直流電動機を用いているために、従来のカム式制御システムからの完全

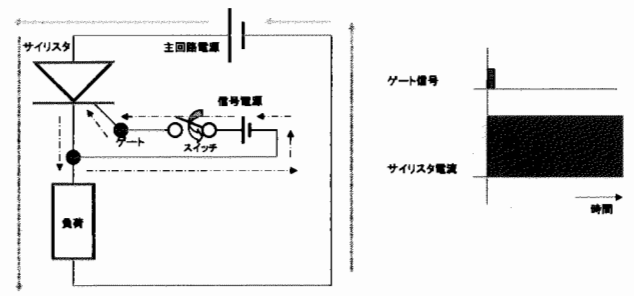


図20 サイリスタ

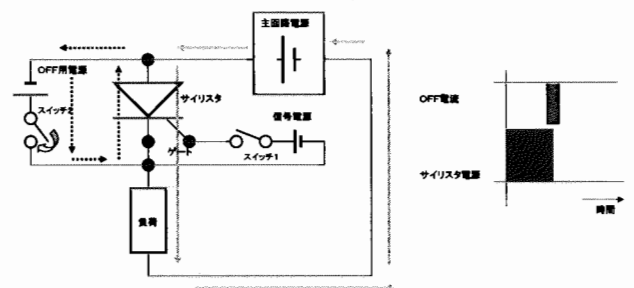


図21 サイリスタ

な脱却は出来ていないところも多かった。

さて、この時代にインバータシステムの可能性はというと、図18に示したように言わば6個のチョップから構成されているので、このような技術環境ではインバータを半導体で構成することは極めて難しかった。

4-2 GTO

1970年後半になって高耐圧の「GTO」が実用化の域に至った。GTOの名称の由来は「Gate Turn-Off thyristor」で、「ゲートでオフすることのできるサイリスタ」という意味である。図22は車両に適用されている4500V、2000AのGTOの外観である。

GTOもゲートに信号を送ることによってON状態になることはサイリスタと同様であるが、このゲートに逆方向の信号を流すことによってOFF状態に復帰できるものである。図23に示すようにGTOをON状態にするにはサイリスタと同様ゲートの数アンペア程の電流を流せば良い。GTOの画期的なところはOFF状態に戻すにおおがかりな回路は不要なことで、スイッチ2を入れONとは逆方向に数100アンペアの電流をゲートに流すことによってOFF状態にもどすことができる。これによって主回路の要素は大幅に削減され、三相のインバータも車両の床下に搭載されるようになった。

しかし、サイリスタもGTOも平たい形を図24に示すような構造物として構成する上で、数トンの力で挟み込んで保持している。このためには機械強度もそれなりの頑丈さが必要であり、また冷却方法もフロン液、純水などを用いたヒートパイプ方式などが採用されていた。

4-3 IGBT

トランジスタの技術が進み、高耐圧、大容量の素子が徐々に実用化された。その一つの成果として、静電誘導(MOS)型と従来のバイポーラ型の長所を併せ持った素子「IGBT」が出現した(注)。MOS型の特徴として、ベース信号(ON/OFFの信号)も10万分の1アンペアの単位にまで少なくなり、更にトランジス



図22 GTO

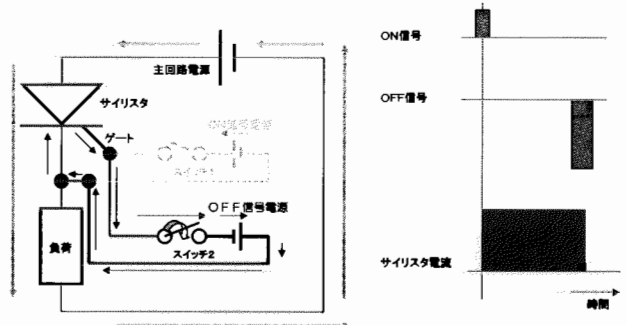


図23 GTO

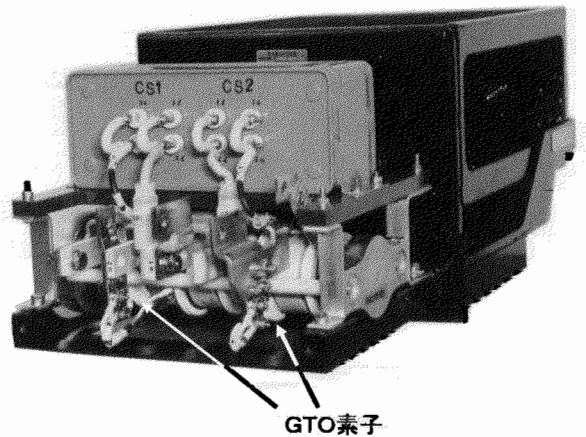


図24 パワーユニット

タの同族としてベース信号できめ細かく電動機の電流を制御できるようになった。図25

更にIGBTの特徴はその外観からも見る事が可能である。図26に示すように平型の弁当箱のように樹脂で固定したモジュール構造で、これを図27に示す放熱板に一方向からネジで固定するだけで主回路のモ

ジュールが組み上がる。したがって、図24に示したGTOなどのように頑丈な主回路ユニット構造から脱皮し、ますます軽量で小型にまとめる事ができるようになった。

図27の放熱板はドライパネルとよばれており、裏側に取り付け、図に見える板状の部分から熱を空气中に放散する。これには冷却用の冷媒が使用されてい

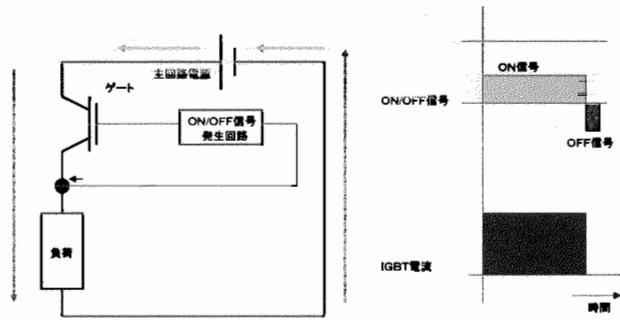


図25 IGBT

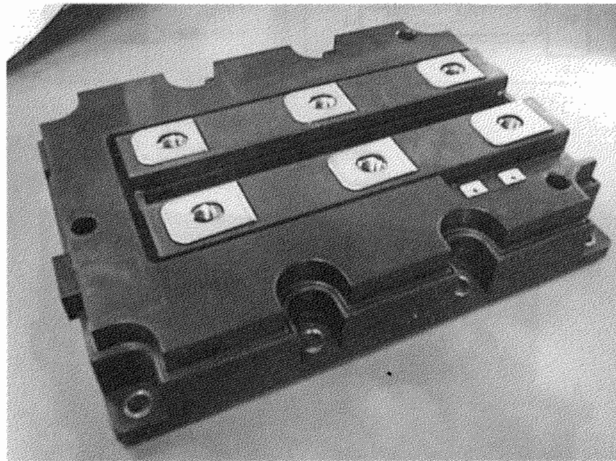


図26 IPM

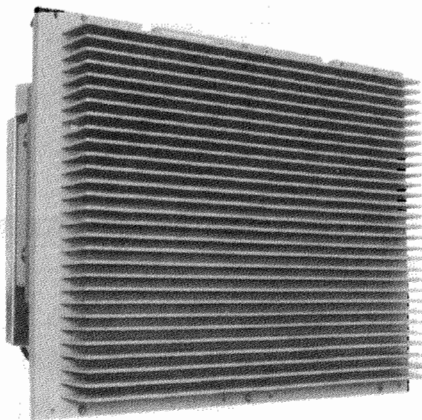


図27 ドライパネル

いことと、リサイクルに優れたアルミ素材とから、地球環境に適合した方式として今後は採用されていくものである。

(注)MOS：Metal Oxide Semiconductor

5. 直流電源電車とパワーエレクトロニクス

整流子を持たない誘導電動機には、制約条件としての通風冷却能力と回転子の構造上の強度を配慮すれば、定格回転数、最高回転速度を直流電動機よりも高く設定することができる。直流電動機と同一質量であれば出力は大きく、同出力の場合は小形軽量化が実現することになる。誘導電動機の適用が狭軌の一般通勤用電車の大出力化と近年の新幹線用の高速・大出力化に寄与した所は大きい。

5-1 主電動機の高出力化と小形軽量化

直流電動機では機械的に磁極を切り替えていたために最高回転数も低く、発電機として車両の運動エネルギーを回収、消費する電気ブレーキ時にも電圧の限界もあった。しかし誘導電動機の場合は最高回転数を高くとることができるので、制約条件としては通風冷却能力と回転子の構造上の強度のみとなった。したがって直流電動機と同一サイズであれば大出力モーターが実現し、同出力の場合は小形軽量化を図ることが可能になった。特に狭軌の一般通勤用電車の大出力化と近年の新幹線用の高速大出力化に寄与した功績は大きい。図28に電食用電動機における単位出力あたりの質量の変遷を示す。

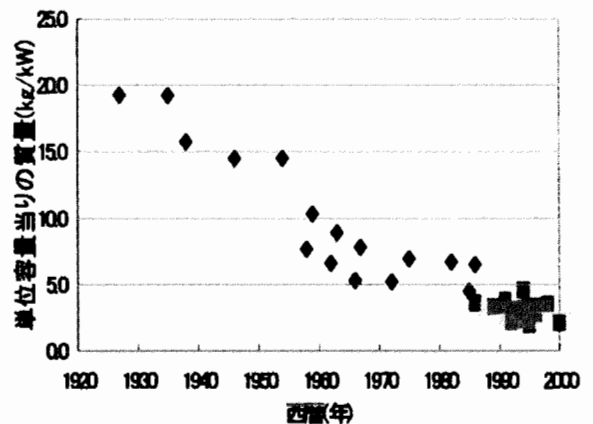


図28 電動機の質量推移

5-2 省エネルギーと回生効率の向上

従来から車両の低速領域のブレーキ操作は経験と技能が必要といわれている。低速領域は停止間際に目標の停止位置に止めるために、速度と車両の位置とを考えながらブレーキハンドル操作をしなければならないためである。また15km/hから5 km/h間で、電気から空気の制動に切り替わるのが一般的である。

このとき電気系と空気ブレーキ系の制動力の違いと切り替わりの過渡的なトルク変動が現れ、状況によっては乗客の乗心地の変化や停止位置の不確実性につながっていた。

更に停止間際のブレーキシューの粘着係数は大きくなり、ブレーキハンドル位置を固定しておいても制動力が大きくなる特性がある。運転士はブレーキハンドルを操作して制動力の変化を調整することになるが、停止時の乗心地には運転士個人の能力差が影響することにもなる。

一方で高速領域からの回生電気ブレーキは回生負荷が十分でない場合は失効する事を懸念されて来た。しかし最新のデジタル制御では応答速度の速いベクトル演算が導入されているので、失効せずに電気ブレーキ機能を維持させることが可能になった。回生負荷が十分になった時点で最大の制動効果を発揮できるシステムに改善されている。

また、低速域も停止までを電気ブレーキのみにすることも可能であることから「純電気ブレーキ」の適用が始まった。これは電気ブレーキで「車両の速度が0 km/h」になった時点で、空気ブレーキは車両を固定するために機能するのである。図29にその動きを示す。

全速度域で電気ブレーキが安定して有効になるために、回生負荷を確保する方策の課題があるが、今後の社会における地球環境保全と省エネルギーの議論から徐々に結論がでてくるものと考えられる。

純電気ブレーキの効果を整理すると下記の項目になる。

① LCC (Life Cycle Cost) の抑制

「電力消費」「ブレーキシュー摩耗」「保守費用」が抑制できる。

② 運転の確実性の確保

空気ブレーキはシューの粘着特性を利用して確実性が薄い、電気ブレーキでは、こうしたことはないのので、「運転のしやすさ」が向上するし、「定点停止精度」も向上することになる。

③ 環境対策

「ブレーキシュー磨耗粉の飛散」は減少するし、軋み音がなくなることから「低騒音」効果が得られ、更に「乗心地」も向上する。

5-3 「駆動車」対「付随車」比の減少と高粘着性

誘導電動機はマイコンによる空転/滑走制御によって従来形の制御では期待できなかった高い粘着係数の設定ができるようになった。しかも現在では誘導電動機を直流電動機と同様な応答速度で制御するために「ベクトル制御」が採用されて、粘着率21%の実績も得ている。従来のカム式制御装置では平均13%ほどの粘着率であったが、同じ加速度を得るには8両構成の車両では、6両を電動車にしなければ空転して満足する走行ができなかったところを、現在では従来の加減速性能と同等であれば4両の電動車で済むことになる。

一方、インバータ制御では主電動機を並列接続のみで駆動することから、車両システム設計上自由な選択が可能となった。例えば「4個電動機制御」「8個電動機制御」「2個電動機台車制御」「1個電動機個別制御」など、冗長性も増えて運用上の信頼性の向上ももたらした。

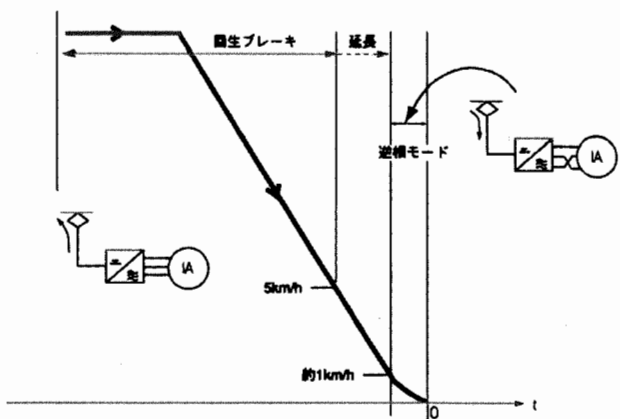


図29 純電気ブレーキ

5-4 インバータシステムの保守

交流可変速制御の採用により「保守要領」さえあれば個人の特性によらない検査修理技術の均一化が可能となった。更に装置の高信頼化と標準化とともにパワー半導体の構造の改善によって、主回路のユニット構造化、モジュール化が促進されて、交換等も軽作業になって保守業務は大きく改善前進した。

更に制御のデジタル処理が促進されて、演算処理をソフトウェアが支配することで、制御論理の変更や定数設定、各種調整がソフトウェア変更で簡単に行えるようになったことが制御性能の均一化や信頼性の向上の要因の一つである。

5-5 環境問題へのとりくみ

人と地球にやさしさを求める時代に至り、鉄道システムが環境に与える影響についても最近急速に感が高まるとともに制約も年々厳しいものになりつつある。

「エネルギー消費」「排出ガス」「騒音」「振動」「悪臭」「粉塵」など多岐にわたるが、今後の車両システムの果たす影響と役割、そして社会的期待は大きい。

インバータ制御車両はもともとシステムが保有している高効率特性と回生による省エネルギーの他、空転/滑走制御の改善による車輪のフラット発生が抑制されている。これによって低振動、低騒音化にも効果が見られ、ブレーキシュー摩耗の抑制から摩耗粉、鉄粉の飛散量も低減している。

インバータの変調音による駆動音も快適性の課題となって、主回路の素子数を12個構成とした3レベル方式も実用化され、現在では図18に示す典型的な3相インバータにも新たな変調方式の適用による磁歪音の分散、抑制がなされている(注)。

(注)ゼロベクトル変調

6. システム展望

6-1 路面交通、軽快電車システム (LRT、LRV)

国内で最初にVVVF制御車を営業線に投入した熊本

市交通局の8200形以降、現在では世界的な路面電車の再評価の機運に交流可変速技術が大きく寄与している。

6-2 新交通・ゴムタイヤ電車

最近までゴムタイヤ駆動車両におけるインバータシステムは機装条件が厳しいため、適用が見送られてきたが、装置の構造の改善により札幌市交通局で1996年の導入以来、「東京モノレール」「ゆりかもめ」においても導入された。

6-3 機関車

国内では1992年以降にJR貨物でEF200、EF210形などのVVVFインバータ制御による大出力機関車(6,000kW)が登場し、電気式ディーゼル機関車でもDF500形が製作された。

6-4 海外

列車の動力集中思想が強い欧州では機関車への交流可変速技術導入への取り組みは古く(1960年代)から行われて来た。現在では「ICE 3」では分散型(新幹線)と同等の方式に移行している。

7. 今後の動向

交流駆動方式が国内外では既に主流となった。今後も進化して、部品機器の無保守化が進展し、ソフトウェアも空転制御や低騒音化など性能面で一層の改善が想定される。今後の車両駆動システムはインバータシステム以外にはありえないと考えられるが、電動機が誘導電動機から、永久磁石を回転子とした同期電動機の適用の動向が見え初めている。半導体の進化は一層進展して、いつの時には、電動機にインバータが直接一体化されることになる可能性がある。

また地球環境の改善をめざして、走行エネルギーを回生利用する社会的システムが実用化されることを期待したい。

参考文献

- ① 電気学会 電気車の交流電動機駆動・インバータ制御方式 電気学会技術報告1987年6月
- ② 小林 車両用主電動機技術の変遷 電気学会 電気技術史研究会2001年6月
- ③ 加我、飯田 VVVFインバータ制御電車概論 電気車研究会
- ④ 図解電気の大百科 オーム社