

単基水銀整流器による直流電動機の可逆運転

Reversible Operation of D.C. Motors by Means of a Single Mercury Arc Rectifier

小野田芳光* 守田啓一** 西一郎**
 Yoshimitsu Onoda Kēichi Morita Ichirō Nishi

内 容 梗 概

直流電動機の可逆運転に単基の水銀整流器を用い、電機子を切り換えて行う方式は効率、速応性の点などですぐれたものであるが、その方式にこれまで簡単確実なものがなく、使用された例は非常に少なかった。

日立製作所では数年前よりこの方式の研究を行い、新しい方式を開発した。そして、この方式による装置は長期間の連続運転試験にも良好な成績を納め、また、その加減速特性は理想的に近いものを示した。

1. 緒 言

水銀整流器は効率と速応性がともによいため直流電動機の電源として適当なものであるが、その整流性からひん繁に逆転の行われるところではあまり用いられていない。このような場所に単基の水銀整流器を用い、電機子を切り換えることによって直流電動機を可逆運転させることは、現在のところ水銀整流器応用装置の中でもっとも高度の技術とされ、このような装置の大容量の実施例はわが国にまだない。

欧米で報告された方式はいずれも複雑な回路構成で、それにもかかわらず電源が相当安定でないとその動作がかならずしも安定と考えられないものが多く、このようなことがこれまで単基可逆運転装置の普及されなかった大きな原因の一つでないかと思われる⁽¹⁾。したがって、もしも、簡単な回路構成で、電源が変動しても安定に動作する方式がえられるならば大いに普及するものと考え、その目的に沿う方式を研究し開発した⁽²⁾。

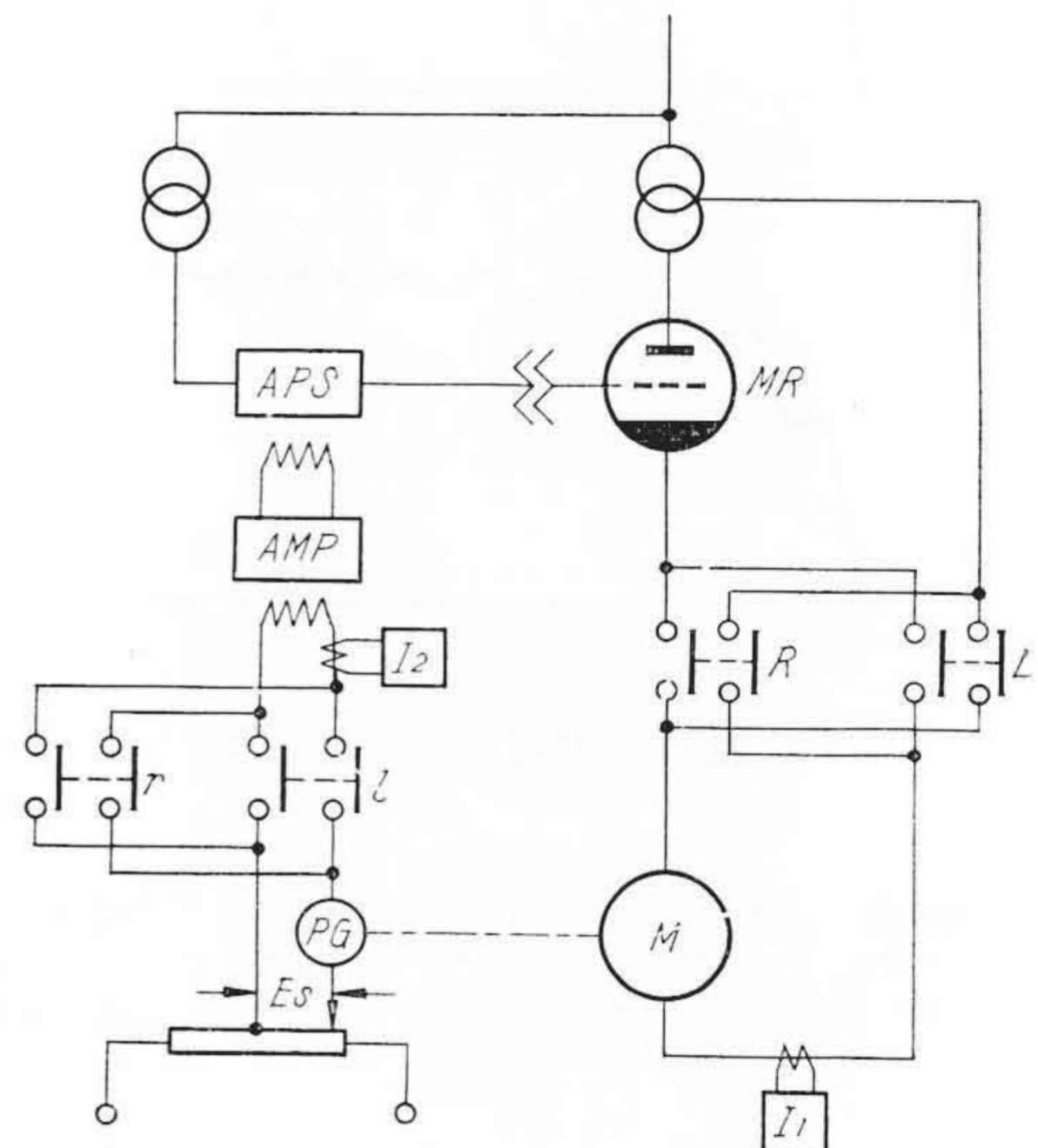
ここでは、この方式とその試験結果、および電動機に加減速の理論などについて述べる。

2. 従来の方式とその欠点

第1図に現在、欧米で行われている方式の中で代表的なものを示す。

図において、電動機Mが正転しているときは主回路切換開閉器Rと制御信号切換器rがとじ、Lとlが開いている。

この状態における制御系の動作を説明すると、なんらかの原因によって電動機Mの速度が減少したとすれば、速度検出用パイロット発電機PGの電圧が低くなり基準電圧 E_s との間に差を生ずる。



MR: 水銀整流器
 R, L: 主回路切換開閉器
 AMP: 増幅器
 PG: 速度検出パイロット発電機
 I₁, I₂: 電流検出器
 M: 直流電動機
 APS: 自動移相器
 r, l: 制御信号切換器
 E_s: 基準電圧

第1図 従来の代表的な方式

この差電圧のため増幅器AMPの出力が増加し、自動移相器APSの移相角が正の方向へ動き、水銀整流器MRの出力電圧を上げ電動機Mの速度をほぼ元の状態にもどす。すなわち、定速度制御を行っている。逆転しているときはLとlがとじ、Rとrが開いて同様の動作をしている。

この主回路切換開閉器R, Lおよび制御信号切換器r, lの切換動作を行わずには各社において多少の相異がみられるが、一般に制御信号の方向が反転し、かつ、電機子回路の電流がほぼ零となったことを、たとえば図に示すI₁, I₂なる検出器によって検出し、

R: 開 → r: 開 → L: 閉 → l: 閉

* 日立製作所日立研究所
 ** 日立製作所日立工場

の順序で行う。

したがって、Mを逆転しようとして基準電圧 E_s を負の方向へ変化させると、まず、増幅器AMPの出力が減少し、APSの移相角が負の方向へ動き、MRの出力電圧が減少する。

しかし、MRは逆方向の電流を流すことができないから、電機子電流 I_M は零となるのみで、Mは容易に速度を減少せずPGの電圧も降下しない。

ここに前記切換指令の条件

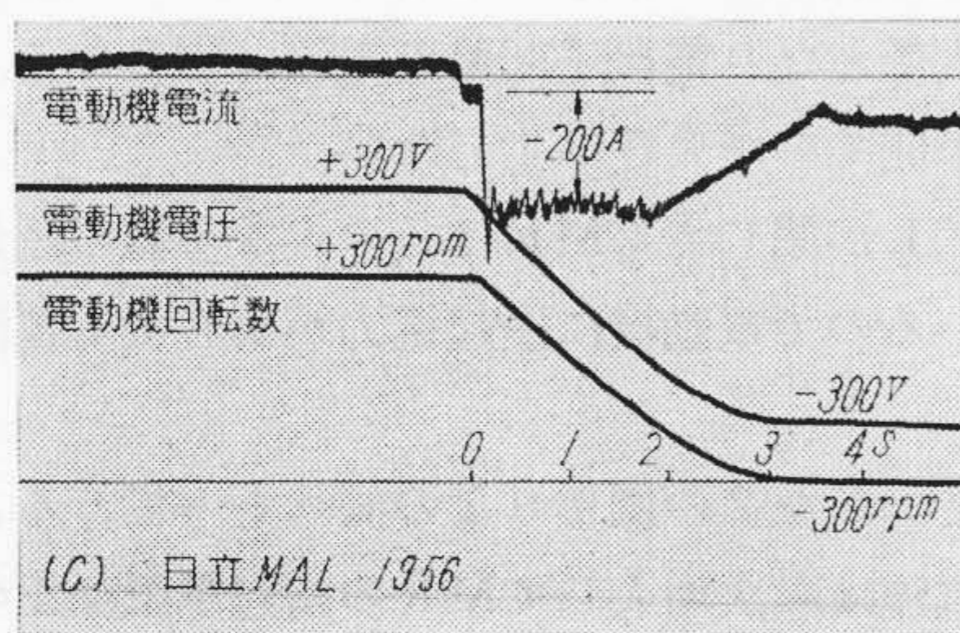
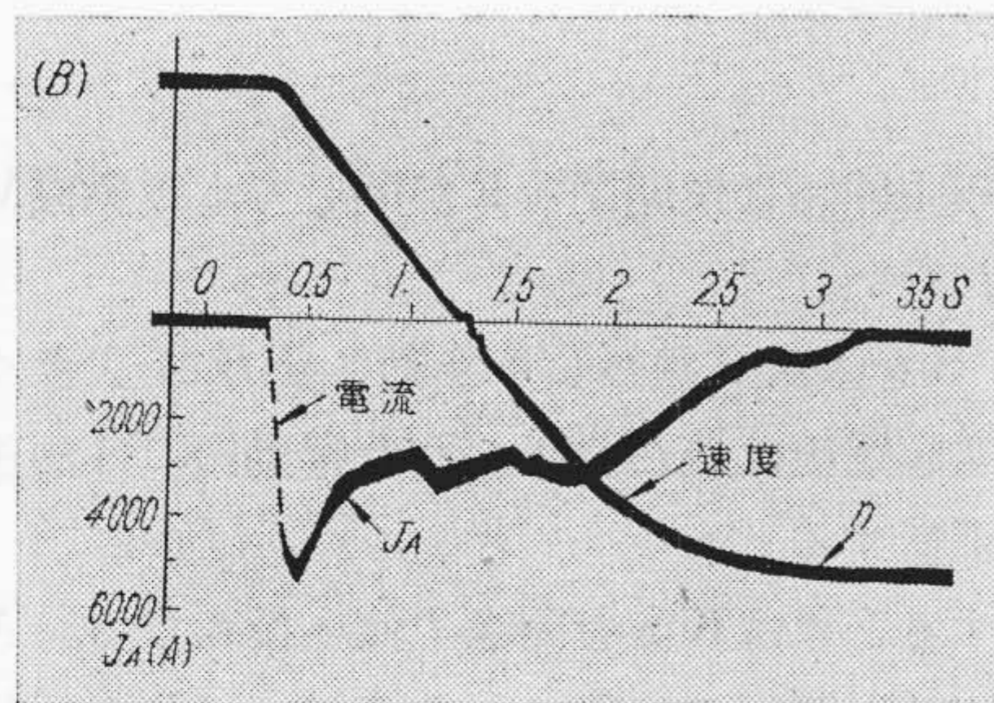
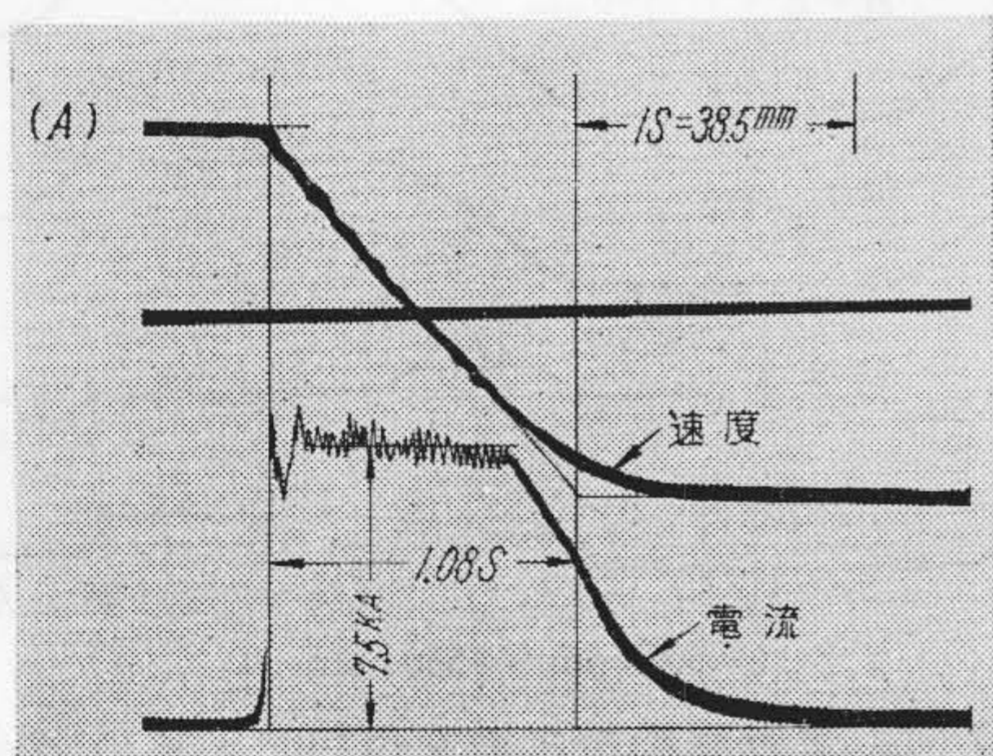
制御信号反転

電機子電流が零

が成立し、まずRが開き、次にrが開き、続いてL、lが閉じて電機子回路に減速電流が流れ、電動機が速度が漸次減少し逆転するに至る。

この方式の欠点は、

- (a) 切り換えの際過電流が流れること
- (b) 電動機が無負荷のとき不安定となることである。なぜなら、前述の切換順序で



(A)(B)はヨーロッパにおける例で(C)は日立製作所日立研究所における実験結果である。

第2図 従来方式による試験オシログラム

R: 開 → r: 開

が終わったとき制御信号回路が切れているから信号電流が零となり、この制御系は基準電圧 E_s とパイロット発電機の電圧とがあたかも等しいかのようになり、MRの電圧はそれに対応する値、すなわち零ボルトとなっている。

しかるに、電動機は相当大きな逆起電力をもっているため、この状態でLが閉じると電機子回路に大きな電流が突入することになる。この切換順序を多少変更してもだいたい同じような結果となる。

このため、この方式にはかならず過電流制限装置や突入電流抑制装置が付加されている。しかし、これらの装置を用いても突入電流が容易にさげられないようで、発表されているオシログラムはほとんど切換時の立上りが急しゅんである。第2図にその例を示す。

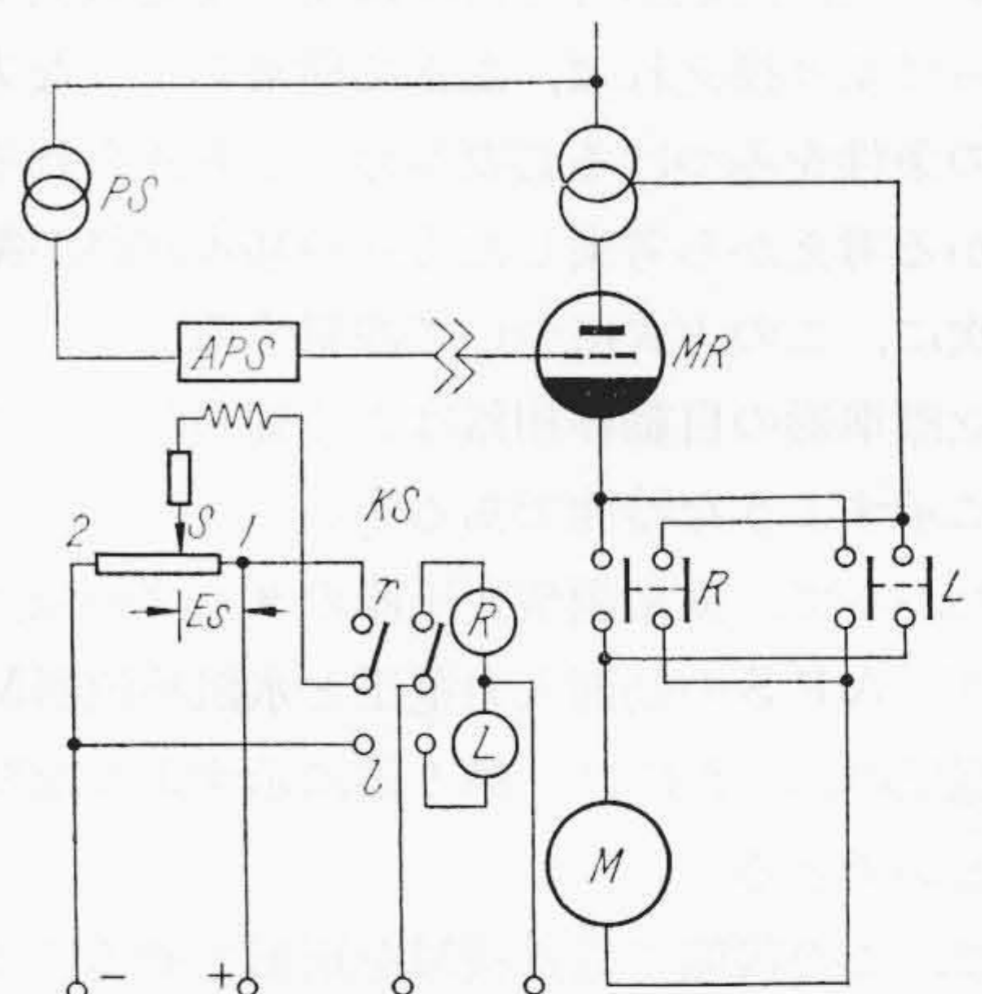
次に、電動機が無負荷の状態では小さな外乱でも電機子電流が零、制御信号が反転という条件が生じ、そのたびに切り換えが行われることになる。しかも、この切り換えにはいくらかのむだ時間があるため系が不安定となりやすい。

特に、電源電圧が変動すると電動機に負荷がかかっているにもかかわらず電機子電流が零になることがあるので、このような不必要な切換動作が行われやすくなり、しかも、その場合は格子回路に外乱がはいるので、満足な切換動作が困難となりやすい。

3. 新形方式

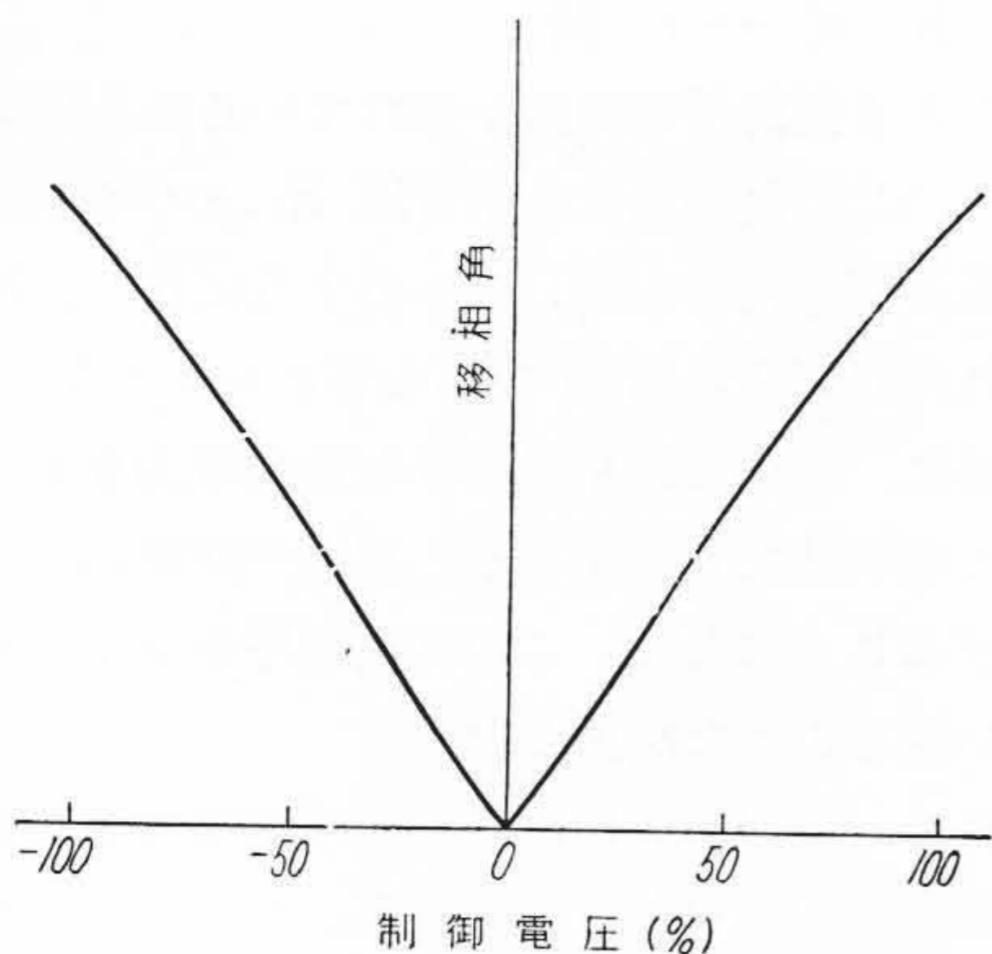
電動機をひん繁に逆転させるところにおいては、急速に逆転させることが重要で、逆転後に定速であることはあまり要求されていない。

また、逆転させようとする場合は運転者らが逆転の指令を与えるが、切換条件は一般にその直後に生ずること

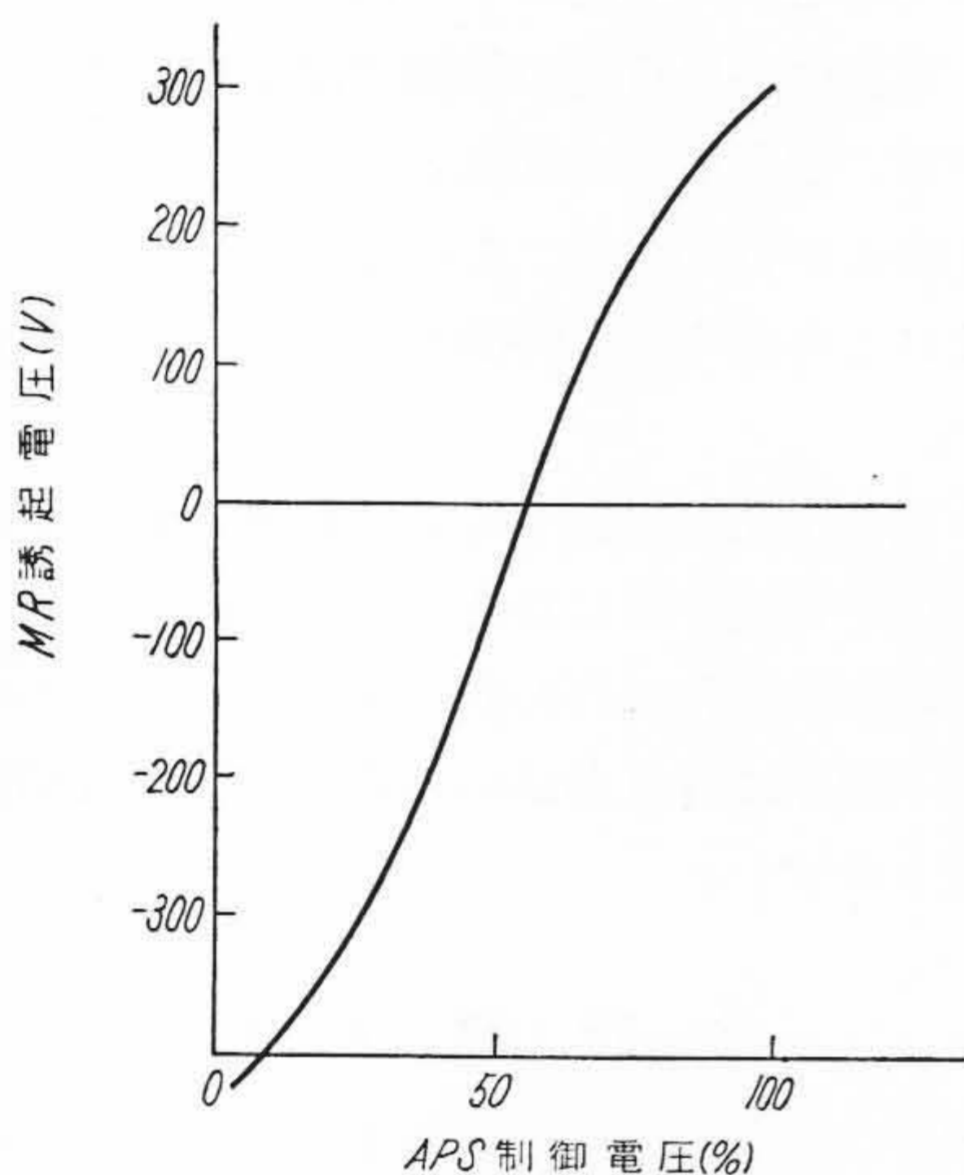


MR: 水銀整流器
M: 直流電動機
R, L: 主回路切換開閉器
⊙⊙: 同コイル
KS: ナイフスイッチ
APS: 自動移相器
PS: 位相調整変圧器
 E_s : 制御電圧

第3図 新形方式の基本回路



第4図 日立標準形自動移相器の特性



第5図 位相調整変圧器のタップを適当に選んだときの自動移相器制御電圧対水銀整流器誘起電圧の関係

が多いので、逆転指令と同時に切り換えの条件を強制的に作って切り換えれば、あえて従来のような方法で切り換えの条件をみつける必要がないと考えられる。

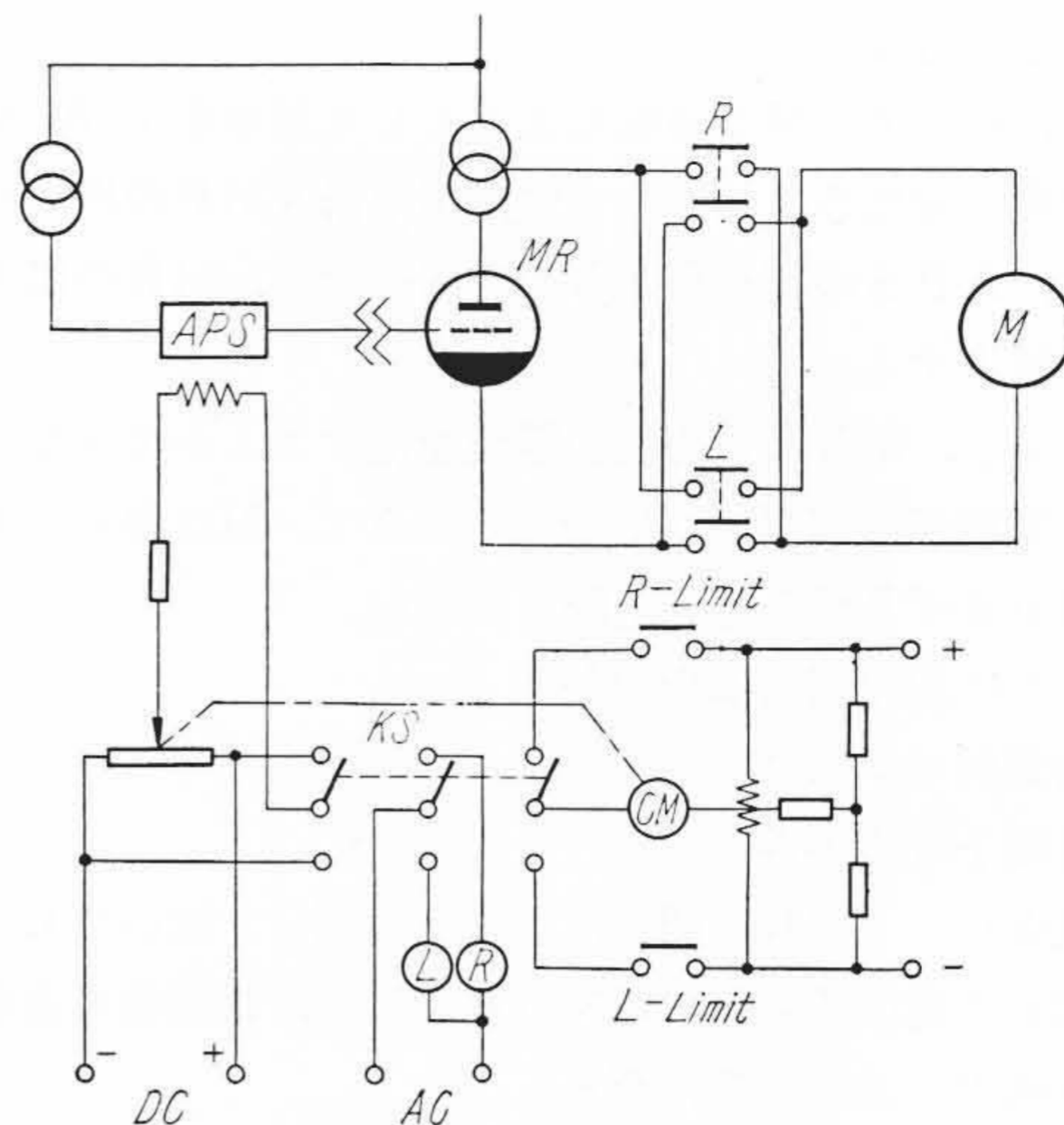
かかる考えから考案した方式の基本回路が第3図である。次に、この方式について説明する。

日立標準形の自動移相器はよく知られているように第4図に示すような特性である⁽³⁾。

したがって、位相調整変圧器のタップの位置を適当に選べば、APSの制御入力電圧と水銀整流器MRの等価誘起電圧のあいだには、第5図に示すような関係をもたすことができる。

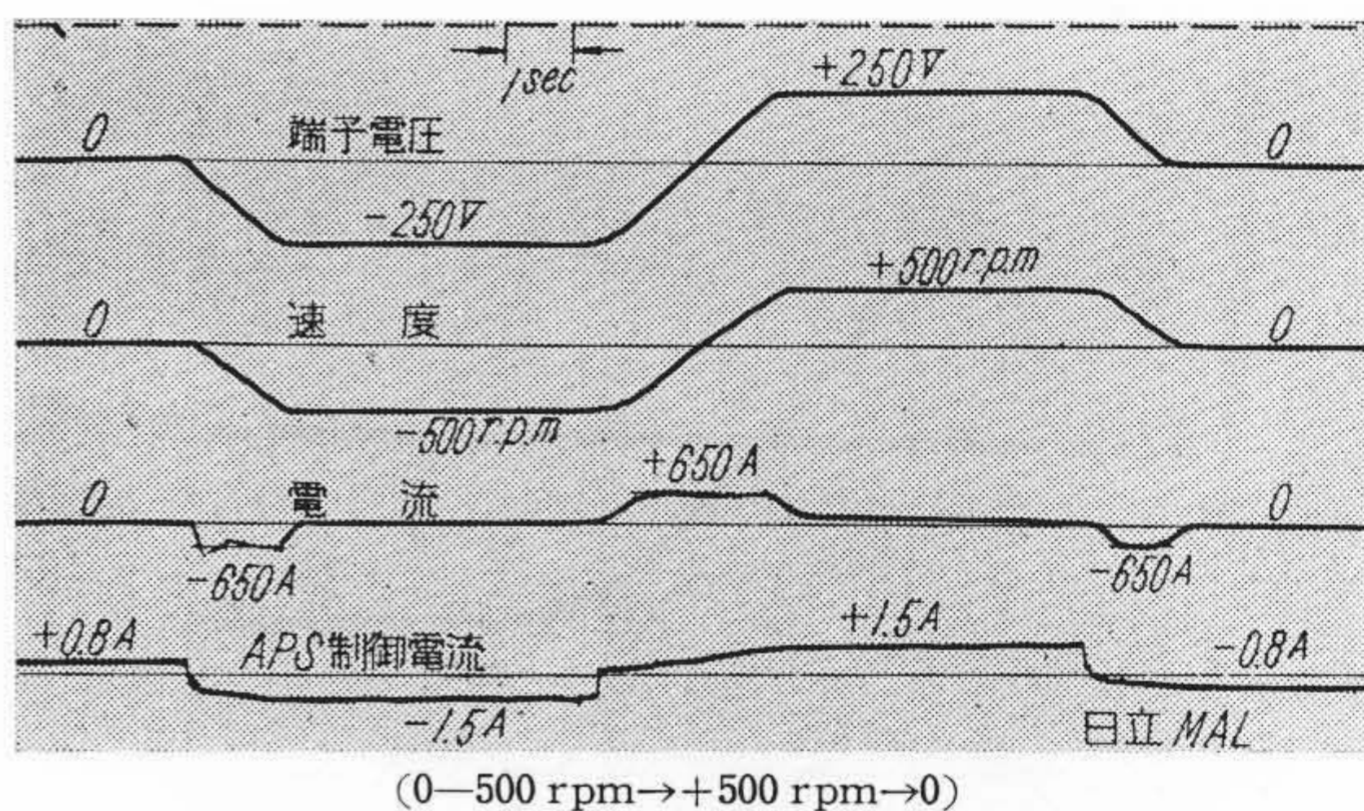
いま、この状態で電動機Mを正転させるには第3図におけるSを1側にもってき E_s の値を小さくし、スイッチKSをr側に投入する。

自動移相器に流れる制御電流が小さいからMRの誘起電圧は負の値となっており、MRは逆方向に電流を流さ



CM: 電動抵抗器用コントロールモータ
R-limit, L-limit: 電動抵抗器のリミットスイッチ
(ほかの記号は第3図参照)

第6図 電動駆動抵抗器を用いた場合の接続図



第7図 電動駆動抵抗器を用いたときの実験オシログラム

ないから主回路切換開閉器Rが閉じても電動機Mには電流が流れない。

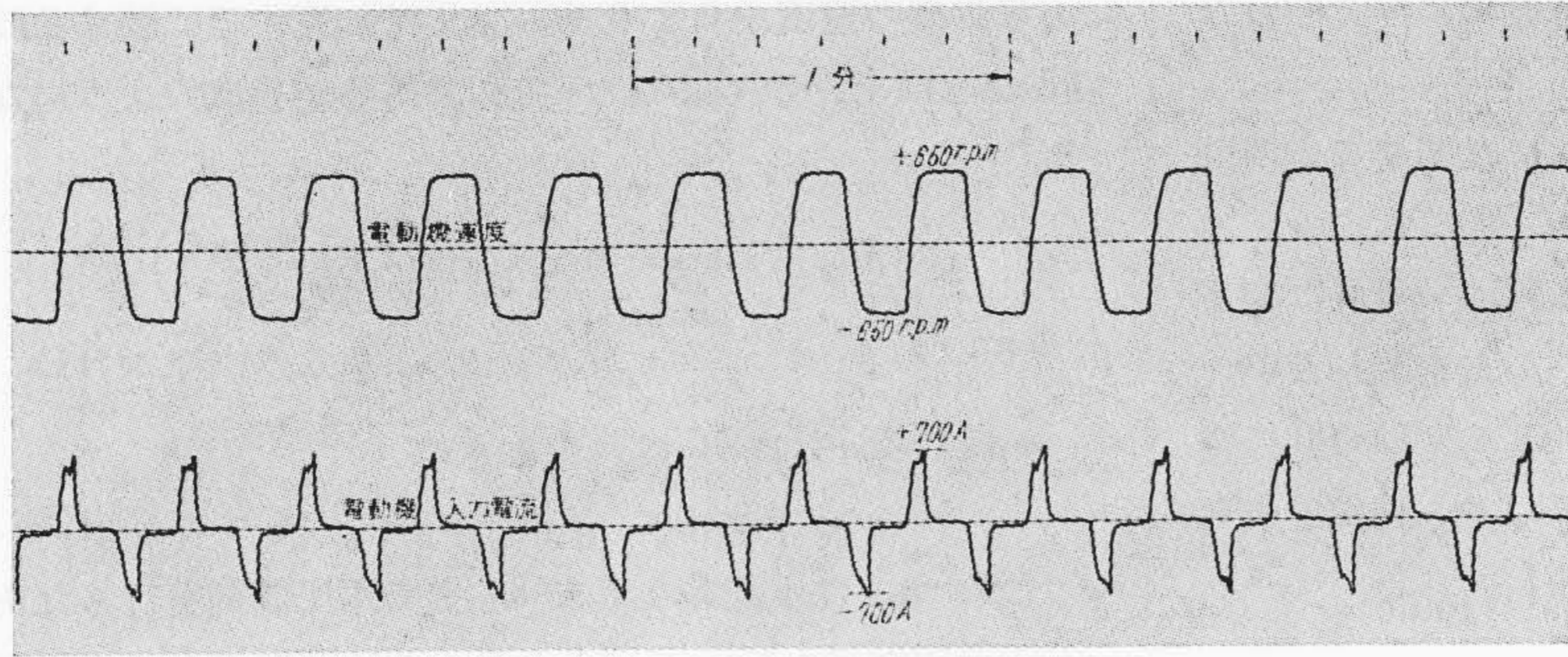
次に、Sを漸次2側へしゅう動させ E_s を大きくするとMRの誘起電圧は負から正となり電動機には加速電流が流れて正転する。

逆転するときにはKSを開きl側へ投入する。APSの制御電流は瞬間零の状態になるので、MRの誘起電圧は負の最大値となり電機子回路の電流は零となる。この状態でRが開くので火花は生じない。

次に、Lが閉じてMRは負の大なる値の誘起電圧となっているので電動機に逆起電力があっても電流が流れない。

続いて、Sを2の側より1の側へもってくるとAPSの制御電流は漸次増大してMRの誘起電圧は正の方向へ変化し、電動機に減速電流が流れ、電動機は減速し続いて逆転するに至る。

すなわち、この方式は水銀整流器の速応性と自動移相



(+C50 rpm → -C50 rpm → +650 rpm → ……)

第8図 自動逆転指令装置を施した場合の連続運転オシログラム

器の特性を十分利用したもので、APSの制御電流を零にするとほとんどおくれなしにMRの誘起電圧が負の最大となること、自動移相器の移相角が制御電流の絶対値にのみ関係し、方向に無関係であることを生かしたものである。

第6図は制御電流の変化にコントロールモータを使用した回路で、この装置の試験のオシログラムが第7図である。この図から知られるようにこの方式は確実である。そして、制御電圧 E_s の変化と水銀整流器の誘起電圧 E_R の変化のあいだにほとんどおくれがないため加速を直線的にし、加速電流を許容最大値の矩形波に近い形にすることが容易に実現されている。このような加速をワードレオナード方式で行うには相当困難で、それをこのような簡単な装置で実現できたことは注目されてよいものであろう。

この装置において10秒に1回の割合で数箇月にわたり自動逆転試験を行ったが、その間切替火花は認められず良好な運転ができた。第8図は、この連続運転時のオシログラムである。

なお、この方式において加速後定速にすることなどは多少回路を追加することにより実現できる。

4. 直流電動機の急速加減速の理論⁽⁴⁾

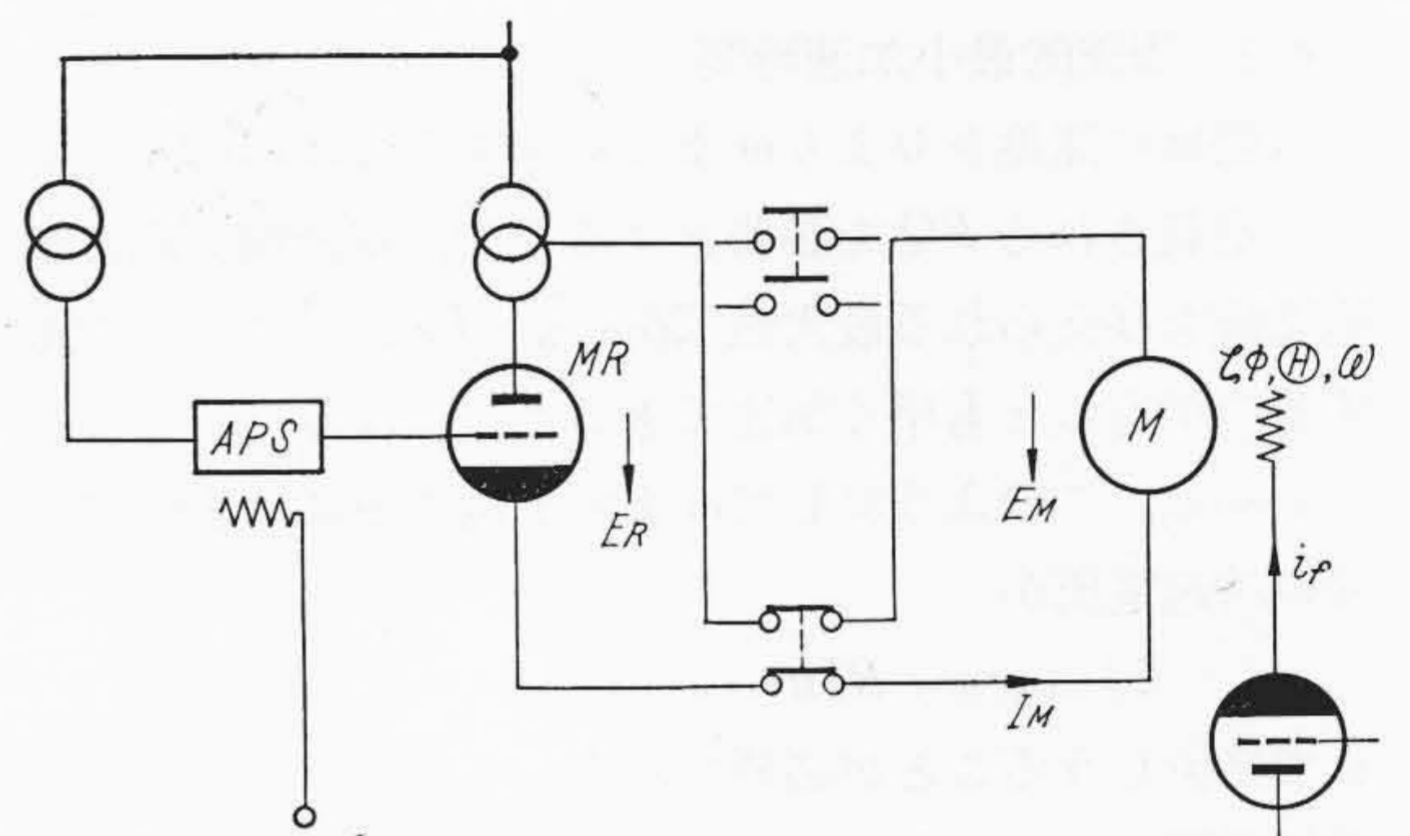
直流電動機の可逆運転においては可逆時間の小さなことが重要である。界磁が一定であれば前記のオシログラムのように電動機の加速電流を許容最大値の矩形波に近くして加速することが理想的であることは容易に推定できる。

しかし、界磁が変化する場合、すなわち、界磁制御をも行うときは、加速電流を許容最大値の矩形波に近くすることは理想加速の一つの条件であるが、それだけでは不十分で、電動機の界磁と水銀整流器の電圧の変化の仕方が問題となってくる。ここでは、理想的な加速とはどのようなものかを検討してみる。

4.1 基本式

第9図において、水銀整流器の等価誘起電圧を $E_R(t)$ 、電動機の逆起電力を $E_M(t)$ 、電機子回路等価全抵抗を R 、電動機加速電流を $I_M(t)$ とすれば次の関係式が成立する。ただし、電動機は無負荷とする。

$$I_M(t) = \frac{E_R(t) - E_M(t)}{R} \dots\dots\dots (1)$$



- E_R : 水銀整流器等価誘起電圧
- E_M : 電動機逆起電力
- Θ : 慣性能率
- i_f : 界磁電流
- I_M : 加速電流
- $\zeta\phi$: 単位回転磁束
- ω : 回転速度

第9図 水銀整流器を用いた直流電動機の急速加減速装置

ところで、電動機の単位回転磁束（逆起電力と回転速度の比）を $\zeta\phi(t)$ (volt·s/rad)、電動機速度を $\omega(t)$ (rad/s) とすれば、

$$E_M(t) = \zeta\phi(t) \cdot \omega(t) \dots\dots\dots (2)$$

となり、また、電動機の慣性能率を Θ (kg·m²) とすれば

$$\omega(t) = \frac{1}{\Theta} \int_0^t \zeta\phi(t) \cdot I_M(t) dt \dots\dots\dots (3)$$

となる。

電動機の界磁電流を $i_f(t)$ とすれば

$$\zeta\phi(t) = K(i_f) \cdot i_f(t) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $K(i_f)$ は電動機界磁の飽和に関係し、 i_f の変化とともに変化する係数で単位は volt·s/amp である。以上が電動機の加減速の基本式である。

4.2 加速回転力の時間積分 FQ と回転エネルギー W

電動機を速度 0 より ω (rad/s) に加速するには (3) 式より

$$FQ = \int_0^t \zeta\phi(t) \cdot I_M(t) dt = \Theta \cdot \omega \text{ (n·m·s)} \dots\dots\dots (5)$$

としてえられる回転力の時間積分が電動機に与えられなければならない。

ここに、 τ は電動機速度が 0 から ω になるまでの時間である。

この量 FQ は電動機速度が定まれば一義的に定まり、途中の $\zeta\phi(t)$ と $I_M(t)$ の変化のいかんを問わない。

一方、エネルギーのほうより考えれば、 τ 秒の間に電動機に与えられるエネルギー W は(2)式と(3)式とから

$$W = \int_0^\tau I_M(t) \cdot E_M(t) dt = \frac{\Theta}{2} \omega^2 \text{ (Joule)}$$

.....(6)

となり、これも電動機速度が定まれば一義的に定まり途中の変化のいかんを問わない。

4.3 理論的最小加速時間

電動機速度を 0 より ω まで加速するには(5)式によって定義される FQ を必要とするので、電動機界磁と加速電流を与えられる最大値 $\zeta\phi_{max}$, I_{Mmax} にして加速するのがもっとも早く加速できることになる。

しかし、このようにして ω まで加速するには水銀整流器の誘起電圧が

$$\zeta\phi_{max} \cdot \omega + RI_{Mmax}$$

まで発生しうることが必要である。もしも、これだけの誘起電圧がえられないときは、界磁弱めをして加速しなければならない。

一般に界磁を最大にして電圧制御のみで加速する速度の最大値を基準速度 ω_0 と呼び、界磁弱め制御によって加速する速度の最大値を最大速度 ω_{max} とよんでいる。

したがって、基準速度までの理論的最小加速時間 τ_{ath} は、

$$\tau_{ath} = \frac{\Theta \omega_0}{\zeta\phi_{max} \cdot I_{Mmax}} \text{.....(7)}$$

となる。

基準速度より最大速度までの間は電動機の逆起電力を最大値 E_{Mmax} に、加速電流を I_{Mmax} に一定に保つように界磁を弱めたときがもっともエネルギーを電動機に与えることができ早く加速できる。この加速時間を τ_2 とすれば、 ω_0 から ω_{max} に加速するに必要な回転エネルギーは(6)式から、

$$W_2 = W_{max} - W_0 = \frac{\Theta}{2} (\omega_{max}^2 - \omega_0^2) \text{.....(8)}$$

であるから、

$$\tau_2 = \frac{W_2}{E_{Mmax} \cdot I_{Mmax}} = \frac{1}{2} \tau_{ath} \left\{ \left(\frac{\omega_{max}}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right\}$$

.....(9)

となる。普通、 $\omega_{max} = 2\omega_0$ に選ばれるが、そのときは

$$\tau_2 = 1.5 \tau_{ath} \text{.....(10)}$$

となる。

電動機速度を 0 より ω_{max} まで加速するに要する時間 $\tau_{\beta th}$ は上記の τ_{ath} と τ_2 の和であるから次のようになる。

$$\tau_{\beta th} = \tau_{ath} + \tau_2 = \frac{1}{2} \tau_{ath} \left\{ 1 + \left(\frac{\omega_{max}}{\omega_0} \right)^2 \right\}$$

.....(11)

$\omega_{max} = 2\omega_0$ に選ばれたときは

$$\tau_{\beta th} = 2.5 \tau_{ath} \text{.....(12)}$$

この $\tau_{\beta th}$ は上記のように ω_0 まで電圧制御を行ったあとに界磁制御を行った場合の最小加速時間であるが、同時にこれは電圧制御と界磁制御をどのように変化してもこの時間より短い時間で加速できない、すなわち、この場合の理論的最小加速時間であることが次のようにして証明できる。

電動機速度を ω_{max} まで加速するには前記 W_{max} なる回転エネルギー、もしくは FQ_{max} なる加速量を電動機に与えなければならぬ。ところが、加速電流は I_{Mmax} 以上にできないから短時間で所要の回転エネルギーに達するためには電動機の逆起電力を極力大きくしなければならぬ。

上記の方法では τ_{ath} まで電動機界磁束が最大値に保たれているので、その間の速度では当然ほかの方法よりも逆起電力が大きく、 τ_{ath} より $\tau_{\beta th}$ までは電動機の逆起電力が最大値になっているので、これ以上の逆起電力は存在しない。すなわち、この場合にもっとも短時間で W_{max} を与えることができる。

4.4 水銀整流器誘起電圧および電動機界磁の理想制御曲線

上記より電動機を理想的に加速するには、0 より基準速度 ω_0 の間は電動機の界磁を最大の状態に保って電圧制御を行い、基準速度より最大速度 ω_{max} の間は水銀整流器の誘起電圧を最大の状態に保ち、界磁制御することにより、加速電流が許容最大値 I_{Mmax} になるようにすべきことが知られた。

この条件を前記基本式に入れて水銀整流器の誘起電圧および電動機界磁の理想制御曲線を求めると次のようになる。

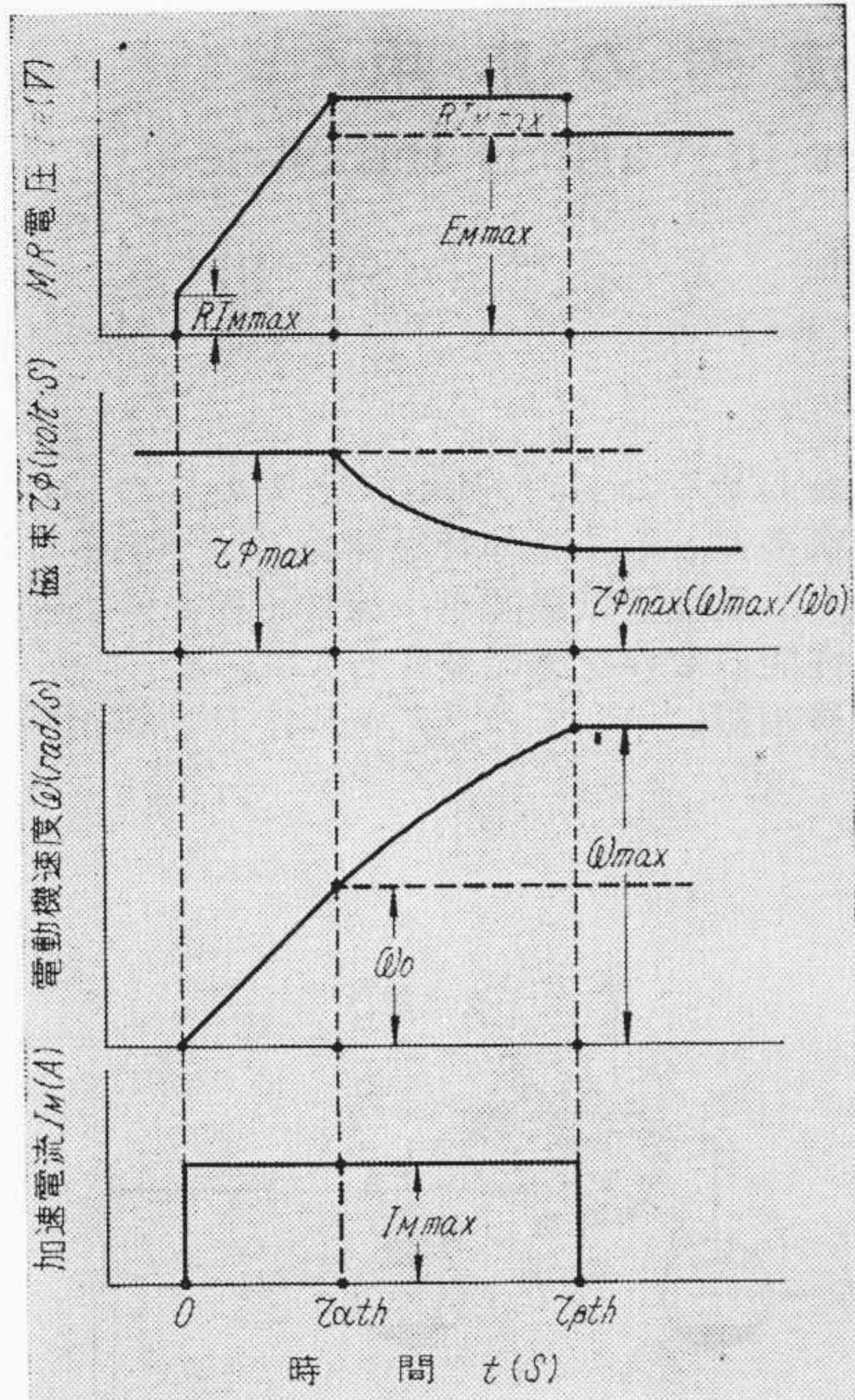
$$E_R(t) = \begin{cases} (E_{Mmax}/\tau_{ath})t + RI_{Mmax} & (0 \leq t \leq \tau_{ath}) \\ E_{Mmax} + RI_{Mmax} & (\tau_{ath} \leq t \leq \tau_{\beta th}) \\ E_{Mmax} & (\tau_{\beta th} \leq t) \end{cases}$$

.....(13)

$$\zeta\phi(t) = \begin{cases} \zeta\phi_{max} & (0 \leq t \leq \tau_{ath}) \\ \zeta\phi_{max} \sqrt{\tau_{ath}/(2t - \tau_{ath})} & (\tau_{ath} \leq t \leq \tau_{\beta th}) \\ \zeta\phi_{max} (\omega_0/\omega_{max}) & (\tau_{\beta th} \leq t) \end{cases}$$

.....(14)

この時の電動機速度の変化を求めると次のようになる。



(界磁制御しないときは $\tau_{\alpha th}$ 以後破線のようになる)
第10図 直流電動機急速加減速の理想曲線

$$\omega(t) = \begin{cases} (\omega_0/\tau_{\alpha th}) \cdot t & (0 \leq t \leq \tau_{\alpha th}) \\ \omega_0 \sqrt{2(t/\tau_{\alpha th}) - 1} & (\tau_{\alpha th} \leq t \leq \tau_{\beta th}) \\ \omega_{max} & (\tau_{\beta th} \leq t) \end{cases} \quad (15)$$

界磁が一定のときは時間 t が 0 から $\tau_{\alpha th}$ までの間を考えればよい。

これらを図示すると第10図となる。前記のオシログラムは界磁が一定の場合の理想加速に近いことが知られる。先に、この理想の程度を理論的加速時間 $\tau_{\alpha th}$ と実際の加速時間 τ_{α} の比 k_{α} であらわすと便利であること、さらに、 $\tau_{\alpha th}$ を計算するに当って I_{Mmax} をどのように選ぶべきか困難なことが少なくないので実際に流れた加速電流の最大値を I_{Mmax} とし、こうして計算した $\tau_{\alpha th}$ を用いたときの k_{α} を特に $k_{\omega\alpha}$ として区別して用いるべきであることなどを述べた⁽⁴⁾。

いま、前記の試験の場合の $k_{\omega\alpha}$ を求めてみる。

この試験の装置では慣性能率 $\theta = 80 \text{ kgm}^2$, $I_{Mmax} = 650 \text{ A}$, $E_{Mmax} = 250 \text{ V}$, $\omega_0 = 500 \text{ rpm} = 53 \text{ rad/s}$ であるから、

$$\tau_{\alpha th} = \frac{\theta \omega_0}{\zeta \phi_{max} I_{Mmax}} = 1.4 \text{ 秒}$$

一方、このオシログラムより得られた加速時間は 1.5 秒であるから

$$k_{\omega\alpha} = 1.5/1.4 = 1.07$$

となって、かなり理想に近いことがわかる。ちなみにイルグナ装置では高級の制御を行っても $k_{\omega\alpha} = 1.25 \sim 2$ である。

5. イルグナ装置との比較

上述のように単基水銀整流器による直流電動機の可逆運転装置、すなわち、単基可逆静止レオナード装置は水銀整流器と自動移相器の組み合わせよりなるすぐれた増幅特性によって理想加速を行うことが容易であり、容量にもよるけれども効率がイルグナ装置よりも 10% 程度高く、この電力節約費を考えるならば断然すぐれているといえることができる。

水銀整流器はその格子率とほぼ等しい力率をとるので、力率はあまり良くないが、イルグナ装置も力率は良くなく、その点は両者ほとんど差がないと考えられる。欠点は静止器であるためフライホール効果がなく尖頭負荷がそのまま電源擾乱の原因となり、また、主回路の切り換えに現在のところ、どうしても 0.2 秒程度の時間が必要で、これが問題となるころでは使用することができない。

しかし、そのようなところは実際問題として少ないと考えられるので、将来、大形圧延機用などのイルグナ装置に代って次第に用いられてくるものと思う。

6. 結 言

以上、単基水銀整流器による直流電動機の可逆運転に関する研究についてのべた。

すなわち、まず、従来の方式について検討し、その欠点を明らかにし、次に、この欠点を除いた新しい方式の原理と試験結果についてのべた。

この方式は従来のものに比べてきわめて簡単で、しかも確実であり、長期間の連続運転にも良好な成績を納めた。

また、電動機の可逆運転の理論について述べ、上記の方式でえられた結果は理想的加速に近いものであることを示した。

さらに、イルグナ装置との比較について述べ、その利点と欠点を明らかにした。

参 考 文 献

- (1) Gustav Lemke: Stahl u. Eisen 73, 1156 (1953)
- (2) 小野田: 昭 33 電気学会東京支部大会 169
- (3) 小野田: 電学誌 78, 1534 (昭 33)
- (4) 前川, 小野田: 日立評論 38, 1131 1235 (昭 31-9)