

# 同期電動機の磁界オリエンテーション運転の ためのトランスベクトル制御

## TRANSVEKTOR-control System for Fieldoriented Operation of a Synchronous Machine

### I. ま え が き

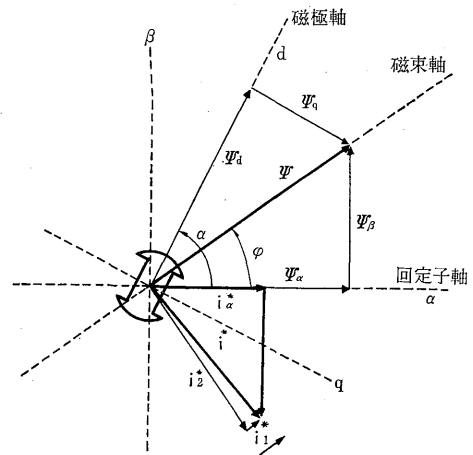
変換装置によって給電される最近の工業用可変速駆動装置に、同期機を用いるケースが増えてきている。

その理由としては、同期機が簡単で丈夫な、その上ほとんど保守の必要のない構造となっていること以外に、励磁が容易なこと、および変換装置との組み合わせに適した特性を持っていることが考えられる。われわれはこの駆動装置によっても、制御付直流機駆動装置からえられるような高度の動特性をえたいので、回転トルクの調整動作が事実上遅れなく、リニアな特性曲線関係をもつとともに、後続の過渡振動も生じない状態で行なわれるよう考慮しなければならない。励磁に対する調整動作についても同じことがいえる。この場合、二つの調整動作は互いに分離されねばならない。すなわち一つは回転トルクと有効電力だけに、もう一つは磁化力と無効電力だけに影響するようにしなければならない。今日では、この命題は磁界オリエンテーションの原理に基づくトランスベクトル制御によって解決できる。

### II. 磁界オリエンテーション制御の基本原則

磁界オリエンテーション制御の基本原則は回転機の固定子電流を、トルクと磁束を決定する二つの成分に互いに無関係に分離することである。回転する磁束ベクトル (KOVACS RACZ とによる空間ベクトルとしての定義) に垂直な方向の成分  $i_2$  (第1図) は、磁束の大きさとともに回転トルクを決定する。これに対し、固定子巻線から生ずる磁化力は、直接磁束に並行な成分  $i_1$  によって影響される。同期機の所望の動作点に対するこの両方の成分は、演算回路中で決定され、その結果相電流に対する指令値が作られる。

同期機の磁界オリエンテーション制御の構成と機能を以下セメントキルンに対する速度制御の例によって述べることにする。このキルンは可変周波数の直接変換装置によって給電される5MWの同期機で駆動されている。直径5m、長さ15mのキルン管がモータ軸として使用される。管の一端には直接40個の磁極が取り付けられている。キルンは5Hzの変換器周波数に対応する15rpm



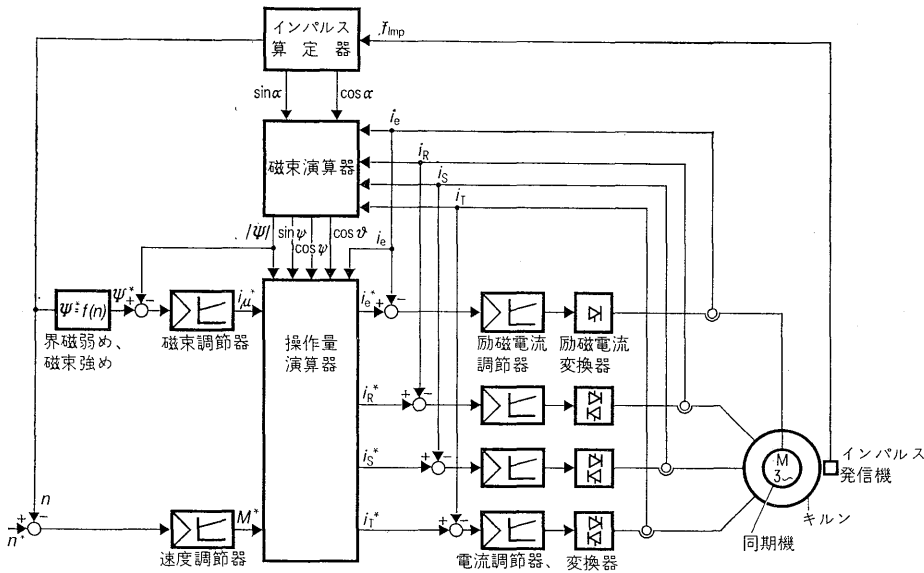
第1図 あるシステム例での電流-磁束成分に対するベクトル図

Fig.1. Vector diagram for the current and flux components in the various reference system

の回転数となる。管胴をある回転角度で短時間固定できるようにするために、電動機は静止状態も含めた全速度範囲中で、全トルクを発生しなければならない。

第2図は磁界オリエンテーションの原理に基づいたセメントミルの制御概念を示したものである。これは直流機駆動に対するトランジダインによってえられる速度制御と電流マイナ制御をもった公知の概念に相当するものである。目標値と実際値をもった速度調節器は、すべてのトランジダイン制御の場合とまったく同じ構成となっている。その出力電圧は必要とする回転トルク指令である。この電圧は直流機の場合のように、固定子電流の回転トルクを形成する成分  $i_2$  に影響をおよぼすことになる。磁束調節器は、回転機の磁束を負荷に無関係に、その都度の所望値に保つ作用をする。回転機を最適に利用するために、始動時には磁束の指令値を非常に大きな値として始動トルクを補償し、これに対して定常運転では定格値に設定する。変換器電圧の制限を考慮して、高速領域での磁束の指令値は、界磁弱め特性曲線に従って減少させる。

速度調節器と磁束調節器の出力電圧 (トルク化電流と磁化電流の指令値) は操作量演算器によって、相電流および励磁電流の指令値に変換される。このさい、静止状



第 2 図 同期機に対する磁界オリエンテーション制御  
Fig. 2. Fieldoriented control for a synchronous machine

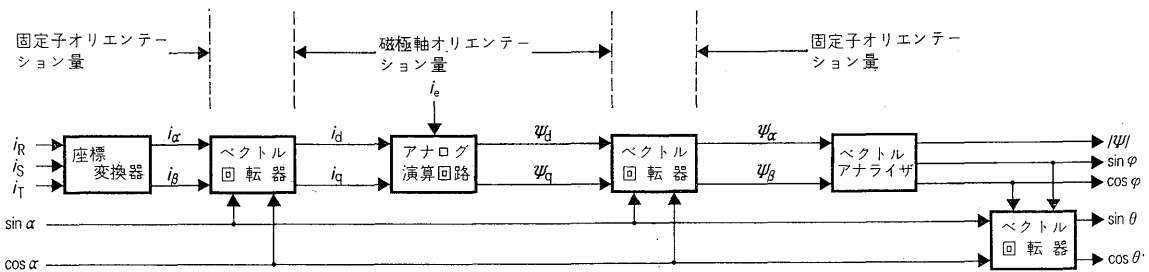
態での線電流に対する指令値は一定の直流量であり、電動機が回転するとその回転数に比例した周波数の正弦波交流量に移行する。それぞれの線電流および励磁電流に対しては、別々の電流マイナーループが設けられている。この場合、電動機の固定子電源には三相直接変換装置が用いられ、励磁巻線電源には可調整三相ブリッジ変換装置が使用される。

(磁界オリエンテーション) 値  $i_f^*$  および  $M^*$  を (固定子オリエンテーション) 値  $i_R^*$ ,  $i_S^*$ ,  $i_T^*$  および励磁電流  $i_e^*$  に変換するためには、操作量演算器は磁束の大きさと位相に関する瞬時値を必要とする。これらの量は目下の場合磁束演算器でもって、固定子電流  $i_R$ ,  $i_S$ ,  $i_T$  の瞬時値と回転子の位置から作り出される。回転子位置は、セメントキルの回りに取り付けられているインパルス発信機で精密に検出され、インパルス算定器で回転

角度の正弦値および余弦値に変換される。このために用いられる正弦余弦値発生器はインパルス発信機によって制御される電子式可逆カウンタを持っている。その出力には固定プログラムの正弦波関数をもった DA 変換器が接続されている。この装置はすでに超同期セルビウスの制御に用いられており、常に増大する回転角を適当な角度関数変換するものである。さらにインパルスはインパルス算定器中で、周波数電圧変換器により回転数に比例した電圧に変換され、速度調節器に実際値として印加される。

### III. 磁 束 演 算 器

回転角  $(\sin \alpha, \cos \alpha)$  によって三つの線電流は磁束演算器 (第 3 図) 中で、縦軸, 横軸成分  $(i_d, i_q)$  に分解される。両方の軸に対する電磁的な平衡動作の微分方程式



$\alpha\beta$ -システムでの RST-システム	$\alpha\beta$ -システムの $dq$ -システムへの変換	縦軸, 横軸用の微分方程式	$dq$ -システムの $\alpha\beta$ -システムへの逆変換	大きさと位相についての磁束の変形	磁極角の演算
$i_\alpha = \frac{2}{3} i_R - \frac{1}{3} i_S - \frac{1}{3} i_T$ $i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} i_S - \frac{1}{\sqrt{3}} i_T$	$i_\alpha = i_\alpha \cos \alpha + i_\beta \sin \alpha$ $i_d = -i_\alpha \sin \alpha + i_\beta \cos \alpha$	$\Psi_d = (i_d + i_e) L_{hd} \times \frac{1 + pT_{Dsd}}{1 + p(T_{Dsd} + T_{hd})}$ $\Psi_q = i_q L_{hq} \times \frac{1 + pT_{Dsq}}{1 + p(T_{Dsq} + T_{hd})}$	$\Psi_\alpha = \Psi_d \cos \alpha - \Psi_q \sin \alpha$ $\Psi_\beta = \Psi_d \sin \alpha + \Psi_q \cos \alpha$	$ \Psi  = \sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2}$ $\sin \varphi = \frac{\Psi_\beta}{ \Psi }$ $\cos \varphi = \frac{\Psi_\alpha}{ \Psi }$	$\sin \theta = \sin \alpha \cos \varphi - \cos \alpha \sin \varphi$ $\cos \theta = \sin \alpha \sin \varphi + \cos \alpha \cos \varphi$

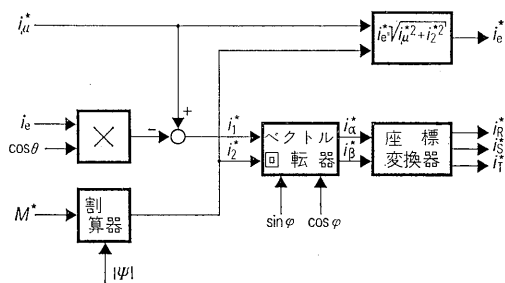
第 3 図 磁 束 演 算 器

Fig. 3. Flux computer

は  $i_d, i_q$  成分と、同期機の場合は単に縦軸のみに影響をおよぼす励磁電流とをもって、二つの電子式演算回路によって解くことができる。これらの演算の結果は、縦軸 ( $\Psi_d$ ) および横軸 ( $\Psi_q$ ) に対する磁束の成分となる。これらはベクトル回転器によって、固定子座標系の成分に逆変換され、ベクトルアナライザによって大きさと、回転角に変換される<sup>(5), (6)</sup>。ベクトル回転器をもった別の変換回路によって、磁束の回転角から同期機の磁極角が決定される。磁束演算器は、電子式の同期機モデルに最初に使用された。これについては引用文献<sup>(7)</sup>に詳細述べられている。磁束演算器の出力  $|\Psi|$ ,  $\varphi$  および  $\theta$  は操作量演算器中でさらに処理される。

#### IV. 操作量演算器

操作量演算器は多くの処理段階 (第4図参照) を経て二つの制御信号 ( $i_u^*$ ,  $M^*$ ) から線電流および励磁電流の目標値を算出する。まず、速度調節器の出力電圧を磁束の大きさと割ることにより、回転トルクを形成する電



第4図 操作量演算器

Fig. 4. Manipulated-variable computer

流目標値  $i_a^*$  がえられる。したがって  $M^*$  と発生する回転トルクのあいだには、磁束に無関係なリニア関係が存在することになる。固定子電流をできるだけ小さくするために、回転機の励磁は常に励磁電流だけから発生せしめられる。ただ動的な過程においてのみ一必要あれば一過渡特性をより適切にするために、付加的な磁化電流成分  $i_1$  が固定子回路から取られることがある。したがって、励磁電流目標値  $i_u^*$  は励磁電流マイナーループと、 $i_1^*$  に直接作用することになる。この場合  $i_1^*$  は必要な磁化電流  $i_u^*$  と、励磁巻線によって磁束軸に発生する磁化電流成分  $i_c \cos \theta$  の差によって生ずることになる。励磁回路に必要な磁化が設定されるとこの差は零となる。成分  $i_1^*$  および  $i_2^*$  は磁束ベクトルに対して、固定した角度関係にあり、また磁束は固定子巻線に対して回転しているので、これらの電流目標値はベクトル回転器によって、固定子座標系に変換される。これによって、固定子電流の直交成分  $i_a^*$  および  $i_b^*$  がえられるが、この  $i_a^*$  および  $i_b^*$  は座標変換器により相電流指令値  $i_R^*, i_S^*, i_T^*$  に変換される。

制御系中に操作量演算器をそう入することによって、本来、非常に複雑な同期機の過渡特性は本質的に単純化される。これにより、制御に対する最適調整値は、簡単に容易な処理のできる定数決定法、たとえば直流機で行なわれるベトラークオブティミールング手法にしたがって決定することができる。事実、操作量演算器は直流機における整流子の部分機能に相当する機能をもっている。また電流  $i_2^*$  は直流機の電機子電流と同じく、回転子の回転には無関係に回転トルクだけに影響を与え、磁化には影響を与えない。磁化と回転トルクへの調整動作の分離は、操作量演算器をそう入することによって、同期機の制御に大きな進展をもたらした。操作量演算器は同じ演算装置、すなわちベクトル回転器、ベクトルアナライザ、座標変換器などとともに、一般に回転磁界機、すなわち誘導電動機の制御にも使用できる。種々の操作装置 (たとえば直接変換器あるいは直流中間回路付自励インバータ) あるいは種々の検出器 (たとえば直接磁束測定、磁束演算) への適用は簡単である。

#### V. あとがき

磁化とトルク化の分離は、以前にも、たとえば超同期セルビウスあるいは、縦軸または横軸磁界制御においても行なわれたが、今日では、これらの命題に対してもごく普通に適用でき、かつ磁界オリエンテーションの原理によって構成されるトランジベクトル制御が利用されている。

#### 参考文献

- (1) Riehlein, D.: Getriebeloser Antrieb für eine Zementmahlanlage. Siemens-Z. 45 (1971) S. 189 bis 191
- (2) Köllensperger, D.; Tovar, K.: Stromrichtermotoren größerer Leistung. Siemens-Z. 43 (1969) S. 686 bis 690
- (3) Kovács, K.P.; Rácz, I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Budapest: Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften 1959
- (4) Dirr, R.; Neuffer, I.; Schlüter, W.; Waldmann, H.: Neuartige elektronische Regeleinrichtungen für doppeltgespeiste Asynchronmotoren großer Leistung. Siemens-Z. 45 (1971) S. 363 bis 367
- (5) Blaschke, F.: Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen. Siemens-Z. 45 (1971) S. 757 bis 760
- (6) Blaschke, F.: Das Prinzip der Feldorientierung, ein neues Verfahren zur Regelung der Asynchronmaschine. Siemens-Forschungs-u. Entwicklungsber. 1 (1971) Heft 2 (in Vorbereitung)
- (7) Waldmann, H.; Weibelzahl, M.; Wolf, J.: Ein elektronisches Modell der Synchronmaschine. Siemens-Forschungs-u. Entwicklungsber. 1 (1971) Heft 2 (in Vorbereitung)
- (8) Keßler, C.: Ein Verfahren zur Vorausberechnung von Regel-Kreisen. Siemens-Z. 31 (1957) S. 630 bis 632
- (9) Flöter, W.; Ripperger, H.: Die TRANSVEKTOR-Regelung für den feldorientierten Betrieb einer Asynchronmaschine. Siemens-Z. 45 (1971) S. 761 bis 764
- (10) Deutsche Patentschrift Nr. 1538070: Regeleinrichtung für Synchronmaschinen

本文は下記の論文を邦訳したものである。  
Bayer, K.-H.; Waldmann, H.; Weibelzahl, M.: Die TRANSVEKTOR-Regelung für den feldorientierten Betrieb einer Synchronmaschine. Siemens-Z. 45 (1971) S. 765 bis 768

(システム技術第二部 三橋成生訳)



\*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。