

モータを動かす電気の流れ

古谷 勇真

車両制御技術研究部(動力システム 研究員)



ふるや たけまさ

はじめに

電気によって動く鉄道車両にはモータ、空調装置などの様々な電気機器が取り付けられています。これらの電気機器は、車両を動かすために必要な機器(主回路機器)と、走行には直接関係しない機器に大別することができます。

車両を動かすために必要な電気機器は、受け取る電気の種類や走行用モータの種類によって、構成や動作が異なります。以前の走行用モータは、直流モータが主体でした。直流モータでは、車両の速度などに応じて電源とモータの間に接続される抵抗の大きさやモータの接続方法を切り替えていました。このため、機械接点や電気配線も多く必要となり、図1のような複雑な回路構成になっていました。

半導体技術の進歩により、電氣的にOn/Offの切り替えが可能な半導体スイッチが実現されました。半導体スイッ

ちは1秒間に数百回以上On/Offの切り替えが可能であり、機械接点に比べて非常に高速です。これにより、最近製造されている車両の殆ど全てが、インバータ装置と誘導電動機に代表される交流モータによって動いています。インバータ装置で使用される半導体スイッチも、以前はゲートターンオフ(GTO)サイリスタが広く使われていましたが、現在では絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)が主流となっています。交流モータの場合は、図2のようにスッキリとした回路構成となっています。

ここでは交流モータによって動く車両について、主回路機器の構成や動作を中心に解説します。

車両を動かすための電気の種類

車両を動かすための電気の種類としては、直流と交流の2種類があります。直流は乾電池のように時間に依らず電圧の向きが一定で変化しない電気です。これに対して、交流は家庭のコンセントと同じように、電圧の向きが時間によって変化する電気です。電圧の向きが1秒間に変化する速さを周波数と呼び、ヘルツ[Hz]という単位で表現されます。日本では、歴史的な経緯から家庭のコンセントも50Hzと60Hzの2種類があり、車両を動かすための電気の種類と電圧の例を表1に示します。最近注目されている、車両自体にバッテリーやディーゼル発電機、燃料電池などの電源を搭載したハイブリッド車両は、直流で動いています。

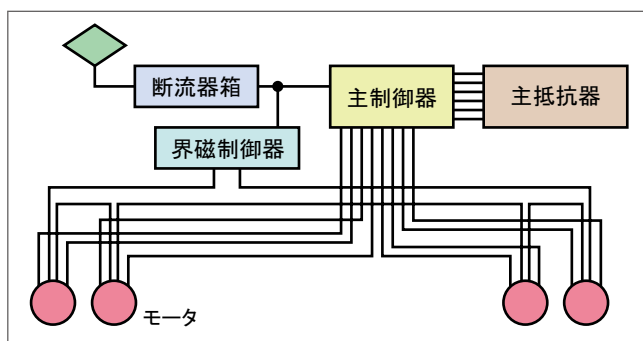


図1 直流モータでの回路構成

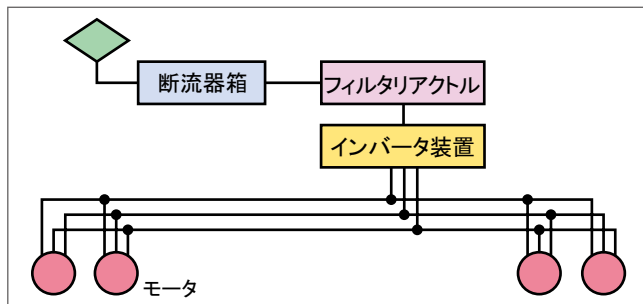


図2 交流モータでの回路構成

表1 車両を動かすための電気の種類

代表的な路線	電源の種類
東海道・山陽新幹線	交流 25,000V / 60Hz
東北・上越新幹線	交流 25,000V / 50Hz
首都圏近郊などのJR在来線	直流 1,500V
路面電車など	直流 600V
札幌近郊のJR在来線など	交流 20,000V / 50Hz
九州のJR在来線(筑肥線除く)など	交流 20,000V / 60Hz

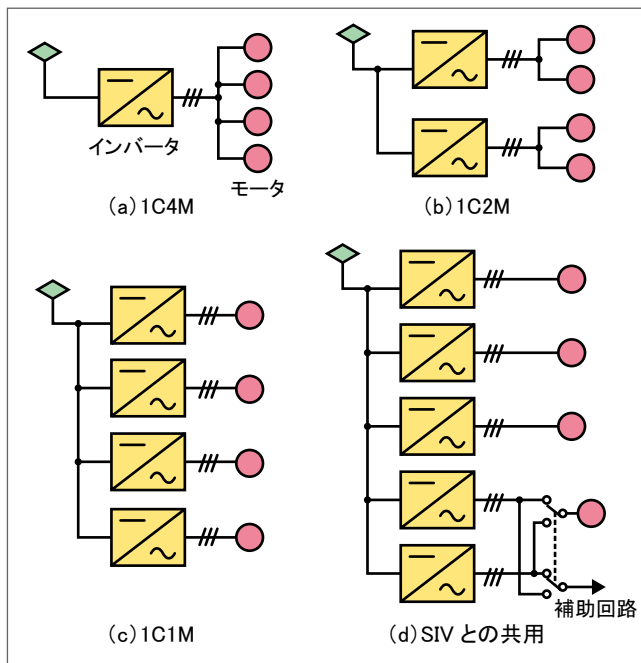


図3 モータとインバータの組み合わせ例

モータとインバータ装置の組み合わせ

交流モータには、回転部分に磁石がないもの（誘導電動機）と磁石があるもの（永久磁石同期電動機）の2種類があります。

永久磁石同期電動機は、磁石の位置に合わせてモータに電気を流す必要があるため、モータ1台に対してインバータ1台が必要になります。モータの数が増えれば、それに合わせてインバータの数も増えますが、効率が良く回転部分の発熱も小さいモータです。

これに対して、誘導電動機はモータに流す電気の周波数と回転部分の回転数（周波数）の差によって、電氣的に磁石を発生させているため、複数のモータを1台のインバータ装置で動かすことができます。モータの数が増えても、ある程度はインバータの増加を抑えることができるため、コストやメンテナンスの点で有利となります。

モータとインバータの代表的な組み合わせを図3に示します。モータとインバータ装置の組み合わせを表す表現として、1C1Mや1C2Mなどがあります。Cはコントローラ、Mはモータの略語であり、1C4Mは1台のインバータで4台のモータを制御していることを示します。

最近では、空調装置やコンプレッサに電気を供給する補助電源装置（SIV）が故障した場合に、モータを動かすためのインバータ装置を代用することで、継続走行や快適な車内の維持ができるように、切り替え回路を有するものもあります。

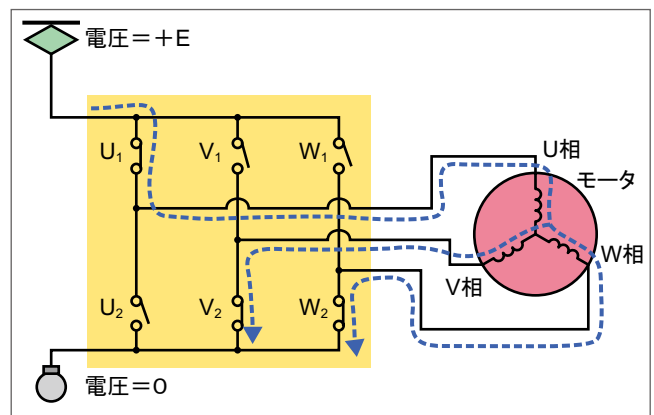


図4 インバータ装置とモータの接続状態

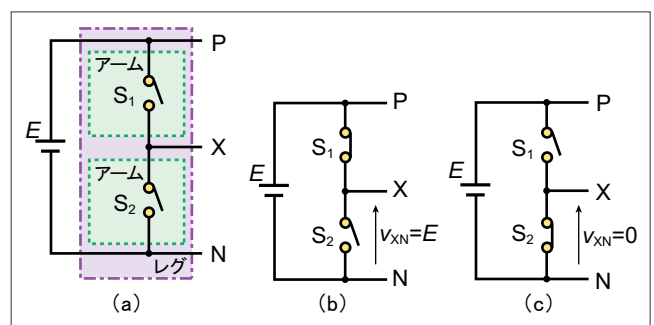


図5 インバータの基本動作

モータに加わる電圧を切り替える

図4にインバータ装置とモータの接続状態を示します。上下1個ずつのスイッチで構成されるセットが、モータに繋がる3つの線（U相、V相、W相）にそれぞれ接続されています。図4で示したスイッチ1つに相当する半導体スイッチを“アーム”と呼び、上下のアームをまとめて“レグ”と呼びます。

インバータ装置の基本動作を図5に示します。説明を判りやすくするために、インバータ装置にある3つのレグのうち、1つだけを取り出したものを図5(a)に示します。Eは直流電源の電圧、Pは直流入力プラス側、Nは直流入力マイナス側、Xはモータに繋がる出力部分（U相、V相、W相のいずれか）です。

モータに直流電源と同じ電圧を加える場合は、図5(b)のように上アームの S_1 をOn、下アームの S_2 をOffとします。一方、モータに電圧を加えたくない場合は、 S_1 をOff、 S_2 をOnとします。ただし、 S_1 と S_2 を同時にOnにした場合は、ショートして非常に大きな電流が流れて半導体スイッチが壊れてしまうため、必ずどちらか一方のみをOnにします。このように、上下アームのOn/Off状態を切り替えることで、モータに繋がる部分の電圧を変えることができます。

直流から交流をつくりだす

交流モータの場合、車両の速度に応じてモータに流す電気の周波数を変化させる必要があります。インバータ装置は、直流から交流をつくりだす役割を果たしており、車両の速度が変わると、インバータ装置が出力する交流の周波数を変える必要があります。ここでは、モータに繋がる部分の電圧を切り替えることで、インバータ装置がどのように直流から交流を作り出しているのかについて解説します。

図4のモータを抵抗とコイルで構成される回路要素で表

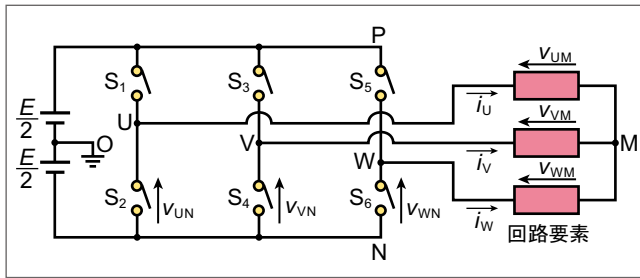


図6 インバータとモータの回路図

現し、図5に示した直流電源を電圧の等しい2つの電源に分離したものを図6に示します。図6のOは基準となる電圧の点です。

図5に示した考え方を基にU相、V相、W相に繋がる3つのアームのOn/Offのタイミングを、120度ずらすことで、三相交流を作ります。

インバータの動作波形を図7に示します。各スイッチのOn/Off信号は、図7(a)となります。 $\overline{S_2}$ は S_2 の反転信号で、 S_2 がOnのとき $\overline{S_2}$ はOffとなります。このときのU相、V相、W相の各電圧(相電圧)は、図7(b)となります。図6のゼロ電圧が、図5での $E/2$ に相当するため、ゼロ電圧を挟んで $\pm E/2$ に変化しています。モータの入力端子に加わる電圧である各相電圧の差(線間電圧)は、図7(c)となります。図7(c)から、線間電圧はゼロ電圧を挟んで $\pm E$ に変化していることが判ります。このように、スイッチのOn/Offを切り替えることで、モータに加わる電圧が $+E$, 0 , $-E$ に変化します。これが、直流から交流を作り出すしくみです。

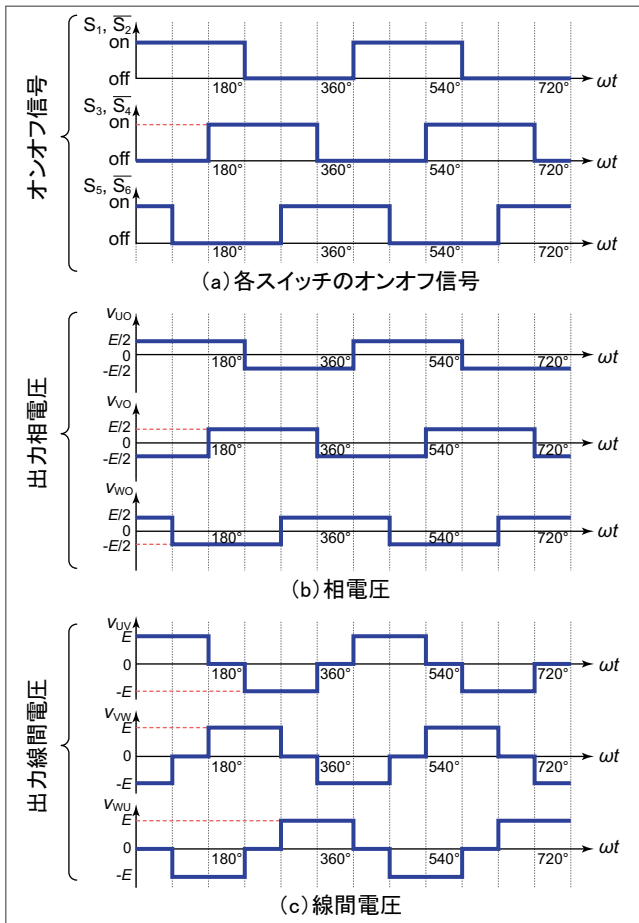


図7 インバータの動作波形

スイッチのOn/Offを決める

直流から交流を作り出す手段の代表的なものとして、パルス幅変調(PWM: Plus Width Modulation)方式があり

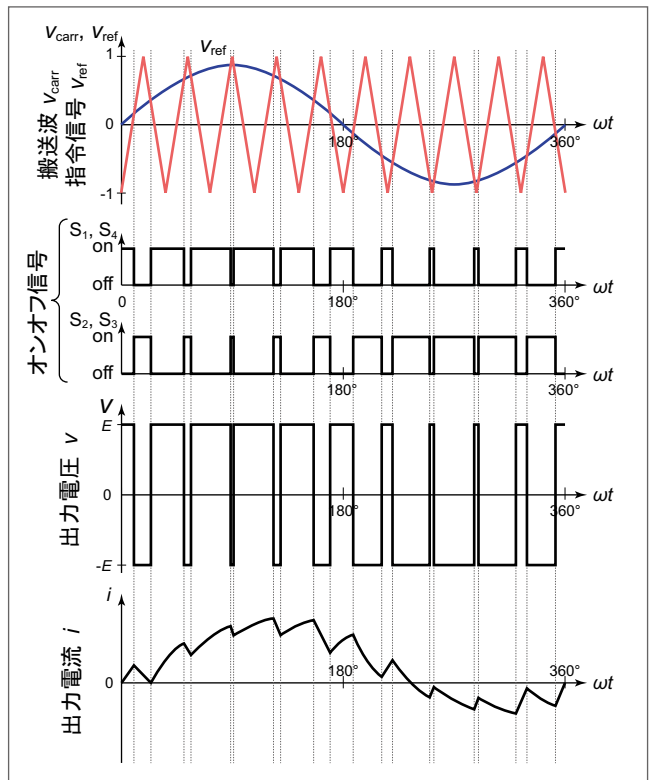


図8 PWM変調の例

ます。これは、スイッチをOn/Offしている時間の幅を調整することで、出力される交流の電圧振幅(大きさ)や周波数を制御するものです。図8にPWM変調の例を示します。

基準となる波形(搬送波)に対して、出力したい波形(指令信号)が大きい時は上アーム:On/下アーム:Off, 逆の場合は上アーム:Off/下アーム:Onとします。このようにOn/Offを決めることで、指令信号が大きいほど上アームがOnとなる時間が長くなります。逆に、指令信号が小さいほど下アームがOnとなる時間が長くなります。この結果、指令信号に基づいて出力される電圧の平均値が制御されます。また、指令信号に基づいてスイッチのOn/Offを決定しているため、出力される交流の周波数は指令信号の周波数と等しくなります。

電源が交流の場合は？

新幹線をはじめとする、交流を電源とする車両では、交流を直流に変換する電気機器を搭載しています。交流を直流に変換することを、電気用語では「整流」と呼ぶため、この電気機器を整流器と呼びます。整流器の基本動作を図9に示します。電源の電圧の向きに応じて、スイッチを切り替えることで、出力側の電圧の向きを一定にしています。出力される直流電圧は、向きは変化しませんが大きさが変化してしまうため、直流出力部分にコンデンサを接続して電圧の変化が少なくなるようにしています。以前はダイオード整流器が使われていましたが、近年は半導体スイッチを用いたPWM整流器が広く使われています。PWM整流器の回路構成を図10に示します。PWM整流器では、加速する場合は交流から直流への変換を行い、減速する場合はインバータのように直流から交流への変換を行うこともできます。

電気ブレーキの仕組み

減速する際に、モータを発電機として動作させることで、走行エネルギーを電気エネルギーに変換することができます。このような電気ブレーキには、発電した電気を車両に搭載された抵抗器で熱として消費する「発電ブレーキ」と、発電した電気を他の列車で消費してもらう「回生ブレーキ」があります。回生ブレーキでは、発電した電気が他の列車で消費されない場合は、ブレーキ力が得られません。このような状態を「回生失効」と呼びます。そこで、回生失効が生じる恐れのある線区を走る車両では、回生ブレーキと発電ブレーキを併用することで、電気ブレーキ力を確保す

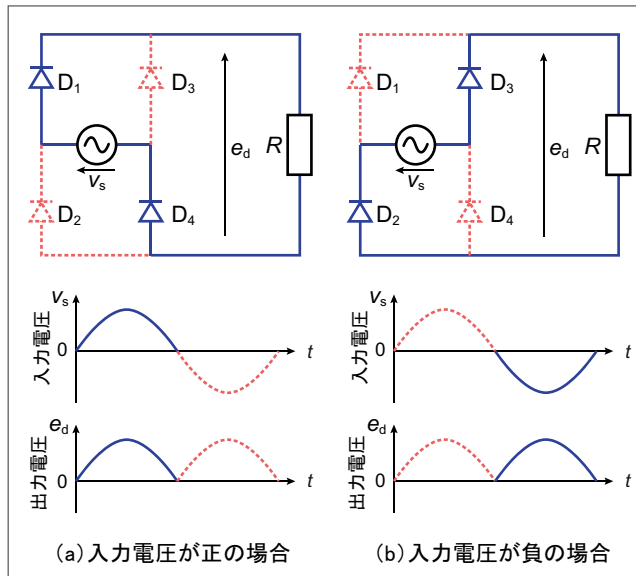


図9 整流器の基本動作

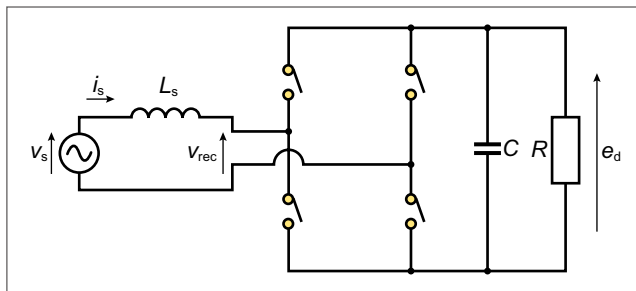


図10 PWM整流器の回路構成

るものもあります。

電気は、電圧の大きい方から小さい方に電流が流れる性質があるため、回生ブレーキの場合電源の電圧よりも発電機の電圧を高くすることで、電源側に電気を戻すことができます。鉄道では、直流モータの時代からこのような取り組みを通じて、省エネルギー化が図られてきました。

おわりに

半導体スイッチを使用したインバータ装置などは、今後も広く使用されていくと思われます。モータを動かす電気の流れは、以前は機械スイッチの切り替わりなどである程度は視覚的に見ることができました。しかし、半導体スイッチが広く使用されている現在は目で直接的に観測することができないため、難しいと感じられる方も多いかと思えます。本稿が、モータを動かす電気の流れを理解するための一助となれば幸いです。RRR