

電気車の速度制御

まえがき

電動機を用いた最初の電気鉄道は、1879年ベルリン万国博覧会においてドイツの Siemens 社が発表した、電圧 125V の直流第 3 軌条式の電気機関車である。この電気機関車は 18 人乗りの客車を牽いて 12 km/h の速度で走った。次いで、2 年後の 1881 年、ベルリン市で、電圧 500V の架空電車線式の直流電車によって旅客輸送が始まった。

鉄道車両は停止状態から高速域まで幅広い速度で走行し、勾配や牽引重量の変化により負荷が変動するため、動力源としての主電動機には次のような特性が必要となる。

- 1) 起動時のトルクが大きいこと。
- 2) 広い速度において高効率で使用できること。
- 3) 速度制御が容易であること。

このような特性を備えた電動機として、直流直巻整流子電動機が電気鉄道の主電動機として古くから使用されてきた。

直流直巻整流子電動機

直流電動機は、内部の回転する電機子（ローター）と外部の固定された界磁コイル（ステーター）が直列に接続されている直巻電動機と並列に接続され

ている分巻電動機に大別される。直巻き電動機と分巻電動機の出力特性を図 1 に示す。

直巻電動機は低速で大電流が流れ、大きなトルクを発生し、高速になるに従って電流は減少し、トルクは減少する。直流直巻整流子電動機の回転数は、電動機の端子電圧に比例し、界磁磁束すなわち電動機電流に反比例する。したがって、主電動機への印加電圧を調整することにより、電気車の速度制御を行うことができる。

この方式は、電圧の制御に電力損失が伴う欠点があるものの、変圧器や整流器が不要であり、構造が

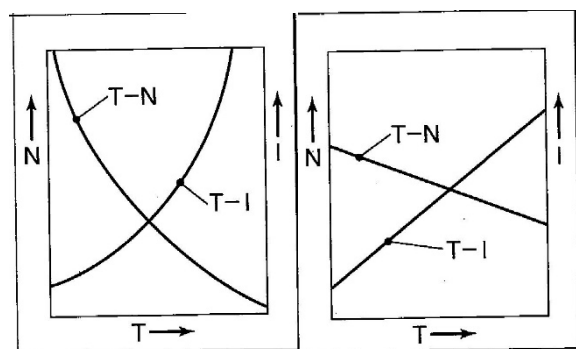


図 1 直巻き電動機（左）と分巻電動機（右）
トルク T, 回転数 N, 電流 I 特性

簡単で安価なことから、インバータ制御が普及する 20 世紀末まで広く用いられた。

抵抗制御（Rheostatic Control）

抵抗制御とは、図 2 に示すように、主電動機に直列に起動抵抗と呼ばれる抵抗器を挿入し、この抵抗値を変化させることにより速度制御を行う方式で、起動加速時に用いられる。ここで、 R_i ：起動抵抗、 A_i ：電機子、 F_i ：磁界コイルである。

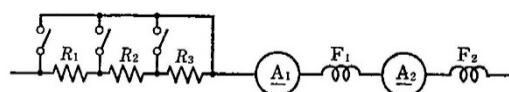


図 2 電動機の抵抗制御

起動時は全ての抵抗器を主電動機と直列に配置する（すなわち、抵抗値は最大となる）。これにより電機子電流は低く抑えられ、電源電圧は抵抗値に応じて、主電動機と抵抗器に分配される。

電気車を加速する場合、速度の上昇につれて徐々に抵抗器を短絡し、電動機電流をほぼ一定に保って、加速時の引張力を一定にする。抵抗器を全部短絡した後は、主電動機の特性に沿って加速し、均衡速度で運転する。

起動抵抗はいくつかの段に分けられ、主電動機はこの段に沿って段階的に制御される。これらの抵抗変化の段をノッチと呼ぶ。抵抗制御のノッチ段数が多いほど電流の変化は少なく、平均電流も大きくすることができる。しかし、ノッチ段数を多くすると、スイッチ数が増えるので、一般には、抵抗を直並列に組み合わせるノッチ段数を増やす方法がとられる。また、抵抗制御の各ノッチ間にバーニア（Vernier）抵抗と言う抵抗を並列に入れ、各ノッチ間を更に細かく制御できるようにしたものもある。これは起動加速時の引張力の変化が少なく、粘着性能の向上に役立つので、電気機関車では EF62, 63 以降、電車では 103 系以降に採用されている。なお、バーニアとはノギスの副尺を発明した Pierre Vernier に由来する。

直並列制御（Series-parallel Control）

主電動機が偶数の電気車において、主電動機を、図 3 に示すように、直列・直並列あるいは並列に切り替えて、主電動機の端子電圧を変えて速度制御を行う方法を直並列制御という。

F 級機関車の場合、直列制御では各電動機の印加電圧は 250V、直並列制御では各電動機の印加電圧は 500V、並列制御では各電動機の印加電圧は 750V となる。

直並列制御だけでは速度制御は不可能で、先に述べた抵抗制御と組み合わせて使用する。組み合わせ制御を使用すると、抵抗制御だけで速度制御を行う場合に比べて、抵抗器での電力損失を大幅に減らすことができる。

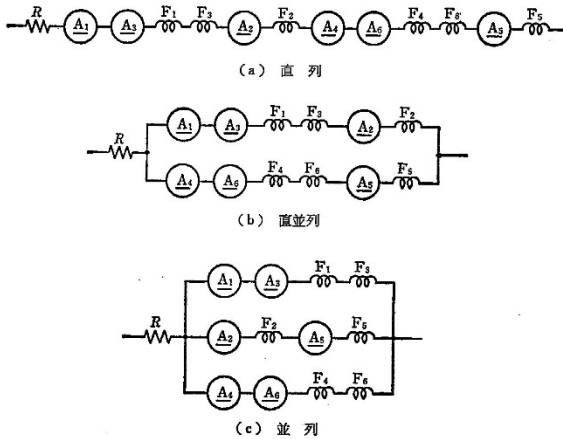


図3 直並列制御

弱め界磁制御 (Field Weakening Control)

抵抗制御、直並列制御が最終段に達すると、主電動機の印加電圧は最大となり、回転数も最大となる。ところで、界磁の中で電機子が回転すると起電力が発生する (フレミングの右手の法則)。これは、主電動機に印加する電圧と逆向きに作用するから、逆起電力と呼ばれる。逆起電力は、回転数と磁束の積に比例するから、磁束が強いと電機子電流は小さくなり、逆に磁束を弱めると逆起電力が弱くなるために電機子電流は大きくなる。

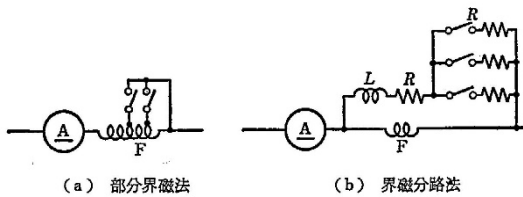


図4 界磁制御

このように、磁束を弱めて回転数、すなわち速度を増加させる方法を弱め界磁という。界磁を弱める方法としては、図4(a)に示すように、界磁巻線からタップを出し、界磁の一部を短絡して界磁を弱める部分界磁法、(b)に示すように、界磁巻線に並列に分流抵抗を設けて界磁を弱める方法などがある。

ED75, EF65, EF81などに使用された主電動機MT52の特性を図5に示す。垂直に引かれた連続定格線 (破線) と回転数 (速度)、トルク曲線との交点を見てみよう。

全界磁の場合、連続定格回転数：約 900rpm, トルク：400kgm。

40%界磁の場合、連続定格回転数：約 1500rpm, トルク：250kgm。

弱め界磁を使う事により、速度を上げることはで

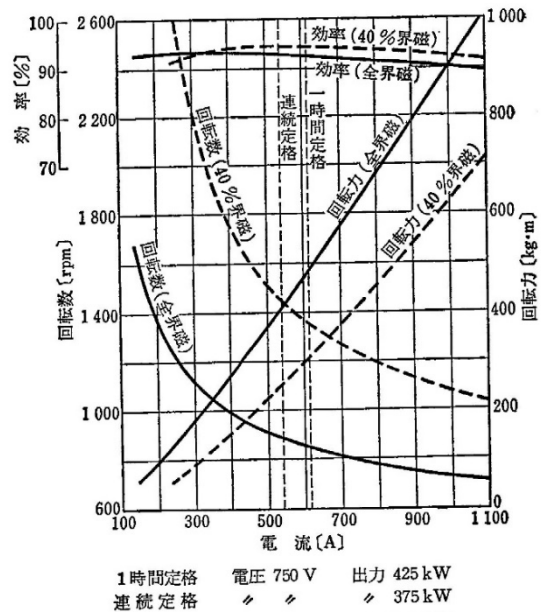


図5 MT52 電動機の特性

きるが、トルクは減少、すなわち引張力は減少する。代表的な直流電気機関車の全界磁および弱め界磁の一時間定格速度を表1に示す。

速度と引張力を両立させるためには、高速の主電動機を大きな歯車比で駆動させる必要がある。しかし、1950年頃は高速の主電動機がなく、MT42は全界磁の回転数が800rpm、弱め界磁の回転数が970rpmであるため、歯車比4.15の貨物機EF15と歯車比2.68の旅客機EF58の二種類の機関車を作らざるを得なかった。

表1 直流電気機関車の一時間定格速度

| | 電動機 | 歯車比 | 全界磁 | 弱界磁 |
|------|------|------|--------|---------|
| EF15 | MT42 | 4.15 | 43km/h | 52km/h |
| EF58 | MT42 | 2.68 | 68km/h | 87km/h |
| EF60 | MT49 | 5.47 | 39km/h | 63km/h |
| EF65 | MT52 | 3.83 | 45km/h | 72km/h |
| EF66 | MT56 | 3.55 | 73km/h | 108km/h |

1960年代半ばになり、全界磁の定格回転数が850rpm、弱め界磁の定格回転数が1350rpmのMT52電動機が開発されて、初めて、EF65, EF81などの貨・客両用の機関車が作られた。それでもEF65, EF81は高速貨物やブルートレインの牽引には十分とは言えない。EF65が100%の引張力を発揮するのは45km/hの時で、引張力は72km/hでは64%、110km/hでは21%に低下する。

高速貨物やブルートレインは70km/hから100km/hの間で加速する機会が多く、定格速度がこれに合致するEF66は、加速時に最大出力を有効に使用できる。EF65の定格速度はこれとは異なっており、高速貨物やブルートレイン牽引では、弱め界磁

の定格速度が87km/hの EF58 と同等のダイヤ運行は困難で、特に連続高速運転時の弱め界磁多用による主電動機の故障が頻発した。EF65 は、EF58 よりも出力が大きいので、高速で引張力が落ちてはともなにか EF58 と互角に走れるが、引張力は80km/h付近で逆転し、これより高速域では、EF58 の方が強力な機関車となる。

サイリスタチョップ制御 (Chopper Control)

先に述べたように、抵抗制御方式の場合、架線から得る電力の多くを抵抗器での電力損失に換えてしまう。抵抗器での電力損失を低減するために、チョップ制御が 103 系電車の後継機として開発された 201 系で導入された。

チョップ制御は、スイッチにより電動機に印可する電圧を ON・OFF し、ON・OFF の時間の比率を変化させ、平均電圧を制御するものである。スイッチングによる電力調整の原理を図 6 に示す。図 6 (a) は主回路であって、インダクタンス L 、電機子 A 、主界磁 F 、チョップ用サイリスタ S 、還流ダイオード D_F 、コンデンサ C が用いられている。

サイリスタ S が ON のとき、主電動機に電車線電圧が印加され、主電動機には図 (b) の (イ) のように電流 i_s が流れる。電流 i_s は回路の時定数に従って増加する。サイリスタ S が OFF になると、主電動機にかかる電圧はゼロになるが、インダクタンス L に蓄えられたエネルギーによって、還流ダイオード D_F を通して電流 i_D が流れる。電流 i_D は (ロ) のように時定数に従って減少するが、一定時間後にサイリスタ S が ON になると、ふたたび電車線から電流 i_s が流れる。

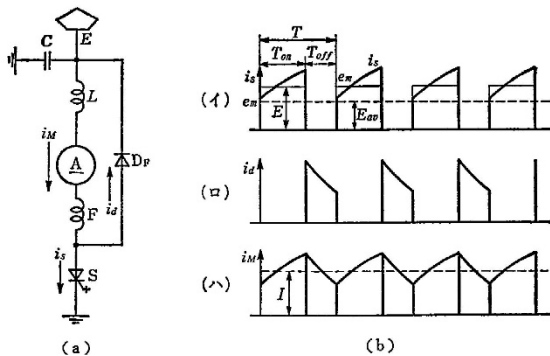


図 6 チョップ制御の原理

このようにサイリスタの ON・OFF を繰り返すことによって、主電動機には、図 (b) の (ハ) に示すように、脈流が流れる。ここで、サイリスタの ON・OFF の時間の比率を変えれば、平均電圧 \bar{E} を連続的に制御することができる。サイリスタが ON している時間を T_{ON} 、OFF している時間を T_{OFF} とすると、

$$T = T_{ON} + T_{OFF}$$

をスイッチング周期 T と呼ぶ。電源電圧を E とすると、平均電圧 \bar{E} は次式で与えられる。

$$\bar{E} = E \frac{T_{ON}}{T} = Ed$$

ここで、 d : デューティ比

サイリスタチョップ制御により、起動抵抗を使わずに、電動機の端子電圧を連続的に制御できるので、電力の節約と同時に発熱源の起動抵抗を除くことができる。

VVVF インバータによる誘導電動機の世界速度制御

軸のある導体の円板の表面に沿って永久磁石を回転させると、図 7 に示すように、円板は磁石の回転方向に回転する。これが交流かご形誘導電動機の基本原理である。実際には、磁石を回転させるのではなく、電気的な方法で磁界を回転させる。かご形誘導電動機は構造が簡単なため、価格が安く、保守費用も安い、という利点がある。

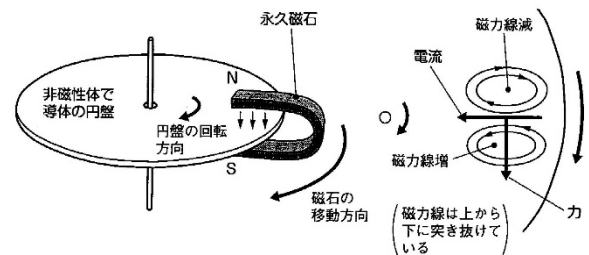


図 7 誘導電動機の原理

しかし、回転数が電源の周波数に依存するために、パワーエレクトロニクスが進歩する 21 世紀初頭までは、可変速度を必要とする車両用の主電動機としては使用できなかった。

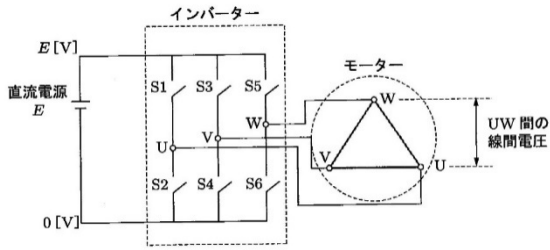
近年の半導体技術、特にパワーエレクトロニクスの進歩に伴い、出力電圧と周波数を連続的に変化させる VVVF インバータがかご形誘導電動機の連続的な速度制御を可能にした。VVVF とは、可変電圧 (Variable Voltage) と可変周波数 (Variable Frequency) を直訳した和製英語。インバータとは直流を交流に変換する装置のことである。

直流から交流を作り出す基本原理は、図 8a に示す、スイッチの ON・OFF である。基本回路はスイッチが 6 個あり、3 本 (U, V, W) の線が三相交流誘導電動機の界磁コイルに接続されている。

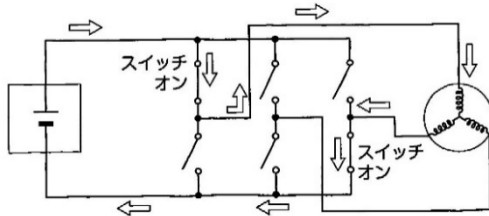
スイッチ S_1 と S_6 を ON にすると、図 8(b) に示すように、U から W に電流が流れる。このとき、U と W の電位は E である。スイッチ S_1 と S_6 を OFF にして、スイッチ S_2 と S_5 を ON にすると、図 8(c) に示すように、逆向きに W から U に電流が流れる。

このとき、U と W の電位は $-E$ となる。これでプラス波形とマイナス波形ができ、図 8(d) に示すように、交流ができたことになる。同様の方法で、U, V, W の間に三相交流を生じさせることができる。

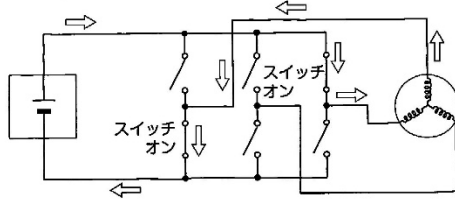
デューティ比 d 、スイッチング周期 T を制御して、出力電圧と周波数を連続的に変化させることができる。このようにパルスの幅 (ON している時間 T_{ON})



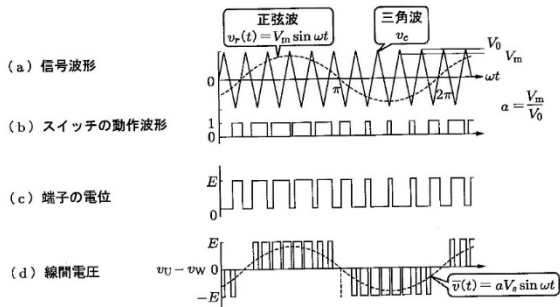
(a)インバータの基本回路



(b)スイッチ S_1 , S_6 をON



(c)スイッチ S_2 , S_5 をON



(d)チョップによるPWM制御

図8 インバータの仕組み

を制御することをパルス幅変調 PWM (Pulse Width Modulation) 制御という。インバータがもっているこれらの機能をVVVFと言い、交流誘導電動機の世界速度制御の基本となっている。電動機のトルクは電圧に、回転数は周波数に比例する。

VVVFインバータの出現により、三相かご形誘導電動機を電気車の主電動機として使用することが可能となり、大幅な省エネルギーが実現した。VVVFインバータ制御は、電気機関車ではEF200、EH500、電車ではモハ231系に採用された。

電気ブレーキ

走行している車輛の運動エネルギーあるいは位置エネルギーを電気エネルギーに変換し、このエネルギー

を消費することによりブレーキ力を得る方法を電気ブレーキという。

一般の電気ブレーキは、主電動機を発電機として使用し、その発生電力を主抵抗器で熱として放散する発電ブレーキ (dynamic brake) と発生電力を電車線を通して返還する回生ブレーキ (regenerative brake) がある。

発電ブレーキ

発電ブレーキは主電動機を発電機として使用し、列車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、発生電力を抵抗器で消費することによりブレーキ力を得る方式である。摩擦部分がないので、制輪子や車輪を摩耗することなく、ブレーキ粉による被害もなく、安全なブレーキ力が得られる。しかし、低速域ではブレーキ力が小さくなり、また何らかの原因で電気ブレーキが失効した場合を考慮して、必ず空気ブレーキ装置と併用しなければならない。

発電ブレーキは主電動機を発電機として使用し、回路に負荷となる抵抗器をおき、抵抗値の加減、主電動機の界磁変更、直並列に応じた抵抗とのつなぎとしてブレーキ力を調整して速度制御を行う。ブレーキ力の制御にはブレーキ電流を制御すればよい。これには力行と同様に抵抗制御が用いられる。ブレーキ力が一定になるように速度の低下とともに抵抗値を減らしてゆけばよい。

停止ブレーキの場合、速度は時々刻々変化するため、速度の低下とともに抵抗値を変化させブレーキ力を一定にする必要がある。主電動機の定格回転の2倍以上の高速からブレーキを作用させるため、主電動機は短時間であるが定格の2倍以上の高電圧かつ定格の2倍程度の電流に耐える必要がある。モハ70系以前の電車では2台の主電動機を直列につないでいたが、電気ブレーキを採用するにあたり、モハ101系電車では、2両1単位のMM'方式とし、4台の主電動機を直列につないで定格電圧を下げた。

回生ブレーキ

回生ブレーキは主電動機を発電機として使用し、その発生電力を電源側に送り返すことによってブレーキ力を得る方式である。発生電力を電源側に送り返すためには、発生電圧を電車線電圧より高くし、かつ一定に保つことが必要となる。さらに回生ブレーキでは発生電力を消費してくれる負荷が十分でない場合にはブレーキ力が不足する。しかし、発電ブレーキのように抵抗器を必要とせず、電力の節約にも役立つことから、主として勾配抑速ブレーキとして使用されてきた。

パワーエレクトロニクスの進歩によって、回生ブレーキを安定に効率よく使えるようになってきたので、サイリスタチョップ制御車などに停止ブレーキとして採用された。チョップ制御による回生ブレーキ回路の原理を図9に示す。図9(a)においてサイ

リスタ S を ON にすると、主電動機回路が短絡され、図 9 (b) に示すように、電流 i_s が流れる。電流 i_s がある値に達したときにサイリスタ S を OFF にすると、インダクタンス L に蓄えられたエネルギーによる電圧と発電機の発電電圧とによって、電車線電圧に逆らって電源に電流 i_d を流して電力回生を行う。インダクタンス L のエネルギーの減少につれて電圧も低くなるので、回生電流も減少する。ここでふたたびサイリスタ S を ON にすると、短絡電流が流れてインダクタンス L にエネルギーを蓄える。この動作を繰り返して、主電動機電流の制御を行う。回生ブレーキは、サイリスタチョップ制御を導入したモハ 201 系で本格的に採用された。

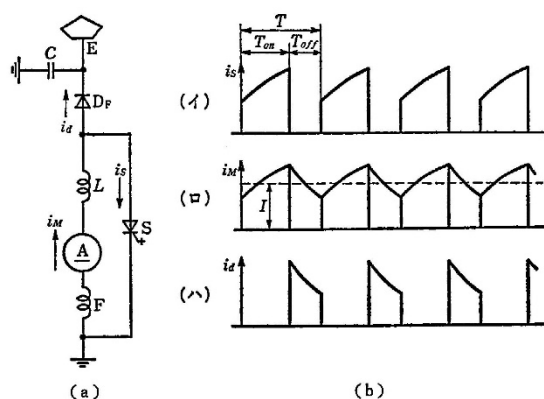


図 9 チョップ制御による回生ブレーキ

このようにチョップによる回生ブレーキは、力行回路の切替えだけで簡単に実施することができ、かつ電力回生効率も高い。しかし電源側に回生電力を吸収するための十分な負荷がない場合には、電車線電圧が異常に上昇することになるので、回生電力を減らして空気ブレーキなどで補う必要がある。

京王電鉄は、2015 年、京王堀之内変電所内に容量 2,145kW、最大充放電電流 1.3kA の回生電力貯蔵施設を導入した。

参考文献

- 1) 久保田博，最新鉄道車輛工学，交友社，1972
- 2) 増田参一郎，曾小川久和，電気応用 (2)，コロナ社，1984
- 3) 谷腰欣司，モーターのしくみ，日本実業出版社，1995
- 4) 森本雅之，電気自動車，森北出版，2017