

# 光電的方法による直流電動機の応答時間測定

大内 隆夫・福寿 三典・鈴木 春男

工学部電気工学科

## 1. 緒言

他励小形直流電動機の回転速度の過渡応答を観測する場合それに直結された直流速度計発電機が用いられてきた。しかし、被測定電動機の伝達関数を一次系で近似すれば、この電動機の応答時間はこの関数の時定数から求められる。これを測定する場合この発電機の慣性モーメント、ブラシの摩擦損および電機子巻線のインダクタンスの影響が新たに付加されること、また低回転速度の電動機の応答時間を測定する場合この速度計発電機の誘起電圧が小さいこと、などに問題が残されている。

最近、高精度の等分技術が発達したため、回転あたり 6000 パルスを発生する光電式ピックアップが市販されるようになり、低回転速度におけるパルスの繰り返し周波数も高くすることができ測定精度を上げることができるようになった。またりん青銅を材料としきわめて薄く高精度に等分された小形円板を光電形のピックアップとして使用すれば、この慣性モーメントも上記のものより小さくできる。

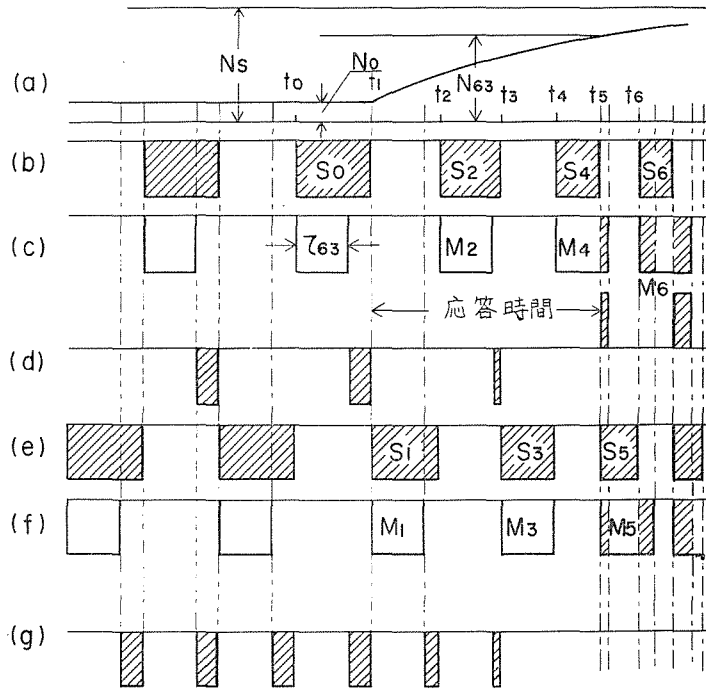
本文ではこのような光電式ピックアップを用いて回転数に比例した繰り返し周波数の方形波を発生させ、回転数の増加に対して基準パルス巾とこの方形波パルス巾の差を検出して直流電動機の応答時間を測定する回路方式<sup>(1),(2)</sup>について述べる。

この方式は従来の方法と比較すれば次のような長所がある。

- (1) 被測定機に接触することなく測定できる。
  - (2) 円板の等分数を増加させることによりきわめて低速回転(毎秒一回転)での応答時間も測定できる。
  - (3) 速度計発電機の時定数、ブラシの整流作用による高周波の雑音などの影響がない。
- さらに適当な回路的考慮を払えば、パルス巾変調出力回路の応答時間測定にも応用できる範囲が少なくないものと思われるので、以下にその大要を報告する。

## 2. 基本的測定原理

被測定直流電動機に高精度に等分され一つおきに光が通る薄くて小形の円板を取り付け光電式ピックアップを構成する。この電動機を基準回転速度  $N_0$  で回転させると定常状態で一定周期の方形波が発生する。この方形波の後縁と同期して一定励磁の直流電動機の電機子にステップ状入力電源電圧が印加されると回転速度は  $N_0$  より上昇し定常回転速度  $N_s$  に達する。第1図の (a) と (b) はこの基本的動作状態を示す図であり、回転速度の上昇に対してピックアップの出力方形波のパルス巾が減少する。この場合の応答時間をステップ入力印加後全変化量の 63.2% に達するまでの時間と定義すれば、この 63.2% の時の回転速度  $N_{63}$  は次式となる。



第1図 基本的測定原理図

$$N_{63} = N_0 + 0.632 (N_s - N_0) \quad (r.p.m) \quad (1)$$

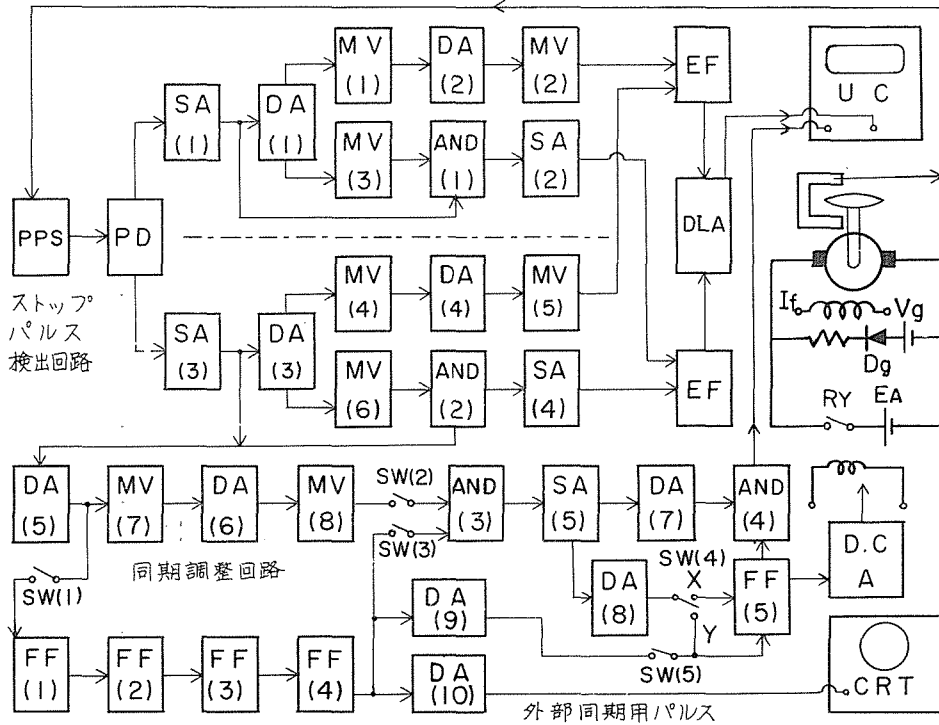
ここで円板の等分数を  $m$  とすると (1) 式の回転速度  $N_{63}$  のときの方形波パルス巾  $\tau_{63}$  は次式となる。

$$\tau_{63} = 60 / (mN_{63}) \quad (sec) \quad (2)$$

このピックアップの出力方形波の前縁のトリガパルスで単安定マルチバイブレータを動作させその出力パルス巾を (2) 式の  $\tau_{63}$  に調整したのが第1図の (c) である。同図の (b) と (c) の差を差動増巾器で検出すれば同図の (d) がえられる。これから過渡時の方形波  $M_4$  のパルス巾が  $S_4$  のそれより大きくなり両者の差のパルス(ストップパルスと呼ぶ)が正に現われる。ここで、ステップ入力印加時にトリガパルス(スタートパルスと呼ぶ)を発生し時間間隔測定用カウンタを動作させストップパルスまでの時間を指示させれば応答時間の測定が可能である。上記の測定方法では方形波出力パルスの半波のみを使用したので測定誤差が大きくなる。そこで、この方形波出力パルスを第1図の (b) と (e) に示すように第2図の PD 回路により位相が  $\pi$  だけ異なる二つの半波方形波パルスに分ければ、そのそれぞれが独立に前述と同様にして動作する。しかし、これを全波出力形にするため第1図の (b) と (e), (c) と (f) を混合しそれぞれの出力を差動増巾器の入力端子に加えれば、方形波パルス  $M_4$  と  $M_5$ ,  $M_5$  と  $M_6$  が重なり同図の (g) に示すごとく差動増巾器の出力にはストップパルスが現われない。また、同図 (b) と (c), (e) と (f) の方形波パルス巾の差を検出する場合このパルスの前縁の立上り時間に差違があればこのカウンタのストップのさい誤動作の原因ともなる。そこで以下のような回路方式を用いた。

### 3. 基本的回路構成

#### 3.1 ストップパルス検出回路



第2図 測定回路のブロック線図

PPS：光電式ピックアップ用方形波増巾器

SA (1), (2), (3), (4), (5)：方形波パルス増巾器

DA (1), (3)：方形波パルス前縁におけるトリガパルス発生用微分回路

DA (2), (4), (5), (6), (8)：方形波パルス後縁におけるトリガパルス発生用微分回路

MV (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8)：単安定マルチバイブレータ

FF (1), (2), (3), (4), (5)：フリップ・フロップ回路

AND (1), (2), (3), (4)：ANDゲート(一致)回路

AND (4)：スタートパルス発生回路

EF：エミッタホロワ回路      DLA：差動増巾器 (ストップパルス発生回路)

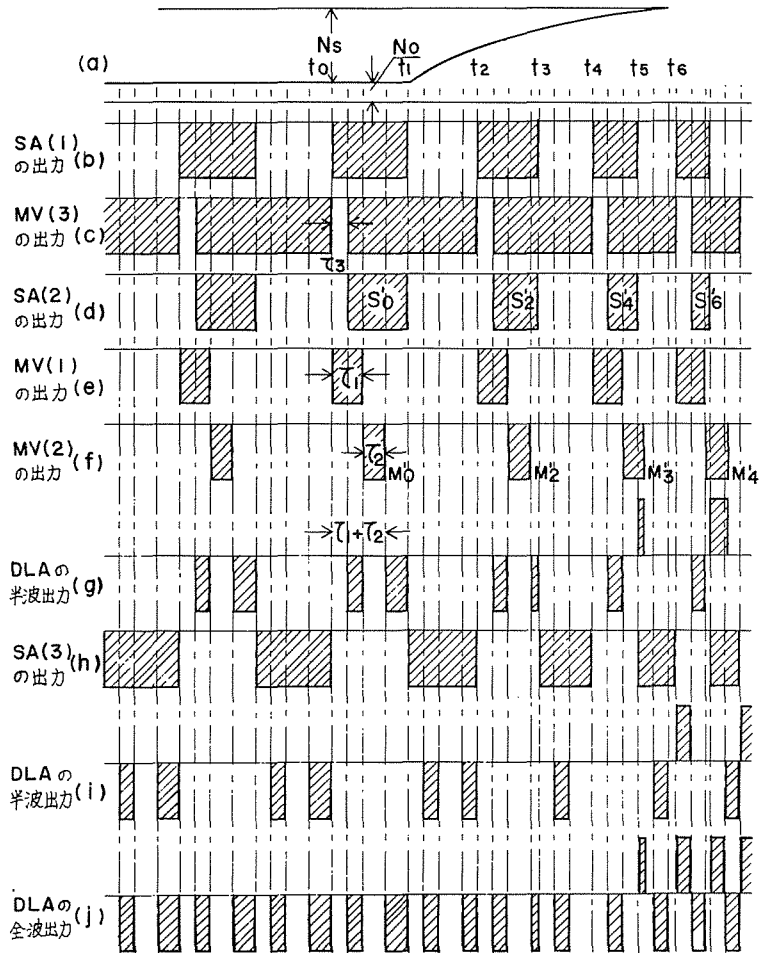
DA (9)：FF (4) の出力波形後縁でのトリガパルス発生用微分回路

DA (10)：FF (4) の出力波形前縁での外部同期トリガパルス発生回路

DCA：リレーのコイル駆動用直流電力スイッチ回路

UC：時間間隔測定用カウンタ

CRT：二現象シンクロスコープ



第3図 ストップパルス検出回路の各出力波形

第2図に測定回路のブロック線図を示す。第3図にストップパルス検出回路の各ブロックの出力波形を示す。第2図の被測定直流電動機を初め直流電源  $V_0$  とダイオード  $D_0$  により起動し基準回転速度  $N_0$  (第3図(a))で回転させる。この場合、第2図に示す光電式ピックアップの方形波増巾器 (PPS) の出力は PD 回路により位相が  $\pi$  だけ異なる二つの半波に分けられる。それがそれぞれの方角波増巾器 SA (1) と SA (3) (その出力は第3図の (b) と (h)) で増巾される。SA (1) の出力方形波の前縁を微分回路 DA (1) で微分し、そのトリガパルスで単安定マルチバイブレータ MV (1) と MV (3) (その出力はそれぞれ第3図の (e) と (c)) を動作させる。この単安定マルチバイブレータのパルス巾決定条件のなかで特に抵抗を可変とし一つを粗調整に用い他の一つを微細調整に用いれば、このパルス巾を精密に  $\tau_{63}$  に調整することができる。MV (3) と SA (1) の出力を一致回路 AND (1) の入力としその出力を方形波増巾器 SA (2) (その出力は第3図の (d)) で増巾する。次に MV (1) の出力方形波 (そのパルス巾は  $\tau_1$ ) の後縁

を微分回路  $DA(2)$  で微分し単安定マルチバイブレータ  $MV(2)$  (その出力は第3図の  $(f)$  でそのパルス巾は  $\tau_2$ ) を動作させる。 $MV(2)$  と  $SA(2)$  の出力方形波をそれぞれトランジスタのエミッタホロウ  $EF$  を介して差動増巾器  $DLA$  (その出力は第3図の  $(g)$ ) に印加する場合、これまで述べて来た半波形回路についてのみ考えれば両者のパルス巾の差が出力に現われる。ここでストップパルス検出回路のみについていえば、 $SA(3)$  以後の各ブロックの動作は位相が  $\pi$  だけ異なる以外は前述の場合と同様である。ここで、 $MV(5)$  と  $SA(4)$  の出力方形波をそれぞれ前述と同様にして差動増巾器 (その出力は第3図の  $(i)$ ) に印加すれば両者のパルス巾の差が出力に現われる。これまで述べてきた二つの半波出力形の出力を混合し全波出力形にするため、 $SA(2)$  と  $SA(4)$ 、 $MV(2)$  と  $MV(5)$  の出力をそれぞれトランジスタのエミッタホロウ  $EF$  で混合しその出力を  $DLA$  の入力に印加すれば第3図の  $(j)$  に示すような方形波パルスがえられる。

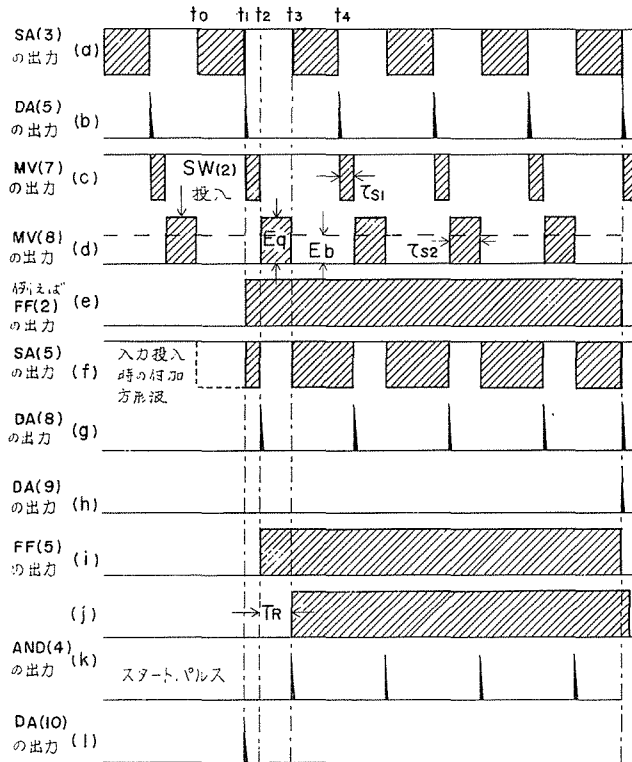
時間的關係を明らかにするため、基準回転速度  $N_0$  における  $SA(1)$  の出力方形波の前縁を時刻  $t_0$  とし、その後縁  $t_1$  時刻に被測定電動機の電機子にステップ状入力印加されるものとする。 $MV(3)$  の出力パルス巾を  $\tau_3$  とすれば、 $SA(2)$  の出力方形波  $S'_0$  の前縁と時刻  $t_0$  との間に  $\tau_3$  の時間間隔が生ずる。これは  $SA(2)$  と  $SA(4)$  の出力方形波を  $EF$  で混合し全波出力をうるさい両者の間に方形波パルス間隔を持たせるためである。もしこの間隔が無ければストップパルスの発生が阻止される。 $MV(1)$  と  $MV(2)$  の出力パルス巾をそれぞれ  $\tau_1$  と  $\tau_2$  とする。 $MV(1)$  は  $MV(2)$  の出力方形波の発生を  $\tau_1$  だけ遅らせるためのものである。もし遅らせなければ第1図で説明したように、同図の  $(b)$  の  $S_2$  と同図の  $(c)$  の  $M_2$  との差を検出する場合両者の立上り時間の差により正のパルスが生ずる。これがストップパルスとなり誤動作をひきおこす。第3図の  $\tau_1 + \tau_2$  を第1図の  $\tau_{e3}$  に等しくさせれば  $\tau_1$  と  $\tau_2$  は任意の値でよい。

### 3・2 同期調整回路

基準回転速度  $N_0$  で回転している場合に発生する出力方形波の前縁または後縁に同期してリレー  $RY$  の接点が閉じ、それと同時に時間間隔測定用カウンタのスタートパルスが発生するような装置を付加する必要がある。ところが、リレー  $RY$  の励磁コイルに電圧が印加されてから接点が閉じるまでにはある時間遅れが生ずる。この時間遅れを  $T_R$  とすると、上記の同期をとるには励磁コイルに  $T_R$  だけ進んで電圧を印加しなければならない。

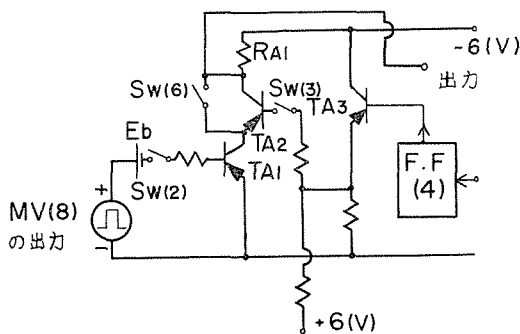
#### 3・2・1 リレー接点とスタートパルスの同期

第2図に同期調整回路のブロック線図もあわせて示す。第4図に同期調整回路の各ブロックの出力波形とそれらの間の時間的關係を示す。初めに第2図のスイッチ  $SW(1)$ 、 $SW(2)$ 、 $SW(3)$  と  $SW(5)$  を閉じ、スイッチ  $SW(4)$  を  $X$  側に投入する。 $SA(3)$  の出力方形波 (その出力は第4図の  $(a)$ ) の後縁を微分回路  $DA(5)$  (その出力は第4図の  $(b)$ ) で微分し、そのトリガパルスで単安定マルチバイブレータ  $MV(7)$  (その出力パルス巾は  $\tau_{s1}$  で第4図の  $(c)$ ) を動作させる。その出力方形波の後縁を微分回路  $DA(6)$  で微分し単安定マルチバイブレータ  $MV(8)$  (その出力パルス巾は  $\tau_{s2}$  で第4図の  $(d)$ ) を動作させる。 $DA(5)$  の出力トリガパルスでフリップ・フロップ回路  $FF(1) \sim FF(4)$  ( $FF(2)$  の出力は第4図の  $(e)$ ) が動作して繰り返し周波数が分周



第4図 同期調整回路の各出力波形

される。第5図に AND (3) の回路とスイッチ回路を示す。MV (8) の出力を同図に示



第5図 AND 回路(3)と入力回路

す極性に印加しその出力方形波の高さを  $E_q$  とし直流バイアス電圧を  $E_b$  (第4図の (d)) とする。ここで  $E_q > E_b$  を満足するものとすれば、スイッチ SW (2) と SW (3) は閉じており SW (6) は開いているから、FF (4) の出力が現われている間だけトランジスタ  $T_{A2}$  は導通するからこの AND (3) の負荷抵抗  $R_{A1}$  に発生する出力を方形波増幅器 SA (5) で増幅すれば第4図の

(f) の斜線で示した方形波がえられる。この出力方形波の前縁を微分回路 DA (7) で微分し、その後縁を微分回路 DA (8) (その出力は第4図の (g)) で微分すればフリップ・フロップ回路 FF (5) (その出力は第4図の (i)) が動作する。ここで FF (5) の出力の一つは直流電力増幅器 DCA で増幅されリレー RY の励磁コイルに印加され、これ

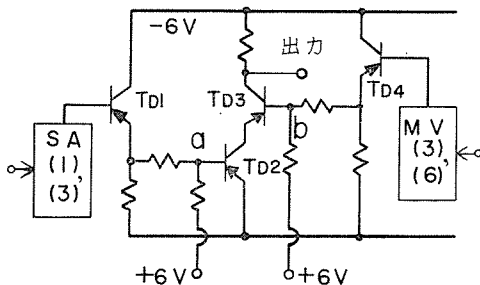
より  $T_R$  だけおくれた時刻  $t_3$  に接点が閉じるようにする。さらに、 $FF$  (5) の出力と  $DA$  (7) の出力を一致回路  $AND$  (4) (その出力は第4図の  $(k)$ ) に印加して時刻  $t_3$  に時間間隔測定用カウンタのスタートパルスが発生するようにする。このさい、 $FF$  (4) の出力波形の後縁を微分回路  $DA$  (9) (その出力は第4図の  $(h)$ ) で微分しこのトリガパルスを  $FF$  (5) に印加すれば出力が反転しリレー  $RY$  も開きスタートパルスは消滅する。この同期の調整は繰り返し現象として二現象オシロスコープを観測して行う。この場合、 $FF$ (4)の出力波形の前縁を微分回路  $DA$  (10) で微分すればこれが外部同期トリガパルスとなる。

リレー  $RY$  の負荷として抵抗を選びこの負荷電圧(第4図の  $(j)$ )と  $SA$  (3) の出力の波形を観測しながら  $MV$  (7) の出力パルス巾  $\tau_{s1}$  を調整してリレーの閉じる時刻を  $t_3$  に同期させる。 $SA$  (3) の出力と  $AND$  (4) の出力を同様に観測しながら  $MV$  (8) の出力パルス巾  $\tau_{s2}$  を調整してスタートパルスを時刻  $t_3$  に同期させる。基準回転速度  $N_0$  で発生する出力方形波のパルス巾を  $T_P$  とすれば、各パルス巾の間には次の関係式を満足させる必要がある。 $T_P > T_R$ ,  $T_P - T_R = \tau_{s1}$ ,  $\tau_{s1} + \tau_{s2} = T_P$

### 3・2・2 応答時間測定時の入力投入方法

基準回転速度  $N_0$  におけるリレーの接点およびスタートパルスの同期調整が终れば、第2図のスイッチ  $SW$  (1),  $SW$  (2),  $SW$  (3) と  $SW$  (5) を開き、 $SW$  (4) を  $X$  側に投入したままにしておく。応答時間測定時の入力投入方法がここでは  $SW$ (2)で行うものとし、いかなる時刻に  $SW$  (2) が投入されてもリレー  $RY$  の接点が  $N_0$  における方形波の前縁に同期して閉じるために  $AND$  (3) を第5図の回路構成にした。ここで第5図の  $SW$  (2) と  $SW$  (3) を開き  $SW$  (6) を閉じれば  $AND$  (3) は単なる増巾器として働く。いま、第4図の  $(d)$  に示す時刻に  $SW$  (2) が投入されれば第2図の  $SA$  (5) の出力には第4図の  $(f)$  の斜線で示した方形波に新たに点線で示した方形波が付加された出力方形波が発生する。

この場合、 $SA$  (5) の出力方形波の後縁を微分しこのトリガパルスで  $FF$  (5) を動作させる。また  $SA$  (5) の出力方形波の前縁を微分しこのトリガパルスと  $FF$  (5) の出力を  $AND$  (4) の入力とするため、前述の同期を初めに調整しておけば、基準回転速度  $N_0$  における方形波の前縁といつも同期させることができる。

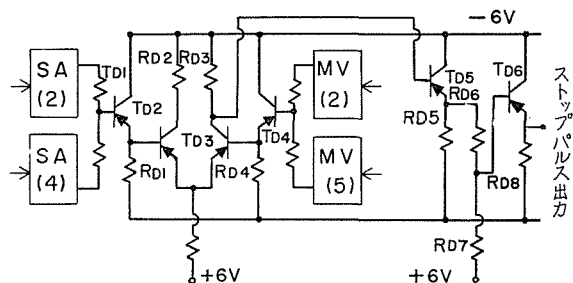


第6図 AND回路(1), (2)

### 3・3 各部回路

第6図は第2図の一致回路  $AND$  (1) および  $AND$  (2) のトランジスタ回路を示す。トランジスタ  $T_{D2}$  と  $T_{D3}$  のベース点  $a$  と  $b$  はそれぞれ無入力時に正の電位にしておく、それぞれエミッタホロア回路を介して入力印加されれば両入力と同時に印加されたときのみ出力が現われる。

第7図は第2図のエミッタホ  
ロワ  $EF$  と差動増巾器  $DLA$   
のトランジスタ回路を示す。  
 $SA(2)$  と  $SA(4)$ ,  $MV(2)$  と  
 $MV(5)$  の出力をそれぞれト  
ランジスタ  $T_{D2}$  および  $T_{D4}$  のエ  
ミッタホロワ回路で混合し、そ  
れぞれ差動増巾器に印加する。  
ここでえられた出力がストップ  
パルスとなる。



第7図 差動増巾器(ストップパルス発生)回路

#### 4. 直流電動機と光電的方法による測定装置の解析的検討

##### 4.1 直流電動機の解析的検討

他励直流電動機の電機子に直流電圧  $E_A$  が印加された場合の方程式は近似的に次式となる。

$$E_A = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_s n \quad (3)$$

$$T = K_t i_a = J \frac{dn}{dt} + F n \quad (4)$$

ただし、 $J$  : 電動機の慣性モーメント、 $R_a$  : 電機子回路の合成抵抗、 $K_s$  : 電動機の逆起電力定数、 $L_a$  : 電機子のインダクタンス、 $K_t$  : トルク定数、 $F$  : 電動機の粘性摩擦係数とする。

電機子にステップ入力印加時で基準回転速度  $N_{r0}$  を初期条件とする回転速度のラプラス変換  $N(s)$  は上記両式から、電気的時定数を無視すれば、近似的に次式となる。

$$N(s) = \frac{N_{r0}}{s} + \frac{(K_t E_A)/(FR_a + K_t K_s) - N_{r0}}{s\{JR_a/s/(FR_a + K_t K_s) + 1\}} \quad (5)$$

ただし

$$\left(\frac{FL_a + JR_a}{2JL_a}\right)^2 \gg \frac{FR_a + K_t K_s}{JL_a}$$

$$N_{r0} = \frac{2\pi N_s}{60} \quad (rad/s)$$

ここで、 $T_m = JR_a/(FR_a + K_t K_s)$  : 機械的時定数、 $K_m = K_t/(FR_a + K_t K_s)$  とおけば

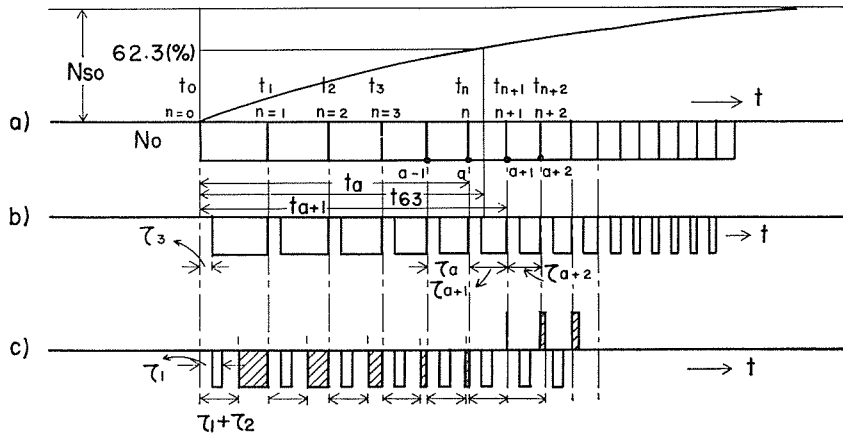
$$N(t) = N_{r0} + (K_m E_A - N_{r0})(1 - e^{-t/T_m}) \quad (6)$$

実験に使用した直流電動機〔200W, 100V, 2A, 3,500 r·p·m〕の諸定数  $J = 7.27$  g-cm/(rad/s<sup>2</sup>),  $R_a = 3.29\Omega$ ,  $K_t = 2,104$  g-cm/A,  $K_s = 0.27V/(rad/s)$ ,  $F = 0.4$  g-cm/(rad/s), これらの定数を用いて  $K_m$  と  $T_m$  を求めると  $K_m = 3.69(rad/s)/V$ ,  $T_m = 42ms$  がえられた。



4・2 光電形測定回路の解析的検討

第8図は過渡応答時の各部の出力波形を示す。同図の(a)は基準回転速度  $N_{r0}$  にお



第8図 過渡応答時の各部出力波形

ける出力方形波の前縁または後縁と同期してリレーの接点が閉じた瞬間  $t_0(n=0)$  から、 $SA(1)$  と  $SA(2)$  (第2図)の出力を混合したと仮定した場合の全波出力方形波を示す。同図の(b)は  $SA(2)$  と  $SA(4)$  (第2図)の出力を混合したと仮定した場合の全波出力方形波を示す。同図の(c)は差動増巾器  $DLA$  (第2図)の出力方形波を示す。

回転円板の等分数は  $m$  とする。その回転角を  $\theta$  (rad) として(6)式の回転速度を書き改めれば次式となる。

$$\frac{d\theta}{dt} = N_{r0} + N_{s0}(1 - e^{-t/\tau_m}) \quad (7)$$

ただし、 $N_{s0} = K_m E_{s1} - N_{r0}$  (rad/s)

(7) 式の両辺を積分すれば

$$\theta = (N_{r0} + N_{s0})t + T_m N_{s0} e^{-t/\tau_m} + C \quad (8)$$

第8図(a)の  $t_0$  からの回転円板の回転角を等分角の正の整数倍として表わせれば次式となる。

$$\frac{2\pi}{m} n = (N_{r0} + N_{s0})t + T_m N_{s0} e^{-t/\tau_m} + C \quad (9)$$

ただし、 $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

ここで、 $t = 0$  で  $n = 0$  とおき、定数  $C$  を求めると、(9)式は次式となる。

$$\frac{2\pi}{m} n = (N_{r0} + N_{s0})t + T_m N_{s0} e^{-t/\tau_m} - T_m N_{s0} \quad (10)$$

ただし、 $n$  (等分数) =  $1, 2, 3, \dots$

(10)式は超越関数であるから一般的には解けない。しかし電子計算機を用いれば求め

ることができる。この場合 (10) 式に  $n = 1, 2, \dots, n, \dots$  を代入しそれぞれその時の時間を求めその値を  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, \dots$  とすれば、それらの時間はステップ入力印加後  $n$  の数値に対応する出力方形波までの時間を示す。

(6) 式から  $\varepsilon^{-1} = \varepsilon^{-t/T_m}$  を満足する時間を  $t_{63} (=T_m)$  とする。これを (10) 式に代入すれば次式となる。

$$\frac{2\pi}{m} n = (N_{r0} + N_{s0})T_m + T_m N_{s0} \varepsilon^{-1} - T_m N_{s0} \quad (11)$$

(11) 式を満足する  $n$  を逆に求めて  $n = a + \eta$  で表わす。ただし、 $a$ : 正の整数、 $0 \leq \eta < 1$  とする。即ち  $a \leq n < (a + 1)$ , 被測定電動機の応答時間は方形波パルス数  $a + 1$  までの時間の間にあることになる。

ここで、(10) 式に  $n = a$  を代入し、この式を満足する時間を求めこれを  $t_a$  とする。また (10) 式に  $n = a + 1$  を代入し、この式を満足する時間を求めこれを  $t_{a+1}$  とすれば次の関係式が成り立つ。

$$t_a < t_{63} < t_{a+1} \quad (12)$$

$n$  が  $a - 1$  と  $a$  の間の方形波パルス巾を  $\tau_a$ ,  $n$  が  $a$  と  $a + 1$  の間の方形波パルス巾を  $\tau_{a+1}$ ,  $n$  が  $a + 1$  と  $a + 2$  の間の方形波パルス巾を  $\tau_{a+2}$  とすると

$$\tau_a = t_a - t_{a-1} \quad (13)$$

$$\tau_{a+1} = t_{a+1} - t_a \quad (14)$$

$$\tau_{a+2} = t_{a+2} - t_{a+1} \quad (15)$$

回転速度が上昇時の過渡応答の場合には次の関係がある。

$$\tau_a > \tau_{a+1} > \tau_{a+2} \quad (16)$$

第8図(c)の  $\tau_1 + \tau_2$  は(2)式の  $\tau_{63}$  に等しく調整しその後は一定にしてあるから  $\tau_a, \tau_{a+1}, \tau_{a+2}$  のそれぞれと基準パルス巾  $\tau_{63}$  との差の検出がストップパルス(第8図(c)の最初の正のパルス)発生の精度に影響を与える。

a)  $\tau_{a+1} < \tau_{63}$  の場合

$\tau_{63} = \tau_1 + \tau_2$  であるから第8図の(c)からわかるように  $n$  が  $a + 1$  の時点で正のパルス(ストップパルス)が発生する。しかし、この場合の測定誤差  $t_{\varepsilon(a+1)}$  は次式で求められる。

$$t_{\varepsilon(a+1)} = t_{a+1} - t_{63} \quad (17)$$

b)  $\tau_{a+1} > \tau_{63}$  の場合

この場合に  $n$  が  $a + 2$  の時点で正のパルス(ストップパルス)が発生することになる。この場合の測定誤差  $t_{\varepsilon(a+2)}$  は次式で求められる。

$$t_{\varepsilon(a+2)} = t_{a+2} - t_{63} \quad (18)$$

#### 4.3 回転円板の等分誤差とパルス巾への影響

等分数  $m$  の回転円板の回転数を  $N$  ( $r \cdot p \cdot m$ ) とすれば、1秒間の回転角(deg)は  $6N$  (deg/sec) となるから1度当りの時間は  $1/(6N)$  (sec/deg) となる。一方、1等分の角度は  $360/m$  (deg) となるが、この角度に  $\pm \Delta\theta$  (deg) だけの等分誤差があるものとする。1等分の角度は一般に  $(360/m) \pm \Delta\theta$  で表わされる。この1等分に相当する方形波パルス巾  $\tau_\theta$  (sec) は次式となる。

$$\begin{aligned}\tau_{\theta} &= \left( \frac{360}{m} \pm \Delta\theta \right) \times \frac{1}{6N} \\ &= \tau_{\theta s} \pm \Delta\tau_{\theta} \quad (\text{sec})\end{aligned}\quad (19)$$

ただし、 $\tau_{\theta s} = \frac{60}{mN}$ 、 $\Delta\tau_{\theta} = \frac{\Delta\theta}{6N}$  とおく。

(1) 式で示される回転速度  $N_{63}$  ( $r \cdot p \cdot m$ ) における方形波パルス巾  $\tau_{\theta 63}$  は一般に次式で表わされる。

$$\tau_{\theta 63} = \frac{60}{mN_{63}} \pm \frac{\Delta\theta}{6N_{63}} = \tau_{63} \pm \Delta\tau_{\theta 63} \quad (\text{sec}) \quad (20)$$

ただし、 $\Delta\tau_{\theta 63} = \Delta\theta / (6N_{63})$

ここで、(13) ~ (15) 式で示される場所の隣合う方形波パルス巾  $\tau_a$  と  $\tau_{a+1}$  の差および  $\tau_{a+1}$  と  $\tau_{a+2}$  の差をそれぞれ次のように表す。

$$\tau_a = \tau_a - \tau_{a+1} \quad (21)$$

$$\tau_{a+1} = \tau_{a+1} - \tau_{a+2} \quad (22)$$

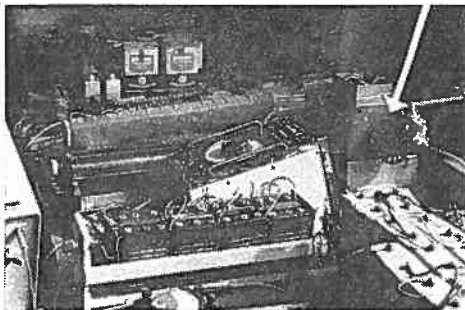
上式の隣合うパルス巾の差と  $\Delta\tau_{\theta}$  との間には回転速度の如何にかかわらず次の不等式が成立しなければならない。

$$\left. \begin{aligned}\tau_a &> 2\Delta\tau_{\theta}, & \tau_{a+1} &> 2\Delta\tau_{\theta} \\ \tau_a &> \tau_{a+1}\end{aligned}\right\} \quad (23)$$

しかし、回転速度  $N_{63}$  ( $r \cdot p \cdot m$ ) における方形波パルス巾に対する誤差がストップパルス発生に影響を与えるので特に次の不等式の成立が重要である。

$$\tau_a > \tau_{a+1} > 2\Delta\tau_{\theta 63} \quad (24)$$

## 5 計算結果と実験的検討

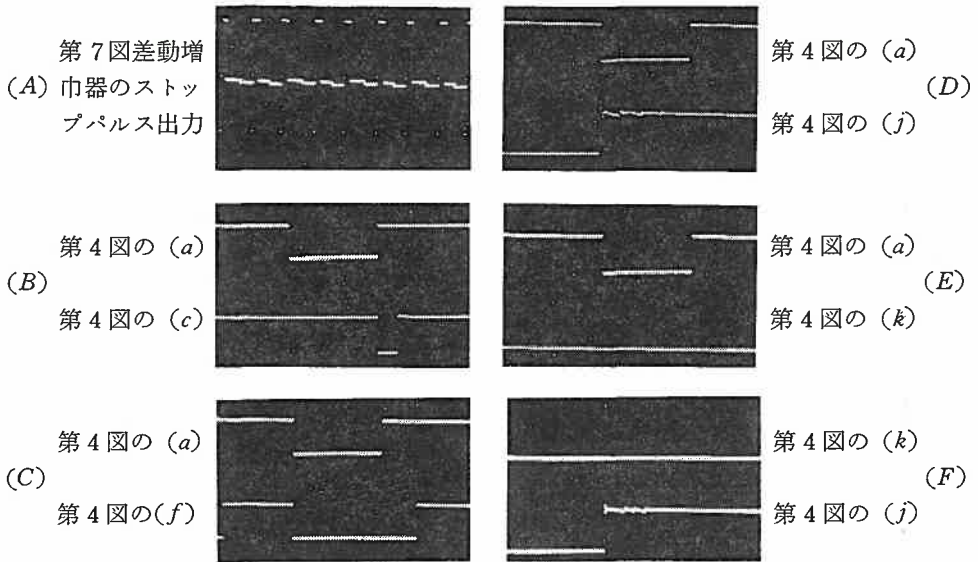


第9図 本装置の写真  
(白い矢印のところが回転円板)

第9図は本測定装置の写真を示す。

第10図は本装置の各部の波形を示す。同図(A)は(1)式の  $N_{63}$  よりわずかに高い定常回転速度におけるストップパルス発生状態を示す。また同図(F)からスタートパルスと同期してリレー接点が開閉することがわかる。さらにこの両者は方形波増巾器 SA (3) の出力の前縁と同期していることも同図(D)と(E)からわかる。

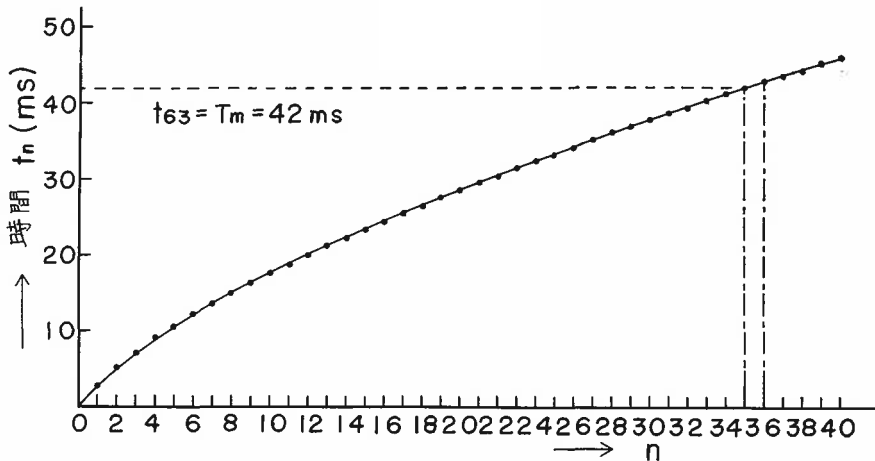
回転円板は凸版印刷株式会社写真製版により厚さ  $0.1\text{mm}$  (材質はりん青銅) 直径  $5\text{cm}$  の円板にエッチングを行なって製



第10図 各部のオシログラフ波形

作したもので  $m = 30$  等分したものである。一つおきに光が通るようにしてあり小野測器製の光電式ピックアップと増巾器を使用した。ここに使用した回転円板の慣性モーメントは  $7.2 \times 10^{-3} (g \cdot cm \cdot sec^2)$  である。また単安定マルチバイブレータの安定度はパルス巾  $1 ms$  の点について実測した結果  $1.2 \times 10^{-3}$  がえられた。

初期定常回転速度  $N_{r0} = 20\pi (rad/s) (=6,000r \cdot p \cdot m)$ 、最終定常回転速度  $K_m E_A = 366.33 (rad/s) (=3,500r \cdot p \cdot m)$ 、 $N_{s0} = 303.69 (rad/s)$ 、 $m = 30$ 、 $T_m = 0.042 (sec)$  で等分の数  $n = 1, 2, 3, \dots$  を (10) 式に代入しそれぞれその時の時間  $t_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) を電子計算機で求めたものが第11図である。



第11図 (10) 式をもとにした計算結果

上記の各種定数のもとで方形波増巾器の出力波形と同期して被測定機の電機子にステップ入力印加後回転速度の全変化量の 63.2% に相当するまでの時間  $t_{63} = T_m$  を与えて逆に一等分の倍数  $n$  を求めると (11) 式を使えば  $n = 35.0039$  がえられた。これを  $n = a + \eta$  で表わせれば次のようになる。 $n = 35 + 0.0039$ , すなわち  $a = 35$ ,  $\eta = 0.0039$  となる。これから、全変化量の 63.2% に相当する時間は一等分の倍数  $n = 35$  と 36 の間にあることがわかる。それで、これらを中心とし一等分の倍数  $n = a = 32 \sim 38$  における時間をそれぞれ (10) 式より求めたのが第 1 表であり、あわせて (13), (14) と (15) 式から過渡時の隣合うパルス巾  $\tau_a$  も示し、また (21) と (22) 式から隣合

第 1 表 (10) 式をもとにした計算結果

$n = a$	$t_n = t_a$	$\tau_a = t_a - t_{a-1}$	$\tau_a = \tau_a - \tau_{a+1}$
32	39.498 (ms)	0.8488 (ms)	8.54 ( $\mu$ s)
33	40.338 (ms)	0.8407 (ms)	8.13 ( $\mu$ s)
34	41.171 (ms)	0.8330 (ms)	7.74 ( $\mu$ s)
35	41.997 (ms)	0.8256 (ms)	7.39 ( $\mu$ s)
36	42.815 (ms)	0.8185 (ms)	7.06 ( $\mu$ s)
37	43.627 (ms)	0.8118 (ms)	6.75 ( $\mu$ s)
38	44.432 (ms)	0.8053 (ms)	6.46 ( $\mu$ s)

うパルス巾の差  $\tau_a$  も示してある。(6) 式からえた値を真値と考えれば第 1 表より  $n = a = 35$  においては (12) 式  $t_{35} (= 41.997ms) < t_{63} (= 42.0ms) < t_{36} (= 42.815ms)$  も成立する。同表より  $n = a = 35$  においては (16) 式  $\tau_{35} (= 0.8256ms) > \tau_{36} (= 0.8185ms) > \tau_{37} (= 0.8118ms)$  も成立する。第 8 図 (c) の  $\tau_1 + \tau_2 = \tau_{63} = 0.8221ms$  に調整してあるから  $[\tau_{a+1}]_{a=35} (= 0.8185ms) < \tau_{63} (= 0.8221ms)$  が成立するから第 8 図からもわかるように  $n = [a + 1]_{a=35}$  の時点で正のパルス (ストップパルス) が発生することがわかる。この場合の本装置を使用した場合の誤差  $[t_{e(a+1)}]_{a=35}$  は (17) 式より  $[t_{a+1}]_{a=35} - t_{63} = 0.815ms$  となる。

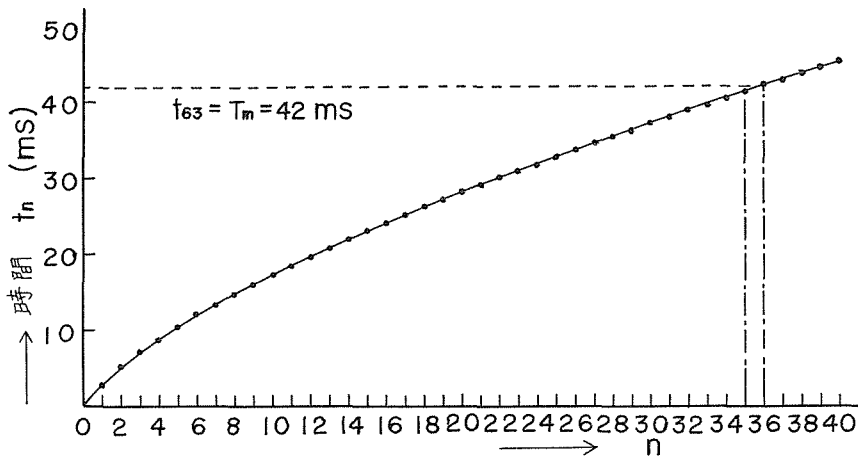
つぎに回転円板の等分誤差とパルス巾への影響を検討する。実測の結果一等分の等分誤差  $\pm \Delta \theta$  (deg) は  $\pm 1.1 \times 10^{-2}$  (deg) がえられた。(19) 式よりこの等分誤差に相当する方形波パルス巾  $\pm \Delta \tau_\theta$  は  $N = 3,500 r \cdot p \cdot m$  において  $\pm 0.523\mu s$  がえられた。すなわち  $2 \Delta \tau_\theta = 1.05\mu s$  となる。誤動作なくストップパルスを検出するには (23) 式が成立しなければならぬ。すなわち  $[\tau_a]_{a=35} (= 7.39\mu s) < [\tau_{a+1}]_{a=35} (= 7.06\mu s) > 2 \Delta \tau_\theta (= 1.05\mu s)$  となる。 $N_{63} = 2433.15 r \cdot p \cdot m$  における等分誤差に相当する方形波パルス巾  $\pm \Delta \tau_{\theta 63}$  は  $0.753\mu s$  となる。これがストップパルス発生の設定に影響を与えるので (24) 式も成立しなければならぬ。すなわち  $[\tau_a]_{a=35} (= 7.39\mu s) > [\tau_{a+1}]_{a=35} (= 7.06\mu s) > 2 \Delta \tau_{\theta 63} (= 1.5\mu s)$

第 2 表は初期定常回転速度  $600 r \cdot p \cdot m$  から最終定常回転速度  $3,500 r \cdot p \cdot m$  に対する応答時間をこの装置を用いてカウンタに指示させた実験結果を示す。計算結果は  $t_{63} = 42.815ms$  となる。

第2表 実験結果

測定回数	初期定常回転速度 (r·p·m)	最終定常回転速度 (r·p·m)	応答時間 (カウンタ指示) (ms)
1	600	3500	41.288
2	600	3500	41.923
3	600	3500	40.954
4	600	3500	41.116

つぎに、初期定常回転速度  $N_{r_0} = 20\pi \text{ (rad/s)} (= 600 \text{ r} \cdot \text{p} \cdot \text{m})$ 、最終定常回転速度  $K_m E_A = 376.8 \text{ (rad/s)} (= 3,600 \text{ r} \cdot \text{p} \cdot \text{m})$ 、 $N_{s_0} = 314.16 \text{ (rad/s)}$ 、 $m = 30$ 、 $T_m = 0.042 \text{ (sec)}$  で等分の数  $n = 1, 2, 3, \dots$  を (10) 式に代入しそれぞれその時の時間  $t_n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) を電子計算機で求めたものが第12図である。(11) 式より  $n$  を求めると  $n =$



第12図 (10) をもとにした計算結果

$35.776 = 35 + 0.776$  がえられた。すなわち  $a=35$ 、 $\eta = 0.776$  である。これからストップ入力印加後  $t_{63}$  の時刻では一等分の倍数  $n = a = 32 \sim 38$  における時間  $t_n = t_a$  とパルス巾  $\tau_a$  および隣合うパルス巾の差  $\tau_d$  を示す。同表より (12) 式および (16) 式も成立することがわかる。 $[\tau_{a+1}]_{a=35} (= 0.8031 \text{ ms}) < \tau_{63} (= 0.8221 \text{ ms})$  が成立するから第8図からもわかるように  $n = [a+1]_{a=35}$  の時点に正のパルス(ストップパルス)が発生することがわかる。この場合の誤差  $[t_{[a+1]}]_{a=35}$  は (17) 式より  $[t_{a+1}]_{a=35} - t_{63} = 0.179 \text{ ms}$  となる。 $N = 3,600 \text{ r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$  において  $\pm \Delta\tau_\theta = 0.51 \mu\text{s}$  がえられた。 $2\Delta\tau_\theta = 1.02 \mu\text{s}$  となり (23) 式も満足する。 $N_{63} = 2,496 \text{ r} \cdot \text{p} \cdot \text{m}$  において  $\pm \Delta\tau_{\theta 63} = 0.74 \mu\text{s}$  がえられた。 $2\Delta\tau_{\theta 63} = 1.48 \mu\text{s}$  となり (24) 式を満足する。

第3表 (10) 式をもとにした計算結果

$n = a$	$t_n = t_a$	$\tau_a = t_a - t_{a-1}$	$\tau_a = \tau_a - \tau_{a+1}$
32	38.923 (ms)	0.8331 (ms)	8.47 ( $\mu$ s)
33	39.748 (ms)	0.8251 (ms)	8.06 ( $\mu$ s)
34	40.566 (ms)	0.8174 (ms)	7.68 ( $\mu$ s)
35	41.376 (ms)	0.8031 (ms)	7.33 ( $\mu$ s)
36	42.179 (ms)	0.8031 (ms)	7.00 ( $\mu$ s)
37	42.975 (ms)	0.7964 (ms)	6.69 ( $\mu$ s)
38	43.765 (ms)	0.7900 (ms)	6.41 ( $\mu$ s)

第4表は初期定常回転速度  $600r \cdot p \cdot m$  から最終定常回転速度  $3,600r \cdot p \cdot m$  に対する応答時間をこの装置を用いてカウンタに指示させた実験結果を示す。計算値は  $t_{0.9} = 42.179ms$  となる。

第4表 実験結果

測定回数	初期定常回転速度 ( $r \cdot p \cdot m$ )	最終定常回転速度 ( $r \cdot p \cdot m$ )	応答時間 (カウンタ指示) (ms)
1	600	3600	42.847
2	600	3600	42.483
3	600	3600	42.300
4	600	3600	42.312
5	600	3600	42.897
6	600	3600	42.221

## 6 結 言

これまで光電式ピックアップを用いて任意の定常回転速度からのステップ入力に対する比較的短い応答時間を測定する回路方式について述べた。回転円板も凸版印刷株式会社写真製版により厚さ  $0.1mm$  (材質はりん青銅) の円板にエッチングを行なって製作したため精度の高いものをうることができた。そのため、測定誤差も小さく良い結果をうることができた。このような回転円板の製作方法によれば、高精度を保ちながら小形の円板も製作可能であり慣性モーメントも小さくできる。この方法に回路的考慮を払えば電動機が停止している時からの応答時間の測定も可能である。電動機が停止しているとき、回転円板を光が通る直前に調整しておき、ステップ入力が電機子に印加された瞬間にスタートパルスが発生するようにしておけば、同期調整回路も不要となり回路も簡単となる。終りに親

しく御指導賜わった東北大学菊地正教授の御厚意に深く謝意を表わす。

文 献

- (1) 大内・福寿・鈴木：東北支部連大 6A-1(昭41-10)
- (2) 大内・福寿・鈴木：電気四学会連大 2521(昭42-5)



## Measurement of Response Time of DC Motor by Photoelectric Method

Takao OUCHI, Mitsunori FUKUJU and Haruo SUZUKI

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

If the first-order system approximation is made in the transfer function of DC motor, the response time of DC motor is obtained from the time constant of this function. Since the engineering of the dividing into equal parts with a high-degree of accuracy has developed, the photoelectric pickups which generate 6000 pulses for one revolution have been on the market. It is also possible to make the repeated frequency high at very low rotating speed.

The square wave with repeated frequency which is in proportion to rotating speed is generated by using those photoelectric pickups. This paper describes on circuit forms of measuring the response time of DC motor by means of detecting the difference between reference pulse width and this square wave pulse width in case that the rotating speed increases. This method has a merit that it can measure with no contact to DC motor, and it is possible to make the sensitivity of measurement high at very low rotating speed if the number of dividing into equal parts increases.