

巻線型誘導電動機における二次抵抗制御の方式

A Control System of Secondary Resistor for Wound Rotor Type Induction Motor

大 和 利 丸* 榎 本 勝 雄*

Toshimaru Yamato

Katsuo Enomoto

内 容 梗 概

巻線型誘導電動機は二次抵抗を制御することによつて、トルクや電流を自由に替えることができるので、いろいろな設備に使用されている。この二次抵抗を制御する方式は、平衡式と不平衡式に大別できる。今回、単極の接触器を使用して二次抵抗が次々に並列回路を作りながら抵抗値を減少していく不平衡式に類似した方式が考えられた。この方式によれば抵抗器を従来のものよりも、小さく設計できる。

巻線型電動機を荷役機械などに使つて自動起動を行わせるときは、全速に達するまでの時間の長短が問題となることが多い。この時間を短かくするには抵抗段数を増加すればよいのであるが、従来の自動起動は平衡式のため電磁制御器が大型となる。単極の電磁接触器を利用した新しい自動起動方式が開発されて、電磁制御器をあまり大型とすることなく抵抗段数を増加できるようになった。

1. 緒 言

巻線型誘導電動機は二次抵抗を加減することによつて起動電流とトルクを簡単に制御できるので、速度制御を必要とする機械や、起動時の衝撃をきらう機械、あるいは電源容量の小さい場合などに多数使用されている。この二次抵抗を制御する方式は古くからいろいろなものが考えられ機械の特性に合ったものが選ばれて採用されていた。

起動用二次抵抗は電動機が速度が上昇するに従つて順次短絡していくのが普通である。平衡短絡では短絡段数が多いと、制御器が大型となり、一方不平衡短絡では制御器は小型ですむが、逆に短絡段数が少な過ぎると不平衡率が大きくなってしまう。

また、いずれの場合も、短絡された抵抗は完全に回路から切り離されるので、起動中の損失はあとで短絡される抵抗中に片寄つて発生し、熱の放散が悪くなる傾向がある。抵抗器はこれを考慮に入れて設計されるから、全抵抗中に平均に熱が発生する場合に比べて大型となるを免れない。この点を改善するために、方法は不平衡短絡に類似しているが、各段の抵抗が単極の接点によつて次々に並列回路を形造るように接続して抵抗値を減少していく方式が開発された。この方式によれば抵抗は常に回路の一部として熱の発生にあずかるうえ、不平衡率も減少する傾向にある。

上述の新しい二次抵抗制御と、電動機の二次電圧に応動する電圧継電器の組合せによる自動起動方式が、同時に開発された。この自動起動方式によれば起動電流をおさえながら加速を速くするために、抵抗の短絡段数を増加して、しかも制御装置を小型にすることができる。

* 日立製作所亀戸工場

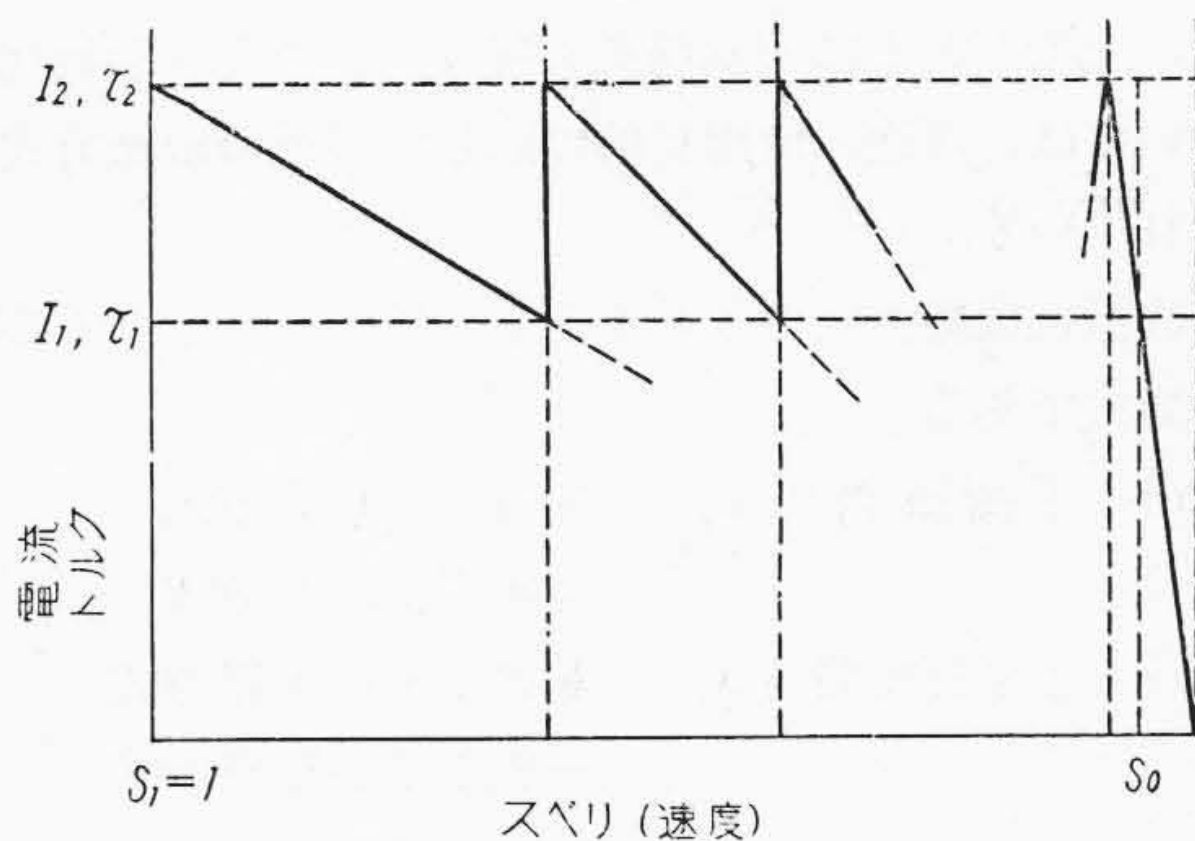
2. 誘導電動機の起動

2.1 起動電流と短絡段数

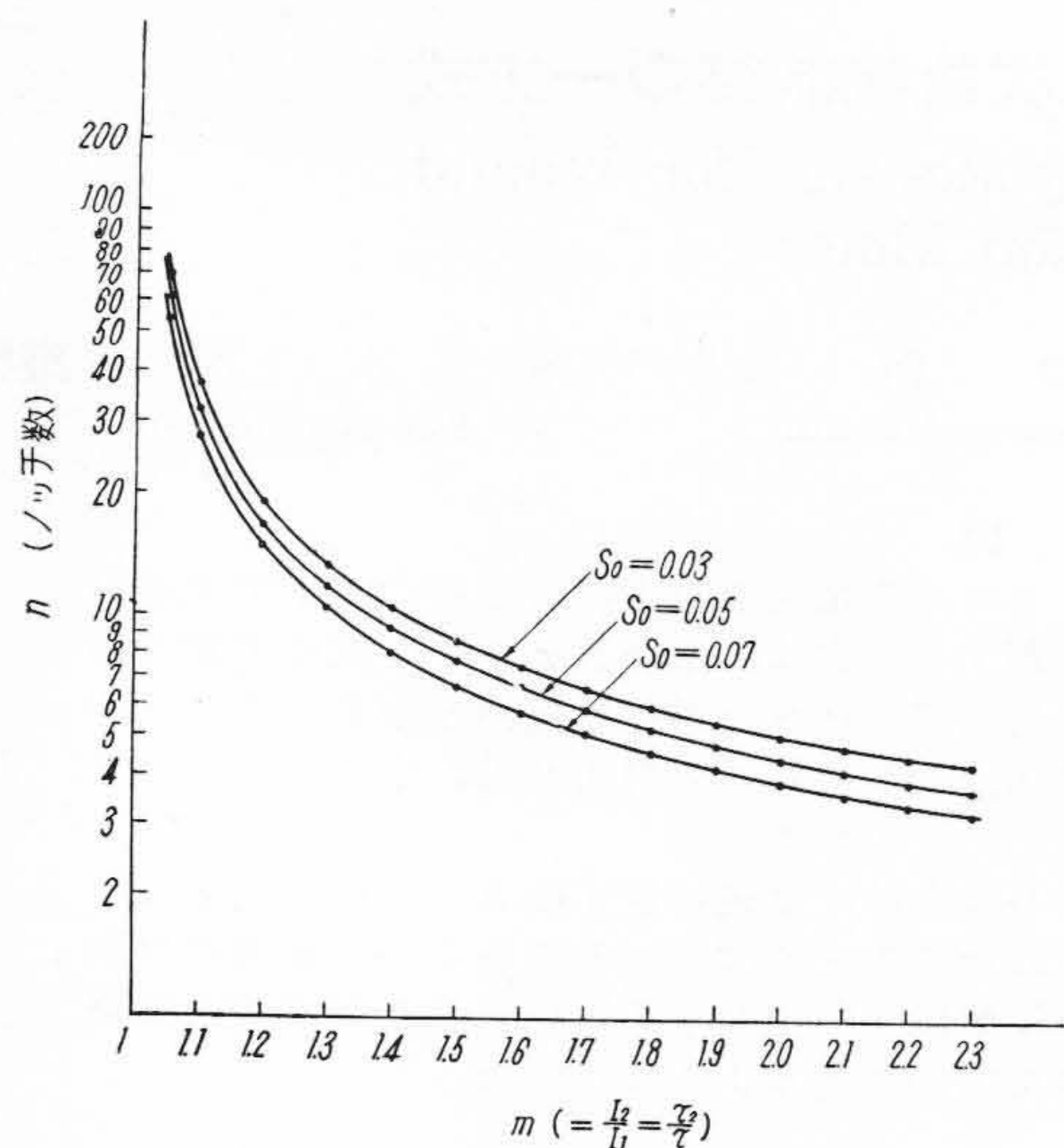
巻線型誘導電動機の起動時の損失は、運転中に比べはるかに大きく、起動停止をひんばんにくり返す用途のものに対しては、これを等閑にすることは決してできない。この起動時の損失についての理論的考察はすでに発表されている⁽¹⁾。起動電流を一定におさえ起動を行うためには、順次短絡されてゆく抵抗が、等比でなければならず、起動電流の大きさ、負荷電流、加速時間などによつて抵抗器の短絡段数は決められる。

電流とトルクは定格値の 0~200% くらいまでは比例するとして扱つても大過ない。今電動機を第 1 図のようにして起動させ、すべり s_0 で運転に入つたとすると制御器のノッチ数と起動電流の関係は次のようになる⁽¹⁾。

$$n = \frac{\log \frac{s_1}{s_0}}{\log m} = \frac{\log \frac{R_2}{r_2}}{\log m} \dots \dots \dots (1)$$



第 1 図 起動時のすべり-電流トルク曲線



第 2 図 起動電流ノッチ数関係曲線

ただし

$$\left(m = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)$$

ここに n : ノッチ数

I_1, I_2 : 起動中の最小および最大電流

τ_1, τ_2 : 起動中の最小および最大トルク

r_2 : 電動機二次一相抵抗

R_2 : 巻線抵抗も含めた二次一相の総抵抗

s_1 を 1 とし, s_0 をそれぞれ 0.03, 0.05, 0.07 としたときの m と n の関係を図示すると第 2 図のようになる。これにより一般に短絡段数は決められる。

起動電流を一定におさえて起動させる場合第 2 図よりわかるようにノッチ数を 5 以上にしてもあまり効果はない。またノッチ数の多いほど同じ負荷力に対しては回転子の抵抗損は小さくなるが, 5 段以上になつてもあまり回転子の抵抗損は減じない⁽²⁾。これよりノッチ数は 5 段以下にするのが普通である。

2.2 短絡方式

クレーン, 巻上機, 送風機などの制御用抵抗器においては, 起動とともに速度制御も行う。このような抵抗器においては, 用途, 使用目的に応じて各種の短絡方式がとられている。

二次抵抗短絡方式のうち主として用いられているのは次の方式である。

- (a) 平衡短絡方式 等比平衡短絡方式
 等差平衡短絡方式
- (b) 不平衡短絡方式 等比不平衡短絡方式
 一相不平衡短絡方式
 二次单相方式

この各方式について簡単に述べる。

(a) 平衡短絡方式

等比と等差方式があるが, 尖頭電流を制限する場合は 2.1 で述べたように等比方式が用いられ, 連続速度制御を行う場合, たとえば印刷機などには等差方式が用いられる。

この方式は短絡段数が多いと制御器が大型になる欠点がある。

(b) 不平衡短絡方式

短絡段数を増し, かつ制御器を小型にするため特殊な場合を除いてはこの方式が採用されている。

(i) 等比不平衡短絡方式

順次各相抵抗が短絡されていくとき, 残された各相抵抗が常に一定の比になつていくような短絡方式で, 日立製作所で行っている方式である。

(ii) 一相不平衡短絡方式

平衡短絡方式の変形であつて, 各相平衡の状態から順次一相ずつ短絡し, 3 度目にふたたび平衡状態とするもので, これも広く採用されている方式である。

(iii) 二次单相方式

二次を单相とすると電動機トルクは, $1/2$ 速度で大きく陥没し, これ以上には昇速できない。このためほかの方式と組合せ低速第 1 ノッチで使用するのが普通である。日立製作所が行っている CF 制御方式も巻下 1 ノッチにおいてこの方式をとっている。

不平衡二次抵抗を有する場合の巻線型誘導電動機の特性についてはこれまでに多くの研究報告が発表されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

これを要約すると

- (a) 抵抗の不平衡が大きくなければ $1/2$ 速度以下では平衡抵抗の場合と大差なく速度制御にも使用できる。
- (b) 不平衡率が多少大きくなつても起動・制動など過渡的使用にはさしつかえないが, 速度制御を行う場合は, トルク特性, 負荷状態, 電源の大きさなど考慮すべきである。
- (c) 不平衡率が非常に大きい場合は $1/2$ 速度でトルク特性に陥没を生じ, かつ電動機トルクにはすべり周波数の 2 倍の周波数の脈動を生じ, うなりのような音を出す。また逆相電流により, 電動機内部の熱損失を増す。

このように抵抗の不平衡が大きくなければ制御用抵抗器としては実用上さしつかえないので, ほとんど不平衡短絡方式が用いられている。

2.3 並列不平衡短絡方式

2.2 で述べたこれまでの短絡方式では, 短絡された抵

抗はすべて回路より切り離された状態となり、熱の発生にはあずからない。したがって抵抗器の全放熱面積に対し、有効放熱面積は減少し、局部的に温度上昇が大となる。二次抵抗制御中常に全放熱面積を有効に使用すれば、温度上昇は低くなるのでその分だけ放熱面積が小さくできる。すなわち抵抗器構成のグリッド枚数を減らし

小型とすることができる。

今回開発された新短絡方式は、この特長を活用したもので、次々に並列回路を形成しながら抵抗を短絡していく方式である。この方式では、最終短絡を行うまで各段の抵抗は回路より切り離されることがなく、抵抗器の全放熱面積を有効に使用できる。以下この方式について詳述する。

(a) 短絡方式

短絡方式の一例を第3図に示す。

(b) 各相抵抗値の変化

第4図に従来の短絡方式によつた場合の各相抵抗値の変化と、新短絡方式によつた場合の変化の一例を示す。各ノッチにおける平均抵抗は、起動電流を一定にするため、従来と同じ値にする。このときノッチを進めた際現われる各相抵抗の大小は、これまでと同様の傾向になり、各相抵抗の不均衡も減る傾向にある。このように抵抗を設定すれば、抵抗器の電流容量の決定はこれまでと同じように取り扱うことができる。

(c) 温度上昇

抵抗器の大きさは抵抗値と電流容量によつて決まるが、制御用抵抗器では多くの場合間けつ的、あるいは周期的通電が行われるので、電流容量を単純に表示することは困難である。一般に抵抗器が等時間隔で短絡されるものとして、新方式と従来の方式の温度上昇を比べてみる。

温度上昇は、発熱量、放熱面積の大小により決まり、次のように表わされる。

$$\theta = \left(\frac{Q}{A\alpha} - \theta_0 \right) \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\frac{Mc}{A\alpha}}} \right) + \theta_0$$

$t=0$ において $\theta = \theta_0 = 0$ とすると

$$\theta = \frac{Q}{A\alpha} \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{\frac{Mc}{A\alpha}}} \right) \dots \dots (2)$$

となる。ここに

θ, θ_0 : 温度上昇

Q : 抵抗器単位時間の発熱量

A : 抵抗器の平均放熱面積

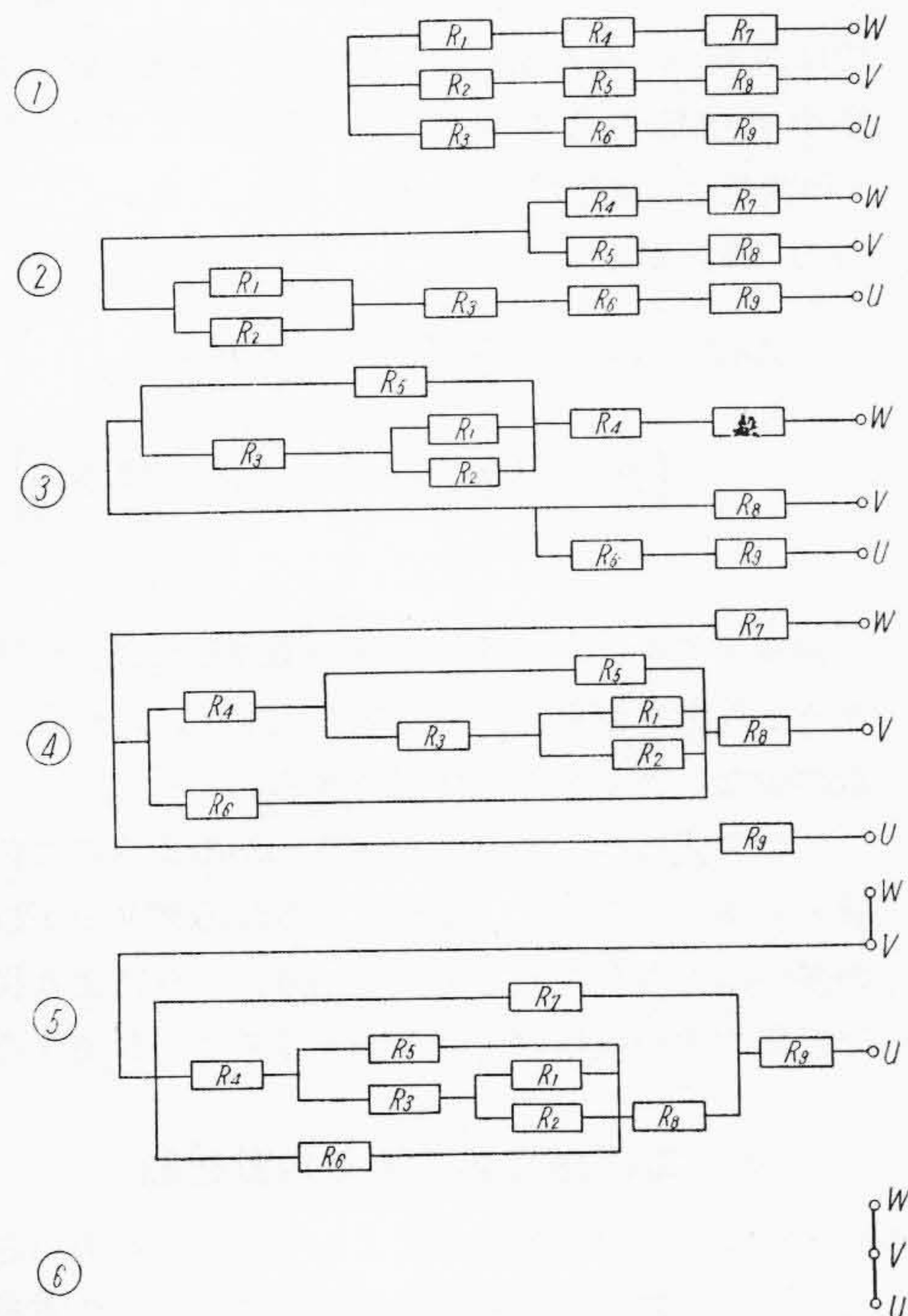
M : 抵抗器の放熱にあずかる質量

c : 平均比熱

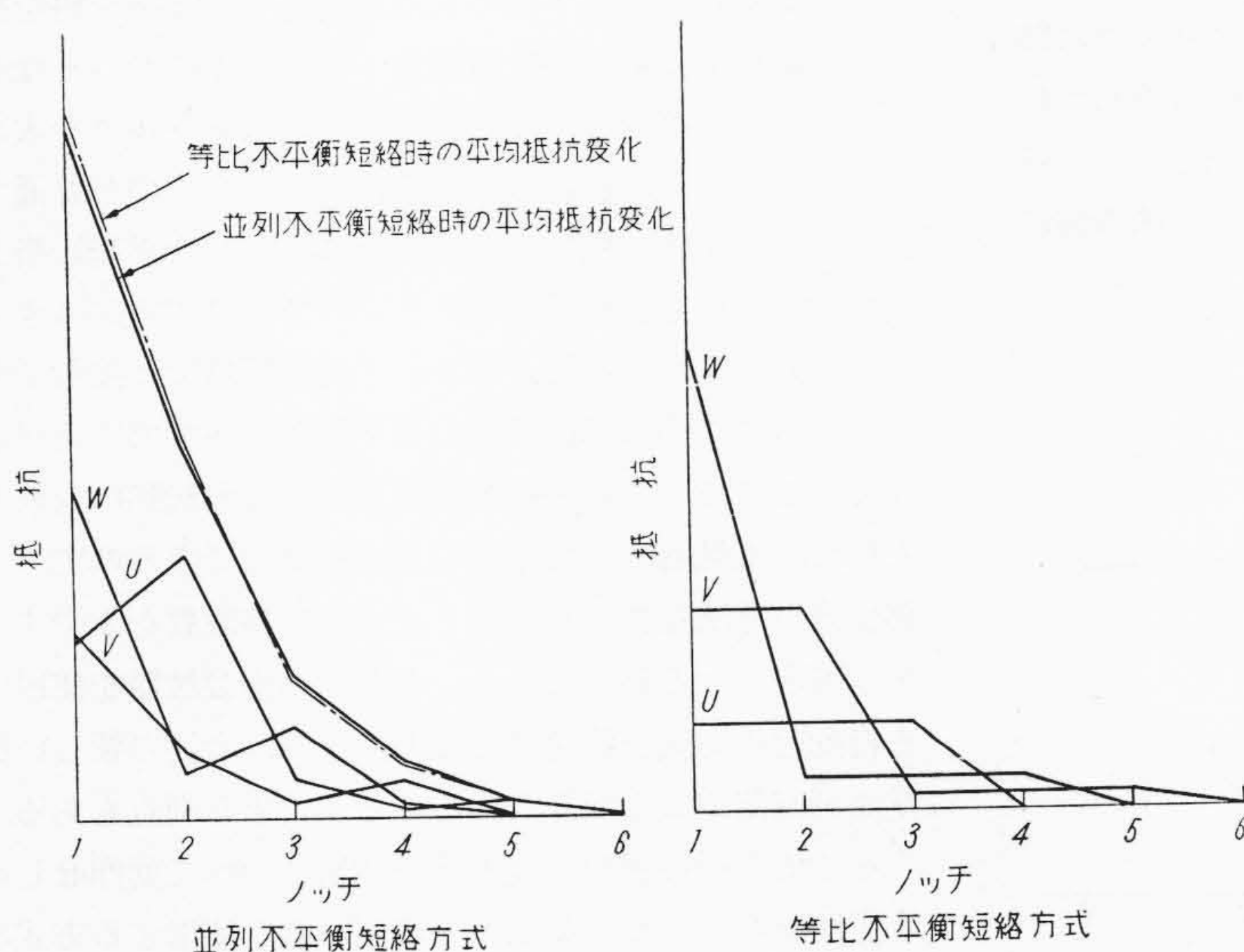
α : 平均放熱係数

グリッドの熱時定数 $\frac{Mc}{A\alpha}$ は非常に

小さいので、 θ はほとんど $\frac{Q}{A\alpha}$ によ



第3図 並列不平衡短絡方式短絡順序



第4図 抵抗短絡時各相抵抗の変化

つて決まる。新旧両短絡方式によつた場合の $Q, A\alpha$ をそれぞれ $Q_1, Q_2, A_1\alpha_1, A_2\alpha_2$ とする。

$$Q_1 = Q_2 = \frac{1}{n} (I^2 r + I^2 k r + I^2 k^2 r + \dots + I^2 k^{n-1} r) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$A_1\alpha_1' = aP\alpha_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A_2\alpha_2' = \frac{1}{n} (aP_1\alpha_1 + aP_2\alpha_2 + \dots + aP_n\alpha_n) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P = P_1$$

ここに n : 短絡段数

P_1, P_2 : 各ノッチで発熱するグリッドの枚数

α_1, α_2 : 各ノッチで熱放散を行うグリッドの平均放熱係数

α_1', α_2' : 新旧短絡方式における平均放熱係数

P : グリッド総枚数

a : グリッド 1 枚の平均放熱面積

k : 比例常数

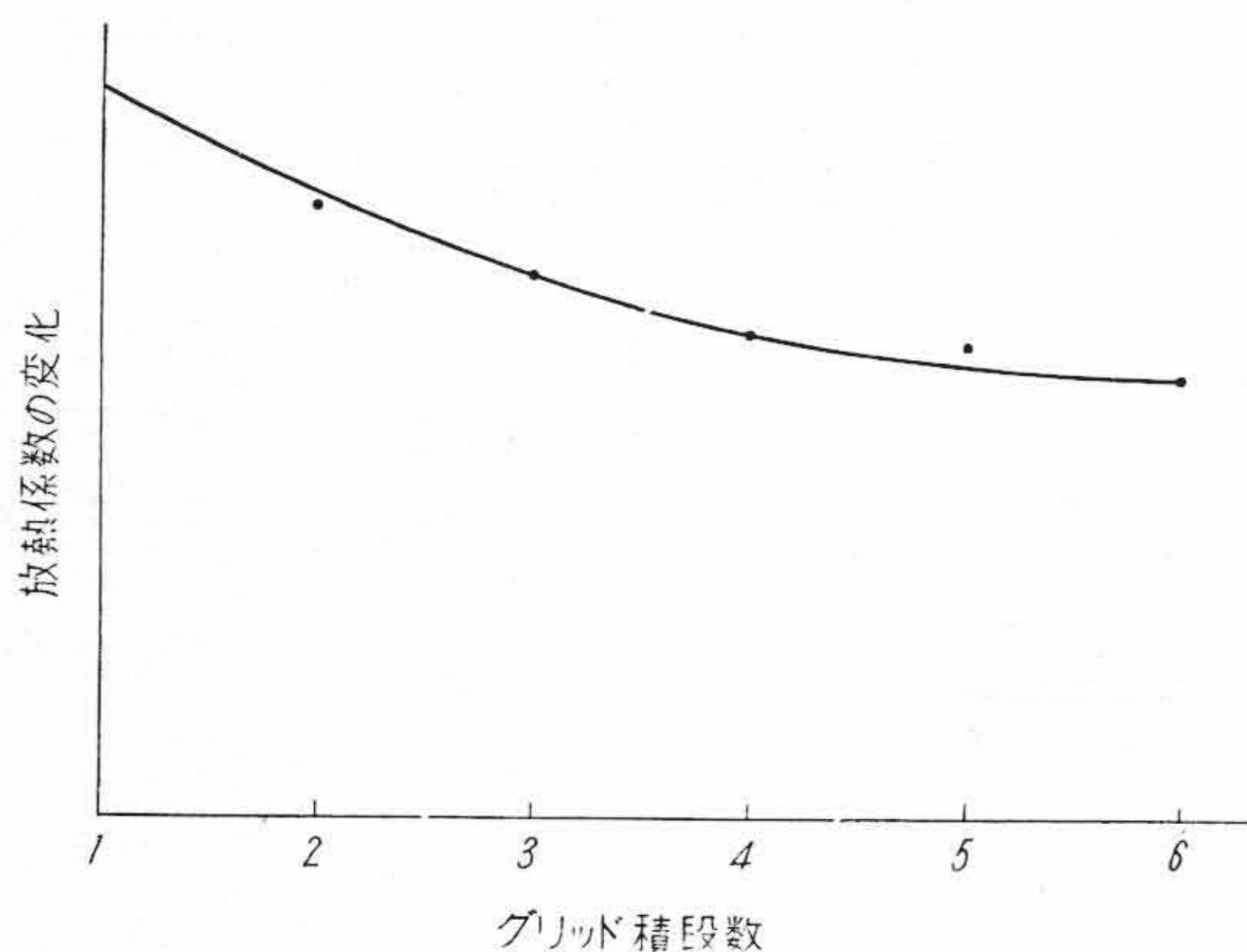
r : 抵抗

抵抗器放熱係数の増加は (4) (5) 式より

$$A_1\alpha_1' - A_2\alpha_2' = \frac{a\alpha_1'}{n} \left\{ \left(P - \frac{\alpha_1}{\alpha_1'} P_1 \right) + \left(P - \frac{\alpha_2}{\alpha_1'} P_2 \right) + \left(P - \frac{\alpha_3}{\alpha_1'} P_3 \right) + \dots + \left(P - \frac{\alpha_n}{\alpha_1'} P_n \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{A_1\alpha_1'}{A_2\alpha_2'} = \frac{P\alpha_1}{\frac{1}{n} (P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + \dots + P_n\alpha_n)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

グリッド抵抗器においては一般に 1 ブロックに 20 余枚のグリッドを並べ、これを数段に積み重ねて使用する。このときの放熱係数変化の一例として、各段数を積み重ねたときの α の変化の状態を第 5 図に



第 5 図 グリッド積段数による放熱係数の変化

示す。

一般に抵抗器短絡の際の α については次のことがいえる。

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 \dots \dots \dots < \alpha_n$$

したがつて (6) 式において

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_1'} = 1, \quad 1 < \frac{\alpha_2}{\alpha_1'} < \frac{\alpha_3}{\alpha_1'} \dots \dots \dots < \frac{\alpha_n}{\alpha_1'}$$

ではあるが、挿入抵抗は等比であり電流容量により多少抵抗値の大きいグリッドを使用しているが、 α の変化より P の変化の方が一般に大きい。したがつて (6) 式は、

$$A\alpha_1' - A\alpha_2' = \frac{a\alpha_1'}{n} \left\{ \left(P - \frac{\alpha_2}{\alpha_1'} P_2 \right) + \left(P - \frac{\alpha_3}{\alpha_1'} P_3 \right) + \dots + \left(P - \frac{\alpha_n}{\alpha_1'} P_n \right) \right\} > 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

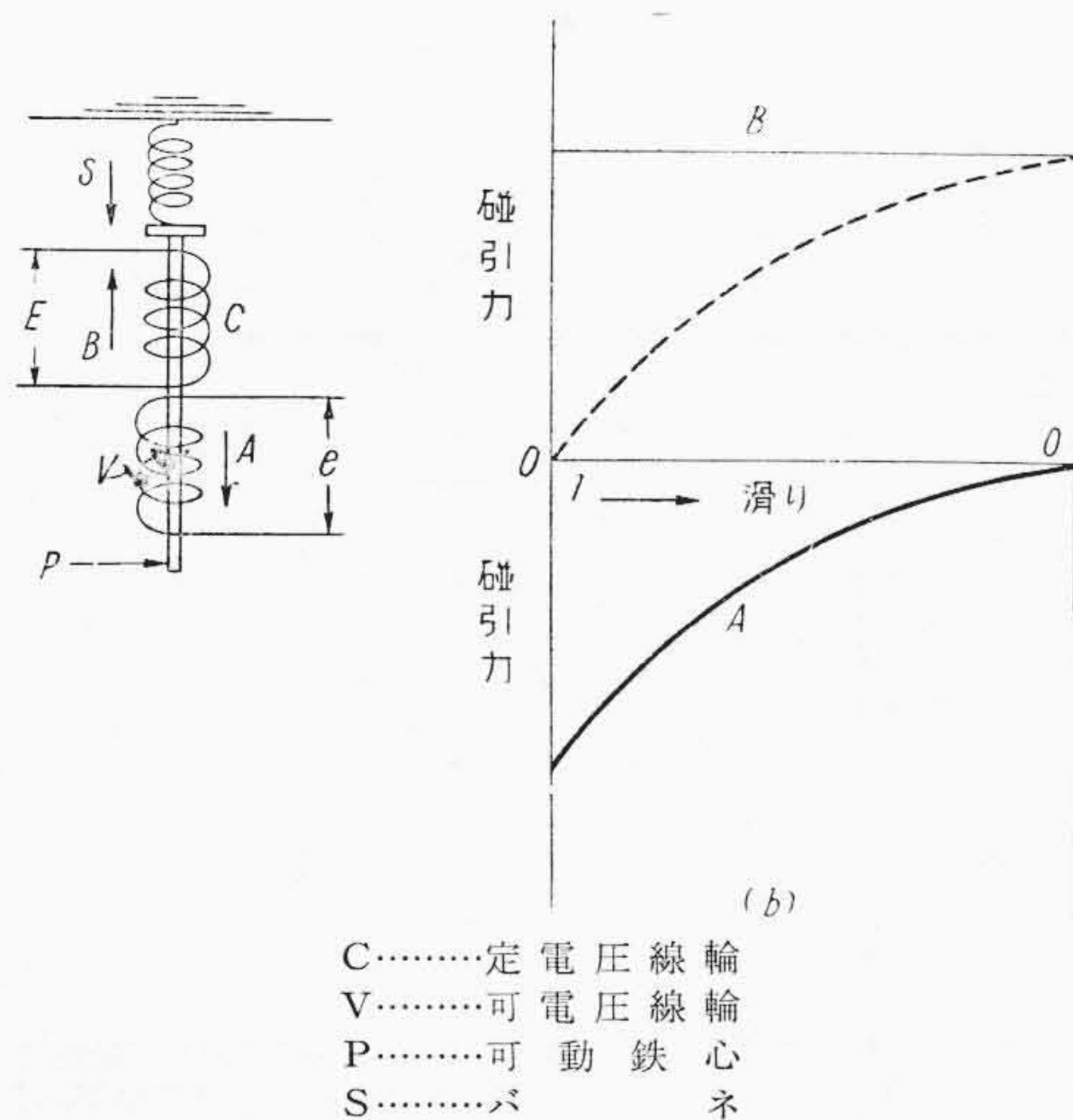
温度上昇を一定にすれば A の増加した割合だけグリッド枚数を減らし、抵抗値が大きく、かつ電流容量の少ないグリッドを使用できる。

この方式は (7) (8) 式よりわかるように短絡段数 n の多いものほど、また短絡されるグリッド枚数の多いほど有利な短絡方式であり、これにより従来の短絡方式の抵抗器より小型とすることができる。

3. 電圧継電器による自動起動

巻線型電動機の自動起動方式として古くから実用されているものに 2 個の電流制限器を交互に使用して電動機一次電流の減少を検出しながら二次抵抗を短絡する方式がある。この方式では一般に二次抵抗の短絡用接触器として 2 極あるいは 3 極のものを使用した平衡短絡を行う。巻線型電動機の突入電流を一定値以下におさえながら、しかも加速を速くするために平均加速トルクを大きくしたいときは、抵抗器の短絡段数をふやすのが普通である。この目的で抵抗短絡段数をふやす場合平衡短絡方式では電磁接触器の寸法が大きいの制御装置が大きくなり、したがつて高価となる。手動制御器では接触子の数を減らすために二次抵抗の不均衡短絡がすでに実用されているので、この不均衡短絡方式を自動起動にも取り入れれば接触器として単極のものを使用できるので、制御装置の寸法をあまり大型とせずに短絡段数をふやすことが可能となるわけである。また、単極接触器を使用する自動起動方式を開発することにより、上述の新しい抵抗並列回路方式も取り入れることができる利点もある。

そこで単極接触器を電動機の加速につれて動作せしめる方法として、まず 2 個の電流制限器を使用する方式について検討したが、この方式では接触器に最大 4 個の補助接点を必要とするので、接触器の寸法が単極になつて



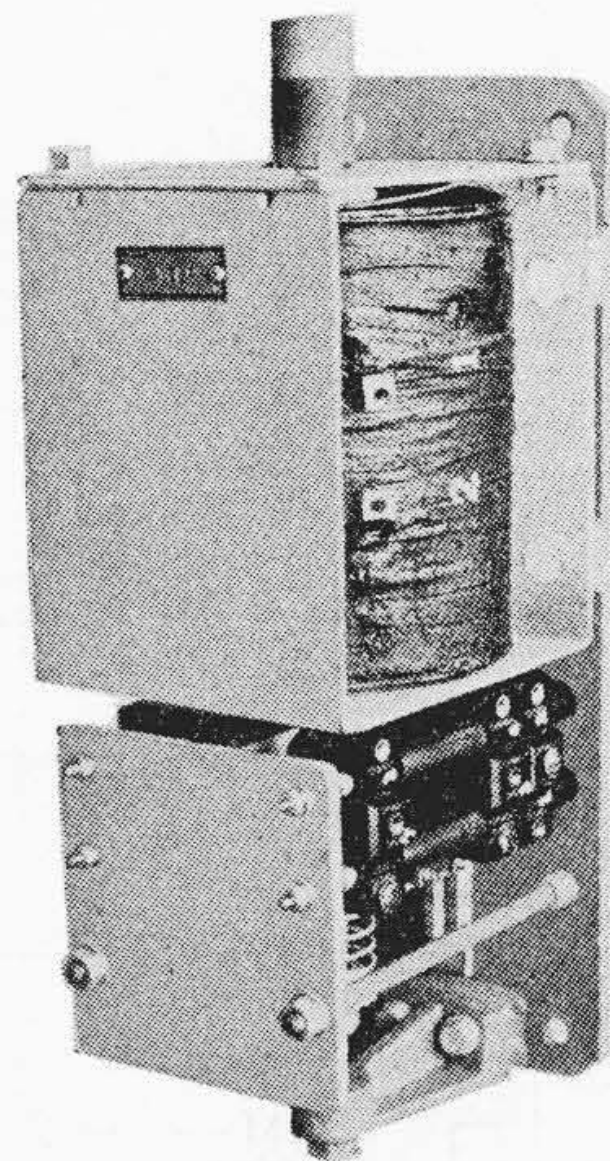
第6図 電圧継電器の原理

もあまり小さくならないことがわかった。

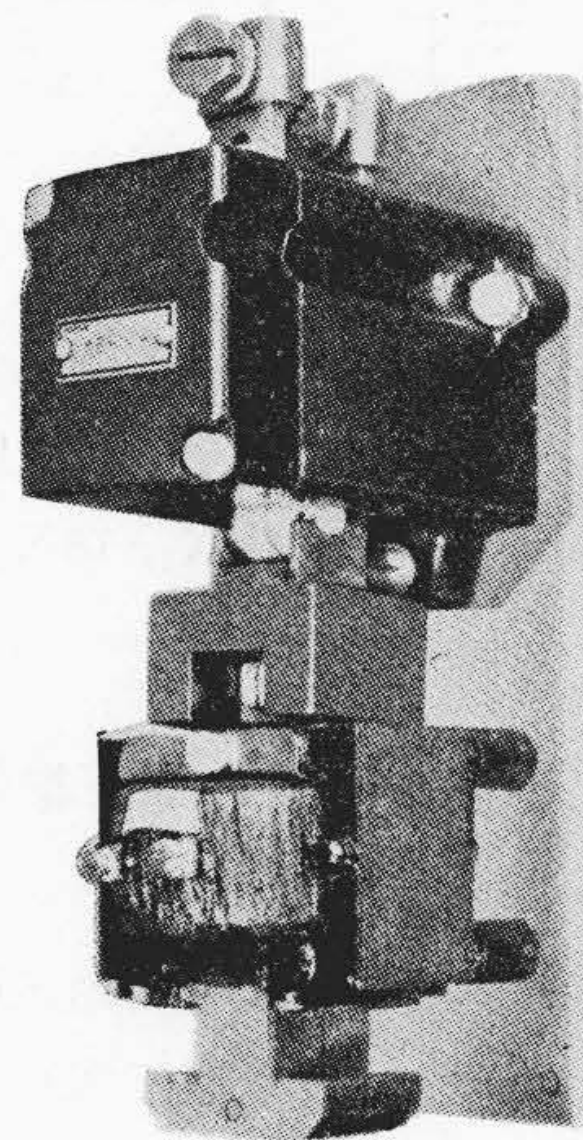
ほかには時限継電器を使つて、あらかじめ定められた時間に抵抗を短絡していく方式もあるが、この方式は補助接点を必要としないけれども、荷重が正負軽重と常に変化する荷役機械などには適当とはいえない。電動制御器による方式は時限継電器方式の変形と考えられるから、同じ理由で、これも適さない。

巻線型電動機では二次電圧はすべりに比例するので、この二次電圧に応じて動作する電圧継電器により電動機の手速を検出してあらかじめ設定した適当な速度の点で単極接触器を次々と動作せしめれば、電流制限器による方式の長所を兼たものとなり、抵抗段数をふやしても、制御装置はさほど大きくならない。

上述のように電動機二次電圧はすべりに比例するので、起動の始めに電圧は最大で同期速度で零となる。したがつて、この場合、電圧継電器の特性が、普通の電圧継電器のように検出した電圧が高ければ可動部分の動きもこれにつれて大きいという特性では、全速になつたときと停止状態を区別することができない。電流でも同様のことがあるので、電流継電器では電圧線輪と電流線輪を置いてこの点を巧みに解決している。そこで自動起動に使用する電圧継電器としてこの点を解決するために定電圧線輪と可変電圧線輪を置いた。第6図についてその原理を説明する。定電圧線輪Cに一定電圧Eを印加し、可変電圧線輪Vには電動機二次電圧eを印加する。おのおのの線輪によつて生じる磁引力が矢印B、Aとなるようにしておけば可動鉄心Pに対する合成の磁引力はBとAの差、すなわち第6図(b)の点線のようになる。この磁引力とバネSを対向させれば電動機のすべりによつて可動鉄心Pの位置が変わるので、この可動鉄心に開閉部分を連結して単極接触器を動作せしめるものである。し



第7図 電圧継電器



第8図 単極電磁接触器

たがつて、この電圧継電器は2個の線輪によつて生じる磁引力の差を利用するために交流を直流に整流して使用している。第7図に電圧継電器を示す。第8図は単極電磁接触器である。

以上の原理を応用した巻線型電動機自動起動方式の主回路結線図は第9図のとおりである。操作開閉器、主幹制御器、あるいは押ボタンスイッチなどにより主回路接触器52Mを投入すれば電動機IMは二次抵抗最大の状態で起動する。同時に補助接点52Maの閉路により電圧継電器の定電圧線輪Cと可変電圧線輪Vに電源電圧ならびに電動機二次電圧が印加される。電動機の手速が上昇するにつれて可変電圧線輪に印加された二次電圧が減少するので電圧継電器可動鉄心の位置が変わり、それに連結された開閉部分によりあらかじめ設定された点で二次側接触器18X₁, 18X₂……18X₅が次々に閉路し、二次抵抗は順次並列回路を形作りながら減少していき、最後に全部短絡されて電動機は全速運転に入ることとなる。

