

回転磁界機のトランスベクトル制御の基本

(磁界オリエンテーションの原理)

Fundamentals of TRANSVEKTOR Control System for Rotating-field Machines (Principle of Field Orientation)

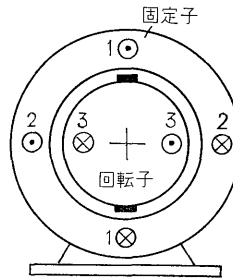
I. ま え が き

回転磁界機を電動機として使用する場合は電気トルクの発生とその可制御性が決定的な重要性をもっている。この場合、トルクに対する操作量としては、給電する周波数変換装置の種類（電圧を制御できるか電流を制御できるか）に応じて固定子電圧のベクトルあるいは固定子電流のベクトルが利用される。

この論文は回転磁界機の新しい制御方法である磁界オリエンテーションによるトランスベクトル制御を、非同期電動機を例として紹介するものである〔文献(1)~(4)も参照〕。非同期電動機の本来の特性にかかわらずトルクの制御をわずかな遅れ時間と良好なダンピングで行なえるようにするためには、上記の操作量をどのようにしなければならないか、について説明する。

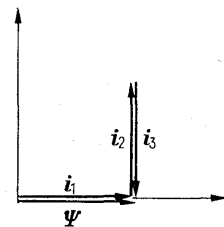
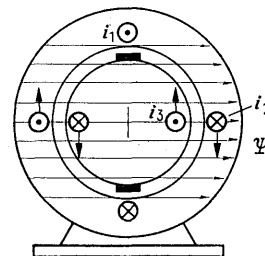
II. 電流制御における磁界オリエンテーション

磁界オリエンテーションの基本概念を説明するためには、直流電動機の特徴から出発するのがよい。そのため非突極形直流電動機を考えてみる（第1図）。このような電動機の固定子には直交した二つの巻線1および2が設けられている。回転子巻線はそれ自体回転するが、整流子により、あたかも静止している巻線のような作用を示す。界磁巻線1に電流 i_1 が流れると、この電動機に磁束 Ψ が作られる（第2図の左側）。回転子にトルクが発生するためには、回転子に存在する電機子巻線3にも電流 i_3 が流れなければならない。回転子電流と磁界が図示の方向に力を発生させる。回転子巻線の軸は磁界と直交しているので、これらの力により回転軸に働くトルクは最大となり、したがってこの回転子巻線の位置がトルク発生のために最も望ましい。他方、回転子巻線の電流 i_3 によってもやはり磁界が作られ、これはもとの磁界に対して直角方向に加わる。この作用は、磁界を最適の方向からずらすことになるので、望ましくない。したがって、この回転子磁界を補償するため、回転子巻線と対向して固定子に設けられている補償巻線2に i_3 と等大逆方向の電流 i_2 を流す ($i_2 = -i_3$)。この固定子巻



1. 界磁巻線
2. 補償巻線
3. 電機子巻線

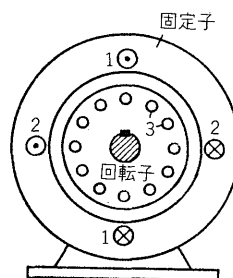
第1図 直流電動機の基本的表現
Fig. 1. Schematic description of direct-current motor



左：構造上の表現 右：ベクトル図

第2図 直流電動機における磁界と電流の状態

Fig. 2. State of field and currents in direct-current motor



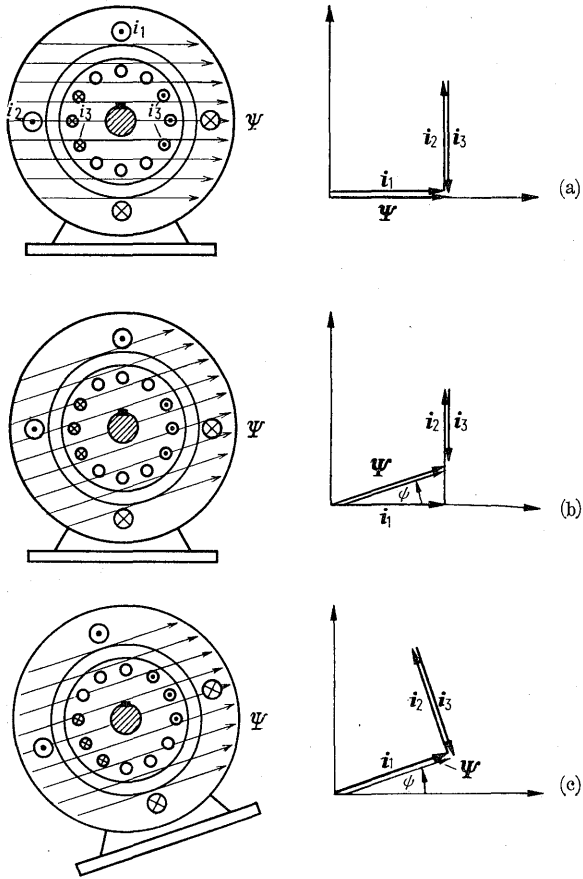
1. 2. 固定子巻線
3. 回転子巻線

第3図 非同期電動機の基本的表現

Fig. 3. Schematic description of asynchronous motor

線の電流 i_2 と磁界は固定子のなかに回転子と逆方向の反作用トルクを発生する。これらの電流と磁界は第2図右側のベクトル図によって表わすことができる (Kovacs⁽⁵⁾とRaczによる空間ベクトルとして定義。空間ベクトルとマトリクスは太文字で示してある)。結局、電流 i_1 が磁界を作り、電流 i_2 ないし i_3 が磁界と作用して、直流電動機にトルクを発生する。

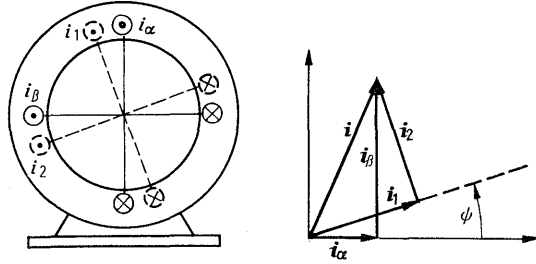
非同期電動機では、回転子巻線は整流子をへて通電されることなく、回転子巻線それ自体が閉じた回路になっている。この閉回路はたとえば周縁に均等に分布した棒状導体と二つの短絡環から構成することができる (第3



左：構造上の表現 右：ベクトル図
第4図 非同期電動機における磁界と電流の状態

Fig. 4. States of field and currents in asynchronous motor

図). トルク発生のためこの巻線に必要な電流は電磁誘導によってのみ、すなわち磁界変化によってのみ、発生させることができる。さて、この場合も巻線1の電流 i_1 によって磁界が作られる。これまで補償巻線として作用した巻線2に、いまの場合、突然変化する電流 i_2 を与えれば、回転子には電磁誘導によって電流 i_3 が流れることになる。この電流 i_3 は最初の瞬間には固定子電流 i_2 とちょうど等大逆方向である。したがって、この最初の瞬間は直流電動機とまったく同じ状況である(第4図(a))。しかし、電磁誘導により生じた回転子電流 i_3 が磁界変化にあずかるので、ベクトル図はある時間のうち第4図(b)に示す状態に変化する。回転子はこの考察ではもとの位置にとどめられているものと仮定している(このことは図示の回転軸の位置が不変であることによって示されている)。磁界は ϕ だけ回転しており、磁界 Ψ に対する電流ベクトル i_1 および i_2 の当初のオリエンテーションは失なわれている。さて、思考手段として、固定子を i_1 と磁界 Ψ が再び平行になるまで回転させれば、オリエンテーションが回復される(第4図(c))。いま、磁界を i_1 の方向から決して狂わせることなく、固定子を磁界の回転とともに連続的に回転させれ



第5図 実現可能な電流への
所望の電流の変換
Fig. 5. Conversion of desired
currents to realizable
currents

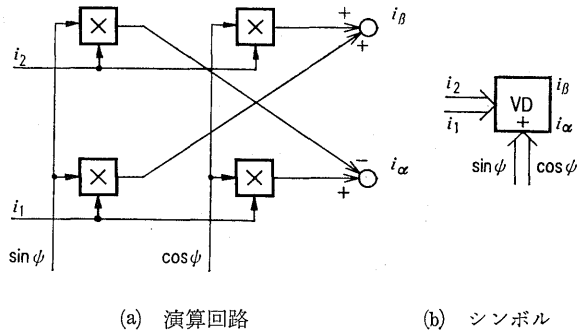
第6図 第5図に対するベクトル図
Fig. 6. Vector diagram for
Fig. 5

ば、磁界への電流のオリエンテーションが強制的に行なわれ、その結果どの瞬間にも直流電動機と同様の状況になる。このような固定子の回転はもちろん説明のための手段に過ぎない。

実際には静止している固定子とやはり静止している巻線 α, β を利用する(第5図)。上述の方法は i_1 および i_2 から合成された電流ベクトル i を問題としているに過ぎない。この回転ベクトルを回転している巻線1, 2に流れる一定電流 i_1, i_2 により発生させるかわりに、実際には静止している巻線 α, β に流れる可変電流 i_α, i_β によってそれを実現する必要がある。第6図は電流 i_α, i_β がこの場合各瞬間において、いかなる値をとらなければならないかを示している。 i_α, i_β は任意に選択可能の(たとえば一定の)値 i_1, i_2 に関するほか、固定子軸 α に対する磁界の角度 ϕ に関する。すなわち

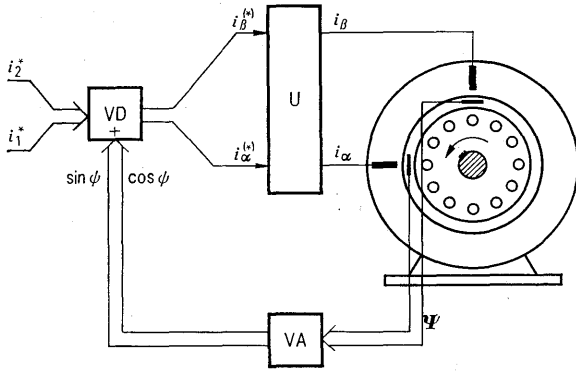
$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_1 \cos \phi - i_2 \sin \phi \\ i_\beta &= i_1 \sin \phi + i_2 \cos \phi \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(1)$$

この関係は第7図に示す演算回路によって実現することができる。この回路は、電流ベクトルを磁界の角度だけ回転させるので、ベクトル回転器(Vektordreher, 略してVD)と名付けられている。第8図は非同期電動機における磁界オリエンテーションへのこのベクトル回転



第7図 回転座標系から固定座標系への変換のためのベクトル回転器

Fig. 7. Vector-rotating circuit for transformation from rotary coordinate system to stationary coordinate system



第 8 図 非同期電動機の磁界オリエンテーションのためのベクトル回転器の利用

Fig. 8. Utilization of vector-rotating circuit for field orientation of asynchronous motor

器の適用を示す。ベクトル回転器において所望の目標値 i_1^* , i_2^* および 磁界角度 ψ の角度関数から必要な操作値 $i_\alpha^{(*)}$, $i_\beta^{(*)}$ が作られる。これらの値が電流可制御の周波数変換装置 (U) に操作量として与えられ、その出力が各固定子巻線の電流 i_α , i_β を規制する。ベクトル回転器に必要な磁界角度 ψ に関する情報は電動機内部の磁界ベクトル測定によって得られる。(6) エアギャップに空間的にずらして取り付けられた二つのホール発電器により磁界ベクトルの二つの成分が測定され、いわゆるベクトル・アナライザ (Vektoranalysator, 略して VA) (1) により必要な角度関数 $\sin \psi$ および $\cos \psi$ に変換される。

この固定子電流の磁界オリエンテーションによる制御方法では、電流 i_1 による非同期電動機の磁界の制御と電流 i_2 によるそのトルク発生のための電流の制御を別々に行なえるようになる。したがって非同期電動機を電流制御による直流電動機のように運転することができる。

固定子電流の磁界オリエンテーションを、ここでは理解しやすいように、回転子がもとの位置にとどめられているものとして説明した。これは回転子が回転する場合にもそのまま同じ結果になる。すなわち、オリエンテーションの基準となる磁界の回転が、回転子がもとの位置にとどめられている場合のそれと単に回転子の回転だけ相違するに過ぎない。

III. 磁界オリエンテーションのベクトル表示

つぎに、先に見出した関係をベクトルにより表示しておくと同都合である。式(1)に示した i_1 , i_2 および i_α , i_β の間の関係は磁界を基準とする回転座標系から固定子を基準とする固定座標系への電流ベクトル i の座標変換として理解することができる。いま、

$$i_\psi = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$$

で回転座標系の電流ベクトルを表わし、また

$$i_s = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix}$$

で固定座標系の電流ベクトルを表わせれば、この座標変換を回転マトリクス

$$D(+\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}$$

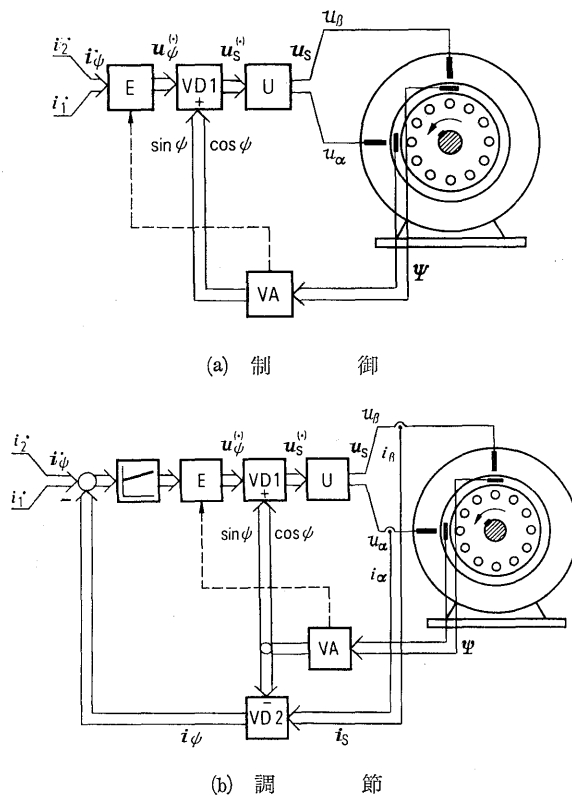
を用い、つぎのように表わすことができる。

$$i_s = D(+\psi) i_\psi \quad \dots\dots\dots(2)$$

第 7 図に示したベクトル回転器はこの回転マトリクスの変換機能を持っている。

IV. 電圧制御における磁界オリエンテーション

可制御電圧を出力とする周波数変換装置では巻線 α , β に加える電圧 u_α , u_β が操作量 $u_\alpha^{(*)}$, $u_\beta^{(*)}$ を介して制御される。この場合は磁界オリエンテーションの実現のために、電流制御の場合と反対に、所望の電流目標値 i_1^* , i_2^* に必要な電圧操作値 $u_\alpha^{(*)}$, $u_\beta^{(*)}$ が得られなければならない。この関係は二つのステップで作られる。まず i_1^* , i_2^* で作られる電流ベクトル i_ψ^* から回転座標系の電圧ベクトル $u_\psi^{(*)}$ が作られる。このベクトルは電流によって抵抗およびインダクタンスに生ずる電圧降



第 9 図 電圧制御における非同期電動機の磁界オリエンテーション

Fig. 9. Field orientation of asynchronous motor in case of voltage control

下のベクトルと電動機の逆起電力のベクトルから合成されたものである。この関係は演算回路(E)で作られる(第9図(a))。電動機からの情報を必要とする演算回路には電動機の構成が模擬されている⁽¹⁾。この結果は第二のステップにおいて、電流制御の場合の座標変換に相当する。

$$u_s^{(*)} = D(+\phi)u\phi^{(*)}$$

という座標変換によって、固定座標系における電圧ベクトル $u^{(*)}$ に変換される。この変換は第9図(a)のベクトル回転器(VD1)により行なわれる。そしてこのベクトルの成分 $u_\alpha^{(*)}$, $u_\beta^{(*)}$ が周波数変換装置に操作量として導かれる。

印加電圧によって電動機に流れる電流は特に電動機のインピーダンスに関係する。このインピーダンスは運転による温度上昇によって変化するが、演算回路では一般にそのことを考慮に入れられない。そのため電流ベクトル $i\phi$ がその目標値 $i\phi^*$ から偏差する。したがって、上記演算回路に電流ベクトル $i\phi$ の調節回路を重ねる必要がある(第9図(b))。定常運転中の $i\phi$ の成分は安定した量であるから、インピーダンスに関係する $i\phi$ のその所望の値 $i\phi^*$ からの偏差を積分動作の調節器により補償することができる。この調節に必要な実際値 $i\phi$ は固定座標系の電流ベクトル i_s の測定とそれに続く回転座標系への変換によって得られる。この変換の式は式(2)を逆にしたものである。すなわち

$$i\phi = D^{-1}(+\phi)i_s = D(-\phi)i_s \dots\dots\dots(3)$$

これに必要なベクトル回転器(VD2)が第9図(b)に示されている。これは第7図に示したものと同一の構成になっている。すなわち $+\phi$ を $-\phi$ におきかえるだけでよい。このことは交さループの符号を交換することである。

上記の構成によって電圧制御の場合にも非同期電動機の固定子電流の磁界オリエンテーションが可能になる。

V. む す び

この論文で紹介した磁界オリエンテーションの原理によって、給電する周波数変換装置の種類と無関係に、非同期電動機をすぐれた動特性をもって運転することができる。

参考文献

- (1) Blaschke, F.: Das Prinzip der Feldorientierung, ein neues Verfahren zur Regelung der Asynchronmaschine. Siemens-Forschungs-u. Entwicklungsber. 1 (1971) Heft 2 (in Vorbereitung)
- (2) Böhm, K.; Wesselak, F.: Drehzahlregelbare Drehstromantriebe mit Umrichterspeisung. Siemens-Z. 45 (1971) S. 753 bis 757
- (3) Flöter, W.; Ripperger, H.: Die TRANSVEKTOR-Regelung für den feldorientierten Betrieb einer Asynchronmaschine. Siemens-Z. 45 (1971) S. 761 bis 764
- (4) Bayer, K.-H.; Waldmann, H.; Weibelzahl, M.: Die TRANSVEKTOR-Regelung für den feldorientierten Betrieb einer Synchronmaschine. Siemens-Z. 45 (1971) S. 765 bis 768
- (5) Kovács, K.P.; Rácz, I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Budapest: Verlag der Ungar. Akad. d. Wissenschaften 1959
- (6) Langweiler, F.; Richter, M.: Flußfassung in Asynchronmaschinen. Siemens-Z. 45 (1971) S. 768 bis 771
- (7) Weh, H.: Elektrische Netzwerke und Maschinen in Matrixdarstellung. Mannheim, Zürich: Bibliogr. Inst. 1968
- (8) Naunin, D.: Ein Beitrag zum dynamischen Verhalten der frequenzgesteuerten Asynchronmaschine. Berlin, Techn, Univ., Diss. 1968
- (9) Hasse, K.: Zur Dynamik drehzahl geregelter Antriebe mit stromrichtergespeisten Asynchron-Kurzschlußläufermaschinen. Darmstadt, Techn, Hochsch., Diss. 1969
- (10) Blaschke, F.; Ripperger, H.; Steinkönig, H.: Regelung umrichtergespeister Asynchronmaschinen mit eingprägtem Ständerstrom. Siemens-Z. 42 (1968) S. 773 bis 777

本文は下記の論文を邦訳したものである。

Felix Blaschke: Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen, Siemens-Z. 45 (1971) S. 757 bis 760

(訳者: 石橋誠一)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。