

# VVVFインバータ

— 直流から交流を発生させ誘導電動機を駆動する —

近藤 圭一郎 (千葉大学大学院 工学研究科 電気電子系コース 准教授)

## インバータの役割と意義

～誘導電動機駆動に不可欠な装置～

インバータとは、半導体による電氣的なスイッチ（電力用半導体スイッチング素子）のON・OFFにより直流の電力を交流の電力に変える装置です。鉄道の分野では主に、車両を駆動する誘導電動機の制御に用いられています。電気鉄道では長年、整流子のメンテナンスが必要な直流電動機が車両駆動に用いられてきましたが、GTO (Gate Turn Off Thyristor) 等の半導体スイッチング素子の大容量化により、日本では1980年代から整流子の無い誘導電動機が用いられるようになりました。その結果、車両のメンテナンスは大幅に軽減された他、誘導電動機とインバータを組み合わせると高性能な回生ブレーキ（主電動機を発電機としてブレーキをかけ、発電した電力を架線に返すブレーキ方式）も実現可能となり、省エネルギー化にも貢献しました。その後、半導体素子の主流はIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) に代わり、インバータ装置の小型軽量化、高効率化、出力高調波（出力したい交流電圧以外の周波数成分の波形）低減等が進み現在広く用いられています。

## インバータとは？

～直流から交流を発生させる原理～

直流電圧から交流電圧を発生させる電圧形インバータを取り以下説明します。電圧  $E_d$  の直流電源に、4つのスイッチを用いて図1のように接続します。S1とS4をON、S2とS3をOFFとすると負荷には矢印の向きを正として、 $E_d$  [V] の電圧がかかります。また、S2とS3をON、S1とS4をOFFとすると、負荷には  $-E_d$  [V] の電圧がかかります。これを時間  $T/2$  [sec] 毎に繰り返すことで、図1の下部に示すように負荷の両端には、周波数  $f = 1/T$  [Hz] の矩形波（短冊状の波形）の交流電圧が発生します。これがインバータによって直流電圧を交流電圧に変換する原理です。スイッチのON・OFFで直流電源から容易かつ損失を少なく交流を発生させることができます。スイッチは外部の電圧信号（ゲート信号）により電氣的にON・OFFすることで、1秒毎に1000回以上の高速なON・OFF動作が可能となります。

## 電圧と周波数を制御する方法

～パルス幅変調 (PWM) 方式～

交流の電圧や電流には、その大きさを表わす振幅（単位VやA）と正負が交互に

入れ替わる周期を表わす周波数（単位Hz）があります。交流電力を制御するためには、これらを制御する必要があります。例えば、図1のような回路の場合に負荷にかかる交流電圧を制御する方法は以下の通りです。周波数については、S1とS4をON（S2とS3をOFF）としている時間およびS2とS3をON（S1とS4をOFF）としている時間の長さ  $T/2$  を調節すれば調整できます。電圧については、直流電源の電圧が常に

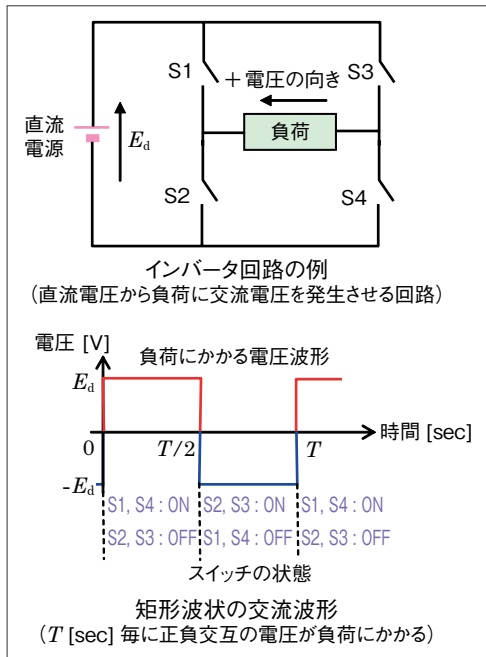


図1 インバータの原理

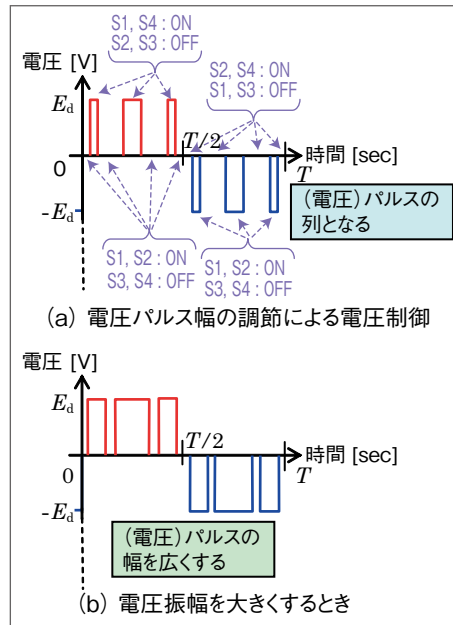


図2 負荷にかかる交流電圧と周波数を調節する原理

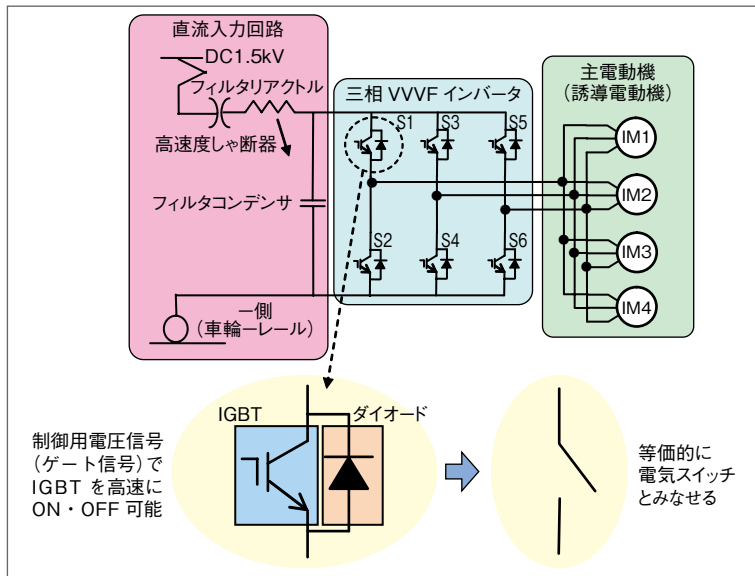


図3 直流電車の主回路構成例  
(架線の直流1500VをVVVFインバータで三相交流に変換する)

$E_d$ で一定ですので、このままでは負荷の交流電圧も一定のままです。そこで、図2(a)に示すように負荷に正の電圧が掛かっている0secから $T/2$ [sec]の間で、S1とS4をONしている時間とS1とS3をONしている時間、すなわち、負荷に $E_d$ [V]がかかっている時間と0Vがかかっている時間を、交流の振幅に応じて調節します。負荷に負の電圧がかかっている期間、すなわち、 $T/2$ [sec]から $T$ [sec]の間については、S2とS3をONしている時間とS2とS4をONしている時間を調節して、負荷に $-E_d$ [V]がかかっている時間と0Vがかかっている時間を調節します。これは丁度、パルス状の電圧をかけ、その時間幅を調節することで、交流電圧を制御することから、パルス幅変調(Pulse Width Modulation: PWM)方式と呼ばれます。電圧振幅を調整する際、例えば、図2(b)に示すようにパルス幅を広くすれば、負荷にかかる交流電圧を高くすることができます。

### 鉄道車両駆動用インバータ ～三相VVVFインバータ～

図3は実際の直流電車の駆動に用いられるインバータ車の主回路例です。ピンク色の部分は、架線から供給される直流1500V電源を受ける直流入力回路、水色の部分がVVVFインバータ、緑色の部分が負荷である三相誘導電動機です。水色のインバータは誘導電動機が三相であることからやはり三相インバータとなっています。図1の回

路の上下2つのスイッチ(例えばS1とS2)を1組としたものを相と呼びますが、図3の回路ではS1, S2の相(U相), S3, S4の相(V相)およびS5, S6の相(W相)の3つを用いて三相インバータを構成します。S1～S6のスイッチはIGBTとダイオードから構成されます。IGBTは電圧信号で主電流のON・OFFを行う半導体素子です。ダイオードは電流を一方に流す機能を持った半導体素子です、この2つを組み合わせると双方向の電流を制御可能な一つの電気的なスイッチを構成します。インバータはPWMにより、可変電圧可変周波数出力されるので、Variable Voltage Variable Frequency(VVVF)インバータと呼ばれます。三相インバータでは、任意の2つの相間(例えばU相V相間)の波形は図2と同様ですが、各相間電圧の位相(時間)は120度ずつずれて出力されます。こうして三

相誘導電動機のトルクや回転数に応じた適切な三相交流電圧を出力することが可能となります。

### 車両駆動用インバータの技術動向 ～さらなる小型軽量化・高効率化～

直流・交流の電力変換回路であるインバータの代表的な性能指標としては、小型軽量化や高効率化等が挙げられます。これは車両搭載スペース節減や車両質量低減および低損失化による省エネルギー化、軸重軽減による軌道メンテナンス低減等に効果があります。インバータの性能は主に、用いる半導体スイッチング素子によって決まります。素子の主流は現在IGBTですが、6.5kV耐圧IGBTの登場により車両駆動用で必要とされる耐圧の上限は達成されました。また、素子はスイッチングや電流を流すことによる損失が発生しますが、これの低減についても、ほぼ限界に達しています。この半導体素子は現在シリコン(Si)をベースとしたものとなっていますが、これをシリコンカーバイド(SiC)という材料で置き換えることで、高熱に耐え、高速でスイッチングも可能な素子の開発が行われています。高熱に耐えるようになると、結果的に冷却装置(インバータの質量の中で大きな割合を占める)が小さくなり、小型軽量化が期待できます。また、高速でスイッチングすることにより、望ましくない高調波電圧成分も低減されます。このように新しい半導体素子の登場によりさらなる車両用インバータの性能向上が期待されています。