

# パワーエレクトロニクス実験・実習教材

## 誘導モータの制御技術 その2

職業能力開発総合大学校 山本 修・佐々木英世・荒 隆裕

### 4. 三相かご形誘導モータ

#### 4.1 誘導モータの定義

誘導機はJEC-37<sup>1)</sup>において、「固定子および回転子に互いに独立した電機子巻線を有し、一方の巻線が他方の巻線から電磁誘導作用によってエネルギーを受けて動作する非同期機をいう。誘導機は通常整流子を持たない」とされる。また、「電動機として動作する誘導機」を誘導電動機（誘導モータ）といい、固定子によって発生する回転磁界より遅い回転速度で回転子が回る。この速度の差の比率をすべりという。誘導モータは、回転子の構造により分類され、「二次巻線がスロット中に納められた棒状の導体と鉄心の両端でこれらを短絡する短絡環とからなる誘導モータ」をかご形誘導モータという。

三相かご形誘導モータは、他のモータに比べて構造が簡単であり、堅牢で故障が少なく、低価格のため広く産業界で使用されている。

三相かご形誘導モータの構造、固定子巻線の設計法および回転原理等に関しては誌面の都合上、省略するが、これらについては文献<sup>2)</sup>に詳細に記述されている。

#### 4.2 三相かご形誘導モータの等価モデル

図6は、三相かご形誘導モータの等価モデルである。この等価モデルから電圧、電流およびインピーダンスの関係式（すなわち回路方程式）を求めると、(1)式となる。また、自己インダクタンスと相互イン

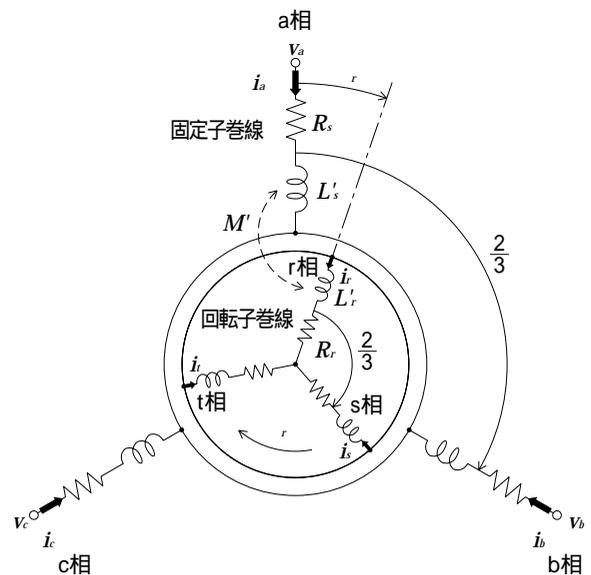


図6 三相かご形誘導モータの等価モデル

ダクタンスには漏れインダクタンスがあり、(2)式の関係がある。

### 5. ベクトル制御理論

直流モータは、一般にトルク発生にかかわる界磁ベクトルと電機子電流ベクトルが機械的に直交関係にある。したがって、磁気的な相互干渉がなく、また直流電流を用いることから瞬時のトルクの制御が容易である。それに対して交流モータは、巻線間の相互干渉があること、ならびに制御諸量が交流であることから瞬時トルクの取り扱いが難しい。

ベクトル制御では、交流諸量を回転する磁界方向軸とこれと直交する軸に分離することにより、励磁

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL'_s & -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} & PM\cos r & PM\cos\left(r + \frac{2}{3}\right) & PM\cos\left(r - \frac{2}{3}\right) \\ -P\frac{M'}{2} & R_s + PL'_s & -P\frac{M'}{2} & PM\cos\left(r - \frac{2}{3}\right) & PM\cos r & PM\cos\left(r + \frac{2}{3}\right) \\ -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} & R_s + PL'_s & PM\cos\left(r + \frac{2}{3}\right) & PM\cos\left(r - \frac{2}{3}\right) & PM\cos r \\ PM\cos r & PM\cos\left(r - \frac{2}{3}\right) & PM\cos\left(r + \frac{2}{3}\right) & R_r + PL'_r & -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} \\ PM\cos\left(r + \frac{2}{3}\right) & PM\cos r & PM\cos\left(r - \frac{2}{3}\right) & -P\frac{M'}{2} & R_r + PL'_r & -P\frac{M'}{2} \\ PM\cos\left(r - \frac{2}{3}\right) & PM\cos\left(r + \frac{2}{3}\right) & PM\cos r & -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} & R_r + PL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_r \\ i_s \\ i_t \end{bmatrix} \quad \dots(1)$$

$V_a, V_b, V_c$  : a, b, c相固定子電圧  
 $i_a, i_b, i_c$  : a, b, c相固定子電流  
 $i_r, i_s, i_t$  : a, b, c相回転子電流  
 $R_s$  : 固定子巻線抵抗  
 $R_r$  : 回転子巻線抵抗  
 $L'_s$  : 固定子巻線の自己インダクタンス  
 $L'_r$  : 回転子巻線の自己インダクタンス  
 $M'$  : 各巻線間の相互インダクタンス  
 $r$  : a相固定子巻線を基準にしたr相回転子巻線の電気角  
 $P$  : 微分演算子 ( $= d/dt$ )

$$\left. \begin{aligned} L'_s &= s + M' \\ L'_r &= r + M' \end{aligned} \right\} \quad \dots(2)$$

$s$  : 固定子巻線の漏れインダクタンス  
 $r$  : 回転子巻線の漏れインダクタンス

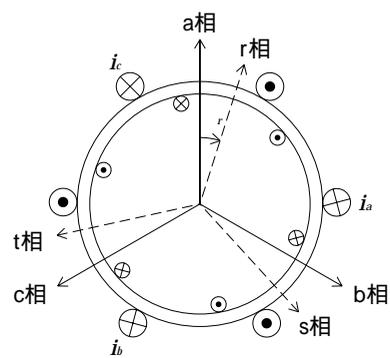
電流成分とトルク発生電流成分として直流モータと同様に、瞬時トルクの制御を可能としている。

### 5.1 三相巻線から二相巻線への変換

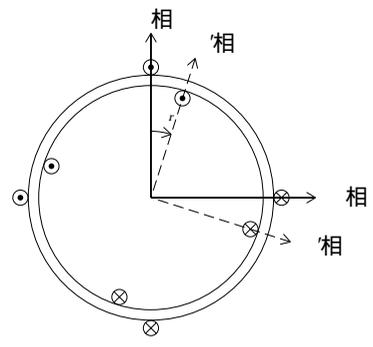
誘導モータの固定子巻線の基本構造は、図7(a)に示すように各相間が120°で配置されている。取り扱いを容易にするため、各巻線軸をa相と同一方向の相と、相と直交する方向の相に配置される等価な直交二相巻線に変換する<sup>3)</sup>(図7(b))

a相・b相・c相に流れる電流を  $i_a, i_b, i_c$  とすると、相、相に流れる電流は変換行列 [ C ] により(3)式のように表される。ここで 2/3は変換前後の電力が等しくなるための絶対変換係数である。

次に、回転子も同様に三相の巻線を持つと考え、変換行列 [ C ] により二相巻線に変換する。以上の



三相巻線の電流ベクトル



等価二相巻線の電流ベクトル

図7 三相巻線から二相巻線への変換

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_s \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \dots(3)$$

ただし,

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{3}{2} & -\frac{3}{2} \end{bmatrix}$$

$i_s, i_s$  : , 相固定子電流  
 $i_a, i_b, i_c$  : a, b, c相固定子電流

ことより, 座標系に変換した三相誘導モータの等価モデルは図8のように表される。

### 5.2 d q座標変換

変換では固定子巻線および回転子巻線の各々の三相巻線を巻線間の磁氣的結合を取り除くために, 等価な二相巻線へと変換した。しかしながら, この変換では固定子と回転子の間に両者の位置関係  $r$  による磁氣的相互干渉が残るので, 固定子にd q座標系を考え, 座標系をこの座標系に統一する。

回転子の 座標系の電流  $i_r, i_r$  のd q軸への変換は, (4)式で表される。

$$\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_r \\ i_r \end{bmatrix} \quad \dots(4)$$

ただし,

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos r & -\sin r \\ \sin r & \cos r \end{bmatrix}$$

$i_{dr}, i_{qr}$  : d, q相回転子電流  
 $i_r, i_r$  : , 相回転子電流  
 $r$  : 相固定子巻線を基準にした 相回転子巻線の電気角

d q座標系に変換した三相誘導モータの等価モデルは図9となる。図9では回転子が電気角速度  $r$  で回転しても, d q軸の回転子巻線の機械的な位置関係は変わらないため, 直流モータのようにブラシと整流子を通じて電流が流れる形として表現している。

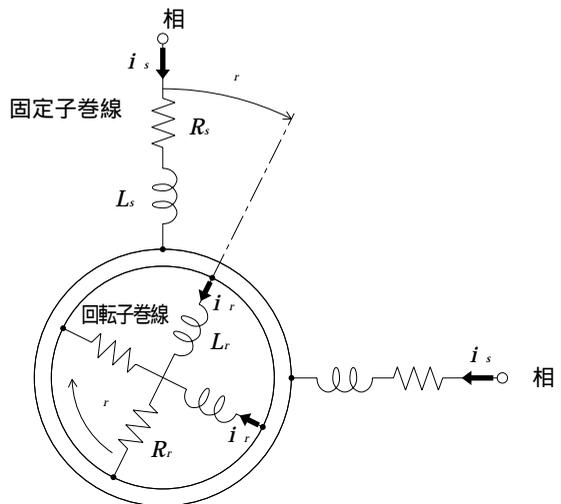


図8 二相交流で表した三相誘導モータの等価モデル

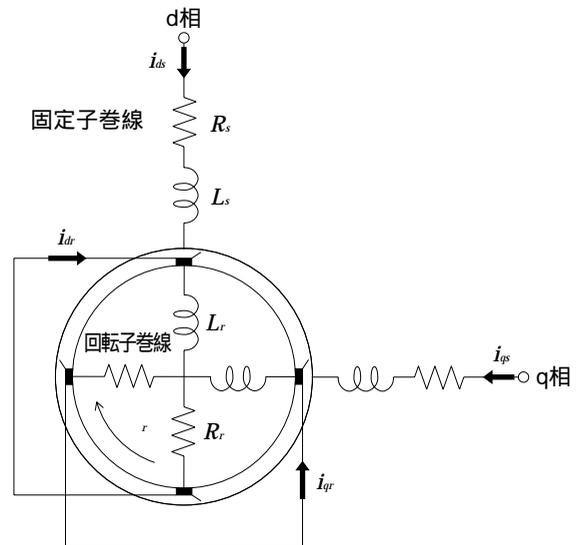


図9 d q座標で表した三相誘導モータの等価モデル

### 5.3 座標変換

静止した直交座標軸を持つ d q座標系での電圧, 電流の諸量は, 角速度 の交流量である。そこで, 図10に示すように, 電源角速度 で回転するd q軸 ( 軸と呼ぶ) を考えると, この 座標系の諸量は直流量となる。

図10の回路方程式は, (5)式のように表される。

さらに(5)式を固定子電流 ( $i_s, i_s$ ) と次式で表される回転子磁束 ( $r, r$ ), すなわち, (6)式を状態変数として状態方程式に変形すると, (7)式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s & PM & -M \\ L_s & R_s + PL_s & M & PM \\ PM & -( -_r )M & R_r + PL_r & -( -_r )L_r \\ ( -_r )M & PM & ( -_r )L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ i_r \\ i_r \end{bmatrix} \quad \dots(5)$$

$v_s, v_s$  : , 軸固定子電圧       $i_r, i_r$  : , 軸回転子電流  
 $i_s, i_s$  : , 軸固定子電流       $R_s, R_r$  : 式 と同じ  
 $L_s = s + M$        $L_r = r + M$        $M = (3/2)M'$

$$\left. \begin{aligned} i_r &= M i_s + L_r i_r \\ i_r &= M i_s + L_r i_r \end{aligned} \right\} \quad \dots(6)$$

発生トルク は、固定子電流によって生じる回転子磁束鎖交数と、これに直交する固定子電流の積和で表され、(8)式となる。

(8)式から明らかなように、トルクは電流指令値と定数の積で表すことができない。

そこで、DCモータやPMモータのように、回転子磁束鎖交数を一定値にしておき、発生トルクが回転子磁束と直交する電流に比例するように固定子電流を制御することを考える。つまり、

- 1) 軸回転子の磁束鎖交数を0に制御する
- 2) 軸回転子の磁束鎖交数を一定値にする

方法が考えられる。このように制御すれば(8)式は、(9)式となり、発生トルクが 軸固定子電流  $i_s$  に比例する形となる。トルクが(9)式となるためにはすべり周波数  $s$  を(10)式となるよう制御することによ

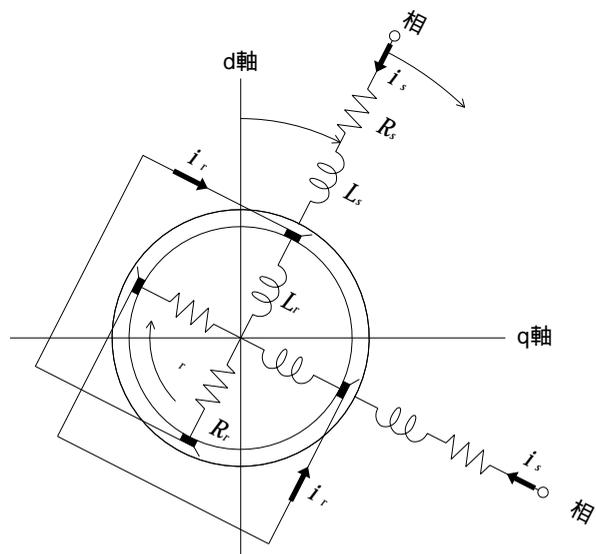


図10 座標で表した三相誘導モータの等価モデル

$$= p \frac{M}{L_r} (i_s - i_s - i_r) \quad \dots(8)$$

ここで、 $p$ は極対数

$$P \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ r \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} - \frac{R_r(1-s)}{L_r} & & \frac{MR_r}{L_s L_r^2} & -\frac{rM}{L_s L_r} \\ & -\frac{R_s}{L_s} - \frac{R_r(1-s)}{L_r} & -\frac{rM}{L_s L_r} & \frac{MR_r}{L_s L_r^2} \\ \frac{MR_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -r \\ 0 & \frac{MR_r}{L_r} & -( -_r ) & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_s \\ r \\ r \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_s \\ v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots(7)$$

は漏れ係数であり、

$$= 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

$$= p \frac{M}{L_r} \hat{i}_s \quad \dots(9)$$

て得られる。文献3)に詳細な記述がなされている。  
 (10)式および(11)式を用いてすべり周波数を演算し、固定子電流の電源角周波数を算出するブロック

$$s = -r = \frac{MR_r}{L_r} \hat{i}_s \quad \dots(10)$$

$$P \hat{i}_s = -\frac{R_r}{L_r} \hat{i}_s + \frac{MR_r}{L_r} i_s \quad \dots(11)$$

線図を描くと図11となる。実際のシステムにおいては、図12(図中)のように、簡単化される。

参考文献

- 1) 電気学会：電気規格調査会標準規格，誘導機JEC-37，1979年。
- 2) 荒：図説電気機器入門「変圧器および誘導機の制御」，電気工事の友，(社)関東電気協会誌，1989年3月～1990年1月。
- 3) 杉本他：「ACサーボシステムの理論と設計の実際」，総合電子出版，1990年。

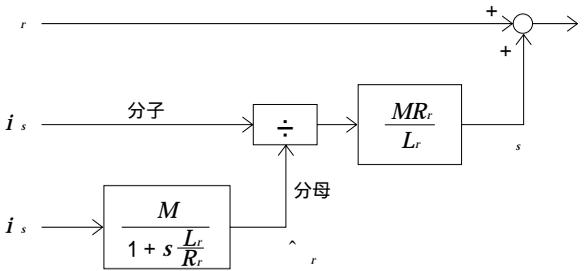
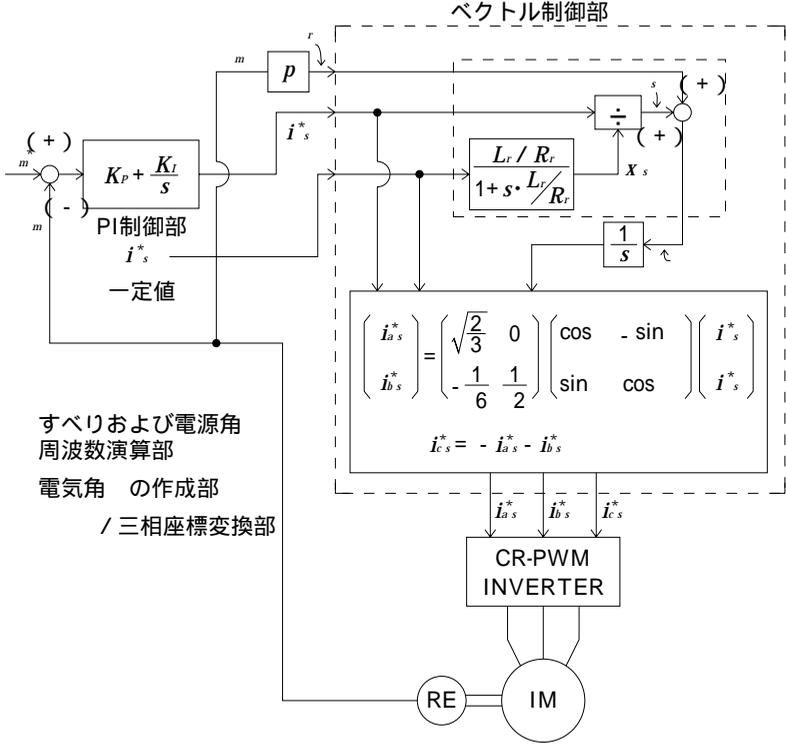


図11 すべり周波数および電源角周波数の演算ブロック線図



$m^*$  : 回転速度指令       $i_s^*$  : 励磁分電流指令       $r$  : 回転子の電気角速度  
 $m$  : 回転速度       $i_t^*$  : トルク分電流指令       $p$  : 極対数  
 IM : 誘導モータ       $i_a^*, i_b^*, i_c^*$  : 三相交流電流指令  
 RE : ロータリエンコーダ       $i_a, i_b, i_c$  : 三相交流電流

図12 ベクトル制御システムのブロック図