

# 富士ロートロール

Fuji Rototrol

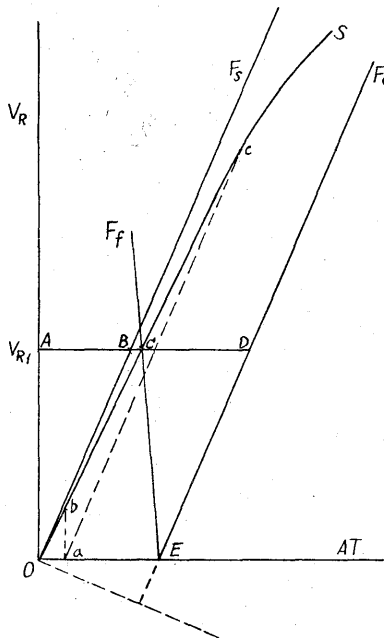
技術部回転機課 鳥居光太郎

## 内容梗概

ロートロールの理論は、既に各種文献に発表されていて、殊更に目新しいものではないが、その動作特性を簡単な解析によって導き、数値計算による特性曲線を求め、之によって、改良された型のロートロールを紹介する。

## I. ロートロールの考え方

ロートロール（以下簡単に  $R$  と呼ぶ）の動作及び性能を簡単に理解するために、第1図に就て説明する。第1図の縦軸は  $R$  の端子電圧、横軸は界磁  $AT$ 、 $OS$  は飽和曲線、 $OF_s$  は自励界磁特性、 $OE$  は制御界磁  $AT$ 、従って  $EF_c$  は自励界磁+制御界磁の特性、 $EF_f$  は復帰



第1図 ロートロールの動作曲線  
Fig. 1. Performance curve of Rototrol.

界磁特性である。或る動作点について考えると、 $AB$  が自励界磁  $AT$ 、 $BD$  が制御界磁  $AT$ 、 $CD$  が復帰界磁  $AT$  であって、 $EF_f$  と飽和曲線の交点  $C$  即ち端子電圧  $V_{R1}$  で平衡を保つ。自励界磁特性  $OF_s$  は  $R$  の増幅特性を左右するものであって、例えば、自励界磁の無い場合に、制御界磁に  $Oa$  なる  $AT$  を与えると端子電圧は  $b$  点で

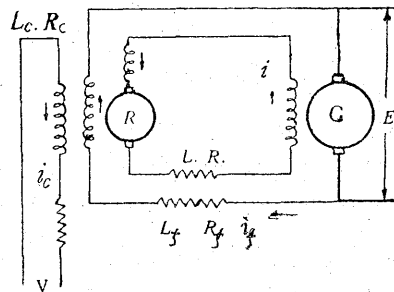
あるが、自励界磁を有する時は  $c$  点まで上昇する。結局自励界磁は座標軸を  $OF_s$  まで回転せしめて、飽和曲線を縦軸に非常に接近させる役目を果たことになる。従って  $OF_s$  が飽和曲線  $OS$  と一致した場合には増幅度は無限大になる。

$EF_f$  なる復帰界磁特性は、 $R$  によって制御される対象物の特性に従って画かれる曲線であって、必ずしも直線ではない。

$R$  の制御は上述の如く、制御界磁  $AT=OE$  を加減することによって行われるが、動作点は  $EF_f$  と  $OS$  の交点なのであるから、 $OE$  を一定に保ち、 $EF_f$  の傾角を種々に制御して行うことも出来る。

## II. ロートロールの特性

最も簡単な場合として、 $R$  によって直流発電機を励磁する場合を取上げる。各回路常数及び電流電圧は、第2図に示す通りである。 $R$  及び発電機の飽和は無視し、各



第2図  $R$  で  $G$  を励磁する場合  
Fig. 2. Case of excitation of "G" by "R".

回路の  $L$  は  $\Sigma(L+M)$  の意味とするが  $M$  による変圧器作用は無視する。従って次の式が成立する；

$$E = k \cdot i \dots \dots \dots (1)$$

$$L_f \cdot \frac{di_f}{dt} + R_f \cdot i_f = E \dots \dots \dots (2)$$

$$L_c \cdot \frac{di_c}{dt} + R_c \cdot i_c = V \dots \dots \dots (3)$$

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = K_1 \cdot i + K_2 \cdot i_c - K_3 \cdot i_f \dots \dots \dots (4)$$

ここで  $\frac{R_c}{L_c} = \frac{R_f}{L_f}$  なる仮定を置くと、上式から  $i_c$  及び  $i_f$  が消去出来て次式が得られる；

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \left( \frac{R-K_1}{L} + \frac{R_f}{L_f} \right) \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{L \cdot L_f} \left\{ k \cdot K_3 \right. \\ \left. + R_f \cdot (R-K_1) \right\} \cdot i = \frac{K_2 \cdot V}{L \cdot L_c} \dots \dots \dots (5)$$

(5) 式を積分して結果を求めると次の如くなる；

$$D = \left( \frac{R-K_1}{L} + \frac{R_f}{L_f} \right)^2 - \frac{4k \cdot K_3}{L \cdot L_f}$$

$$m_1 = -\frac{1}{2} \left( \frac{R-K_1}{L} + \frac{R_f}{L_f} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{D}$$

$$m_2 = -\frac{1}{2} \left( \frac{R-K_1}{L} + \frac{R_f}{L_f} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{D}$$

$$m_0 = -\frac{1}{2} \left( \frac{R-K_1}{L} + \frac{R_f}{L_f} \right)$$

$$\omega = \sqrt{-D}$$

と置くと

(A)  $D > 0$  なる時は減衰型となって

$$i = \frac{V}{R_c} \cdot \frac{K_2}{(R-K_1) + \frac{k \cdot K_3}{R_f}} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{m_1 - m_2} \cdot \right. \\ \left. (m_2 \cdot e^{m_1 t} - m_1 \cdot e^{m_2 t}) \right\}$$

(B)  $D = 0$  なる時は限界型となって

$$i = \frac{V}{R_c} \cdot \frac{K_2}{(R-K_1) + \frac{k \cdot K_3}{R_f}} \cdot \left\{ 1 - e^{m_0 t} (1 - m_0 \cdot t) \right\}$$

(C)  $D < 0$  なる時は振動型となって

$$i = \frac{V}{R_c} \cdot \frac{K_2}{(R-K_1) + \frac{k \cdot K_3}{R_f}} \cdot \left\{ 1 - e^{m_0 t} \cdot (\cos \omega t \right. \\ \left. - \frac{m_0}{\omega} \cdot \sin \omega t) \right\}$$

以上が  $i$  の式、従って発電機の電圧の式、即ち  $R$  の特性式である。  $R$  の特性としては増幅度の大なること、及び  $i$  の上昇の急速なることを要求されるのであるが、概念的に考えて、  $L$ 、  $L_f$ 、  $L_c$  を小さくすれば良いことは直に理解される。然し其の場合(C)の振動型になり易い。振動型になった場合、  $i$  の最終値の  $\pm x\%$  の範囲に落着く時間を実際上の所要時間として差支えないわけである。従って数値計算から最も上昇の早い爲の条件が求められる。

扱て実際に設計した機械に就て、各係数の値を定め、数値計算を行ってみると次の如くなる；

$$E=500V, \quad k=14, \quad i=35.7A, \quad \frac{R_f}{L_f}=10$$

$$R=8.4\Omega, \quad K_1=7.8, \quad K_2=156, \quad K_3=78,$$

(イ)  $L=2H$ ,  $L_f=14H$  なる場合、

$D=-62$  となって振動型

$$i=35.8 \left\{ 1 - e^{-5.15t} (\cos 7.87t + \frac{5.15}{7.87} \sin 7.87t) \right\}$$

これは第3図の曲線Ⅰの如くなる。

(ロ)  $L=2H$ ,  $L_f=10H$  なる場合

$D=-30.2$  となって振動型、

$$i=35.8 \left\{ 1 - e^{-7.15t} (\cos 5.49t + \frac{7.15}{5.49} \sin 5.49t) \right\}$$

これは第3図の曲線Ⅱの如くなる。

(ハ)  $L=2.23H$ ,  $L_f=10H$  なる場合

$D=0$  となって限界型

$$i=35.8 \left\{ 1 - e^{-7.134t} (1 + 7.134t) \right\}$$

これは曲線Ⅲである。

(ニ)  $L=3H$ ,  $L_f=18H$  なる場合

$D=-23.5$  となって振動型

$$i=35.8 \left\{ 1 - e^{-3.99t} (\cos 4.85t + \frac{3.99}{4.85} \sin 4.85t) \right\}$$

これは曲線Ⅳである。

(ホ)  $L=3H$ ,  $L_f=14H$  なる場合

$D=-7.9$  となって振動型

$$i=35.8 \left\{ 1 - e^{-5.1t} (\cos 2.83t + \frac{5.1}{2.83} \sin 2.83t) \right\}$$

これは曲線Ⅴである。

(ヘ)  $L=3H$ ,  $L_f=10H$  なる場合

$D=45$  となって減衰型

$$i=35.8 \left( 1 - \frac{10.45}{6.7} \cdot e^{-3.75t} + \frac{3.75}{6.7} \cdot e^{-10.45t} \right)$$

これは曲線Ⅵである。

(ト)  $L=4H$ ,  $L_f=14H$  なる場合

$D=19$  となって減衰型

$$i=35.8 \left( 1 - \frac{7.26}{4.36} \cdot e^{-2.9t} + \frac{2.9}{4.36} \cdot e^{-7.26t} \right)$$

これは曲線Ⅶである。

(チ)  $L=4H$ ,  $L_f=10H$  なる場合

$D=82.8$  となって減衰型

$$i=35.8 \left( 1 - \frac{11.64}{9.12} \cdot e^{-2.52t} + \frac{2.52}{9.12} \cdot e^{-11.64t} \right)$$

これは曲線Ⅷである。

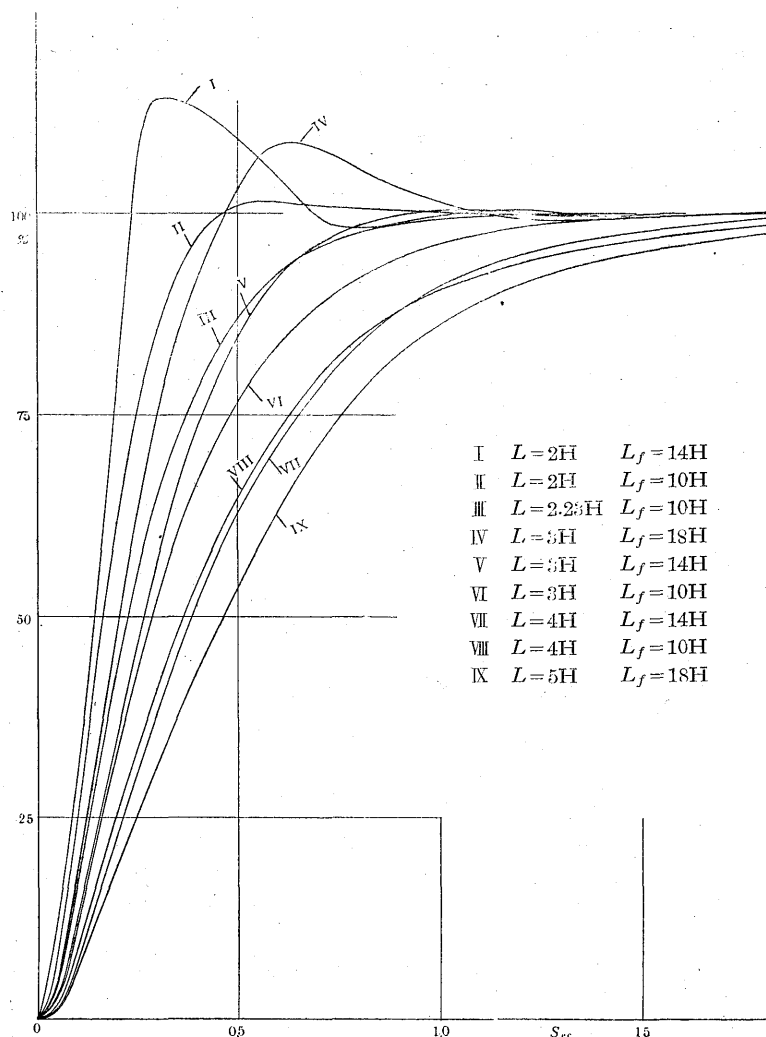
(リ)  $L=5H$ ,  $L_f=18H$  なる場合

$D=10.2$  となって減衰型

$$i=35.8 \left( 1 - \frac{5.54}{3.18} \cdot e^{-2.37t} + \frac{2.37}{3.18} \cdot e^{-5.54t} \right)$$

これは曲線Ⅸである。

之等の曲線群から判断される所は、回路から概念的に判断される所とよく一致している。即ち  $i$  の主回路の  $L$  が小なる時は上昇の早いのは当然であるが、この場合  $L_f$  が大なる時は負帰還の作用が時間的に遅れる故に振動型になるのは当然である。従って  $L$  及  $L_f$  が共に小なる時は殆ど振動もなく、最も早く所定値に達することが認められる。唯この場合、  $L_f$  が大なる時は、立上りの部分で



第3図 R の特性曲線  
Fig. 3. Characteristic curves of "R"

負帰還が抑えられるから、急速に上昇する傾向を示すことは曲線 I 及び II を比較すればうなずける。

ある程度  $L$  が大となると、 $L_f$  を小さくし過ぎるよりも  $L_f$  の幾分大きい時の方が、僅かの振動で早く所定値に達する場合も生ずる。これは曲線 IV—V—VI に示されている。

結論として、急速なる上昇を得るには、 $L$  を小とすると同時に  $L_f$  を小とせねば振動が大きくなること、又實際上問題にならぬ程度ならば振動型とした方が上昇が早いことである。

以上のことは  $D = \left( \frac{R-K_1}{L} - \frac{R_f}{L_f} \right)^2 - \frac{4k \cdot K_3}{L \cdot L_f}$  なる判別式を検討すれば直に判ること、 $R$  に於ては自励界磁特性  $OF_s$  と飽和曲線  $OS$  は非常に接近しているのが普通であるから  $R-K_1 \approx 0$  である。従って

$$D \approx \frac{1}{L_f} \cdot \left( \frac{R_f^2}{L_f} - \frac{4 \cdot k \cdot K_3}{L} \right)$$

となり、 $L$  を小とすれば同時に  $L_f$  も小とせねば  $D < 0$

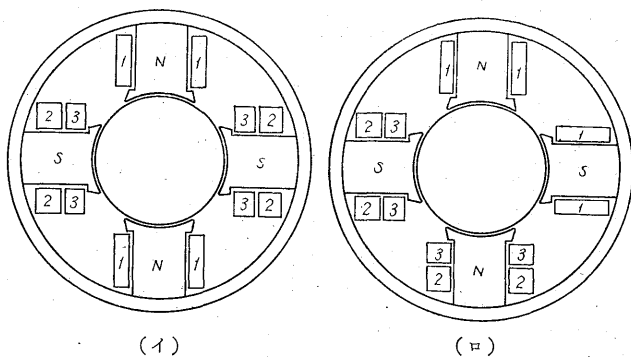
となって振動型になるわけである。

### III. 富士ロートロール

普通の  $R$  の一つの弱点は、共通の磁路に磁束を発生せしめる爲の多数の界磁巻線を有することで、この爲に  $L, L_f$  の値が大きくなり、前述の如き現象を呈することである。この点を改良して特性を優秀なものとしたのが富士ロートロールである。

多数の界磁巻線の個々の  $\Sigma(L+M)$  を減少させる方法として普通に考えられることは、容量の大なる設計として各界磁巻線の巻回数を減らし、大きな抵抗を挿入することであるが、更に特別な方法として第4図に示す如き構造がある。即ち多数の界磁巻線を、 $R$  の使用目的に最も適当している様に分割して、夫々を各別個の極に設けるのである。3個又はそれ以上の界磁巻線を、如何に組合せるかは  $R$  の使用方法に従って自由に選択出来る。又別個の極に取付ける方法には第4図の(イ)及び(ロ)の二様の型がある。斯様な方法により各巻線の  $\Sigma(L+M)$  は著しく小さくする事が出来るのである。

富士ロートロールは上述の如き根本

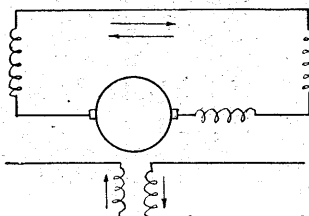


(イ) (ロ)  
第4図 富士ロートロールの構造  
Fig. 4. Construction of Fuji Rototrol.

的に改良された構造を有するものである。其他一般的には、磁路の総てが成層されていること、動作特性上面白くない残留磁気は極めて美事に低減されていること等々は既知の通りである。この特性は後述する通り、発電機の励磁機として使用したる場合に、非常に電圧上昇を急速にしても振動を起さないと言う試験結果に明瞭に現われている。

#### IV. ロートルの使用分野

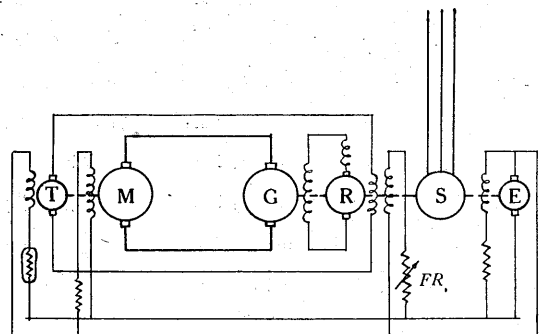
$R$  は前述の如く急速励磁に使用される。次に、発電機の定電圧、電動機の定速度等の自動制御に用いられる。更に又復帰界磁を省いた第5図の結線として自動バルサに使用される。このバルサとしての  $R$  は、発電



第5図 自動バルサとしてのロートル  
Fig. 5. Rototrol as automatic balancer.

機或は電動機の並列運転に極めて優秀な特性を示すほか、自動力率制御等に使用して甚だ妙である。

電動機の定速度制御に使用した一例を第6図に示す。



第6図 電動機の定速度制御に  $R$  を利用した一例  
Fig. 6. An example of  $R$  applied to constant speed controlling of motor.

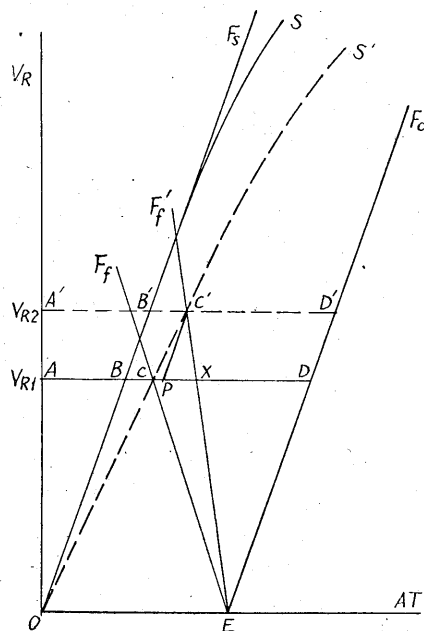
これはワードレオナード方式であって、 $M$  は主電動機、 $G$  は発電機、 $R$  はロートル、 $E$  は励磁機、 $T$  は  $M$  に直結されたタコメータダイナモである。 $S$  は  $G$ 、 $R$ 、 $E$  を駆動する交流電動機である。

レオナード制御は  $R$  の制御界磁に挿入された界磁調整器  $FR$  によって行われる。一度制定された位置に於ては自動的に完全に定速度を保つ。この接続に於て、主電動機に速度に影響するものは、 $S$  を同期電動機とすれば、電源のサイクルの変動のみである。

一般に此種の自動制御に関して、各方面に於てその成績が発表されているが、それ等の制御特性の優秀性を誇示している裏に、必ず、「一定電源」とか、 $R$  或は之に類する制御機を「一定速度」で運転する等々の余り目立たない要素を含めている。所が、電子管或は自動継電器の類を使用しないことを建前とする限り、実験室ではない一般工業施設に斯様な「一定」のものは無いのである。従って、素晴しく優秀な成績が発表されていても、電源

まで非常にフラフラしている実際の工場に使用された場合は、決してそんなに素晴らしい成績とはならぬことに注意する必要があるのである。

$R$  を自動制御に使用した場合、如何なる性能を示すかを簡単な作図によって検討して見る。第7図に於て各文字の意味は第1図に於けると同様である。即ち一例とし



第7図  $R$  を自動制御に使用した場合  
Fig. 7. Case of " $R$ " used for automatic controlling.

て発電機の自動電圧調整に使用する場合であるが、 $OF_s$  と  $OS$  が一致している場合は、完全に一定の電圧を保つ。之に反して、 $OF_s$  が  $OS$  と一致していない場合、即ち図示の如く飽和曲線が  $OS'$  となっている場合はどうかを考えて見る。最初  $R$  の電圧が  $V_{R1}$  で、 $EF_f$  と  $OS'$  の交点  $C$  で平衡していたものとする。その時何等かの原因で発電機電圧が降下して、復帰界磁  $AT$  が  $CD$  から  $XD$  に減少したとする。然る時は復帰界磁特性は  $EX$  を結んだ  $EF_f'$  となり、 $EF_f'$  と  $OS'$  の交点  $C'$  で平衡し、 $R$  の電圧は  $V_{R2}$  となる。この場合の復帰界磁  $AT$  は  $C'D'$  であって、各場合の復帰界磁  $AT$  は発電機の電圧に比例しているものであるから、発電機の電圧は  $C'D'$  に相当する値まで自動的に回復したことになる。 $C'$  から  $OF_s$  に平行線を引き、 $ABCD$  なる直線との交点を  $P$  とする。然る時は、最初  $CD$  であった発電機の電圧が  $XD$  まで何等かの原因で降下したものが、自動的に  $PD$  まで回復されたと言うことになる。この  $P$  点は、 $OF_s$  と  $OS'$  が接近している程  $C$  点に近づき、 $OF_s$  と  $OS'$  が一致している場合は  $P$  点は  $C$  点と一致する。即ち完全に一定電圧を保つことになる。

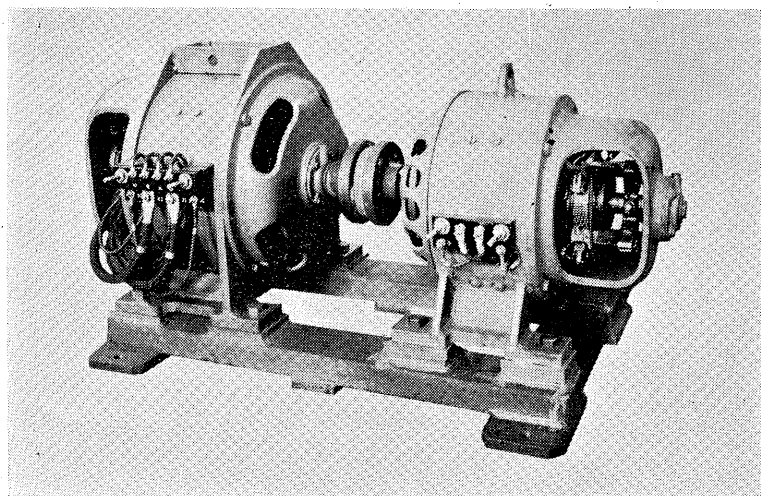
一般に  $OF_0$  と  $OS$  は極めて接近している故、 $P$  点は殆ど  $C$  点と一致していると見て差支えないものであって、 $\pm 1\%$  程度の定電圧を得るのは容易である。

第 6 図の電動機定速制御に用いる回路に就て (Ⅱ) に於けると同様な解析を行うと三次の微分方程式になる。解は非常に複雑になるが、電動機  $M$  の機械的の慣性を電気回路の  $L$  と考えると、根本的には (Ⅱ) で得た解と同じものと考えて良い。即ちこの場合は  $L$ ,  $L_f$  の中に電動機の機械的の慣性も含まれて来るので、その値が非常に大きくなった場合の現象を起す。即ち電動機  $M$  の速度が所定値に達する時間は、発電機の電圧に就て考えた場合よりもずっと長くなる。又速度を急に大きく変える場合は速度の動揺を惹起する。

$R$  は普通の直流発電機と何等異なる所は無い。補極を設けて完全な整流を行ひ得る。従って  $R$  はその容量に制限を受けない。励磁機として使用する場合直接に主励磁機とすることが出来る。勿論制御回路のエネルギーを小さくする爲に  $R$  を副励磁機として、主励磁機の界磁に入れることも出来る。

## V. 富士ロートトロールの実例

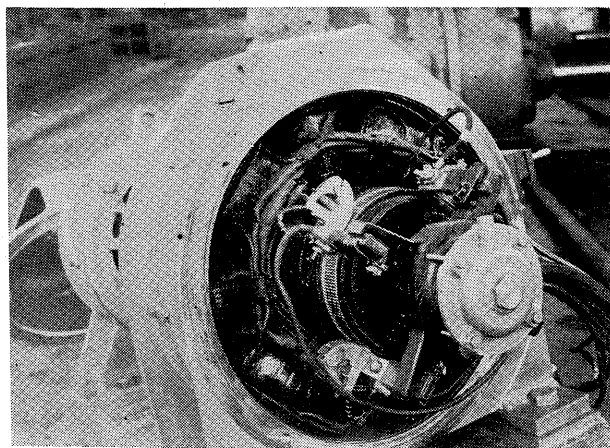
第 8 図は 1.2 kW, 1,500 R.P.M. の富士ロートトロールの外観 (左側) で、第 9 図はその整流子側のシールドを



第 8 図 富士ロートトロール  
Fig. 8. View of Fuji Rototrol.

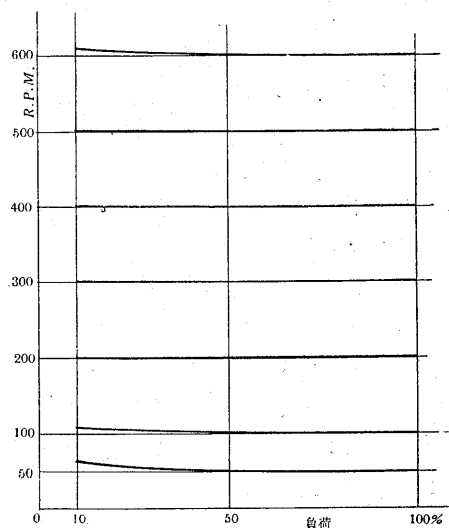
外して内部を見た所である。本機は巴川製紙殿に納入した 75 馬力のカレンダー用電動機の定速制御に用いたものであって、この 75 馬力のカレンダー用電動機は次の様な仕様に合格する性能を有するものである。即ち 100 R.P.M. から 1,200 R.P.M. の範囲のものと 50 R.P.M. から 600 R.P.M. までのものと 2 セットあるのであるが、その間の速度はワードレオナード制御により、各速度の

(21)



第 9 図 富士ロートトロールの整流子側  
Fig. 9. Commutator side of Fuji Rototrol

段階に於て、速度変動率を極めて微少に抑えるものである。而もこの速度変動率は、負荷の大小を対象とすることは勿論、それ以上に、電源のサイクルの変動に対しても極めて小さく抑えることを目標とした。従って本セットには第 6 図の接続を用いることが出来ない。何故ならば、第 6 図の接続では、 $AC$  電源のサイクルが変動すれば主電動機  $M$  は否應なしにその速度を変動することになるからである。これを逃れる爲に本セットに於ては、 $R$  の復帰界磁は矢張り発電機の端子電圧からとり、更に主電動機内部の抵抗降下補償用の界磁を  $R$  に設け、且  $R$  を



第 10 図 カレンダー電動機 の速度特性  
Fig. 10. Speed characteristics of calendar motor

駆動する爲にその端子電圧が相当に変化しても、一定速度を保つ直流電動機を用いた。

以上の対策によって、「一定」なる要素が何一つ存在しない工場に於てこのカレンダー用電動機は第 10 図に示す様な特性となった。尙又、電源に於て 5 サイクルの変動があった場合、本電動機の速度の変動は 3% であった。

この  $R$  を用いて、普通に設計された相当  $L$  の大きい直流発電機を励磁した場合の電圧上昇のオシログラムは第11図である。普通の励磁機の場合と比較してある。

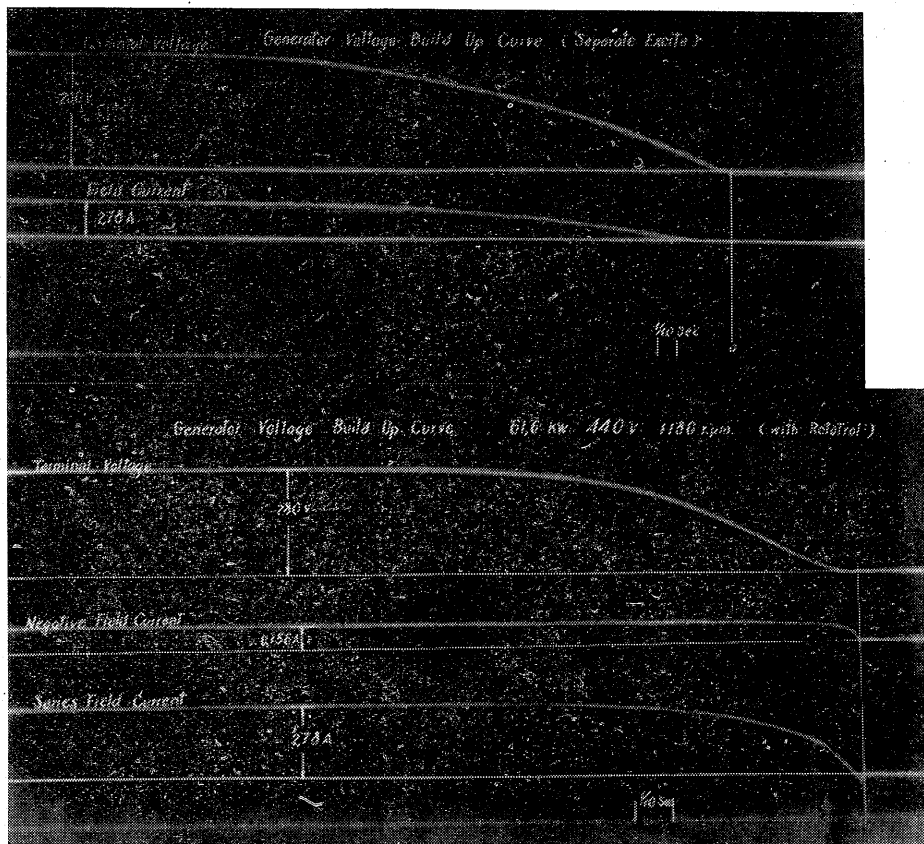
又この  $R$  を用いて、定電圧制御を行った場合、発電機の電圧の変動を如何に回復するかを示すオシログラムは第12図である。回復に要する時間は 0.1 秒以内である。

## VI. 用途の二三の例に就て

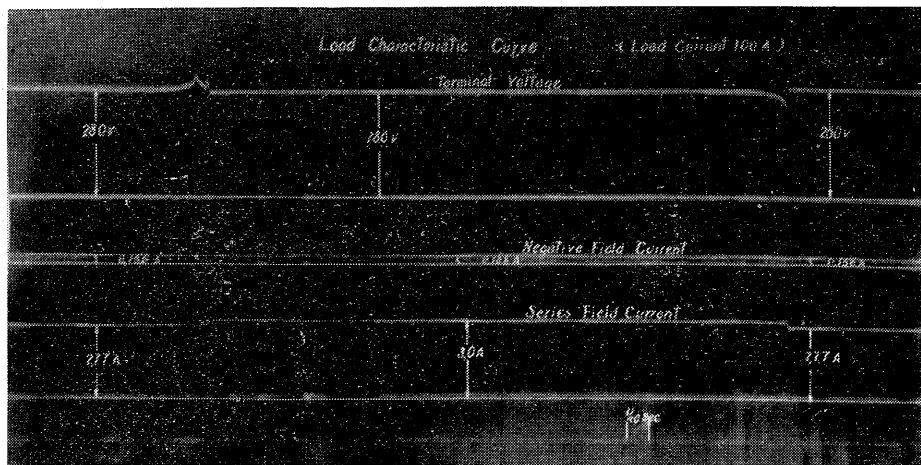
第 13 図は電動機又は発電機の並行運転に  $R$  を自動ランサーとして用いた例である。完全にバランスしている時は  $R$  の電圧、電流は零である。極めて僅かのアンバランスも  $R$  の増幅率が大いから直に自動的に調整される。

第 14 図は第 13 図と同様であるが、並行運転される電動機を速度を完全に合わせることを目的とした場合のもので、過渡的な電動機の突流を考えた場合のハンティングの心配も無く、且又  $R$  の界磁に主電動機回路の電圧を導入する必要が無い点に特色がある。

第 15 図は  $R$  を自動ランサーとして、自動力率調整に用いた例である。力率制定用の調整抵抗器  $RR$  によって決められた力率より外れると直に  $R$  が働いて、励磁機の界磁を加減し、力率を制定値に保つものである。



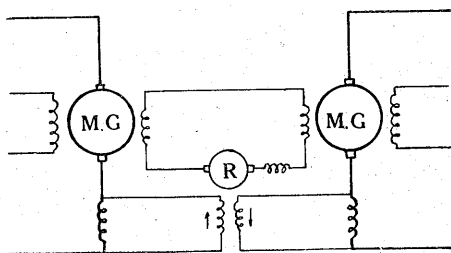
第 11 図 電圧 上 昇 特 性  
Fig. 11. Voltage rising characteristics



第 12 図 自 動 定 電 圧 特 性  
Fig. 12. Automatic constant voltage characteristics

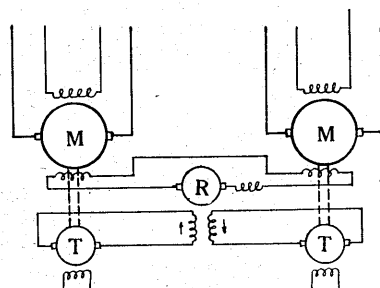
第 16 図は  $R$  をイルグナー又はレオナードセットの急速励磁に用いた例である。此処には少々特殊な例を示してある。即ち発電機側の電圧制御は  $R$  の制御界磁によって行わず、復帰界磁回路に挿入した電圧制定用ブースターの界磁制御によって行う例である。

斯様な方法でも制御出来ることは(I)に述べた通りである。この場合、 $P$  の電圧は  $G$  の電圧と差動せしめ、予め  $P$  で與えた電圧よりも  $G$  の電圧が高くなるまでは、復帰界磁が作用しない様になっている。従って  $R$  の制御



第13図 並行運転にRを自動バルンサーとして用いた例

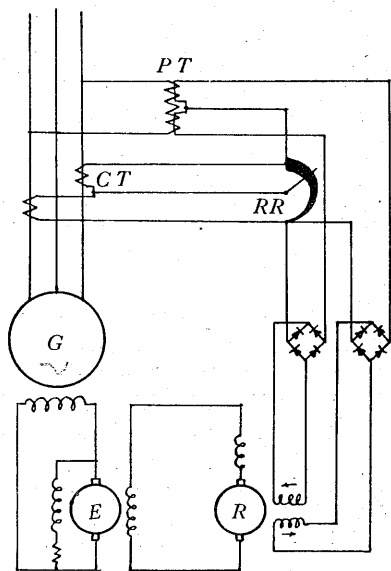
Fig. 13. An example of using R as an automatic balancer for parallel running.



第14図 二電動機を速度を完全に合せる場合

Fig. 14. Case of equalizing speed of two motors completely.

界磁に相当する界磁は一定で良い。この理由からGの電圧上昇は非常に早くなるのである。



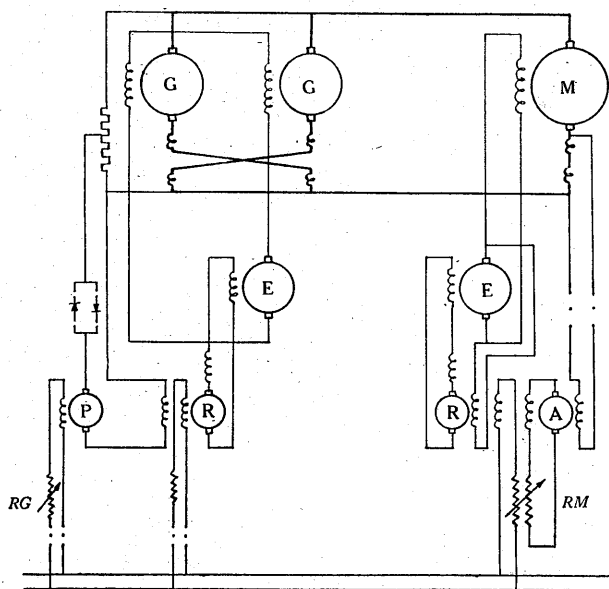
第15図 自動力率調整

Fig. 15. Automatic power factor regulation.

G: 交流発電機 (Alternator)  
E: 励磁機 (Exciter)  
R: ロータロー (Rototrol)  
CT: 電流変成器 (Current transformer)  
PT: 電圧変成器 (Potential transformer)  
RR: 力率制御用抵抗器 (Resistor for power factor setting)

電動機側にもRを用いたのは、Mの速度を界磁調整によって制御する段階に於ても、Mの界磁電流を急速に所定値に達せしめる為である。Aなる補助発電機はMに複巻特性を与えて過度の過負荷を避ける為のものであって、従ってこの作用は電動機Mの界磁の調整と関連して制御されねばならない。

結局主管制御器によって制御される調整抵抗はRG及びRMのみである。



第16図 イルグナ制御方式

Fig. 16. Control system for Ilgner set.

G: 発電機 (Generator)  
M: 電動機 (Motor)  
E: 主励磁機 (Main exciter)  
R: ロータロー (Rototrol)  
P: 電圧制御用ブースター (Booster for voltage setting)  
A: 補助発電機 (Auxiliary generator)  
RG: 電圧制御用抵抗器 (Resistor for voltage control)  
RM: 界磁制御用抵抗器 (Resistor for field control)

## VII. 結 言

以上述べた通り、Rの性能を利用して各種の制御を自動的に行う分野は非常に広いものである。Rの一つの弱点である多数界磁巻線の $\Sigma(L+M)$ が大きいこと、従ってそれが性能を低下させること等は、当社の富士ロータローによって画期的に改善されるものである。

然し尙、根本的に、自動界磁特性を飽和曲線と一致せしめる問題、飽和曲線が立上りの部分で直線にならぬ問題等解決すべき点が残っている。当社としては更に一段と優秀なる性能のものを提供すべく鋭意研究を続行している次第である。

(以上)



＊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。