

# 電動機の技術 第6回

## —かご型誘導電動機の駆動と制御—

森本 雅之\*

### 1 はじめに

今回はかご型誘導電動機の駆動について述べる。商用電源を用いる場合の始動、速度制御法に続き、現在広く使われているインバータによる制御について説明する。なお、巻線型誘導電動機の駆動制御については次回の第7回に述べる。

### 2 誘導電動機の始動

静止している誘導電動機を直接電源に接続すると、定格電流の6～8倍程度の始動電流が流れる。また、始動トルクは定格トルクよりも大きい場合もあり、始動時の機械的なショックが大きい。

大きな始動電流により、電源電圧が低下する。また、過大な電流により電動機巻線や設備配線の過熱を招く。さらに、大きな始動トルクにより機器への機械的な衝撃も大きい。そのため、各種の始動法を用いて始動特性を改良することが行われる。本稿では、かご型電動機に使われる始動方式について述べる。

#### 2.1 全電圧始動

全電圧始動は定格電圧を直接印可する方法である。じか入れ始動、ラインスタートとも呼ばれる。一般的に5kW程度以下で採用される。全電圧始動では始動時に定格電流の6～8倍程度の始動電流が流れる。始動電流の大きさに問題がないようであれば、この方式が採用できる。

始動電流は等価回路において滑り  $s=1$  とした状態のときに流れる電流である。等価回路において、回路定数は

$$r_1 + r_2' \ll x_1 + x_2' \quad (1)$$

の関係がある。等価回路から考えると、始動電流を制限するのは、ほぼ  $x_1 + x_2'$  だけとなる。 $x_1 + x_2'$  は漏れリアクタンスであり、非常に小さな値であるため、大きな始動電流が流れる。また、始動時の力率も低い値となる。しかし、全電圧始動は、特別な始動装置を用いる必要がなく、最も簡単な方法である。なお、以下に述べる始動方式は全電圧始動に対して減電圧始動と総称される。

#### 2.2 Y-Δ 始動

Y-Δ 始動は、始動時だけ Y 結線とし、ほぼ全速度に達したとき、巻線を Δ 結線に戻す方式である。始動時には Y 結線の相電圧は線間電圧の  $1/\sqrt{3}$  となるので、Δ 結線で始動したときの  $1/3$  の始動電流となる。これにより始動電流が低減できる。

ただし、トルクは電圧の2乗に比例するので、トルクも  $1/3$  に低下する。したがって、無負荷または軽負荷で使用される。電動機の巻線の両端を外部に接続できるよう引き出し、図1に示すように Y-Δ 始動器の回路を接続する。始動時は MC ①を閉じ、MC ②を開放して Y 結線とする。加速後、MC ①を開放し、MC ②を閉じて Δ 結線とする。減電圧始動方式のうち、始動装置が最も安価であり、45kW以下の電動機で採用されている。

Y-Δ 始動では、Y 結線から Δ 結線に切り替わる瞬間に電圧がゼロになり、電動機が空転状態になる（これはオープン状態と呼ぶ）。空転中は電動機のトルクはゼロであり、Δ 結線に切り替わった瞬間にトルクが発生し、突入電流が流れる。この突入電流により電動機に機械的なショックが生じる。これを改良するため、クローズド Y-Δ 始動方式が用いられる。

\* Masayuki Morimoto モリモトラボ

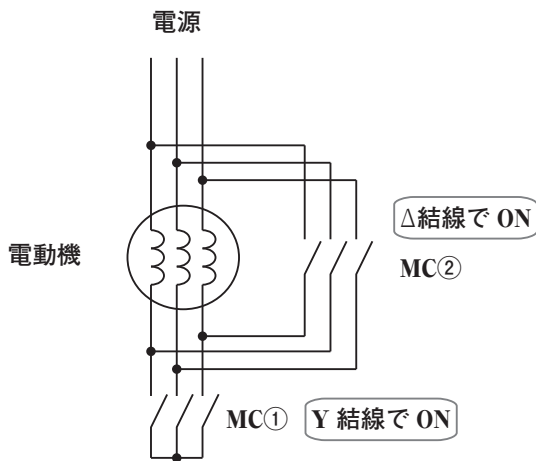


図1 Y-Δ始動法

クローズドY-Δ始動方式ではY結線をΔ結線に切り換える基本的な仕組みは同一であるが、電流制限抵抗回路を並列接続する。MC①を閉じてY結線で始動する。Δ結線への切り替え前に、MC②を閉じてΔ結線された電流制限抵抗を接続する状態とする。その後MC③により抵抗を短絡し、電動機をΔ結線に切り換える。これにより無電圧の状態がなくなり、突入時の電流は抵抗回路により吸収される。したがって、Y-Δ切換時の突入電流による電圧低下及び切り換え時のショックを低下することができる。

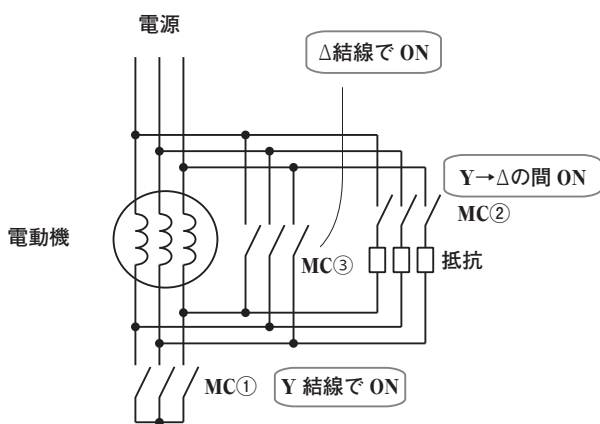


図2 クローズドY-Δ始動法

### 2.3 リアクトル始動

始動時に電動機と電源との間にリアクトルを直列接続し、始動完了後に、このリアクトルを短絡する。リアクトルの電圧降下により電動機に加わる電圧が低下するので減電圧始動となる。リアクトルにより電圧を $1/n$ に低下させた場合、始動電

流は全電圧始動の $1/n$ となる。このとき、トルクは電圧の2乗に比例するので、始動トルクは、 $1/n^2$ となり、始動電流の減少より始動トルクの減少のほうが大きい。そのため、この方式は始動電流の低下ではなく、機械的なショックの低下を目的として採用される。

始動後の加速途中では、電動機のインピーダンスが高くなってゆくの、電流が減少し、電動機の端子電圧が高くなってゆく。そのため、加速中のトルクが電流の減少に伴って高くなるので、加速中のトルクはY-Δ始動方式より大きい。

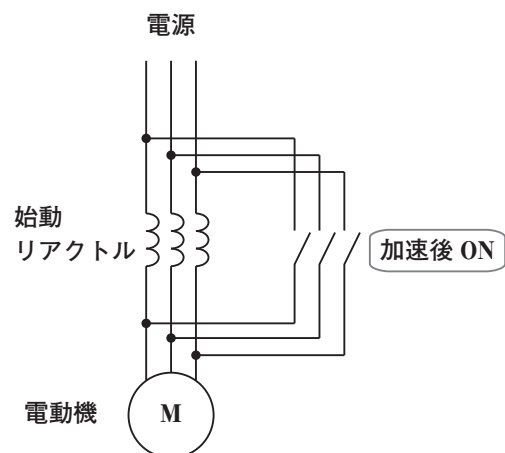


図3 リアクトル始動

### 2.4 コンドルファ始動

コンドルファ始動は、単巻変圧器を用いて減電圧する方式である。単巻変圧器に中間タップを設け、始動時はMC②は開放し、MC①を閉じる。これにより中間タップに相当する電圧が電動機に印可される。加速後にMC①を開くと、電動機にはリアクトルが直列接続されることになる。最終的にMC②を閉じれば電動機には全電圧が印可される。

単巻変圧器のタップを $1/n$ とした場合、始動電流は全電圧始動の $1/n^2$ となり、始動トルクも $1/n^2$ となる。したがって、始動トルクの低下に対し、始動電流の低下が大きく、良好な始動特性が得られる。ただし、始動装置としては最も高価である。

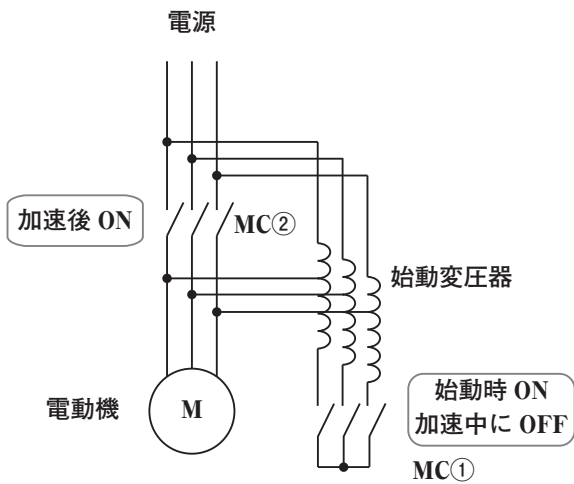
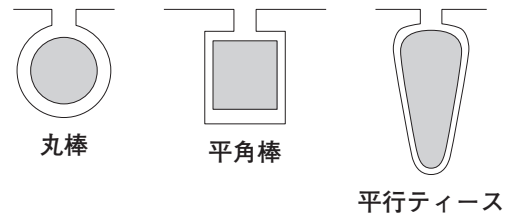


図4 コンドルファ始動



(a) 普通かご型



(b) 深溝型

(c) 二重かご型

図5 かご型導体

### 2.5 その他の方式

このほか、あまり使われていない方式を簡単に紹介する。リアクトル始動のリアクトルに代えて抵抗を用いるのが一次抵抗始動である。抵抗による発熱が大きいリアクトルより安価である。また、三相のうち一相だけ抵抗またはリアクトルを挿入する方式をクザ始動という。始動時のショック低下のために用いられる。さらに、サイリスタの位相制御により、端子電圧を徐々に増加させるソフトスタータによる始動方式もある。

### 3 特殊かご型電動機

かご型誘導電動機は回転子導体の形状によって始動特性が変化する。始動特性を改良するために、回転子導体の形状を変更する。図5 (a) に示す普通かご型導体は丸棒などで、縦横比があまり大きくない。普通かご型は小型機に使われている。(b) の深溝型と (c) の二重かご型は特殊かご型と呼ばれ、中大型機に使われている。

特殊かご型誘導電動機は回転子の二次周波数  $sf$  の変化を利用することにより、自動的に二次抵抗の大きさを変化させる。始動時には二次抵抗を大きくし、運転時には小さくする。これにより始動特性が改善される。一般に5.5kW 以上では特殊かご型を用いている。

深溝かご型は図5 (b) に示すような縦横比の大きい細長い断面の導体である。スロットの周りの漏れ磁束は図6 に示すようにスロット底部のほうが多く、漏れリアクタンスが大きい。始動時は二次周波数が高いため、始動時のスロット内の電流は表皮効果によりスロット上部に集中する。これにより実効抵抗が増加し始動電流が低下する。また、二次抵抗の実効抵抗が大きくなるので始動トルクも大きくなる。

運転時は二次周波数が低くなるのでリアクタンスの影響は小さくなり、電流は均一に分布する。また、実効抵抗も小さくなるので運転特性は良好となる。

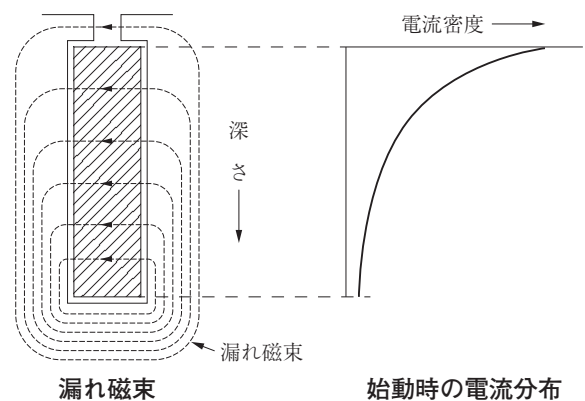


図6 深溝型導体の磁束と電流の分布

二重かご型は図5 (c) に示すように回転子の導体を二つに分けている。外側導体は断面積が小さく、抵抗が大きい。内側導体は断面積が大きく、抵抗が小さい。二重かご型導体の漏れ磁束を図7に示す。外側導体の上下はスロットに面しており、鉄心でないので漏れ磁束は少ない。そのため、漏れリアクタンスは小さい。一方、内側導体は漏れ磁束が多いので、漏れリアクタンスも大きい。

始動時の二次周波数が高い間は、リアクタンスの影響が大きくなるので、電流は主に抵抗の高い外側導体を流れる。運転時には二次周波数が低くなるので、リアクタンスの影響は小さくなり、電流は主に抵抗の小さい内側導体に流れる。

このように、始動時は高抵抗の外側導体により始動電流が低下し、始動トルクが増加する。

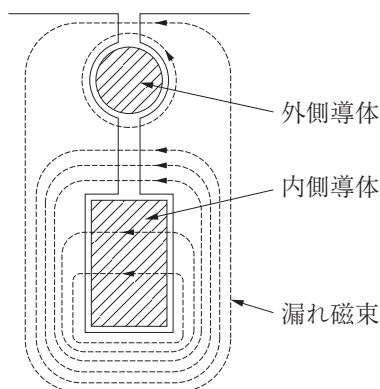


図7 二重かご型導体の磁束

## 4 制動と速度制御

### 4.1 制動

制動とは負荷の運動エネルギーを吸収することにより回転速度を低下させることである。制動には、電氣的にエネルギーを吸収する電気制動と摩擦などを利用する機械制動がある。

電気制動のうち、発電制動は、誘導電動機を直流励磁することにより、電動機を交流発電機として動作させ、運動エネルギーを電気エネルギーに変換することにより制動する。かご型電動機の場合、かご型巻線のみで電力を消費することになるので、運動エネルギーがすべてかご型回転子の発熱となり、電動機の温度上昇となる。また、制動トルクはそれほど大きくない。

逆相制動は、回転中に三相巻線のうち2本を入れ替えて逆転接続する。停止後に逆転運転しないように、回転速度を検出し、回路を切る必要がある。逆相制動は大きな電流が流れ、またトルクも大きい。これは直流電動機と同様にプラグギングと呼ばれる。

逆相制動は電動機の軸が回転磁界と逆方向に回転している状態であり、重量物の巻きおろしではこの状態が出現する。

回生制動は電動機と同じ接続で、同期速度より高い速度で運転する。電動機が発電機動作をするので、電源に電力が戻る。重量物の巻きおろしで、この状態が出現する。

機械的制動は、摩擦ブレーキを用いる制動である。このうち電磁ブレーキは制動動作に電磁石を利用したものである。なお、うず電流ブレーキはうず電流を発生させ、電力を消費させる制動であり、電気制動の一種である。

### 4.2 速度制御

誘導電動機の数  $N$  [ $\text{min}^{-1}$ ] は次の式で表される。

$$N = \frac{120f}{P}(1-s) \quad (2)$$

この式の周波数  $f$ 、滑り  $s$ 、極数  $P$  のいずれかを変更すれば速度が変更できる。ここでは、極数  $P$  を変更する極数変換と、滑り  $s$  を変更する一次電圧制御について説明する。周波数  $f$  の変更は次章にて述べる。

誘導電動機のトルクは次のように表される。

$$T = \frac{3}{\omega_0} V_1^2 \frac{r_2'/s}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \quad (3)$$

すなわち、トルクは一次電圧  $V_1$  の2乗に比例する。一次電圧制御法は、これを利用する。一次電圧誘導電動機のトルクを図8に示す。電圧を下げてゆくと図に示すようにトルクが低下してゆく。この電動機が駆動している負荷の必要とするトルクが図のように回転数に応じて変化するものとする。このとき、電動機のトルク曲線と負荷のトルク曲線の交点となる回転数で運転する。すなわち、電動機の発生するトルクと負荷の必要とするトルクが釣り合う回転数で運転する。

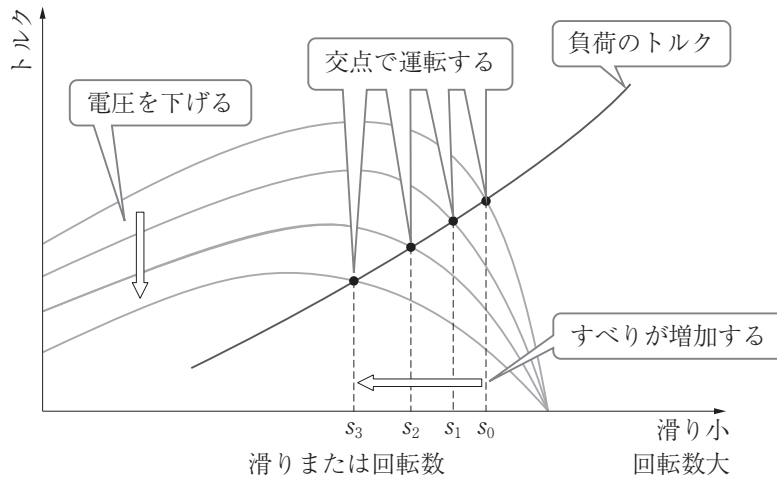


図8 一次電圧制御によるトルク

したがって一次電圧を低下させれば、滑りは  $s_0 \rightarrow s_1 \rightarrow s_2 \rightarrow s_3$  と増加する。つまり、滑りが変化するので速度制御が可能である。一次電圧の制御にはサイリスタの位相制御などが用いられる。位相制御とは、電圧波形の各周期の位相に応じてオンすることにより電圧調整する方法である。電圧は変更できるが周波数は電源周波数のまま変更されない。なお、この方法は、速度制御範囲がそれほど大きくないこと、および、滑りが大きくなるので電動機効率が低下することなどに注意を要する。

極数変換はあらかじめ極数変換を行うように設計された極数変換電動機を用いる。同一鉄心に二組以上の巻線を設けるか、または同一の巻線を接続の切り替えにより異なった極数が得られるようにする。この方法は2段または3段程度の段階的な速度の切り替えが可能である。図9に示すよう

に接続を変更すれば同一の巻線で4極と8極の電動機として運転できる。かご型電動機では回転子の極数は固定子の極数に対応して同一となるので、かご型電動機のみで可能な方式である。

### 5 インバータによる制御

誘導電動機の周波数を変更して回転数を制御する場合、インバータを使用する。インバータとは、直流電力を交流電力に変換する回路をさす。しかし、一般にはインバータ回路を含んだ装置をインバータと呼んでいる。商用電源で利用するインバータは図10に示すような構成になっている。インバータは、商用電源の交流を整流回路で直流に変換し、その直流を、さらにインバータ回路で交流に変換する。つまり、AC → DC → AC という電力変換を行う。インバータ回路により、任意の電圧、周波数の交流に変換して出力する。

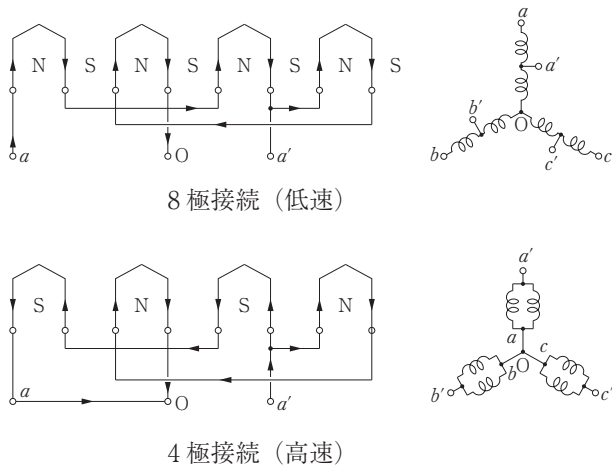


図9 極数の切り替え

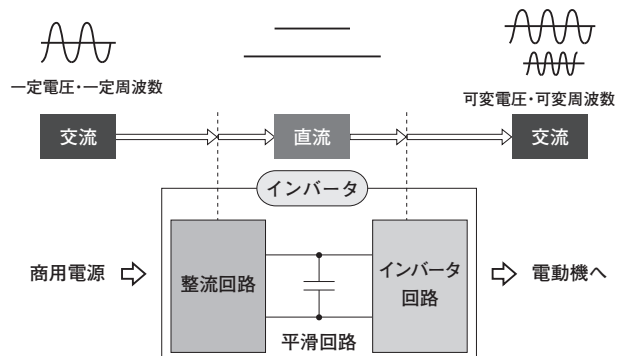
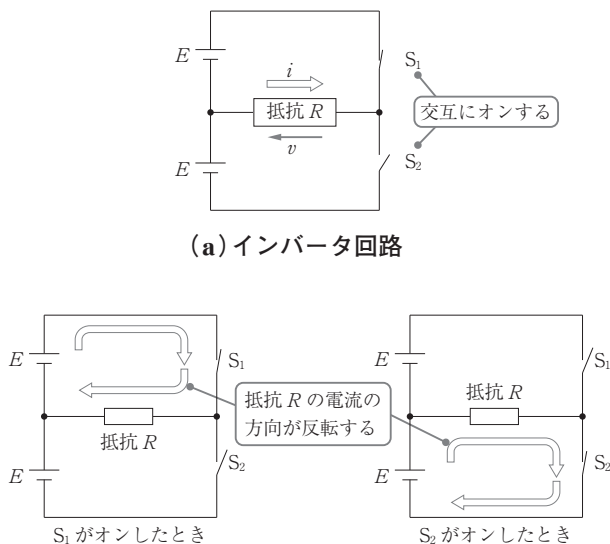


図10 インバータの構成

インバータの原理を図11 (a) に示すような、二つの直流電源と二つのスイッチで構成された回路により説明する。二つの直流電源はそれぞれ  $E$  [V] の電源であり、直列に接続されている。二つのスイッチは、 $S_1$ がオンの期間には $S_2$ はオフし、 $S_1$ がオフの期間には $S_2$ はオンする。二つのスイッチは交互にオンオフし、 $S_1$ と $S_2$ は同時にオンしないと約束する。

スイッチのオンオフにより流れる電流を図11 (b) に示す。 $S_1$ をオンすると、抵抗  $R$  には右から左へ電流が流れる。 $S_1$ をオフして、 $S_2$ をオンすると、抵抗  $R$  には電流が左から右に流れる。抵抗  $R$  を流れる電流の向きが反転している。このようにして $S_1$ と $S_2$ を交互にオンオフを繰り返せば、抵抗  $R$  に流れる電流の方向が反転を繰り返す。



(a) インバータ回路  
 (b) 抵抗を流れる電流  
 図 11 インバータの原理

このようにスイッチングをしたとき、抵抗  $R$  の電圧はスイッチの切り替えに応じて  $+E$  と  $-E$  に入れ替わる。また、電流は、抵抗  $R$  の大きさと電圧  $E$  からオームの法則 ( $I=E/R$ ) で決まる。波形を図12に示す。この波形は矩形波とよばれる。波形は正弦波ではないが、交流の定義は電流の方向が入れ替わることなので、これも交流の一種である。

一定周波数の交流を作るためには、 $S_1$ と $S_2$ のオン時間を等しく、さらに常に一定にしなければならない。オンオフの繰り返し時間が交流の周期  $T$  となり、周期を調節すれば望みの周波数 ( $f=1/T$  [Hz]) の交流に変換することができる。

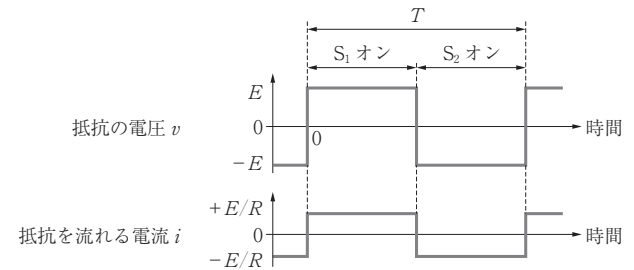
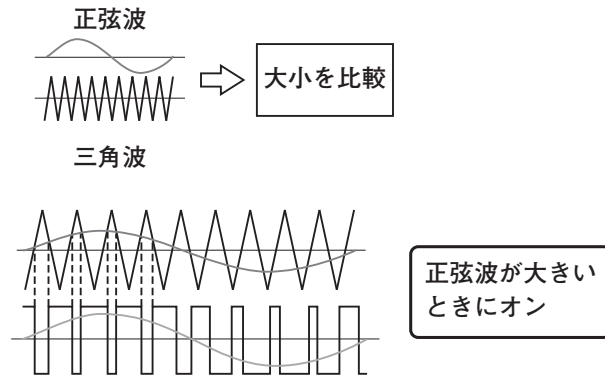


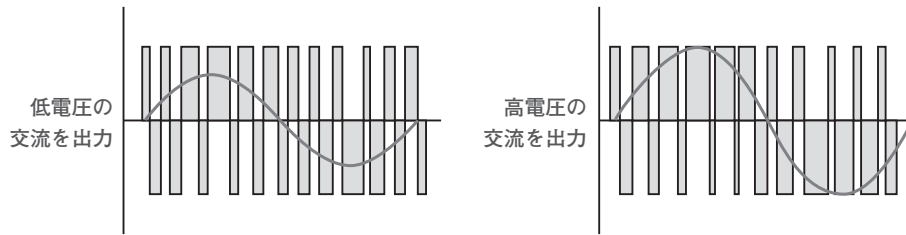
図 12 抵抗の電圧電流波形

しかし、これだけでは、交流の周波数は調節できても、電圧の大きさは一定であり、また、出力する交流は正弦波ではない。そのため、PWM (Pulse Width Modulation) 制御を行う。PWM 制御の原理を図13に示す。出力したい正弦波とそれよりも周波数の高い三角波の波形 (変調波, キャリア波) を信号波として利用する。この二つの信号波形の大きさを時々刻々と比較する。正弦波のほうが三角波より大きいときにスイッチをオンし、小さいときにはオフする。このようにオンオフするとオン時間は一定ではなく、常に変化する。しかも、オン時間は時刻とともに正弦波状に増減する。その結果、インバータの出力はオン時間が正弦波状に変化する電圧のパルス列が現れる。パルス列のパルス幅の変化を平均的に表すと正弦波状になる。正弦波状の平均電圧は正弦波の信号波の振幅に比例する。

電圧を制御するためには、信号波の正弦波の振幅を変更する。その結果、図 (b) に示すように、パルス幅が変化するので電圧の制御ができる。なお、出力電圧の上限はインバータ回路に入力する直流電圧により決まる。



(a) 三角波と正弦波



(b) 電圧の変更

図13 PWM制御

## 6 V/f一定制御

誘導電動機の等価回路（図14）において、固定子誘導起電力  $E_s$  は周波数に比例して変化する。固定子誘導起電力  $E_s$  は鎖交磁束  $\Phi_m$  により誘導される。すなわち、鎖交磁束と周波数の関係は次のように考えられる。

$$\Phi_m = \frac{1}{4.44w_1} \cdot \frac{E_s}{f} \quad (4)$$

この式から、周波数を変化させたとき、誘導起電力も変化させて、その比  $E_s/f$  が一定になるようにすれば、鎖交磁束数は変化しない。等価回路に示すように  $V_1$  と  $E_s$  の差は、 $r_1$  と  $jx_1$  による電圧降下である。この電圧降下が小さく、無視できると考えれば、 $E_s \approx V_1$  と考えることができる。したがって、固定子電圧  $V_1$  の振幅と周波数の比  $V/f$  を一定にすれば周波数を変更しても磁束がほぼ一定になる。図15に示すのは、 $V/f$  一定として周波数を変化させたときの誘導電動機のトルクである。これを  $V/f$  一定制御と呼ぶ。

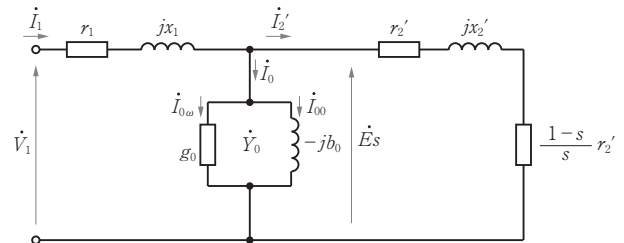


図14 誘導電動機の等価回路

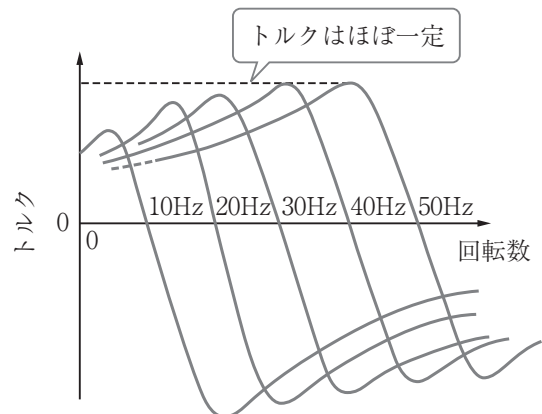


図15 V/f一定としたときの誘導電動機のトルク

誘導電動機をインバータで回転数制御する場合、 $V/f$ 一定制御を基本としたVVVF（Variable Voltage Variable Frequency）制御が行われる。

VVVF制御システムの周波数に対する電圧とトルクを図16に示す。図において、電圧が最大になる周波数を基底周波数（基底回転数）と呼ぶ。基底周波数以下は $V/f$ 一定制御、基底周波数以上では $V$ 一定制御を行っている。基底周波数とは誘導電動機の定格周波数である。つまり、基底回転数とは商用電源で駆動するときの回転数と考えればよい。

誘導電動機のVVVF制御は、基底回転数以下では定トルク特性となり、基底回転数以上では定出力特性となる。定出力特性とはトルクが回転数に反比例して低下する運転である。

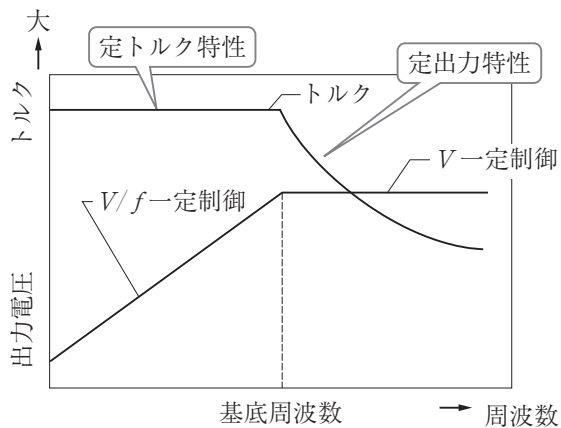


図16 VVVF制御

ここで図15をもう一度よく見てみると、 $V/f$ 一定制御した誘導モータの最大トルクは低周波数のときは小さくなっている。これは端子電圧 $V$ を制御しているためである。 $V/f$ 一定制御の前提として $E_s \approx V_1$ と仮定したが、低周波数では $r_1$ と $jx_1$ による電圧降下の比率が大きくなる。そのため、低周波では磁束が減少し、トルクが低下する。そこで、低周波時のトルクの低下を防ぐために、図17に示すようにトルクブーストと呼ばれる制御を行う。このように低周波数域で電圧を高く設定することにより電圧降下が補償できるので、磁束を一定に保つことができる。トルクブーストにより始動トルクも増加する。市販のインバータ装置では、各種の $V/f$ のパターンを調節することが可能である。

$V/f$ 一定制御はインバータと電動機を3本の電源線を接続するだけで制御が可能なので、回転数制御に広く使われている。

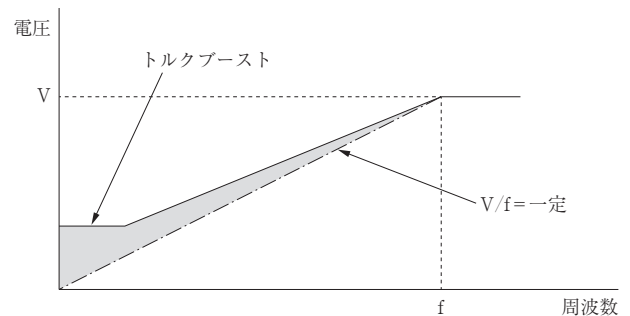


図17 トルクブースト

## 7 ベクトル制御

ベクトル制御とは、交流電動機を流れる電流を、トルクを発生する電流成分（トルク電流）と磁束を発生する電流成分（励磁電流）とを分けて考えることにより電流の位相も制御する方法である。これにより、回転磁界の磁束の方向と大きさをベクトル量として制御できるようになるため、ベクトル制御とよばれる。英語では磁界方向制御（field orientation control）ともいわれる。

ベクトル制御では、電動機の電流を励磁電流成分とトルク電流成分に分解し、それらを電動機の回転と同期して回転する座標上に座標変換する。この座標上では二つの成分の電流とも直流電流となる。しかも、この二つの電流は互いに直交している。したがって、この座標上では励磁電流成分が他励直流電動機の界磁電流に、トルク電流成分が直流電動機の電機子電流になっているように考えることができる。したがって、この座標上では他励直流電動機として制御することができる。つまり、直流電流の大きさだけでトルクが決定する。図18に示すように、励磁電流 $I_0$ とトルク電流 $I_2$ のときにトルクは $I_2$ に比例する。このときの端子に流入する線電流は $I_1$ に相当し、その位相は $\theta$ である。励磁電流 $I_0$ を保ったまま、二つの電流の直交関係が保たれるように、トルク電流を $I_2'$ とすれば、トルクは $I_2'$ に比例する。このようにすれば、誘導電動機のトルクをトルクセンサがなくても制御できるようになる。



ベクトル制御は誘導電動機の精密制御に使われるが、同期電動機の制御にも使われる。ベクトル制御によりトルクが直接制御できるため、精密な速度制御や位置制御などのサーボ制御に使われる。誘導電動機をベクトル制御するためには電動機に回転子位置および速度センサ、および交流電流センサを装着し、フィードバック制御する必要がある。

ベクトル制御は、単なる速度、トルクの制御精度が高いだけでなく、瞬時値を制御できるので、応答性が高い。V/f一定制御と比較すると、始動トルクが大きく、負荷変動があっても定速運転が可能で、速度制御範囲が広いという特徴がある。

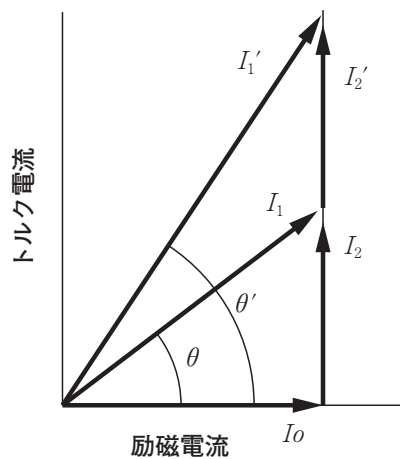


図 18 ベクトル制御

## 8 おわりに

本稿ではかご型誘導電動機の始動と制御について説明した。かご型電動機は次回述べる巻線型誘導電動機と異なり、ブラシが不要である。そのため、現在では大容量機まで含めて、ほとんど、かご型電動機が使われるようになっている。

本講座の掲載予定を以下に示す。

- 1 電動機を理解するための電磁気と電気回路 (2022年4月号)
- 2 電動機の基礎技術 (2022年6月号)
- 3 直流電動機 (2022年8月号)
- 4 直流電動機の制御と永久磁石直流電動機 (2022年10月号)
- 5 誘導電動機 (2022年12月号)
- 6 かご型誘導電動機の駆動と制御 (本号)
- 7 巻線型誘導電動機
- 8 同期電動機
- 9 電動機の絶縁
- 10 電動機技術の動向