

水銀整流器式交流電気機関車の格子制御装置

Grid Control Equipment for Mercury Arc Rectifier System A. C. Locomotives

小野田芳光*
Yoshimitsu Onoda

内 容 梗 概

水銀整流器は格子制御を行うことによりすぐれた性能を示すことはよく知られている。

しかし、水銀整流器式交流電気機関車では電源が単相であり、さらに電源電圧の変動、波形のひずみが大きく、この条件で全制御範囲を安定確実に移相しうる格子制御装置を得ることは容易でなく、これがこれまで水銀整流器式交流電気機関車に格子制御装置が採用されなかった大きな理由の一つであるとも考えられる。

日立製作所ではこの格子制御装置について研究し、従来のものに比較しすぐれた性能のものを開発し、かつこの格子制御装置を使用することにより粘着性能改善のための電圧制御装置を完成し、ED71形機関車に適用納入した。

1. 結 言

交流電気機関車にはいろいろな方式のものがあるが、現在のところ、水銀整流器式がもっとも多く使用されている。最近まで水銀整流器式交流電気機関車は、一般に水銀整流器を単なる整流器として使用し、速度制御には電源変圧器の一次または二次電圧を調整する方式が採用されていたが、昭和34年ED-71形機関車で格子制御による速度制御に成功して以来、わが国で製作もしくは計画される水銀整流器式交流電気機関車のほとんどに格子制御方式が採用されている。

水銀整流器は、格子制御を行うことによってすぐれた性能を発揮するものであるから今後水銀整流器式交流電気機関車にはこの格子制御が採用されることが多いものと考えられる。

ここでは、日立製作所が研究開発し、ED71形機関車などに採用されている水銀整流器式交流電気機関車の格子制御装置とその応用例について述べる。

2. 格子制御の原理⁽¹⁾

水銀整流器の特性は複雑なものであるが、これを制御する立場より考えるならば、その特性が次のようなものであるということができよう。すなわち、

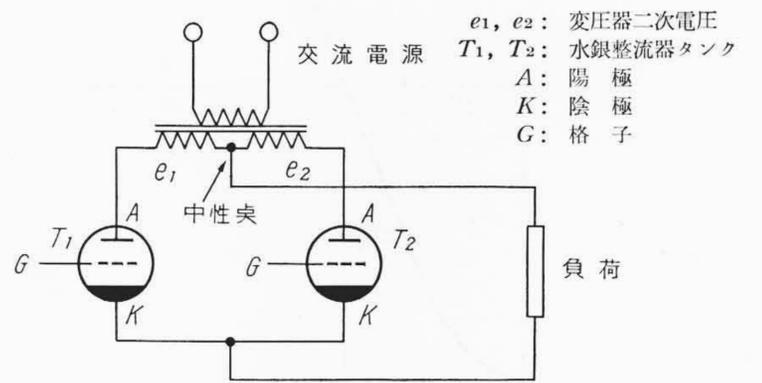
「水銀整流器はその陽極の電位が陰極に対して正であるとき、格子の電位を陰極に対して正にすると陽極陰極間はほぼ短絡された状態になる。そして、この短絡状態は陽極から陰極へ向かって流れる電流、すなわちアーク電流が零になるまで続き、かつ零にすることによってのみ短絡状態が止る」

したがって、第1図のような回路において負荷が理想的な誘導性（この条件は直流回路の直流インダクタンスを L 、回路の等価全抵抗を R 、電源周波数を f としたとき、 $L/R \gg 1/2f$ であることで、大体 $L/R \geq 5/f$ であれば満足される）である場合について考えてみる。

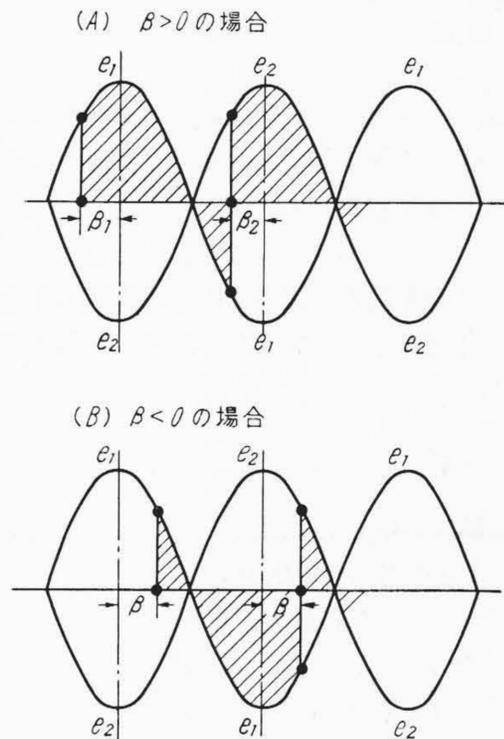
両者の整流タンクの格子が負電位の状態であり、負荷に起電力がなければ、整流タンク T_1 の陽極陰極間の電圧は第2図 e_1 のようになり、 T_2 の陽極陰極間の電圧は e_2 のようになる。

この状態で、 T_1 の格子を正弦波電圧 e_1 が最大値となる点から考えて β_1 だけ進んだ角度の点で正電位にすると T_1 はそこで短絡状態となり、その後負荷には電圧 e_1 が印加される。負荷は誘導性であるから e_1 が負の瞬時値になっても電流が持続され、負荷には瞬時値が負の電圧も加わる。

* 日立製作所日立研究所水戸分室



第1図 負荷に起電力がない場合の水銀整流器回路



第2図 水銀整流器の転流の様相

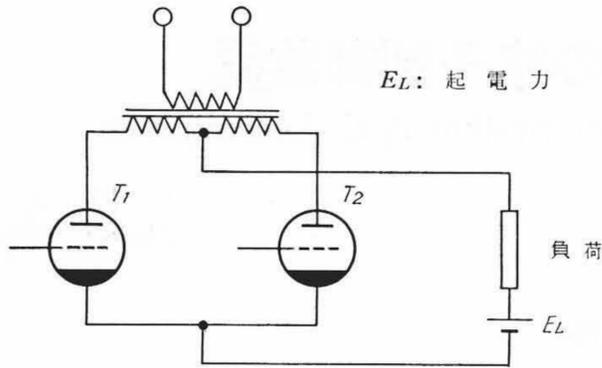
次に、 β_2 の角度でタンク T_2 の格子を正電位にすると T_2 は短絡状態になり、負荷には e_1 と e_2 の両方の電圧が与えられることになるが、

$$e_2 - e_1 > 0 \dots \dots \dots (1)$$

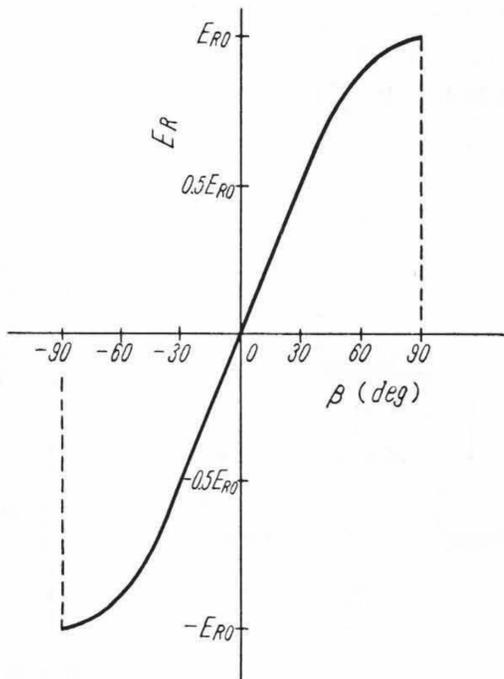
であるから、 T_2 から T_1 へ向かって電流が流れようとする。

そのため T_1 の電流は減少していき零となるが、その瞬間 T_1 の短絡状態は終る。その後は T_2 が通流し、以下同様に動作する(以上のことより、水銀整流器では陽極より陰極へ向かう方向しか電流が流れ得ないという説明もできる)。

$\beta < 0$ の状態では第2図(B)のようになり電圧が負の期間が長くなるので、 T_2 の格子を正にする前に T_1 の電流が0になり T_1 の短絡状態が終ってしまうので、このままでは動作が異なる。



第3図 負荷に起電力がある場合の水銀整流器回路



第4図 連続電流が流れている場合の水銀整流器の制御特性

しかし、第3図に示すように負荷に起電力 \$E_L\$ があり、かつその起電力の方向が図のようなときは、 $\beta < 0$ でも転流されるまで電流が流れ、前と同様な動作が行われる。すなわち、連続電流が流れているときは β の正負にかかわらず同様な転流が行われる。そして、 β の変化にともない水銀整流器の出力電圧の平均値が変化する。

いま、変圧器の電圧降下がないものとして、その出力電圧の平均値を求めると次のようになる。

$$E_R = \frac{E_0}{\pi} \int_{-(\pi-\beta)}^{\beta} \cos \beta \, d\beta = (2E_0/\pi) \sin \beta \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 E_0 : 変圧器二次電圧最大値
したがって、 $\beta = \pi/2$ のとき最大となり、

$$E_R = 2E_0/\pi \quad \dots \dots \dots (3)$$

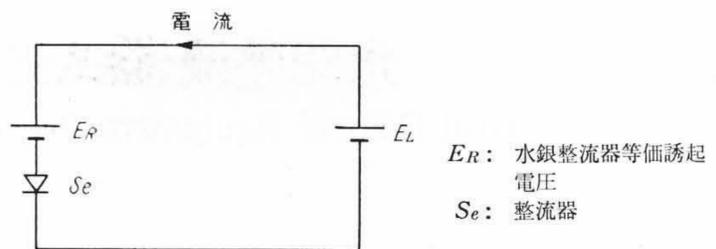
となる。このときの E_R を E_{R0} とすれば、

$$E_R = E_{R0} \sin \beta \quad \dots \dots \dots (4)$$

この E_R を水銀整流器の等価誘起電圧と呼び、多相の場合でも E_{R0} を $\beta = \pi/2$ の等価誘起電圧であるとすれば、(4)式の関係は2相の場合のみならず多相の場合においても成立する。そして、 $\sin \beta$ を格子率と呼び普通%で表わす。(また、 $\alpha = \pi/2 - \beta$ を格子制御遅れ角、 $\gamma = \pi/2 + \beta$ を格子制御進み角と呼ぶ。)

β を変化すれば(4)式にしたがって第4図に示すように E_R が変化する。 β が負のときは E_R も負になる。

ところで、水銀整流器に流れる電流はさきに述べた理由から、陽極より陰極へ向かう方向しか流れ得ないので、このときは等価的に回路が第5図のようになり、もしも負荷側にこのときの水銀整流器の等価誘起電圧に打ち勝って電流を流すような起電力があるときは、水銀整流器は負荷側より直流電力を受けて交流電源側に電力を送り



第5図 β が負で負荷に起動力があるときの等価回路

込む。すなわちインバータ回生制動を行うことになる。

このように、格子制御角 β を変化させることにより力行することができるのみならず回生制動を行うことも可能であり、しかも、この格子制御に要する電力は1タンクあたり数ワットに過ぎず、この電力で水銀整流器の出力をほとんど遅れなしに制御することができるので、動輪が空転した場合、格子制御によってその空転を小さく抑え粘着性能を向上させる制御を行うことなども可能となり、機関車の性能を著しく高めることができる。

3. 格子制御の問題点と日立格子制御装置

3.1 格子制御の問題点

上述のように格子制御を行うことにより水銀整流器式交流電気機関車は粘着性能を向上させることが可能となり、電圧調整用の変圧器やタップ切換器などが不要となるので機関車が軽量安価となり、さらに回生制動も行う場合には制輪子の摩耗、および摩耗鉄粉による機器の絶縁劣化が防がれ保守費が軽減する。

しかし、いっぽう、格子制御を行うと格子率が小さくなるにともない力率が悪くなり、電源電圧の波形のひずみが大きくなり、さらに逆弧、消弧、失弧などの水銀整流器の異常現象も生じやすくなる欠点があるが、これらは進相コンデンサと汜波器の使用によりある程度改善することが可能であり、また格子率の小さなときは起動時の場合のみで短時間であり、さらに水銀整流器の出力電圧も小さく、したがって電力消費量も小さな範囲であるからそれほど問題にならない。

それゆえ、格子制御を採用することが望ましい訳であるが、交流電気機関車では電源が単相であるため一般の静止レオナード装置や直流変電所などで使用されている回転磁界を利用した移相器あるいは多相環状接続された変圧器を利用した移相器を使用する訳にいかず、ツーロン回路や可飽和相互誘導形自動移相器などの自動移相器を使用しなければならない。

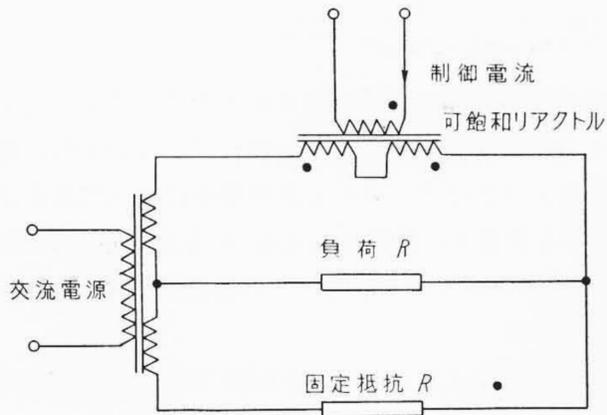
ところで、交流電気機関車では電源電圧が+10%~-20%もしくはそれ以上の範囲をひん繁に変動し、さらに電源電圧波形がかなりひずんでいるためこれに十分耐えて出力電圧の位相を常に正確に保ち、かつ全制御範囲をすべて移相しうる小形軽量で信頼性の高い自動移相器をうることは容易でない。

もしも、小形軽量でなく、また信頼性にとほしいものであるならば、格子制御方式が重量の大きな調整変圧器やタップ切換器を不要にするという大きな特長の一つを失い、また、自動移相器の出力電圧の位相が電源電圧の変動と波形のひずみにより大きく変化するものであるならば水銀整流器の出力も大きく変化するため電源の変動はいよいよ大きくなり安定な運転を行うことが不可能におちいる。このような点を満足する自動移相器が得られなかったことが、最近まで水銀整流器式交流電気機関車に格子制御がほとんど採用されなかった大きな理由の一つであると考えられる。

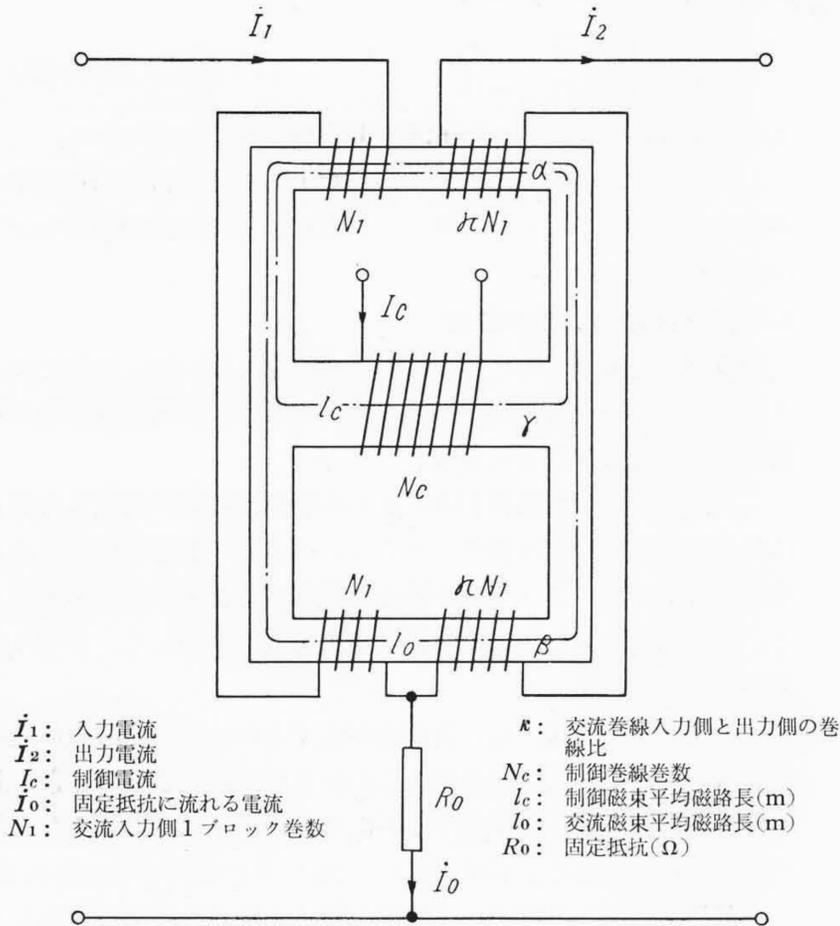
3.2 日立格子制御装置

3.2.1 可飽和相互誘導形自動移相器(APS)とその原理⁽²⁾⁽³⁾

現在、自動移相器としては可変インピーダンス素子に可飽和リアクトルを使用したツーロン回路がもっとも広く使用されてい



第6図 ツーロン回路



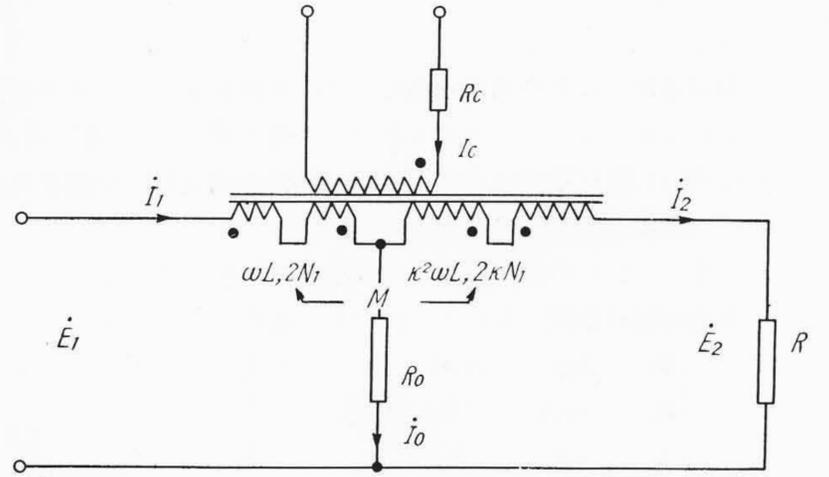
第7図 可飽和相互誘導形自動移相器

る。このツーロン回路は第6図に示すもので可飽和リアクトルのリアクタンスが制御電流の変化により0から ∞ まで変化すると出力電圧の位相角が0から -180 度まで変化するが(実際には可飽和リアクトルのリアクタンスは0にまで小さくすることができず、また ∞ にまで大きくなることができないので、移相範囲は 180 度より小さな値になる)、負荷抵抗 R が固定抵抗 R_0 に比べ十分大きく、理論的には R/R_0 が ∞ でないとき出力電圧の絶対値が移相とともに変化する。さらに、電源側に変圧器が必要であり、また、電源の高調波の影響を受けやすい欠点があるので、日立製作所ではこれらの欠点のない可飽和相互誘導形自動移相器を開発した⁽⁷⁾。

第7図がこの可飽和相互誘導形自動移相器で(この自動移相器を普通APSと略称している)、第8図がこの等価回路である。実際には負荷は飽和変圧器(ピーク波変圧器)であるがコンデンサで励磁電流を補償することにより近似的に抵抗と見なすことができる。

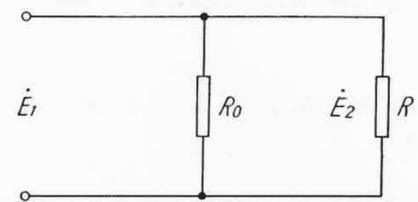
ここで、制御電流を変化すると一般の可飽和リアクトルと同様に交流巻線のリアクタンスが変化するが、交流巻線の一次側と二次側の間に相互誘導作用があり、それを利用している点異なる。

次に、この自動移相器の動作について説明する。この自動移相器の交流巻線のリアクタンス ωL は交流巻線に流れる電流(交流電流)によっては変化しないが、制御巻線に流れる電流(制御電流) I_c によって変化し、 I_c が十分に流れたときは鉄心が完全に飽

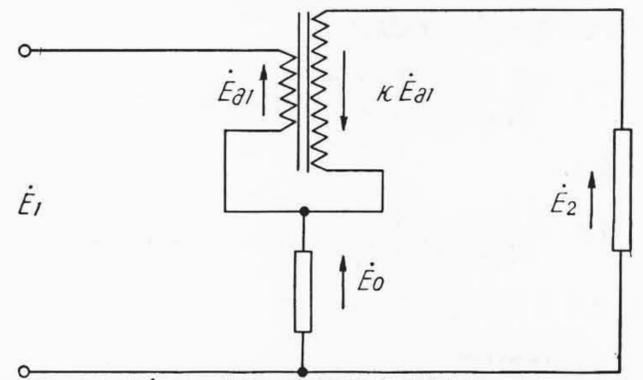


\dot{E}_1 : 入力電圧
 \dot{E}_2 : 出力電圧
 ω : 電源角周波数(rad/s)
 L : 交流巻線入力側インダクタンス(H)
 M : 相互インダクタンス(H)
 R : 負荷抵抗(Ω)
 R_c : 制御回路抵抗(Ω)
 R_0 : 固定抵抗(Ω)
 ほかの記号は第7図参照

第8図 可飽和相互誘導形自動移相器の等価回路

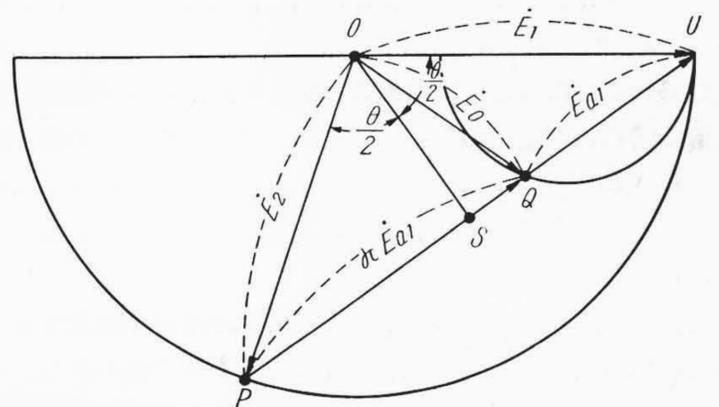


第9図 制御電流が十分流れたときの等価回路



\dot{E}_{a1} : 交流巻線一次側にかかる電圧
 \dot{E}_0 : 固定抵抗にかかる電圧

第10図 制御電流が0のときの等価回路



第11図 可飽和相互誘導形自動移相器の電圧ベクトル図

和して ωL が0になり、 I_c が0のときは鉄心が不飽和となって ωL が ∞ になるものとする。

このようにすると、 I_c が十分に流れたときは第9図のような等価回路となるので入力電圧 \dot{E}_1 がそのまま出力側にあらわれ、

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、出力電圧の位相は入力電圧と同相になる。

I_c が0のときは ωL が ∞ になるので自動移相器は理想変圧器と同様になり、第10図のような等価回路となる。そして、自動移相器の二次巻線に生ずる起電力の方向は図に示す方向となっているので、

$$\dot{E}_2 = -\kappa \dot{E}_{a1} + \dot{E}_0 \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 \dot{E}_{a1} : 交流巻線一次側にかかる電圧

\dot{E}_0 : 固定抵抗にかかる電圧

となり、 κ と R_0 を適当に選ぶことにより

$$\dot{E}_2 = -\dot{E}_1 \dots\dots\dots(7)$$

にすることができる。

制御電流が任意の適当な値のときは交流巻線のリアクタンスもある有限値となるが、そのときの入力電圧 \dot{E}_1 と出力電圧 \dot{E}_2 の間には第11図に示すようなベクトル関係が成立し、位相差角 θ は $0 \sim -180$ 度の間のある値となる。

いま、これらの動作について理論的に解析してみる。

交流回路は線型であるとしたから、次の式が成立する。

$$\begin{pmatrix} R_0 & j\omega L & j\omega M \\ R_0 & -j\omega M & -(R+j\kappa^2\omega L) \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E}_1 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{E}_2 \end{pmatrix} \dots\dots(8)$$

これを解き、入力電圧 \dot{E}_1 と出力電圧 \dot{E}_2 の関係を求めると次のようになる。

$$\dot{E}_2 = \sqrt{\frac{\alpha^2 + \kappa^2 x^2}{\alpha^2 + x^2 \{ \alpha + (1 + \kappa)^2 \}^2}} \dot{E}_1 / \theta \dots\dots(9)$$

ここに

$$\theta = -\tan^{-1} \kappa x - \tan^{-1} x \{ 1 + (1 + \kappa)^2 / \alpha \} \dots\dots(10)$$

$$\alpha = R / R_0 \dots\dots(11)$$

$$x = \omega L / R_0 \dots\dots(12)$$

したがって、制御電流 I_0 を変化することにより ωL を変化したときの出力電圧 \dot{E}_2 の軌跡は

$$\dot{\zeta} = \frac{\alpha(1-\kappa) + (1+\kappa)^2}{2\{\alpha + (1+\kappa)^2\}} \dot{E}_1 \dots\dots(13)$$

を中心とし、

$$\lambda = \frac{(1+\kappa)(\alpha+1+\kappa)}{2\{\alpha + (1+\kappa)^2\}} \dot{E}_1 \dots\dots(14)$$

を半径とする半円を画く。そして、

$$\alpha = \frac{(\kappa+1)^2}{\kappa-1} \dots\dots(15)$$

の条件が成立するときは、

$$\dot{\zeta} = 0 \dots\dots(16)$$

$$\lambda = \dot{E}_1 \dots\dots(17)$$

となるので、このときは移相のいかんにかかわらず出力電圧の絶対値は常に入力電圧のそれに等しい。すなわち、このときは

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 / \theta \dots\dots(18)$$

$$\text{ここに } \theta = -2 \tan^{-1}(\kappa x) \dots\dots(19)$$

となる。

ところで、 κ と α との間上記(15)式の関係が成立するときは出力電圧の絶対値が常に E_1 に等しくなるのであるから、これを満足する κ と α の組合せは無限にあるが、この移相器の効率について検討し、最良の効率を与える κ と α を求めてそれを使用することが望ましい。

この移相器の入力を P_1 とし、出力を P_2 とすれば、効率 η は次のようになる。

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \dots\dots(20)$$

この移相器の理論的な入力、固定抵抗に消費される電力 P_0 と出力 P_2 の和であるから

$$P_1 = P_0 + P_2 \dots\dots(21)$$

出力電圧 E_2 の絶対値は常に入力電圧 \dot{E}_1 のそれに等しいので、負荷抵抗 R にかかる電圧の絶対値は \dot{E}_1 であり、固定抵抗 R_0 にかかる電圧の絶対値 \dot{E}_0 は第11図から

$$\begin{aligned} \dot{E}_0^2 &= OS^2 + SQ^2 \\ &= \dot{E}_1^2 \{ (\kappa-1)^2 + 4\kappa \cos^2(\theta/2) \} / (\kappa+1)^2 \dots\dots(22) \end{aligned}$$

これらから(20)式は次のようになる。

$$\eta = \frac{\kappa-1}{\kappa(\kappa+1+2\cos\theta)} \dots\dots(23)$$

この移相器の効率は位相差角 θ が大きくなるにしたがってよくなる。 θ の小なる値を使用しない訳にはゆかないから、電源の容量と移相器の大きさは θ が0のときの効率によって決定される。

θ が0のとき最大の効率を与える κ を求めると $\kappa=3$ で、そのときの α は8である。そして、この場合は効率が11%から33%の間を変化する。

さきに述べた第6図のツーロン回路で出力電圧の絶対値が常に一定になるよう R_0 を小さく、

$$R/R_0 \doteq \infty \dots\dots(24)$$

とした場合の効率を同様に求めると、

$$\left. \begin{aligned} \theta \neq -180^\circ \text{ で } \eta &= 0 \\ \theta = -180^\circ \text{ で } \eta &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(25)$$

となり、 -180 度を除く全移相範囲で効率が常に零となる。

したがって、 $\kappa=3$ 、 $\alpha=8$ に選んだ場合のこの移相器の効率は非常によいということができ、この自動移相器では普通そのように選ばれる。

3.2.2 移相特性と電圧影響

交流回路が線型でない上記の式が成立しないが、またそのようなときでない電源が正弦波でも出力波形が非正弦波となり移相の目的が達せられなくなる。

たとえば、この自動移相器の鉄心に磁気増幅器に使用した場合に都合のよい理想的な矩形ヒステリシス曲線の鉄心を使用すると交流巻線のインダクタンスが鉄心が飽和するまでは ∞ で飽和すると、0の二つの値しかとらないので出力波形が著しく、ひずみ使用が不可能となる。

このように、交流回路に高調波が生ずるのは鉄心の非線形性によるもので、たとえば交流巻線にかかる電圧が正弦波のときこれに流れる電流に高調波が生ずるが、それが無視できるようなときでない使用することができない。次に、その条件を求めてみる。

交流巻線にかかる電圧を正弦波とすると鉄心内の磁束密度も正弦波となり、

$$B_a \sin \omega t$$

ここに、 B_a : 交流磁束密度最大値 ($\omega b/m^2$) とおくことができる。

このようにすると自動移相器の構造図第7図から制御巻線の巻かれている部分 γ の断面積は交流巻線の巻かれている部分 α と β の断面積の2倍であるので、 α 部分の磁束密度 B_α および β 部分の磁束密度 B_β は次のようになる。

$$B_\alpha = B_a \sin \omega t + B_c \dots\dots(26)$$

$$B_\beta = B_a \sin \omega t - B_c \dots\dots(27)$$

ここに、 B_c : 制御直流磁束密度

すなわち γ 部分の磁束密度 ($\omega b/m^2$)

そして、鉄心の磁化曲線を次の式

$$H = U \sin uB \dots\dots(28)$$

ここに、 H : 磁界の強さ (AT/m)、 B : 磁束密度 ($\omega b/m^2$)

U (AT/m)、 u ($m^2/\omega b$) は鉄心の性質により定まる定数で近似し、(矩形ヒステリシス曲線の鉄心はこの式で近似することが困難であるが、またそのような鉄心は前に述べた理由から自動移相器に使用することができない) α β 部分に生ずる磁界の強さを H_α 、 H_β とし、交流巻線によって作られる磁界の強さを H_A 、制御巻線によって作られる磁界の強さを H_C とすれば、

$$H_\alpha = U \sinh u(B_a \sin \omega t + B_c) = H_A + H_C \dots\dots(29)$$

$$H_\beta = U \sinh u(B_a \sin \omega t - B_c) = H_A - H_C \dots\dots(30)$$

したがって、

$$H_A = (H_\alpha + H_\beta) / 2$$

$$= U(\sinh uB_\alpha + \sinh uB_\beta) / 2$$

$$= H_1 \sin \omega t + H_3 \sin 3\omega t + H_5 \sin 5\omega t + \dots \quad (31)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= -2jUJ_1(juB_a) \cosh uB_c \\ H_3 &= -2jUJ_3(juB_a) \cosh uB_c \\ H_5 &= -2jUJ_5(juB_a) \cosh uB_c \end{aligned} \right\} \dots \quad (32)$$

電流と磁界の強さの間には比例関係が成立するから、交流巻線に流れる電流に奇数高調波を生ずることになる。

ここで、基本波と高調波分の比を δ とすれば

$$\delta = \frac{\sqrt{H_3^2 + H_5^2 + \dots}}{\sqrt{H_1^2}}$$

$$= \frac{\sqrt{J_3^2(juB_a) + J_5^2(juB_a) + \dots}}{\sqrt{J_1^2(juB_a)}} \quad (33)$$

となる。 uB_a が小さく、大体 5 以下のときは分子の第 2 項以下が省略でき、

$$\delta = \frac{J_3(juB_a)}{J_1(juB_a)} \quad (34)$$

とすることができる。これからどの程度まで高調波分を許しうるかで範囲を求めることができる。 $uB_a = 3$ のときは δ が 0.25、すなわち 25% 高調波分が含まれることになる。

このように、 uB_a が小さなところでは高調波分を無視することができ、交流回路は線形であると考えられる。

そして、 H_A と H_C を次のようにおくことができる。

$$H_A \doteq H_1 \sin \omega t$$

$$= -2jUJ_1(juB_a) \cosh uB_c \cdot \sin \omega t \quad (35)$$

$$H_C \doteq UJ_0(juB_a) \sinh uB_c \quad (36)$$

ところで、第 7 図から交流入力電流を \dot{I}_1 、出力電流を \dot{I}_2 、交流磁束平均磁路長を l_0 とすれば、

$$H_A = \frac{2\sqrt{2}N_1 |(\dot{I}_1 + \kappa \dot{I}_2)|}{l_0} \sin \omega t \quad (37)$$

となる。また、交流入力側巻線にかかる電圧を \dot{E}_{a1} とすれば、 $M = \kappa L$ であることを考慮することにより、

$$\dot{E}_{a1} = j\omega L(\dot{I}_1 + \kappa \dot{I}_2) \quad (38)$$

となり、さらに第 11 図から、

$$\dot{E}_{a1} = \{2E_1 / (1 + \kappa)\} |\sin(\theta/2)| \quad (39)$$

なる関係が得られるので、これらから次の式が得られる。

$$\frac{2\sqrt{2}N_1 \dot{E}_1 |\sin(\theta/2)|}{l_0 \omega L (1 + \kappa)}$$

$$= -jUJ_1(juB_a) \sqrt{1 + \left\{ \frac{H_C}{UJ_0(juB_a)} \right\}^2} \quad (40)$$

さらに、 ωL は (19) 式から、

$$\omega L = (R_0 / \kappa) \tan(-\theta/2) \quad (41)$$

であり、交流磁束密度最大値 B_a は、第 7 図で鉄心の α および β 部分の断面積を A とすると、

$$B_a = \dot{E}_{a1} / \sqrt{2} N_1 A \omega \quad (42)$$

また、 H_C は制御電流を I_c 、制御巻線巻数を N_c 、制御磁束平均磁路長を l_c とすれば、

$$H_C = N_c I_c / l_c \quad (43)$$

となるので、(40) 式は次のように変形される。

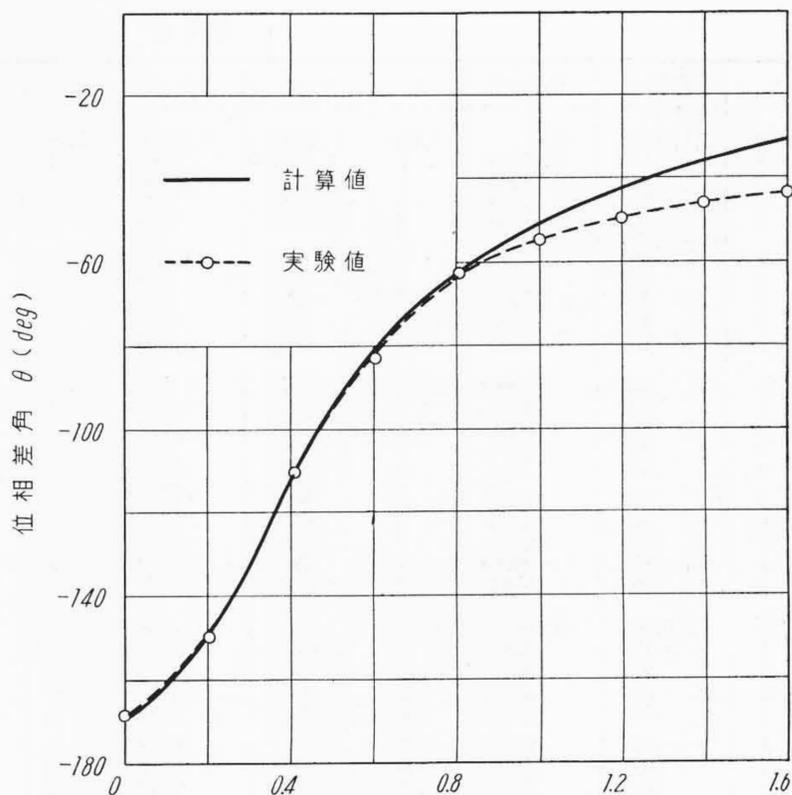
$$\gamma = J_0(j\varepsilon) \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{\lambda^2 J_1^2(j\varepsilon)} - 1} \quad (44)$$

ここに、

$$\gamma = (N_c / l_c U) \cdot I_c \quad (45)$$

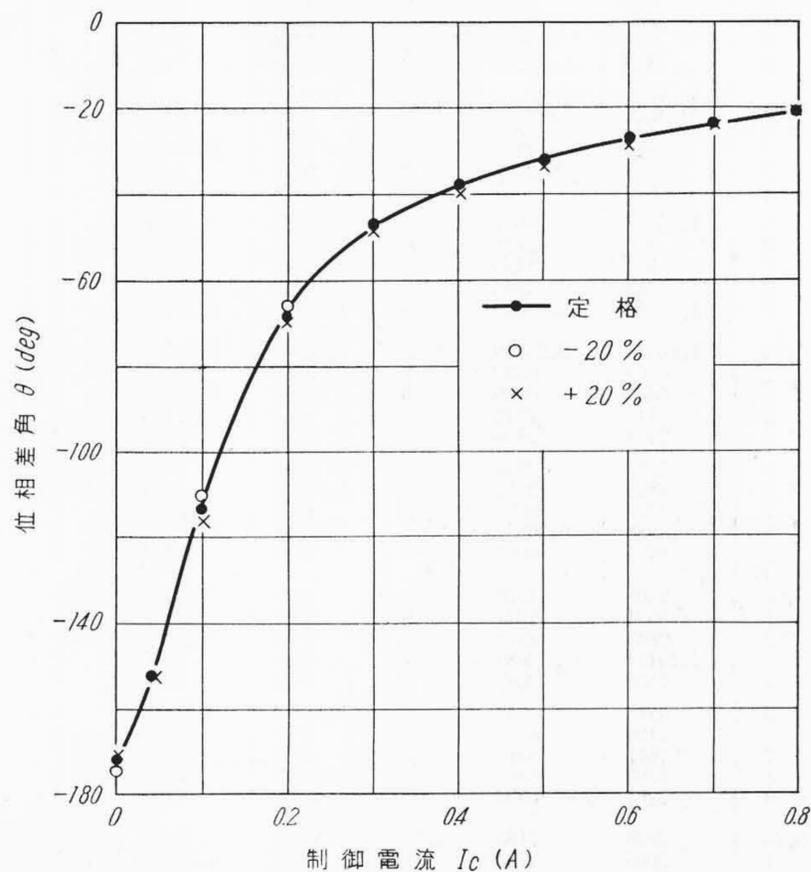
$$\varepsilon = uB_a$$

$$= \{\sqrt{2} u \dot{E}_1 / (1 + \kappa) N_1 \omega A\} |\sin(\theta/2)| \quad (46)$$



第 12 図 可飽和相互誘導形自動移相器の移相特性

$U = 47 \text{ AT/m}$ $u = 2.6 \text{ m}^2/\text{wb}$ $N_c = 3,200 \text{ T}$ $N_1 = 300 \text{ T}$
 $l_c = 0.43 \text{ m}$ $l_0 = 0.6 \text{ m}$ $A = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ $E_1 = 240 \text{ V}$
 $\kappa = 3$ $R_0 = 50 \Omega$ $R = 400 \Omega$ $\omega = 314 \text{ rad/s}$



第 13 図 ε の最大値を 3 とした自動移相器の移相特性

$$\lambda = (uUl_0R_0/2\kappa N_1^2\omega A) \tan(-\theta/2) \quad (47)$$

なお、 $J_0(j\varepsilon)$ 、 $-jJ_1(j\varepsilon)$ を変形ベッセル関数ともいい、 $I_0(\varepsilon)$ 、 $I_1(\varepsilon)$ の記号を使用することがある。第 1 表はこの関数表である。

第 12 図はこの式による計算値と実験結果の比較でよく一致していることが知られる。

電源電圧は \dot{E}_1 であるから、電源電圧が変化したときは上式で ε 、すなわち uB_a が変化することになる。

ところで、 ε の小さなところでは、

$$J_0(j\varepsilon) = 1 + \frac{\varepsilon^2}{2^2(1!)^2} + \frac{\varepsilon^4}{2^4(2!)^2} + \frac{\varepsilon^6}{2^6(3!)^2} + \dots$$

$$\doteq 1 \quad (48)$$

$$-jJ_1(j\varepsilon) = \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon^3}{2^3 1! 2!} + \frac{\varepsilon^5}{2^5 2! 3!} + \frac{\varepsilon^7}{2^7 3! 4!} + \dots$$

$$\doteq \varepsilon/2 \quad (49)$$

第 1 表 変 形 ベ ッ セ ル 関 数 表

ϵ	$J_0(j\epsilon)$	$-jJ_1(j\epsilon)$												
0,00	1,00000	0	1,00	1,26607	0,56516	2,00	2,27959	1,59064	3,00	4,88079	3,95337	4,00	11,30192	9,75947
1	003	0,00500	1	7175	7219	1	9557	1,60554	1	92050	98916	1	39996	84849
2	010	1000	2	7751	7926	2	2,31170	2057	2	96058	4,02528	2	49889	93835
3	023	1500	3	8334	8638	3	2798	3573	3	5,00101	06172	3	59873	10,02903
4	040	2000	4	8924	9354	4	4441	5102	4	04181	09849	4	69948	12055
5	063	2501	5	9521	0,60075	5	6100	6643	5	08298	13559	5	80114	21292
6	090	3001	6	1,30125	0801	6	7774	8198	6	12453	17303	6	90374	30614
7	123	3502	7	0737	1531	7	9464	9766	7	16644	21081	7	12,00727	40023
8	160	4003	8	1356	2265	8	2,41169	1,71347	8	20874	24893	8	11175	49519
9	203	4505	9	1982	3605	9	2891	2942	9	25142	28739	9	21718	59102
0,10	250	5006	1,10	2616	3749	2,10	4628	4550	3,10	29449	32621	4,10	32357	68774
1	303	5508	1	3257	4498	1	6382	6172	1	33795	36537	1	43093	78536
2	360	6011	2	3906	5252	2	8152	7808	2	38180	40489	2	53928	88388
3	423	6514	3	4562	6011	3	9938	9458	3	42605	44477	3	64862	98331
4	491	7017	4	5226	6775	4	2,51741	1,81122	4	47070	48501	4	75895	11,08367
5	563	7521	5	5898	7544	5	3561	2800	5	51575	52562	5	87029	18495
6	641	8026	6	6577	8318	6	5397	4492	6	56121	56660	6	98265	28718
7	724	8531	7	7264	9998	7	7250	6199	7	60708	60794	7	13,09604	39034
8	812	9036	8	7959	9882	8	9121	7921	8	65337	64967	8	21046	49447
9	905	9543	9	8662	0,70672	9	2,61009	9658	9	70008	69177	9	32593	59956
0,20	1,01003	0,10050	1,20	9373	1468	2,20	2914	1,91409	3,20	74721	73425	4,20	44246	70562
1	106	0558	1	1,40091	2269	1	4837	3176	1	79476	77713	1	56005	81267
2	214	1067	2	0818	3075	2	6778	4958	2	84275	82039	2	67871	92071
3	327	1576	3	1553	3887	3	8736	6755	3	89117	86404	3	79846	12,02975
4	445	2087	4	2296	4705	4	2,70713	8568	4	94003	90809	4	91931	13980
5	569	2598	5	3047	5528	5	2708	2,00397	5	98934	95255	5	14,04126	25087
6	697	3110	6	3806	6357	6	4721	2241	6	6,03909	99740	6	16433	36298
7	831	3623	7	4574	7192	7	6753	4101	7	08929	5,04267	7	28853	47612
8	970	4138	8	5350	8033	8	8803	5978	8	13994	08835	8	41386	59032
9	1,02114	4653	9	6135	8880	9	2,80872	7871	9	19105	13444	9	54034	70557
0,30	263	5169	1,30	6928	9733	2,30	2961	9780	3,30	24263	18096	4,30	66797	82189
1	417	5687	1	7729	0,80592	1	5068	2,11706	1	29467	22790	1	79678	93930
2	576	6206	2	8540	1457	2	7195	3648	2	34719	27527	2	92676	13,05779
3	741	6726	3	9359	2329	3	9341	5608	3	40018	32306	3	15,05794	17738
4	911	7247	4	1,50186	3206	4	2,91507	7585	4	45365	37130	4	19031	29809
5	1,03086	7769	5	1023	4090	5	3693	9578	5	50761	41998	5	32390	41991
6	266	8293	6	1868	4981	6	5899	2,21590	6	56205	46910	6	45872	54287
7	452	8818	7	2722	5878	7	8125	3619	7	61699	51866	7	59476	66696
8	643	9345	8	3586	6782	8	3,00371	5665	8	67243	56868	8	73206	79222
9	839	9873	9	4458	7692	9	2638	7730	9	72837	61916	9	87061	91863
0,40	1,04040	0,20403	1,40	5340	8609	2,40	4926	9812	3,40	78481	67010	4,40	16,01044	14,04622
1	247	0934	1	6230	9533	1	7234	2,31913	1	84177	72151	1	15154	17500
2	459	1466	2	7130	0,90464	2	9564	4033	2	89924	77338	2	29394	30497
3	676	2001	3	8040	1402	3	3,11915	6170	3	95724	82573	3	43764	43615
4	899	2537	4	8958	2346	4	4287	8327	4	7,01576	87856	4	58267	56855
5	1,05127	3074	5	9886	3298	5	6682	2,40503	5	07481	93187	5	72902	70218
6	360	3614	6	1,60824	4257	6	9098	2698	6	13440	98567	6	87671	83706
7	599	4155	7	1772	5223	7	3,21536	4912	7	19453	6,03996	7	17,02576	97319
8	843	4698	8	2729	6197	8	3996	7145	8	25520	09475	8	17618	15,11058
9	1,06093	0,25243	9	1,63696	0,97178	9	3,26479	2,49398	9	7,31642	6,15004	9	17,32798	15,24926
0,50	1,06348	0,25789	1,50	1,64672	0,98167	2,50	3,28984	2,51672	3,50	7,37820	6,20583	4,50	17,48117	15,38922
1	6609	6338	1	5659	9163	1	3,31512	3965	1	44054	26214	1	63577	53049
2	6875	6889	2	6656	1,00166	2	4063	6278	2	50345	31897	2	79179	67307
3	7147	7441	3	7662	1178	3	6638	8612	3	56692	37631	3	94924	81698
4	7424	7996	4	8679	2197	4	9236	2,60967	4	63098	43418	4	18,10813	96223
5	7707	8553	5	9706	3224	5	3,41857	3342	5	69561	49258	5	26848	16,10883
6	7995	9112	6	1,70744	4259	6	4503	5739	6	76083	55152	6	43031	25679
7	8289	9673	7	1791	5302	7	7172	8156	7	82664	61099	7	59362	40614
8	8588	0,30237	8	2850	6354	8	9866	2,70595	8	89305	67101	8	75844	55687
9	8894	0802	9	3919	7413	9	3,52584	3056	9	96006	73159	9	92477	70901
0,60	9205	1370	1,60	4998	8481	2,60	5327	5538	3,60	8,02768	79271	4,60	19,09262	86256
1	9521	1941	1	6088	9557	1	8095	8043	1	09592	85440	1	26202	17,01755
2	9843	2514	2	7189	1,10642	2	3,60888	2,80570	2	16477	91666	2	43298	17398
3	1,10171	3089	3	8301	1735	3	3706	3119	3	23425	97949	3	60551	33189
4	0505	3667	4	9424	2837	4	6550	5691	4	30437	77962	4	77962	49123
5	0845	4247	5	1,80558	3948	5	9420	8286	5	37511	10688	5	95534	65207
6	1190	4830	6	1703	5067	6	3,72316	2,90904	6	44651	17145	6	20,13267	81442
7	1541	5415	7	2859	6195	7	75238	3545	7	51855	23662	7	31163	97827
8	1898	6003	8	4027	7333	8	78187	6210	8	59124	30239	8	49224	18,14366
9	2261	6594	9	5206	8479	9	81163	8898	9	66460	36876	9	67451	31059
0,70	2630	7188	1,70	6396	9635	2,70	84165	3,01611	3,70	73862	43575	4,70	85846	47907
1	3005	7784	1	7599	1,20800	1	87195	4347	1	81331	50334	1	21,04410	64913
2	3386	8384	2	8813	1974	2	90252	7109	2	88869	57156	2	23144	82077
3	3773	8986	3	1,90038	3158	3	93337	9894	3	96475	64041	3	42052	99401
4	4166	9591	4	1276	4351	4	96450	3,12705	4	9,04150	70989	4	61133	19,16887
5	4565	0,40199	5	2525	5554	5	99591	15541	5	11895	78002	5	80390	34536
6	4970	0810	6	3787	6766	6	4,02761	18402	6	19710	85078	6	99824	52350
7	5381	1425	7	5061	7989	7	05959	21289	7	27596	92220	7	22,19437	70330
8	5798	2042	8	6347	9221	8	09187	24202	8	35555	99428	8	39231	88478
9	6222	2663	9	7645	1,30464	9	12444	27140	9	43585	8,06701	9	59208	20,06795
0,80	6651	3286	1,80	8956	1717	2,80	15730	30106	3,80	51689	14042	4,80	79368	25283
1	7087	3914	1	2,00279	2980	1	19046	33097	1	59866	21451	1	99714	43944
2	7530	4544	2	1616	4253	2	22392	36116	2	68118	28928	2	23,20247	62780
3	7978	5178	3	2965	5537	3	25768	39161	3	76445	36474	3	40970	81791
4	8433	5815	4	4326	6831	4	29175	42234	4	84848	44089	4	61884	21,00979
5	8895	6456	5	5701	8136	5	32613	45335	5	93327	51775	5	82990	20347
6	9362	7100	6	7089	9452	6	36082	48463	6	10,01883	59531	6	24,04291	39886
7	9837	7748	7	8490	1,40778	7	39582	51620	7	10518	67359	7	25789	59627
8	1,20317	8399	8	9905	2116	8	43114	5						

であるので、(44)式は

$$r \doteq \sqrt{\frac{4}{\lambda^2} - 1} \dots\dots\dots (50)$$

となり ε には無関係、したがって電源電圧に無関係になる。それゆえ、 ε を小さく選んで設計した自動移相器は電源電圧の影響をほとんど受けない。第13図に ε の最大値を3に選んで設計した自動移相器の電源電圧の変化に対する移相特性の変化を示す。

3.2.3 時定数

この自動移相器を含め磁気的自動移相器の時間遅れは、可飽和鉄心の飽和に要する時間によって生ずる。したがって、この自動移相器で制御巻線が1個であれば、制御磁束の変化を妨げる電流がほかの巻線に流れないので、この自動移相器の時定数は制御電流の時定数となる。

制御巻線のインダクタンスは可飽和リアクトルであるから、もちろん一定でないが、微小動作範囲であればほぼ一定と見なすことができる。

位相差角が θ_0 のとき、交流巻線のインダクタンスを $L(\theta_0)$ とすれば(41)式から、

$$L(\theta_0) = -\frac{R_0}{\omega\kappa} \tan\left(-\frac{\theta_0}{2}\right) \dots\dots\dots (51)$$

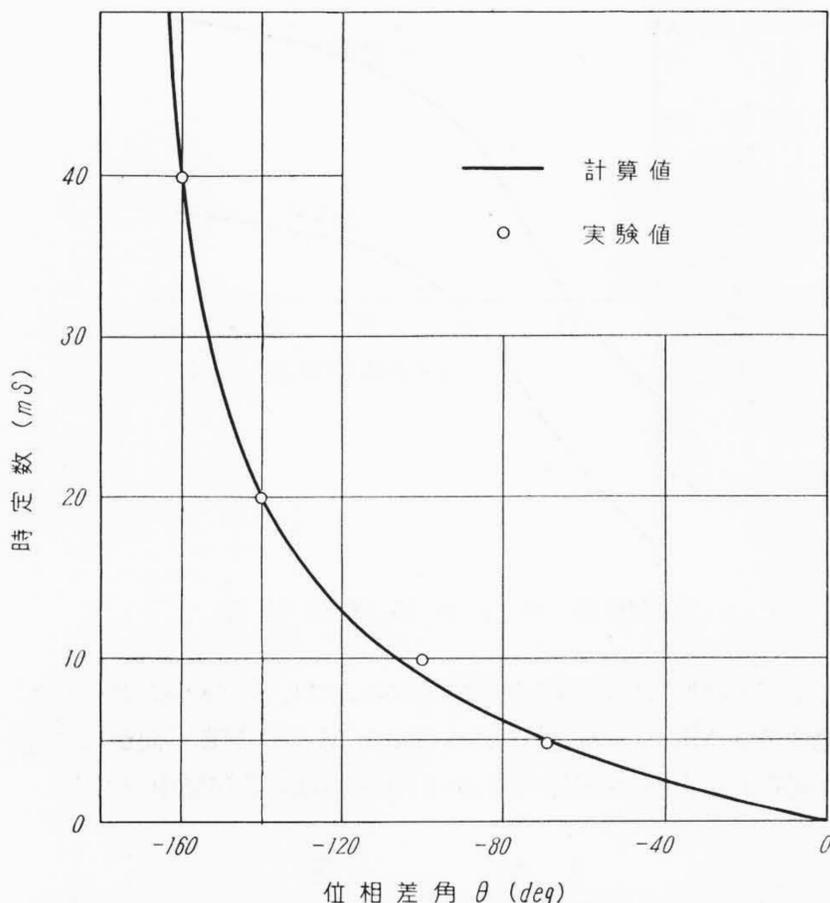
となるから、そのときの制御巻線のインダクタンス $L_C(\theta_0)$ は、制御磁束の通る断面積が交流磁束を通る断面積の2倍であることを考慮し、

$$\begin{aligned} L_C(\theta_0) &= \frac{N_C^2}{(2N_1)^2} \cdot \frac{l_0}{l_C} \cdot 2L(\theta_0) \\ &= \frac{R_0}{2\kappa\omega} \left(\frac{N_C^2 l_0}{N_1^2 l_C}\right) \cdot \tan\left(-\frac{\theta_0}{2}\right) \dots\dots\dots (52) \end{aligned}$$

ゆえに、ある位相差角 θ_0 の近傍における微小動作範囲時定数 $T_C(\theta_0)$ は、制御回路の抵抗を R_C とすると次のようになる。

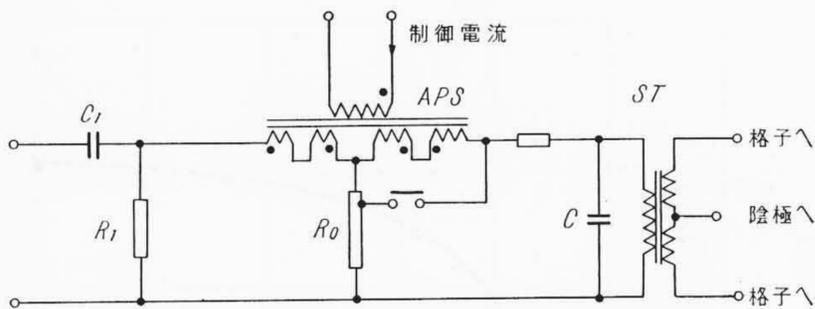
$$T_C(\theta_0) = \frac{R_0}{2\kappa\omega R_C} \left(\frac{N_C^2 l_0}{N_1^2 l_C}\right) \tan\left(-\frac{\theta_0}{2}\right) \dots\dots\dots (53)$$

第14図が計算値と実験値の比較で、よく一致していることが知られる。

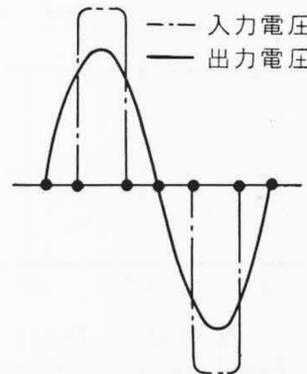


$\kappa=3$ $R_0=80\Omega$ $\omega=314\text{ rad/s}$ $N_C=1,000\text{ T}$ $N_1=400\text{ T}$
 $l_0/l_C=1.4$ (時定数は微小動作範囲で測定したもの)

第14図 可飽和相互誘導形自動移相器の時定数



C_1 R_1 : 進相回路 APS: 自動移相器
 ST : 飽和変圧器 C : 飽和変圧器励磁電流補償用コンデンサ
 第15図 交流電気機関車用水銀整流器の格子制御装置



第16図 飽和変圧器波形

3.2.4 交流電気機関車用格子制御装置⁽⁴⁾

第15図が上記の自動移相器を使用し、ED71形交流電気機関車用水銀整流器の格子制御のために開発した装置を示す。

ここで、 C_1R_1 は固定移相回路で、これにより進相された電圧を可飽和相互誘導形自動移相器(APS)に与える。APSによって位相を調整された電圧は飽和変圧器でせん頭波に変換され水銀整流器の格子に与えられる。

この回路の電源は機関車の補機電源と共用であるので、電圧変動は架線電圧よりもさらに大きく、前にも述べたように+10%~-20%もしくはそれ以上の範囲をひん繁に変動している。したがって、APSはこの電圧変動に耐えるよう一般の目的のものに比較して $\varepsilon(=uB_a)$ を小さくとり、交流巻線のリアクタンスが交流電源電圧の変化によってほとんど変化しないようにした。

このようにすると、APSは交流電圧に対して線形のリアクタンスとなり、これが飽和変圧器とコンデンサの共振回路の一次側に入っているので過渡および定電圧作用を行うことができる。

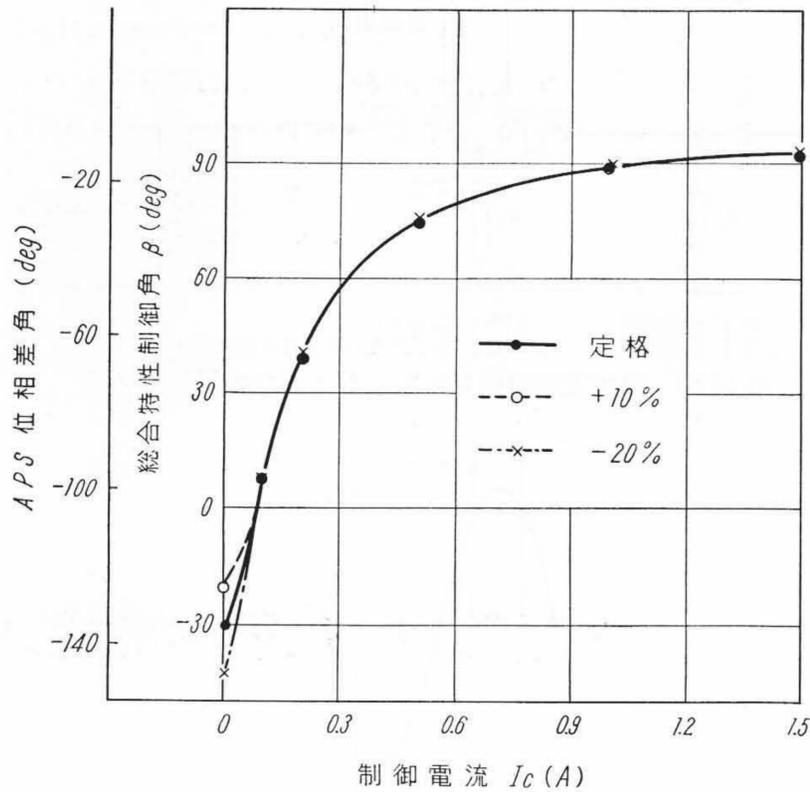
C_1R_1 の進相回路を使用したのはAPSの制御電流が最大になっても鉄心が完全に飽和しないため-20度程度の遅れが残り、さらに飽和変圧器のせん頭波電圧は入力電圧よりも第16図に示すように40度程度遅れるので、これを補償するためのものである。

なお、ED71形機関車では格子制御の外にタップ切換制御も併用しているが、タップ切換制御の場合には格子制御が行われぬようAPSの交流巻線の一部を抵抗を通して短絡するようにしている。

第17図がこの格子回路の実験結果で、移相範囲は約115度以上であり、制御角 β が0~90度の範囲では+10%~-20%の電源電圧の変化に対して位相角の変化は±1度程度の範囲に納まっている。

β が負の範囲では電圧影響が大きくなるが、ED71形機関車ではインバータ回生制動を行わないので、 β が負の範囲は限界電流の範囲内となり問題とならない。

なお、このようにAPSの位相差角の大きなところで電源電圧の影響が大きくなるのは(46)式から明らかなように、 $\varepsilon(=uB_a)$ が位相差角 θ が大きくなると大きくなるためである。したがって、 θ の大きなところでも電圧影響を小さくするには ε の最大値を小さく設計したもの(第13図)を使用すればよいが、重量が多少大



第17図 ED 71 形機関車用格子制御装置の移相特性

きくなる。

4. 水銀整流器式交流電気機関車における格子制御の応用

4.1 粘着性能改善のための制御⁽⁵⁾

粘着性能は機関車にとって最も重要な性能の一つである。水銀整流器式交流電気機関車は粘着性能がほかの機関車に比べすぐれているが、この性能をさらに向上させるため、ED 71形機関車の試作車 ED 711 では前述の格子制御装置を使用したバーニヤ制御方式が採用され、量産車 (ED 714~ED 7144) ではさらに空転を小さく押えるため、前述の格子制御装置と磁気増幅器を使用することにより電動機の端子電圧を一定に制御する電圧制御が行われている。

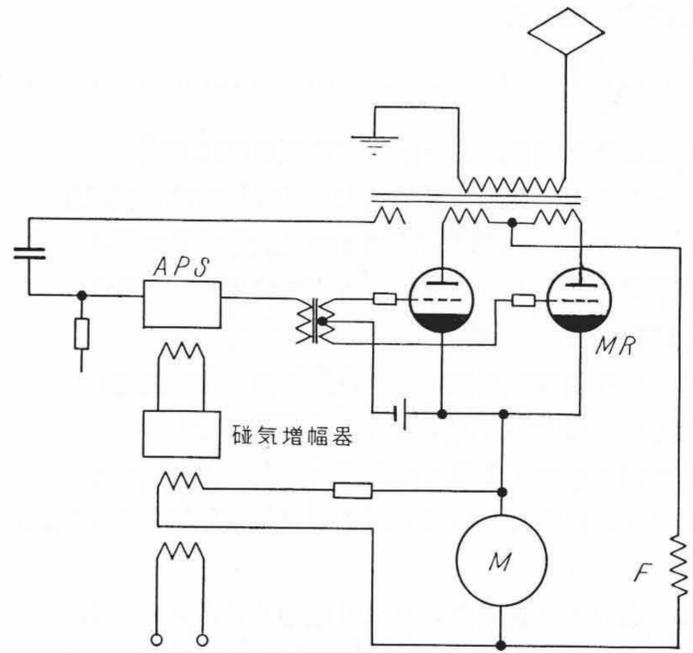
第18図がこの装置の概略図である。この装置は各動輪に独立して4組ある。

空転して電動機の端子電圧が増加すると磁気増幅器の出力が減少し水銀整流器の格子を絞る、電圧を下げて空転を押えるものである。

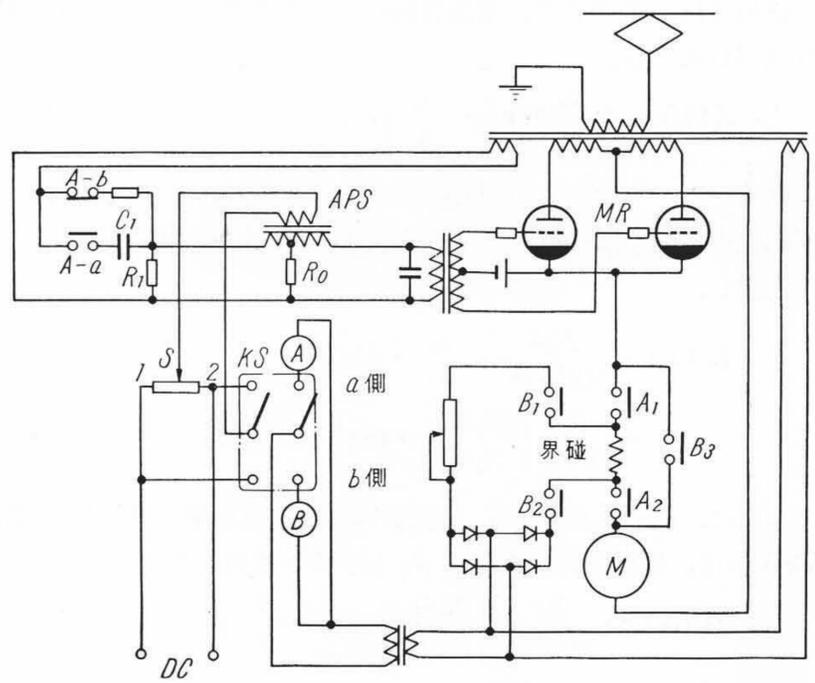
4.2 インバータ回生制動⁽⁶⁾

第19図に日立製作所で開発した装置の原理図を示す。この装置で普通の力行運転を行うには接点Sを2側へもっていき、スイッチKSをa側へ投入する。この状態ではA₁A₂A-aが閉じ、B₁B₂B₃A-bが開く。そのため格子回路の移相特性は第20図実線のようになり、Sが2の位置にあるためAPSの制御電流I_cが零であるので格子制御角βは-30度となっており水銀整流器MRから電動機Mには電力が供給されない。次にSを2から1の側へしゅう動すると制御電流I_cが増加し、βは負の値から正の大きな値へ漸次変化し、MRの電圧は正となりMに電力が供給され、Sが1に達したとき電動機は最大速度に達する。

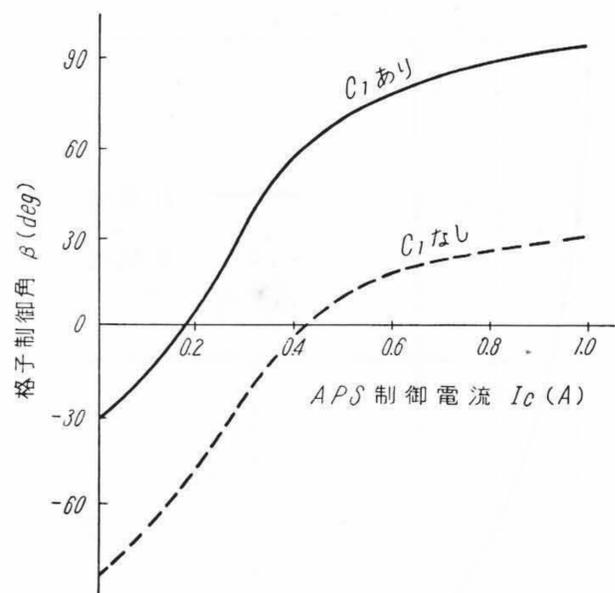
この状態で回生制動を行うにはまずKSを開く。このようにするとI_cが零になりMRの電圧は瞬間的に(約1/2サイクル)負の値になる。したがって、電機子回路にインダクタンスがあっても電機子電流はほとんど瞬間的に(約20ms)零となる。一方、電磁接触器Aが無励磁になりA₁A₂が開くが、この時間は60ms以上であるので電機子電流はすでに零になっており、その動作にはアークを伴わない。そして、A-aが開きA-bが閉じるので格子回路の移相特性は第20図点線のようになり、I_cが零のためβは-80度程度となりMRの等価誘起電圧はほとんど負の最大に達する。一方、B₁B₂B₃が閉じてMは他励の発電機となり、その起電力はこれまでと逆にな



第18図 電圧制御装置



第19図 インバータ回生制動装置



第20図 格子回路移相特性

りインバータ回生制動回路が形成される。次に、Sを1から2へしゅう動するとMRの等価誘起電圧が減少しMからMRへ向かって電力が送られ電力回生制動が行われる(本装置は特許出願中である)。

5. 結 言

以上、日立製作所で開発した水銀整流器式交流電気機関車の格子制御装置の原理とその代表的な応用例について述べた。すなわち、まず水銀整流器の格子制御の原理について述べ、水銀整流器式交流

電気機関車では格子制御を行うことによりすぐれた性能をうることになるが、電源が単相であり、かつ電源変動が大きいこの条件のもとで全制御範囲を安定確実に動作しうる格子制御装置をうることは容易でなく、このことがこれまで水銀整流器式交流電気機関車で格子制御が普及されなかった大きな理由の一つであったこと、そのため日立製作所ではこの格子制御装置について研究し、所要の性能のものを開発することができたことを述べた。

そして、この装置を使用することにより、世界で初めての粘着性能改善のための電圧制御装置が完成し、現在この装置を施した交流電気機関車ED71がすでに41両生産され営業運転に使用されている。

終りに、本研究に対し色々ご指導ご激励を戴いた日本国有鉄道の関係各位、日立製作所日立研究所三浦所長、平田部長ならびに日立、国分、水戸各工場の関係各位に厚くお礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 小野田, 岩城, 守田: 日立評論別冊 No. 32, 66 (昭 34)
- (2) 小野田: 電学誌 78, 873 (昭 33)
- (3) 小野田: 電学誌 78, 1534 (昭 33)
- (4) 小野田: 昭 34 電気学会東京支部大会 271
- (5) 小野田, 杉本: 昭 35 電気学会連大 766
- (6) 小野田: 昭 36 電気学会連大 750
- (7) 特許第 219494 号



新 案 の 紹 介



登録新案第504129号

木暮健三郎・山内章正

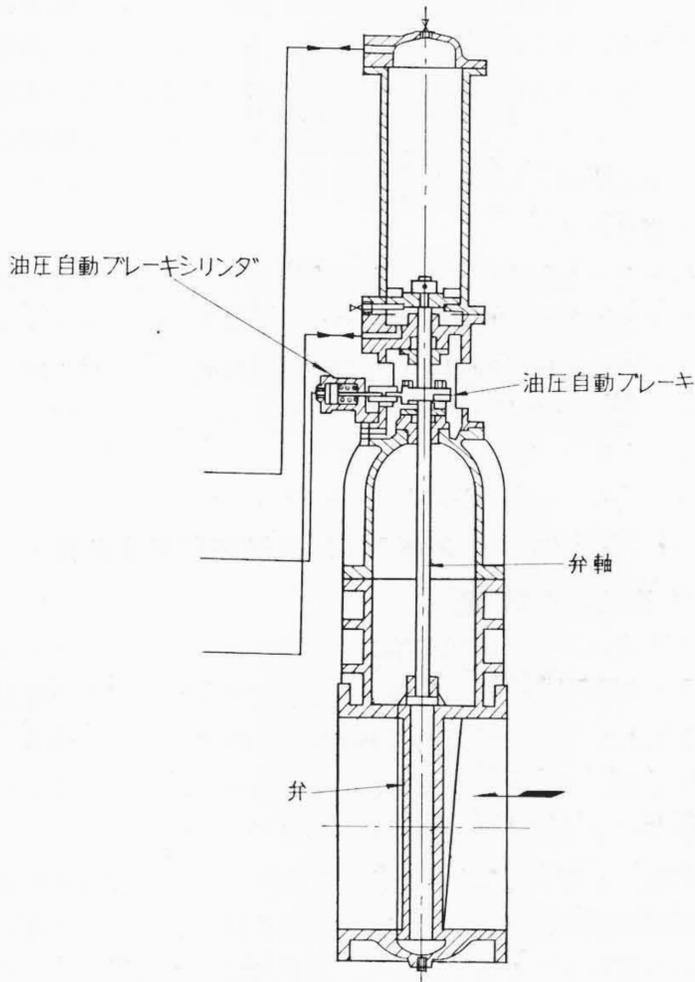
手動ゆるめ装置付油圧自動ブレーキを有する油圧制水弁

油圧自動ブレーキを有する油圧制水弁では、弁の開閉に先だって油圧自動ブレーキをゆるめるようになっているが、停電時には弁を閉じたくとも油圧ポンプによる送油ができないため自動ブレーキがゆるまず閉弁できない欠点がある。

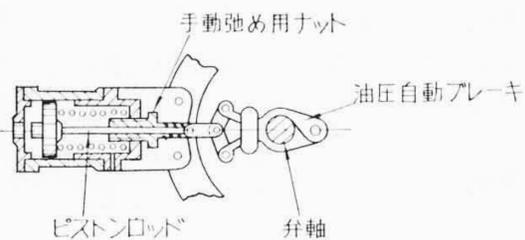
そこでこの考案は、油圧自動ブレーキシリンダに手動ゆるめ用ナットを装着し、停電時に油圧が消滅するとこのナットを回し、ピストンロッドを右に動かしてブレーキをゆるめる。ブレーキはシリンダ内のバネの伸張力によってしまり、ピストン背面の圧油の送入によってゆるむようになっている。

手動ゆるめ用ナットによってブレーキがゆるめば制水弁は自重で降下するが、なおその閉鎖が完全でないときには別に手動油ポンプを準備しておいてそれを使う。

なお手動ゆるめ用ナットはピストンロッドの案内軸受兼用となっていて構造を簡潔なものとしている。(鳥塚)



第1図



第2図

1961		日 立		No. 6	
		目 次			
◎デ	ザ	イ	ン	の	感 情
◎世	界	屈	指	の	揚 水 発 電 所
◎新	し	い	照	明	施 設
◎空	気	調	和	装	置 の す べ て
◎電	線	百	話	(6)	絶 縁 紙 の 若 返 り
◎店	頭	の	冷	凍	基 地
◎ハ		イ		ラ	イ ト
◎僕	の	名	は	サ	ン 剃 刃
◎X	線	テ	レ	ビ	の 話
◎明	日	へ	の	道	標
◎こ	れ	か	ら	の	住 い の 条 件
◎ク	ー	リ	ン	グ	タ ワ ー
◎湿	気	の	被	害	を 一 掃 し よ う
◎超	短	波	無	線	機 の ト ラ ン ジ ス タ 化
◎日		立		だ	よ り
◎つ	け	っ	ぱ	な	し で 寝 て も 安 心

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地 振替口座東京71824番
 取次店 株式会社オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 振替口座東京20018番