

# 無整流子電動機 の 概念 と その 応用

松下電器産業KK 中央研究所\* 田 中 穰

## 1. ま え が き

直流電動機を無整流子化しようとする要求は非常に古く、サイラトロン等を応用した駆動回路が試作され<sup>1)</sup>検討されているが、本格的実用化には至らず、近年の半導体スイッチング素子の発達を迎えた。特に最近、種々回路素子の開発と相まって、特性の向上、容量の増大が実現し、電気機械系の駆動あるいは制御に対する応用も多方面で行なわれるようになってきた<sup>2),3)</sup>。従来の整流子機は本来、高速性、制御性という面で秀れた特性を有しているにもかかわらず、整流子の存在による、寿命の問題、電気雑音の発生、高速時コロナによる整流作用の喪失、等多数の欠点を併存していた。無整流子化の実現は、これらの欠点を除去したばかりでなく、その利点を継承し広く応用することを可能にした。さらに、このために同期化、多極化、等新たに附与された利点も少なくない。

ここに述べる無整流子電動機 の 概念 は、いまだ統一したものではなく、非常に不明確であるから、本文の範囲に限って、ある一面よりその特徴を記述する。

まず、回転子の回転に対応した信号を検知する回路(検知回路)が存在し、検知された信号(検知信号)を処理してスイッチング素子の制御信号とし、固定子の界磁を制御する。さらに電源は元来直流であって、回転子はその重要部分が永久磁石で構成されている。

以下、この種の電動機を検知方式によって分類し、代表例による原理的説明と特に応用面に重点をおいて解説し今後の方向を示している。

## 2. 無整流子電動機 の 原理 と 構成<sup>4)</sup>

無整流子電動機は主に回転子の回転を検知する方式によって表1のように分類され、大別すると回転子の位置を検知するものと、速度を検知するものとが存在し、後者は停止状態での位置が検知できないために起動方式を別に考慮しなければならない。

この電動機の一般的構成と原理的実際回路の1例を図1、図2に示し、その動作を簡単に説明すると、まず位相検知回路によって、回転子の位置、すなわち回転子永

久磁石のN極S極に対応した位相を検知し、この信号を処理してスイッチング素子の制御信号とし、たとえば、N極が近接するときには吸引力を、遠ざかるときには反撥力が働くように常に回転子と駆動電流の位相関係を調整せねばならない。この位相関係が逆転すると回転子には負のトルクが働き電磁ブレーキの作用を示すことに

表1 無整流子電動機 の 分類

|         |         |  |
|---------|---------|--|
| 無整流子電動機 | 自己発振型   | 機械的共振型<br>電気的共振型                               |
|         | 速度検知型   | 他励発振型<br>スイッチング型                               |
|         | 位置検知型   | 磁気感應素子型<br>光応動素子型<br>可変LC型<br>高周波誘導型<br>機械的検知型 |
|         | 外部信号同期型 | 永久磁石回転子型<br>ヒステリシスリ<br>ラクタンス型                  |
|         | その他     | 交流駆動型  |

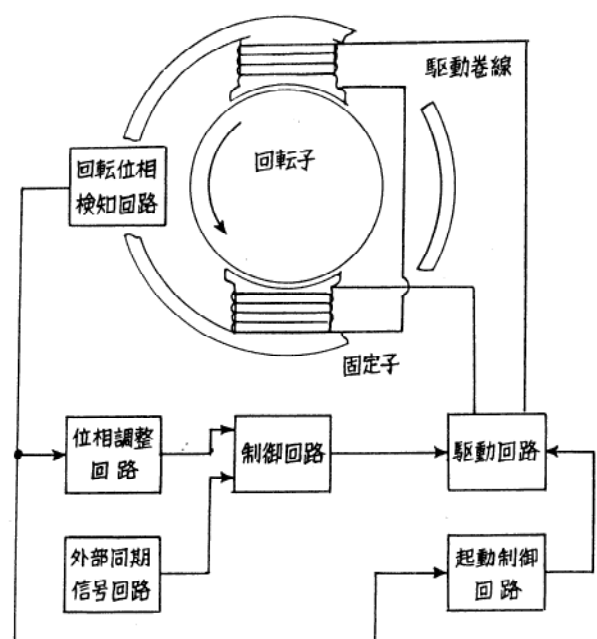


図1 無整流子電動機原理構機図

\* 大阪府門真市大字門真1006

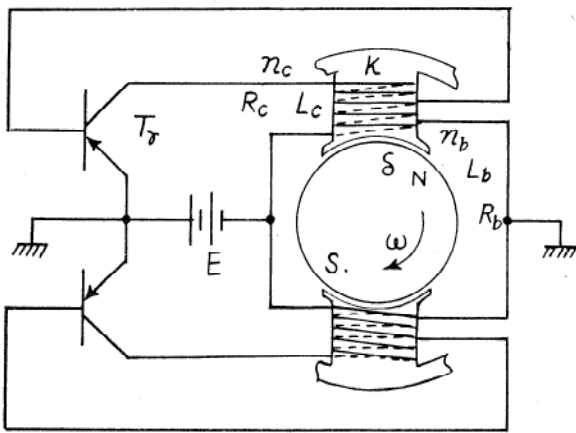


図2 無整流子電動機原理回路 (I)

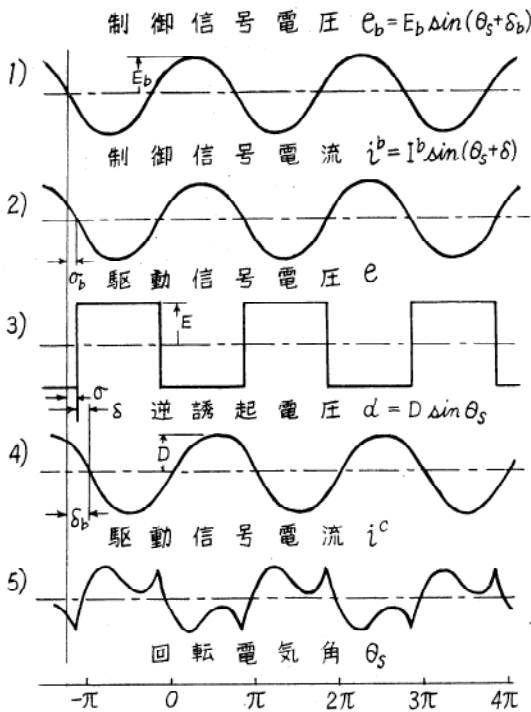


図3 駆動回路波形

なる。一般に無整流子電動機における各信号の波形と位相関係を示すと図3のようになる。

この制御信号は電動機の駆動電流の周波数および位相を制御する。したがってこの場合、固定子の界磁は常に回転子の回転と同期していることになり、これを広義の同期状態にあるという。実際の駆動電流の大きさは駆動巻線と直列に結線された直流電源と永久磁石回転子が回転することによって駆動巻線に誘起する逆誘起電圧との重畳されたものが、その回路のインダクタンスおよび抵抗を通して流れる電流と考えられ、その波形は図3に示したようになる。また、回転子に作用する瞬時トルクは、この駆動巻線への逆誘起電圧  $d$  とその巻線に流れる瞬時駆動電流  $i^c$  との相互作用であり、これらの積、すな

わち回転角速度を  $\omega$  とすると  $\tau = d \cdot i^c / \omega$  で与えられる。

また、図3に示した各波形の位相関係は検知回路および駆動巻線の機械的配置、あるいは信号の電気的処理によって任意に選定し、しかも変化し得ることは容易に理解される。したがって、これらの位相関係  $\delta, \sigma$  等の可変によって電動機の特性を簡単に制御できることが本電動機の1つの特徴となっている。

さらに、広義の同期状態においては、前述のように検知信号をもとに回転子の回転が固定子の界磁電流の周波数あるいは位相を制御し、すなわち固定子の界磁が回転子の回転角速度に従属しているが、いま図4の駆動回路

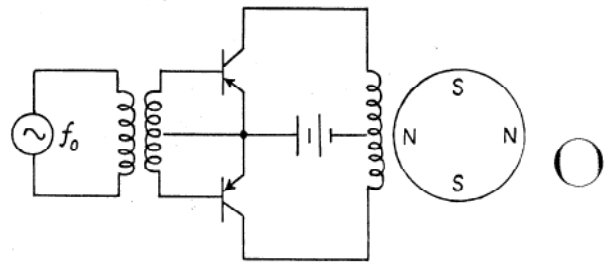


図4 無整流子電動機原理回路 (II)

を考えると駆動電流は外部同期信号  $f_0$  によって制御され、回転が  $f_0$  に同期した状態でのみ安定である。これを狭義の同期状態にあるという。

つぎに狭義の同期状態への同期引込み現象を考察する。本電動機において回転子に作用する瞬時トルクは駆動電流と逆誘起電圧の積で定まるから、制御信号として周波数  $f_0$  の外部同期信号のみが作用する図4のような駆動系では  $i^c$  と  $d$  の周期が異なる過渡状態での瞬時トルクを考えると必ずしも正ではなくトルクとブレーキが交互に作用するので、安定に回転を持続して同期化するとは限らない。

したがって、無整流子電動機の同期引込み方式としては図5に示すように駆動系の制御信号として回転子の回転に対応した前述の検知信号と外部同期信号とを併用した方式が主に用いられる。

図5(a)は回転子からの検知信号を帰還抵抗を通して制御側に作用させ、同時に外部同期信号を入力トランスを通して制御側に重畳させ、過渡状態では検知信号によって駆動トルクが作用し回転を上昇させ同期引込み時には外部信号も作用するように調整される。検知信号は帰還抵抗によるほか、ベース巻線、その他検知回路を入力トランスに対して直列または並列に挿入することも多く、さらに入力トランスはコンデンサ結合方式に置換されることもある。いずれも制御側インピーダンスと固有回転数(外部同期信号を零としたときの回転数)の設定、外部信号と検知信号の比が同期引込み現象に微妙な作用

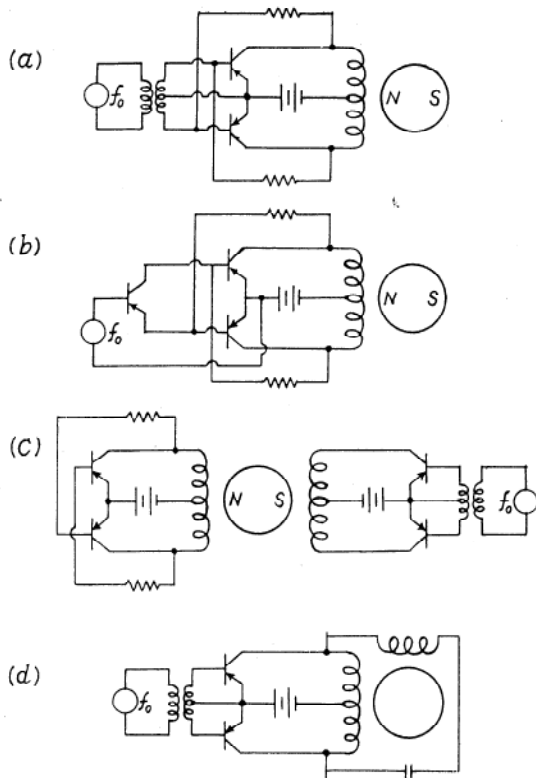


図5 無整流子電動機の同期引込方式

をおよぼす。この動作は明確に理解されておらず今後の問題である。

(b) は外部同期信号を直接検知信号に重畳せず、制御側インピーダンスを同期信号周波数に対応して変化させる同期引込方式であって、特に電圧、温度および外部同期信号周波数の変動にする位相変動の大きさを問題とする用途においては考慮する価値がある方式である。制御側インピーダンスを可変にする素子としては図のように、おもに1または2個のトランジスタが使用され、) の場合と同様に固有回転数の調整が重要である。

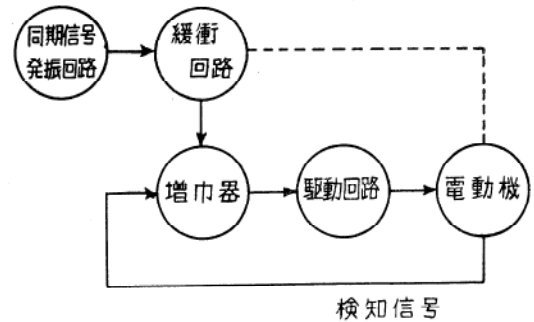
(c) は2個の独立した駆動回路および駆動巻線を有し、一方の駆動回路の制御信号として検知信号を使用し、他方の駆動回路の制御信号としては外部同期信号を使用するもので、その特徴は調整が容易で同期引込トルクを大きくでき、大きな慣性を同期駆動する用途に特に効果がある。各駆動巻線は回転軸方向に存在する2個の独立した固定子に巻線される場合あるいは単一の固定子溝に交互に巻線される場合、等がある。

(d) は本電動機が同期化するまでの過渡状態を従来の誘導トルク、リラクタンストルク、あるいはヒステリシストルクを利用する方式であり、両回転子の結合によって、その利点を総合し今後の小型同期電動機分野に種々の応用面が期待される。

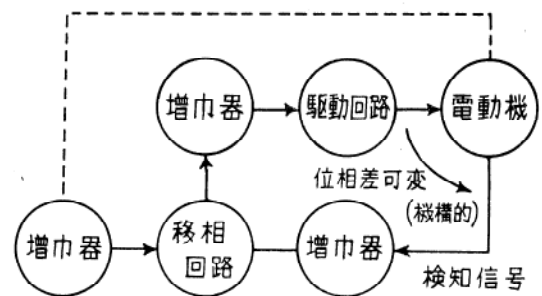
また、無整流子電動機には、一般に負荷変動を位相  $\delta$  および回転角速度  $\omega$  の両方の変化によって補償する性

質がある。このため駆動回路方式による回転角速度  $\omega$  の制御について考察するために、現在種々の  $\delta(\omega)$  関数を実現する方式として既に実用化され、あるいは考慮されているものを図6に示す。

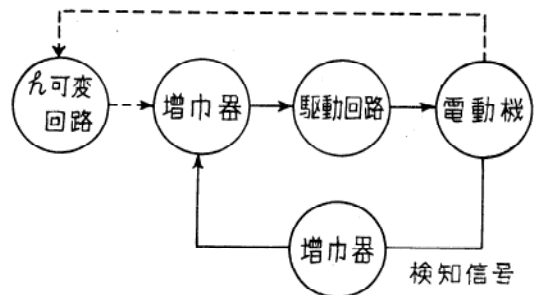
(a) 狭義の同期方式



(b) 位相差可変方式



(c) パラメータ可変方式



(d) パルス巾可変方式

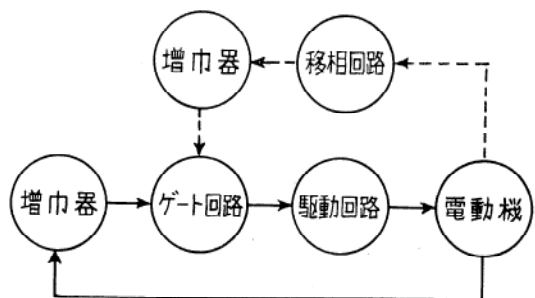


図6 駆動系の基本的構機

(a) はいわゆる狭義の同期電動機で、同期引込み後は  $\omega$  は一定で負荷に応じて  $\delta$  のみが変化する。一般に緩衝回路の動作は電動機の同期化を円滑にするため、外部同期信号の急激な位相あるいは周波数変動が直接電動機に作用するのを緩らげ、また負荷変動などによる電動機側の位相変動に対しても、常に外部同期信号と電動機の間において、相互の急激な変動を緩和し、系全体の動作を円滑にするもので、乱調の安定化、同期引込みを容易にする効果がある。現在使用されている主な回路は、発振回路、濾波回路、積分回路、等であり、これら全てに共通する緩衝回路の特徴は、変動に対して適度の位相遅れ要素となることである<sup>9)</sup>。

(b) はスイッチング位相  $\delta$  を回転角速度に応じて制御するもので、一般にその方法は駆動回路の出力信号と検知信号間の位相を変化するものと、検知信号の処理過程に移相回路を挿入し、検知信号と駆動回路に入る制御信号間に位相差をもたせるものとに大別され、前者は主に機械的構成によって、後者は電動的回路によって制御される。

(c) は電動機駆動系を構成する素子の定数を回転角速度に応じて制御する方式で制御側インピーダンス、特に抵抗、電源電圧、駆動巻線数を制御することが可能である。

(d) は制御信号のパルス巾を変えて駆動電圧波形を制御するもので、検知信号によって角速度変化に対応されるもの以外に、電源電圧の変化に対応して駆動電圧のパルス巾、すなわち電流の導通時間を制御し、電動機出力を一定化して電流消費を抑えようとするものもあり、特に電池を使用した同期電動機に利用される。

### 3. 実際系への適用

つぎに現在までに実用化された具体例とその特性を示し、今後の新応用面の開発の参考とする。

図7はテープレコーダ駆動系に実用されているもので、検知方式は高周波誘導型で、回転子に固定されたフェライト板が、中心巻線に加えられる高周波を  $120^\circ$  毎に円形に配置された3つの巻線に3相に分配している位置検知方式である。また、構造的には通常の回転子と固定子が逆で外部に永久磁石回転子を配し慣性を大きくしている。また速度制御は電子ガバナ方式で電圧変化負荷変化の相方を同時に制御している。なおこの電動機の特性は図8に示すものである。この種の電動機は従来のマイクロモーターの分野に対応するもので、

現在のところコスト面では比較にならないが、寿命、特性の点を含めて充分匹敵する分野が開発されつつあることは特記すべきである。

さらに狭義の同期化を応用したものとして、ビデオテープレコーダ制御系、新聞ファクシミリ駆動系等が実用化されている。

VTR ヘッドディスク駆動において最も要求される特性は外部同期信号、すなわち伝送あるいは記録再生されたテレビジョン垂直同期信号への位相同期性であり、この特性を分析して検討するならば、

- (1) 同期化特性 外部同期信号に対する同期引込時間、定常位相変動の大きさ、1周期内での速度変動、等の総合した特性
- (2) 電圧位相特性 電源電圧の変動によって外部同期信号位相と回転子の機械的位相の位相差が変動する割合を示す特性
- (3) 周波數位相特性 外部同期信号の周波数変動に対する上記位相変動特性
- (4) 温度位相特性 温度変化による位相変動特性
- (5) 経年変化位相特性 経年変化による回路定数

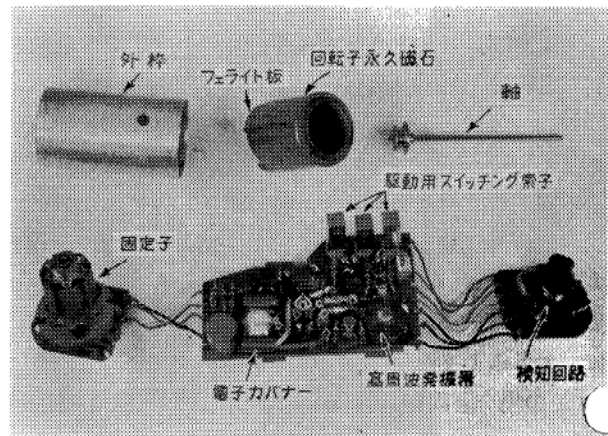
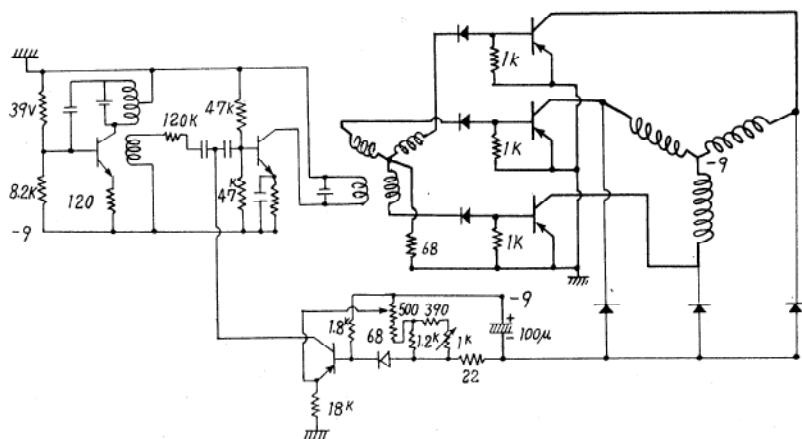


図7(a) 無整流子電動機構成部品



(b) テープレコーダ用無整流子電動機駆動回路

の変動に起因する位相変動特性となる。図9に無整流子電動機を適用した簡易化方式としてのVTR駆動系のブロックダイアグラムを示す。これは開回路制御系であり、特に上記位相変動特性が重要である。本電動機の適用によるその特徴を考えると、

(1) 回転子上にN極およびS極の位置が固定しており、従来のヒステリシス電動機、リラクタンス電動機に比べて、外部同期信号

と回転子位相との相対的安定点が少なく、回転子の各極は外部同期信号の位相と明確な対応を示すので、回転位相の制御が極めて簡単である。特に2極電動機においては、その特徴が顕著となる。

(2) 出力トランスがなく、低圧スイッチング駆動のため素子内での損失が少なく、しかも電動機自体の効率も高く、電池での駆動に対して大きな利点となる。

(3) 回転子の主要部分は永久磁石で構成され、電動機全体の構造が簡単で、しかも微小信号に同期回転が可能であって、制御回路を含めた駆動系の簡易化が実現できる。

(4) 多極電動機を製作することが容易で、回転位相を高精度に保持することができる。

(5) 無整流子電動機を位相同期性の要求されるVTRとき用途に適用しようとする場合、最大の欠点は駆動用スイッチング素子の直流電流増巾率  $h_{FE}$  あるいは制御側内部インピーダンス等によって固有回転数が変化し、これが同期状態においても、外部同期信号位相と回転子位相との間の位相変動として現われることである。勿論これは駆動方式にも関係するもので改善しえない問題ではないが、現在はスイッチング素子の特性のパラツキはたとえば帰還抵抗を変化して固有回転数が一定となるように調整した後に同期化している。

(6) 回転子永久磁石にバリウムフェライトを利用する場合、温度による磁束変化が大きいのが欠点である。

さらに現状の駆動方式は電圧位相特性に対して改良の余地がある。

また、映像特性は1例として、水平解像度約350本信号対雑音比40db以上が得られている。

しかしながら、これらの特性は使用目的に適合した簡

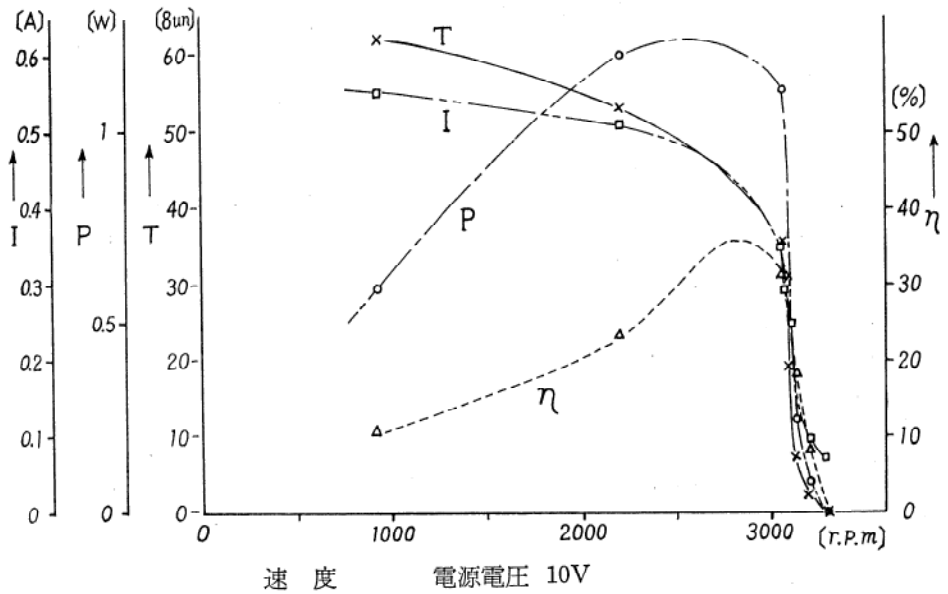
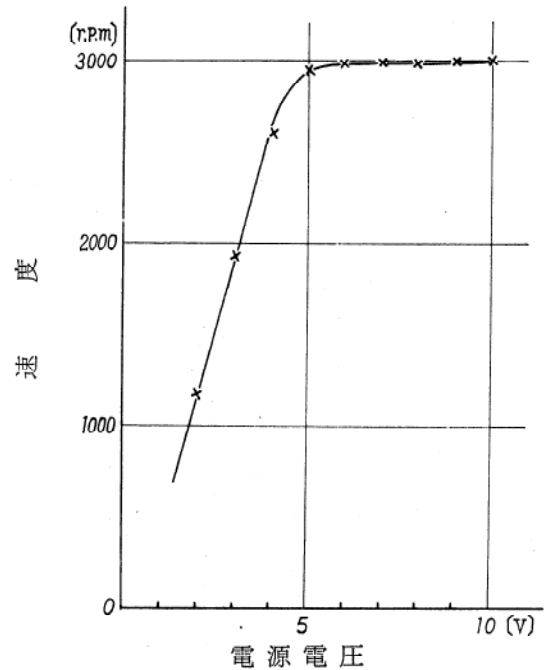


図8(a) 速度対トルク電流出力効率特性



(b) 電源電圧対速度特性

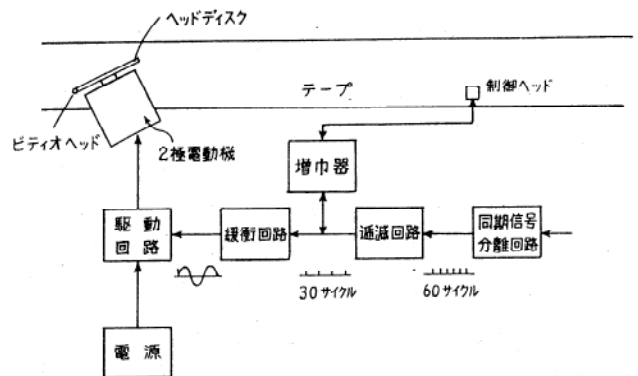


図9 簡易型ヘッドディスク駆動系ブロックダイアグラム

易化と、その度合に見合った実用限界で決定すべきであり、回転ヘッドディスクの直径、慣性能率、搬送周波数（FM変調、パルス変調等により記録）およびテープとヘッドの相対速度、テープ利用率もその面から定まってくるもので、機器の特性はコストを含め総合的に評価すべきである。

さらに、VTRの重要な特性として機器相互間の互換性を注目する必要がある。これはその特性の全てを駆動系に負わすべき性格のものではないが、設計に当っては機械的精度と均一性および記録再生方式の問題と合せて、駆動系がその責任の一端を分担していることを認識しておくべきである。

なおカラー化の簡易化等残された今後の問題も多い。

図10に用いたVTR用に設計された電動機を示す。また、図11には新聞ファクシミリ装置に実用されている電動機の状態を示している。

新聞ファクシミリ装置の駆動系において要求される条件で最も重要なものは、その機器の性能から考えて、電動機および機械部分（ギヤ関係）を含めた回転位相変動であることは明白であるが、一般に回転位相変動に関しても1回転中の速度変動は円周方向の疎密度として表



図10 VTR用無整流子電動機

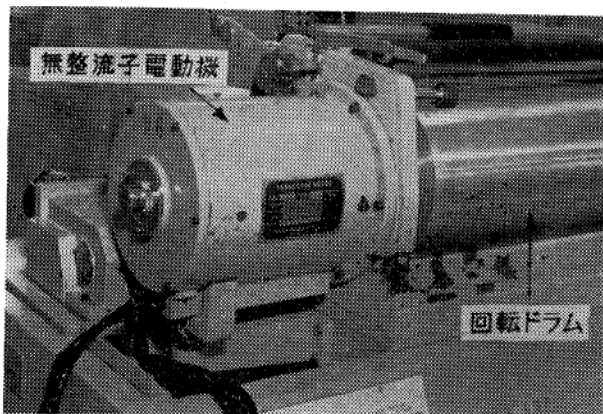


図11 新聞ファクシミリ装置

わされ、文字の記録などではあまり目立たない。写真の記録においては特にハーフトーンになると軸に沿った疎密が顕著になり縞目が見られる。また、1周期の時間変動は軸方向に描かれた直線の曲りとして表現されるので、この変動に関しては非常に高精度が要求される。一般に直線の変動巾は1/100~2/100mm以下とされ、本新聞ファクシミリ装置においては周期変動±0.5μsec以下を必要とし、したがって、回転角速度が大きくなるほどその要求精度としては高度なものとなり技術的困難が増加する。

回転数に対する要求は現状最高3000rpm、最低600rpmである。また1回の走査は当然一定時間で完了し、各走査ごとに位相同期操作が行なわれ確認されるので、その限定された時間内での位相同期性のみが問題となり、この間の緩やかな位相変動は記録された直線の傾斜となって表わされ、あまり長時間にわたる変動や経年変化はそれが急激でないかぎりさほど問題ではない。この点少特殊な要求である。

さらに、機械部分の誤差を除去し、機構を簡易化するためにギヤレスのドラム直結駆動方式が要求され、現在電動機は多極化（現在36極）することによってこれらの要求を満たしている。

本装置に適用した無整流子電動機の駆動系のブロックダイアグラムを示すと図12となる。

電動機の同期化方式は図5(c)に述べたように1個の回転子に対して2個の独立した固定子が存在し、検知信号によって直接制御される駆動回路(I)と外部同期信号を受けて制御される駆動回路(II)で構成され、駆動回路(I)は第2の位相差をもった検知信号により過渡状態での電動機の発振現象<sup>6)</sup>を抑制し、また検知信号の周波数が同期信号周波の附近上下で位相比較回路の出力が反転することを利用して、この信号で電動機の固有回転数が外部同期信号以上に極端に上昇することを防止している。

駆動回路(II)は電動機が一定回転数に達するまで動作しないように検知信号を整流して、緩衝発振器よりの出力が駆動回路に入るのを制御している。また過渡状態において検知信号の半周期ごとに同期信号をゲートして同期化を容易にしている。緩衝発振器の動作は既述の通りであるが、位相角 $\pi$ 以上の変動に対しては同期信号が断続するので、緩衝発振器は一層電動機に追随しやすく、これが同期引込みに効果的作用をしている。

さらに、外部同期信号と検知信号を位相比較し、位相変動の微分量を負帰還することによって電動機の制動係数を増加する効果をもたせている。

またその他の応用として、テレシネ装置<sup>8)</sup>、同期時計、

CBS カラーカメラ, 高速研磨機等が検討されている。

テレシネ装置においては、特にビデオンカメラの同期信号とフィルムの送り、シャッターおよびモニター受像機間の周波数関係とその同期を容易にし、2極の永久磁石回転子を使用して停止位置を限定し、スチル状態で常にシャッターが開放されるようにしている。その構成を図13に示す。

時計においては低圧低電流での駆動に重点がおかれ、むしろ過渡的発振現象を利用して電流値を減少させるように使用されている。特に電池を電源とする用途に対しては電圧変化が約50%程度ある上に電圧が変動しても極力一定出力となるように設計しないと負荷は一定であるから電流が空費されることになり電池の有効時間が短縮される。また高効率化の要求も重要である。

#### 4. あとがき

最後に以上をまとめて、無整流子電動機の今後の方向を分析すると、その特徴から、つぎのような5項目に要約することができる。

(1) 無整流子化 直流機器の発達、特に携帯機器、航空車輻等移動機器の発達にともなって、無雑音、直流同期、あるいは長時間連続的に放置する機器への長寿命、保守の簡易化のために利用される傾向にある。

(2) 高速化 物理実験用として、高周波の光学的パルス発生のためのミラー、プリズムの回転、物理的強度測定のための遠心力による破壊試験用、工作機械用に応用されるが個々の用途に適用した研究を要し、しかも多量化する見込がうすいために現状では企業の見地での研究は困難である。なお交流整流子機に置換するにはコスト高である。

(3) 同期化 伝送同期方式を要する機器の半導体化と駆動回路系の簡易化の要求にともなって、特に永久磁石を含む回転子の構成が重要視されている。従来の同期機の効率を改善し、駆動波形に対する回転子の安定点が着磁された永久磁石回転子によって少なくなる。あるいは方形波で駆動し、出力トランスを削除し、回路での損失の減少を計るなど今後の応用が期待される。

(4) 多極化 高精度の位同期性および超低速回転での速度変動の除去のために、少なくとも24極以上36極

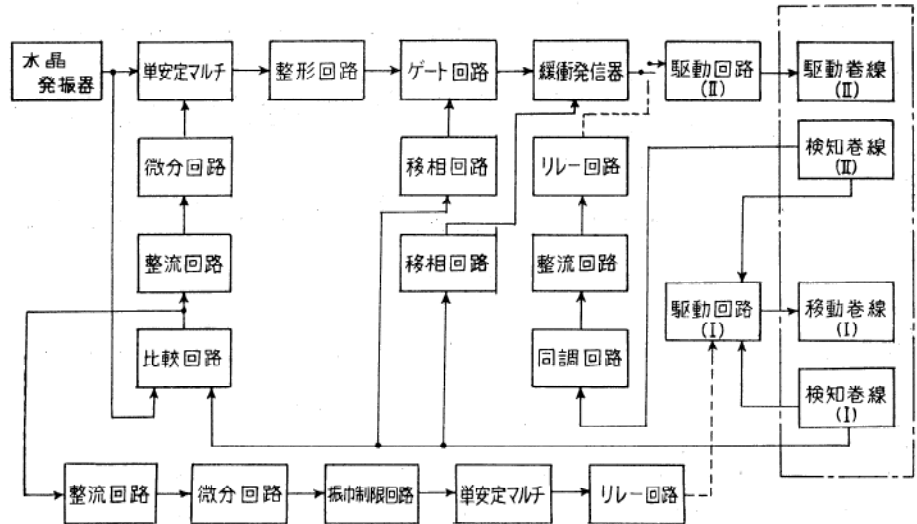


図12 新聞ファクシミリ駆動系のブロックダイアグラム

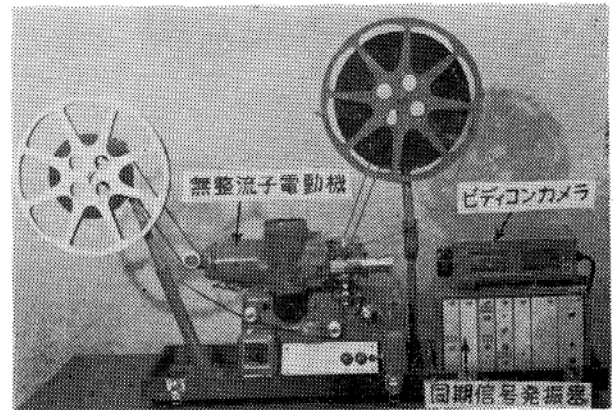


図13 テレシネ装置

64極120極等多極同期電動機が永久磁石回転子、特にフェライトの採用により小型化されて実現可能となった。このため、従来複雑なギヤ機構を要し、その精度で苦心していた分野で電動機直結方式が機器全体の性能向上と簡易化に貢献しうる発展的応用分野である。

(5) 制御性 紡績機械、等高度の制御しかも揃速制御を要する分野への応用、あるいは自動機械への応用等しだいに開発され利用されつつある。

以上、無整流子電動機の原理および応用面を重点に述べたが、いまだ発展の途上であり、しかも従来の用途には長い歴史的経験を経て、それ相応の電動機が適用されており容易に置換えうる分野ではない。この点本電動機の今後の発展の鍵は科学技術全般の進展にともなう新応用面の開発であるといえる。

(以下21頁へ続く)

(15頁より続く)

文 献

- 1) E. F. W. Alexandersson and A. H. Mittag The thyatron Motor Electrical Eng. 53, 1517 (1934).
- 2) 宮入庄太, 井上朝広: トランジスタモータの動向電字誌, 84, 325 (昭 39).
- 3) 田中穰: トランジスタ電動機の発展: National Tech. Rep. 11, 359 (昭 40).
- 4) 田中穰: トランジスタ同期電動機の研究, 電字誌, 84, 1786 (昭 39).
- 5) 田中穰, 笹部馨: 位相制御要素としての Twin-T. 発振器, 電気四字会連大, 522 (昭 40).
- 6) 田中穰: 無整流子電動機の同期特性, 電字誌, 85, 1559 (昭 40)
- 7) 安岡真衛, 田中穰, 笹部馨: トランジスタ電動機研究, National Tech Rep. 11, 90 (昭 40)
- 8) 中野稔他: シネテレビジョン National Tech. Rep. 11, 335 (昭 40).