

# 高性能係数磁気増幅器

## High Quality Coefficient Magnetic Amplifier

小野田 芳光\*  
Yoshimitsu Onoda

### 内 容 梗 概

従来、商用周波の磁気増幅器は性能係数が $10^4 \text{ s}^{-1}$ 程度であるとされていたが、日立製作所ではこの性能係数を大きくすることについて研究を行ない、 $10^5 \text{ s}^{-1}$ 程度の性能係数を安定に得ることができ、さらに定電圧電源を用いたときには $10^6 \text{ s}^{-1}$ の性能係数をも得ることのできる高性能係数磁気増幅器を開発した。

### 1. 緒 言

一般に電力増幅器は電力増幅度が大きく、かつ応答時間の小さいことが要求されるが、電力増幅度を大きくするとそれに伴い応答時間も大きくなるのが普通である。そこで、電力増幅度 $A_p$ と63%応答時間 $T$ の比 $m = A_p/T$ を性能係数と称し、これが大きいほどすぐれた増幅器とされている。

電源周波数が50c/s程度の磁気増幅器ではこの値が普通 $10^4 \text{ s}^{-1}$ 程度であるとされていたが、筆者らはこの性能係数をさらに大きくするにはどのようにすべきかについて検討を行ない、 $10^5 \text{ s}^{-1}$ 程度以上のものを得ることができた。

ここでは、この磁気増幅器を開発するために行なった理論的解析と実験結果の二、三について報告する。

### 2. 理論的解析

#### 2.1 磁気増幅器の性能係数

外部帰還形磁気増幅器の電流増幅度 $A_I$ はよく知られているように次の式であらわされる。

$$A_I = \frac{\Delta I_f}{\Delta I_c} \doteq \frac{N_c}{N_a} \left( \frac{1}{1-\beta} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $I_f$ : 磁気増幅器の出力電流  
 $I_c$ : 制 御 電 流  
 $N_c$ : 制 御 巻 線 巻 数  
 $N_a$ : 交 流 巻 線 巻 数  
 $\beta$ : 帰 還 率

(以下、外部帰還形磁気増幅器について解析してゆくが、一般に使用されている2鉄心の自己帰還形磁気増幅器は交流巻線と帰還巻線の巻数がともに負荷巻線の1/2に等しい外部帰還形磁気増幅器であると考えればよい)。

したがって、制御回路の抵抗を $R_c(\Omega)$ 、負荷回路の抵抗を $R(\Omega)$ とすれば、電力増幅度 $A_p$ は次のようになる。

$$A_p = \frac{\partial(I_f^2 R)}{\partial(I_c^2 R_c)} = \left( \frac{R}{R_c} \right) \left( \frac{I_f}{I_c} \right) \left( \frac{\partial I_f}{\partial I_c} \right) = \left( \frac{R I_f}{R_c I_c} \right) A_I \dots \dots \dots (2)$$

もしも、

$$\frac{\partial I_f}{\partial I_c} = \frac{I_f}{I_c} \dots \dots \dots (3)$$

であれば、

$$A_p = \frac{R}{R_c} A_I^2 \doteq \left( \frac{R}{R_c} \right) \left( \frac{N_c}{N_a} \right)^2 \left( \frac{1}{1-\beta} \right)^2 \dots \dots \dots (4)$$

となる。

磁気増幅器の時定数 $T$ は、

$$T \doteq \left( \frac{1}{4f} \right) \left( \frac{N_c}{N_a} \right)^2 \left( \frac{R}{R_c} \right) \left( \frac{1}{1-\beta} \right) \text{ (s)} \dots \dots \dots (5)$$

ここに  $f$ : 電 源 周 波 数 (c/s)

であるから、性能係数 $m$ は

$$m = \frac{A_p}{T} \doteq \frac{4f}{1-\beta} \dots \dots \dots (6)$$

となる。

したがって、性能係数を大きくするには電源周波数 $f$ を大きくするか、あるいは帰還率 $\beta$ を1に近づけることが必要である。

#### 2.2 帰 還 率 $\beta$

帰還巻線のない可飽和リアクトルでは制御電流 $I_c$ と交流巻線電流(正方向半波平均値) $I_a$ の間に等アンペアターンの関係が成立する。すなわち、

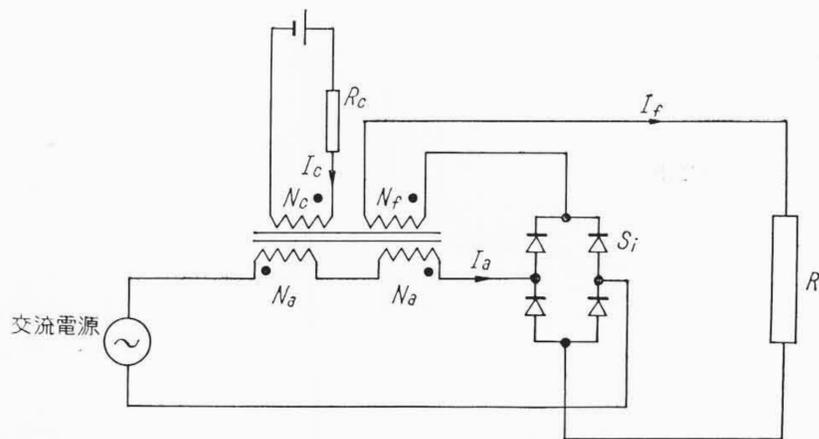
$$|N_c I_c| \doteq N_a I_a \dots \dots \dots (7)$$

厳密に調べてみると、この関係は普通の状態では次のようにあらわすべきことが知られる。

$$\lambda |N_c I_c| = N_a I_a - N_a I_0 \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $\lambda$ は1に近いが1よりも小さい定数であり、 $I_0$ は励磁電流である。したがって、第1図に示すように正帰還巻線があり、その巻数を $N_f$ 、そこを流れる電流を $I_f$ とすると、

$$N_c I_c + N_f I_f \geq 0 \dots \dots \dots (9)$$



$N_a$ : 交 流 巻 線  
 $N_c$ : 制 御 巻 線  
 $N_f$ : 帰 還 巻 線  
 $I_c$ : 制 御 電 流  
 $I_a$ : 交 流 電 流 (正 方 向 半 波 平 均 値)  
 $I_f$ : 帰 還 巻 線 電 流 (出 力 電 流)  
 $R$ : 負 荷 抵 抗  
 $S_i$ : 整 流 器  
 $R_c$ : 制 御 回 路 抵 抗

第1図 外部帰還形磁気増幅器

\* 日立製作所日立研究所 工博

の範囲において、飽和するまでは、

$$\lambda(N_c I_c + N_f I_f) = N_a I_a - N_a I_0 \quad (10)$$

となる。ここで、整流器の整流能率を  $k$  として、

$$I_f = k I_a \quad (11)$$

とすれば、

$$\lambda(N_c I_c + k N_f I_a) = N_a I_a - N_a I_0 \quad (12)$$

これより、

$$I_a = \frac{\lambda N_c I_c + N_a I_0}{N_a - \lambda N_f k} = \frac{\lambda \left(\frac{N_c}{N_a}\right)}{1 - \left(\frac{\lambda k N_f}{N_a}\right)} I_c + \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda k N_f}{N_a}\right)} I_0 \quad (13)$$

あるいは、

$$I_f = k I_a = \frac{\lambda k \left(\frac{N_c}{N_a}\right)}{1 - \left(\frac{\lambda k N_f}{N_a}\right)} I_c + \frac{k}{1 - \left(\frac{\lambda k N_f}{N_a}\right)} I_0 = \frac{\lambda k \left(\frac{N_c}{N_a}\right)}{1 - \beta} I_c + \frac{k}{1 - \beta} I_0 \quad (14)$$

ここに、

$$\beta = \frac{\lambda k N_f}{N_a} \quad (15)$$

が帰還率である。

$\lambda$ ,  $k$  はほぼ1に等しいので、

$$I_f \doteq \left(\frac{1}{1 - \beta}\right) \left(\frac{N_c}{N_a}\right) I_c + \left(\frac{1}{1 - \beta}\right) I_0 \quad (16)$$

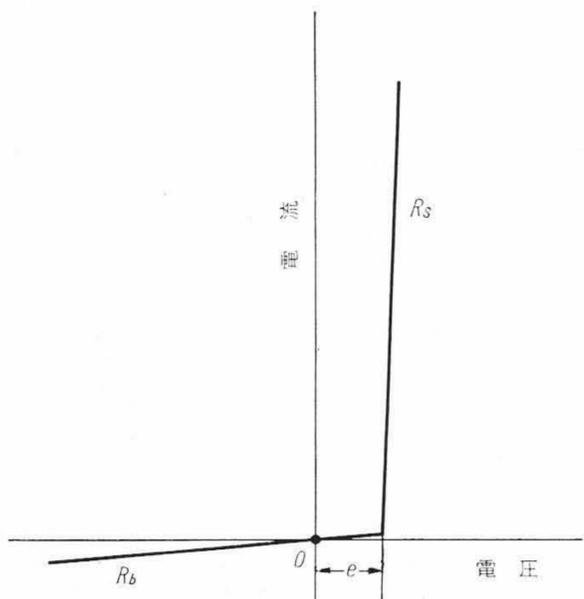
とすることができ、これから  $\partial I_f / \partial I_c$  を求めると、(1)式の電流増幅度の式が得られる。

次に、整流器の整流能率  $k$  について検討する。整流器の電圧対電流の関係を近似的に第2図のようにあらわすことができる。この図で、 $R_s$  を正方向抵抗、 $e$  をせき層電圧、 $R_b$  を逆方向抵抗と称する。

ここで、せき層電圧  $e$  を無視すると第1図の整流器の部分は第3図のようにあらわすことができる。

この図の整流器は理想整流器であり、 $I_b$  は逆方向抵抗  $R_b$  を通って流れる電流すなわち逆流である。正方向抵抗  $R_s$  を無視すると図より次の式が成立する。

$$R I_f = \left(\frac{I_b}{2}\right) \cdot R_b$$



$e$ : 埋層電圧  $R_s$ : 正方向抵抗  $R_b$ : 逆方向抵抗  
第2図 整流器の特性

$$= \frac{I_b R_b}{2} \quad (17)$$

帰還巻線に流れる電流  $I_f$  と逆流  $I_b$  の和は交流巻線に流れる電流  $I_a$  に等しいから、

$$I_f + I_b = I_a \quad (18)$$

上記両式より、

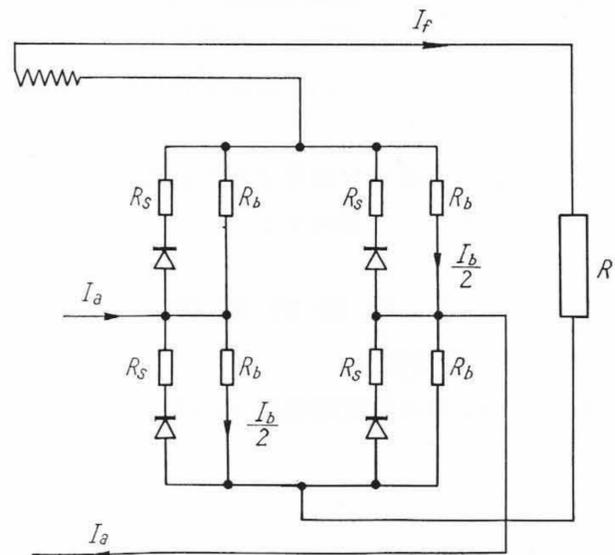
$$k = \frac{I_f}{I_a} = \frac{\left(\frac{R_b}{2}\right)}{R + \left(\frac{R_b}{2}\right)} \quad (19)$$

が得られる。

$R_b$  は整流器の逆方向抵抗であるから温度、湿度、経年などにより変化する。それゆえ、整流能率  $k$  は負荷抵抗  $R$  が一定でも必ずしも一定の値とならない。その結果、帰還率  $\beta$  も常に一定の値とならず変化するようになる。

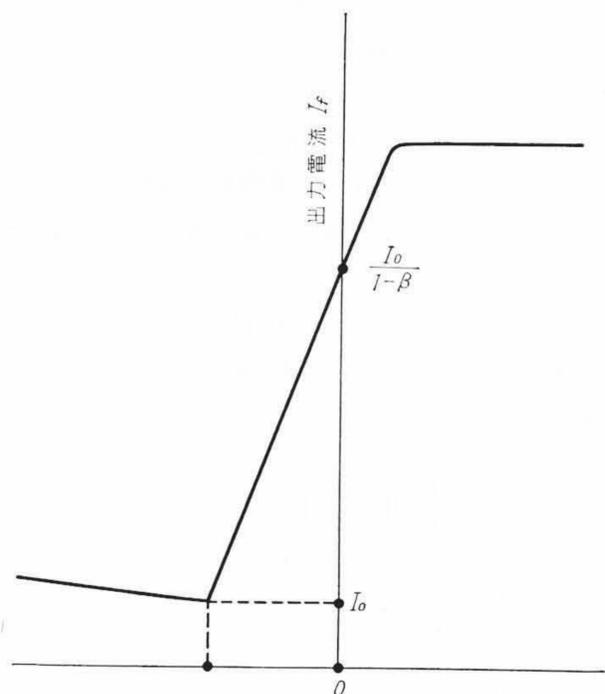
### 2.3 励磁電流 $I_0$

磁気増幅器で、制御電流  $I_c$  と出力電流  $I_f$  の関係を図示すると(14)



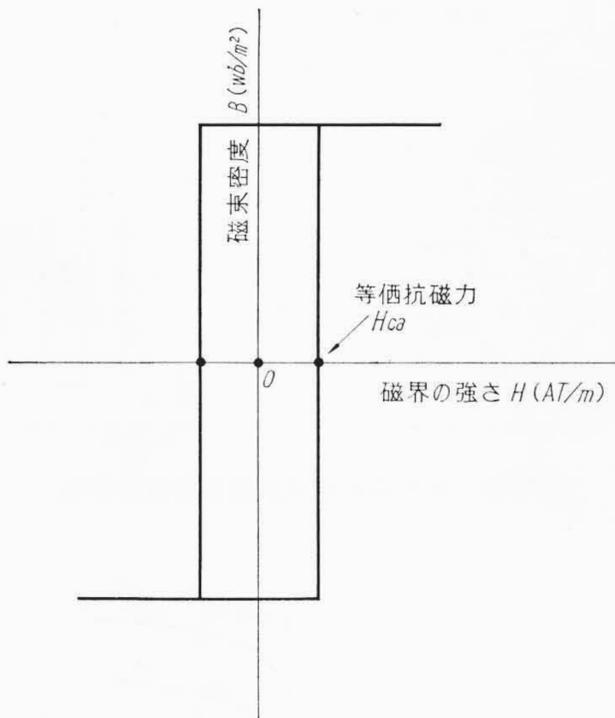
$I_a$ : 交流電流  $R_b$ : 逆方向抵抗  
 $I_b$ : 逆流  $R$ : 負荷抵抗  
 $I_f$ : 出力電流 (図の整流器は理想整流器)  
 $R_s$ : 整流器正方向抵抗

第3図 第1図の整流器の部分の等価回路

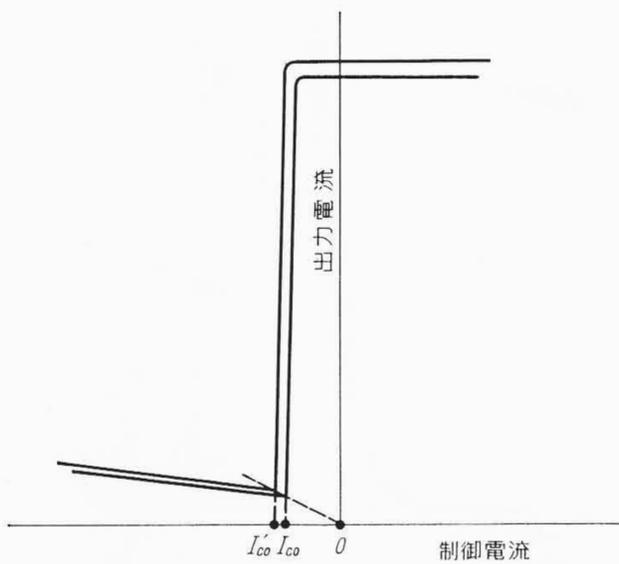


$I_{c0} = -\frac{N_a}{N_c} I_0$   $\beta$ : 帰還率  
 $I_c$ : 制御電流  $I_{c0}$ : 出力電流最小値を与える制御電流  
 $I_0$ : 励磁電流正方向半波平均値

第4図 磁気増幅器の静特性



第5図 鉄心の動磁化曲線



第6図  $\beta$ が1に近い場合の励磁電流が変化したときの特性

式から第4図のようになる。すなわち、出力電流  $I_f$  が最小になるときは(10)式で、

$$\lambda(N_c I_c + N_f I_f) = N_a I_a - N_a I_0 = 0 \dots \dots \dots (20)$$

の場合で、そのときの  $I_f$  の値を  $I_{f0}$  とすると、

$$I_{c0} = -\frac{N_f}{N_c} I_{f0} = -\frac{N_f}{N_c} k I_0 \dots \dots \dots (21)$$

$k$  は1にほぼ等しく、 $N_f$  は  $N_a$  にほぼ等しいので、

$$I_{c0} \doteq -\frac{N_a}{N_c} I_0 \dots \dots \dots (22)$$

とすることもできる。

すなわち、励磁電流  $I_0$  は磁気増幅器の制御動作範囲の立ち上がり点とその点の出力電流の両方に関係する。さらに、励磁電流が変化すると  $\lambda$  も多少変化する。

この励磁電流  $I_0$  は鉄心の動磁化曲線を第5図に示すようなものとし、その等価抗磁力を  $H_{ca}$  とすると、

$$I_0 = \frac{l H_{ca}}{N_a} \dots \dots \dots (23)$$

ここに  $l$  : 鉄心の平均磁路長 (m) となる。

2.4 性能係数改善の方法

電源周波数  $f$  が一定の場合、性能係数  $m$  を大きくするには帰還率  $\beta$  を1に近づけることが必要である。しかし、帰還率  $\beta$  を1に近づけると磁気増幅器の静特性は第6図のようになり、励磁電流と帰還率が多少変化しても大幅に出力電流が変化することになる。

いま、 $N_c \doteq N_a$  であるとすれば、

$$A_I \doteq \frac{1}{1-\beta} \dots \dots \dots (24)$$

となるので、ここでは  $N_c = N_a$  として解析を進める。

励磁電流  $I_0$  が変化すると  $\lambda$  も多少変化するが、立ち上がり点のみが変化するものとする、励磁電流が  $\Delta I_0$  だけ変化した場合、出力電流は、

$$\Delta I_f = A_I \Delta I_0 \dots \dots \dots (25)$$

だけ変化することになる。

$\lambda$  もしくは  $k$  が変化して、 $\beta$  が  $\beta_0$  の値から  $\beta_0 + \Delta\beta \sim \Delta\beta$  だけ変化したとすれば出力電流は、

$$I_{f0} \doteq \frac{1}{1-\beta_0} I_c + \frac{1}{1-\beta_0} I_0 \dots \dots \dots (26)$$

の値から、

$$I_{f0} + \Delta I_f \doteq \frac{1}{1-\beta_0 - \Delta\beta} I_c + \frac{1}{1-\beta_0 - \Delta\beta} I_0 \dots \dots \dots (27)$$

へ変化し、その変化分  $\Delta I_f$  は

$$\begin{aligned} \Delta I_f &\doteq \left( \frac{1}{1-\beta_0 - \Delta\beta} - \frac{1}{1-\beta_0} \right) (I_c + I_0) \\ &= \frac{\Delta\beta}{1-\beta - \Delta\beta} I_{f0} \dots \dots \dots (28) \end{aligned}$$

となり、 $\Delta\beta$  の値が小さくても、

$$1 - \beta - \Delta\beta \doteq 0 \dots \dots \dots (29)$$

のときは  $\Delta I_f$  はきわめて大きな値となる。

励磁電流  $I_0$  は鉄心の温度、交流電源電圧の変化などで変化する。 $I_0$  の値が大きくなるとはその変化の割合が小さくても変化の絶対値が大きいため、帰還率が1に近い場合は出力の変化が大きくなり安定しない。

したがって、性能係数を改善するため帰還率  $\beta$  を1に近づけるには、

- (1) 励磁電流  $I_0$  を小さくし、かつその値が比較的变化しない範囲を使用する。
- (2) 帰還用整流器の整流能率  $k$  をほぼ一定に保つようにすることが必要である。

まず、(1)を実現するにはどのようにすべきかについて検討する。

磁気増幅器の交流巻線の巻数  $N_a$  を決定するものは、出力電圧から決定される交流電源電圧の大いさと、最小出力電流から決定される励磁電流の値である。すなわち、与えられた交流電源電圧の実効値を  $E_c$  (V) とすると、直列形の磁気増幅器では、

$$\sqrt{2} \pi f (2 N_a) B_m A \geq E_c \dots \dots \dots (30)$$

ここに  $B_m$  : 最大磁束密度 ( $W_b/m^2$ )

$A$  : 鉄心断面数 ( $m^2$ )

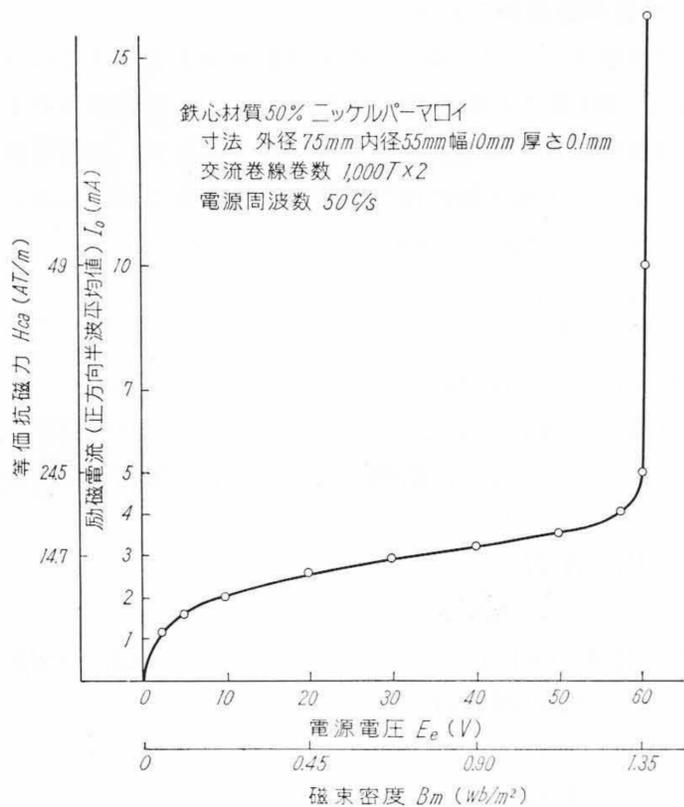
また、与えられた励磁電流の最大平均値が  $I_0$  であると、

$$\frac{l H_{ca}}{N_a} \leq I_0 \dots \dots \dots (31)$$

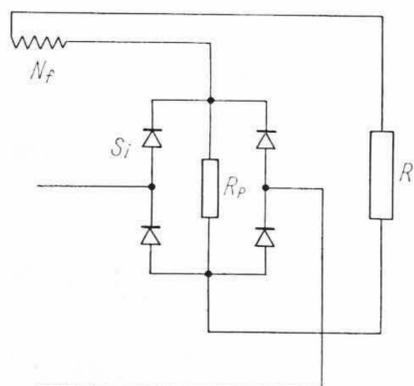
となる。以上の両式から、

$$N_a \geq \frac{E_c}{2 \sqrt{2} \pi f B_m A} \dots \dots \dots (32)$$

および、



第7図 最大磁束密度  $B_m$  と等価抗磁力  $H_{ca}$  の関係



$R_p$ : 並列に挿入された抵抗  
 $R$ : 負荷抵抗  
 $N_f$ : 帰還巻線  
 $S_i$ : 整流器

第8図 整流器に並列に抵抗を挿入した回路

$$N_a \geq \frac{IH_{ca}}{I_0} \dots\dots\dots (33)$$

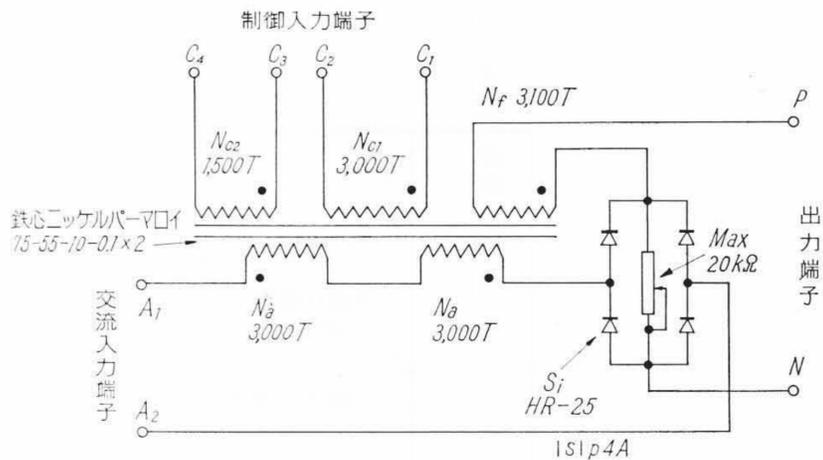
が得られるので、この両者より  $N_a$  を定めねばならない。 $I_0$  の値を小さくすると(33)式から定まる  $N_a$  の値が(32)式から定まるものに比べてかなり大きくなる場合があるが、そのときは鉄心の断面積を小さくするか、鉄心の磁路長を減少して、すなわち鉄心に異なった形状のものを用いてほぼ等しい値にする。

励磁電流の変化の小さな範囲とは鉄心の等価抗磁力の変化の小さな範囲ということになるが、50%ニッケルパーマロイ系鉄心で実測した例が第7図で、電源周波数が50c/s程度では最大磁束密度  $B_m$  を0.7~1.1 Wb/m<sup>2</sup> の範囲に選ぶのがよいようである。

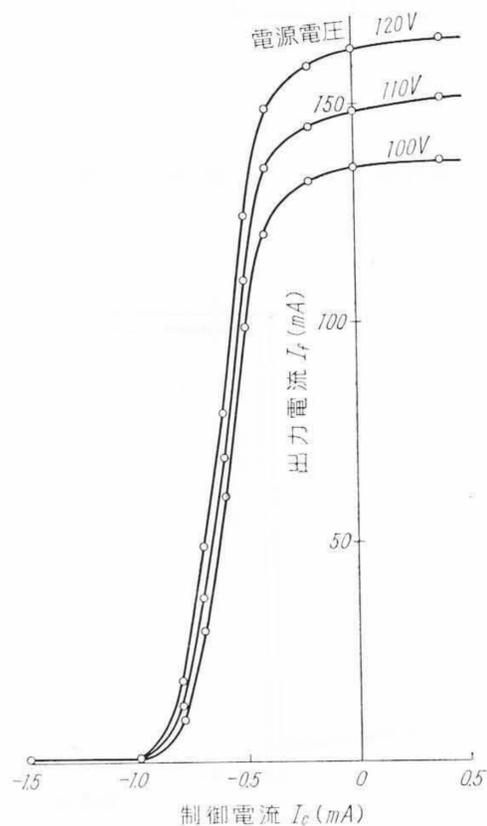
次に、(2)を実現するには整流器に逆方向抵抗の大きなものを使用し、逆方向抵抗の大きなものが得られないときは複数個直列に使用して、かつ第8図に示すように並列に抵抗  $R_p$  をそう入する。この場合の整流能率  $k$  は

$$k = \frac{R_p R_b}{2R_p + R_b} \div \left[ R + \left\{ \frac{R_p R_b}{2R_p + R_b} \right\} \right] \doteq \frac{R_p}{R + R_p} \dots\dots\dots (34)$$

となって、整流器の逆方向抵抗の変化の影響をほとんど無視することができるようになる。



第9図 試作高性能係数磁気増幅器構造



第10図 性能係数  $m = 10^5 \text{ s}^{-1}$  の場合の実験結果

### 3. 高性能係数磁気増幅器の実験

#### 3.1 試作製造の概略

以上の理論を適用し、性能係数  $10^5 \text{ s}^{-1}$  以上を実現する50c/s 50A磁気増幅器を設計し試作した。仕様は次のとおりである。

- 電源電圧  $E_e = 110 \text{ V}$
- 電源周波数  $f = 50 \text{ c/s}$
- 最大出力電流  $I_{f \text{ max}} = 150 \text{ mA}$
- 連続出力電流  $I_{f \text{ max}} = 65 \text{ mA}$
- 性能係数  $m \geq 10^5 \text{ s}^{-1}$  (このことより  $N_c = N_a$  の状態で電流増幅度  $A_f \geq 500$ )

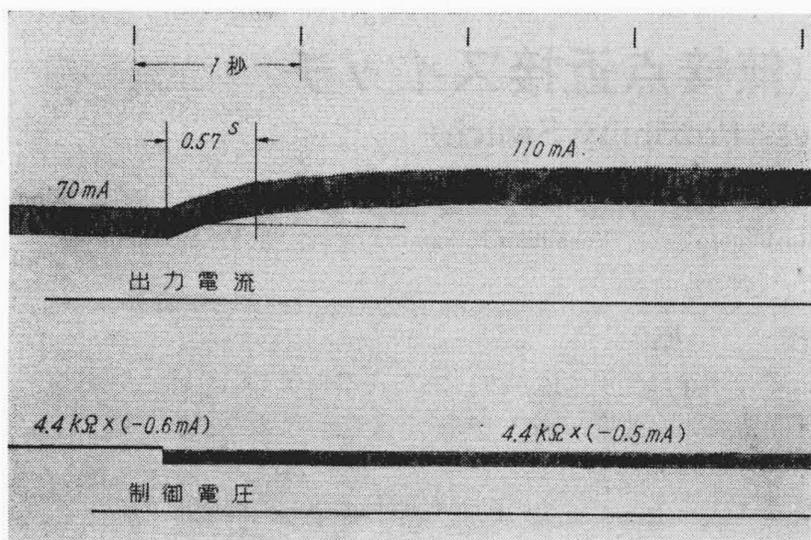
電源電圧±10%の変化による出力電流の変化は最大出力の±10%以下

第9図にこの磁気増幅器の巻線構成を示す。

#### 3.2 性能係数 $m = 10^5 \text{ s}^{-1}$ の場合の実験

この磁気増幅器で最大出力電流が150mA、電流増幅度が約500倍になるように負荷抵抗  $R$  と整流器に並列にそう入されている抵抗  $R_p$  を調整して実験を行なった。この静特性の実験結果が第10図である。この結果から知られるように、電源電圧±10%の変化に対して出力電流の変化が設計仕様どおり±15mA以下、すなわち最大出力電流の±10%以下となっている。

この状態では、-0.6mAから-0.5mAの間における電流増幅度は電源電圧が110Vのとき約800倍となっているが、この場合の時



第11図 過渡応答オシログラム

定数を計算で求めてみる。

(1)式および(5)式より、

$$T \doteq \frac{1}{4f} \left( \frac{N_c}{N_a} \right)^2 \left( \frac{R}{R_c} \right) \left( \frac{1}{1-\beta} \right) \doteq \frac{1}{4f} \left( \frac{N_c}{N_a} \right) \left( \frac{R}{R_c} \right) A_I \quad (35)$$

となるが、ここで、

$$\begin{aligned} A_I &= 800 \\ f &= 50 \text{ c/s} \\ \frac{N_c}{N_a} &= 1 \\ R &= 611 \Omega \\ R_c &= 4,455 \Omega \end{aligned}$$

であるので、

$$T \doteq \frac{1}{4 \times 50} \times 1 \times \frac{611}{44.5} \times 800 \text{ (s)} = 0.56 \text{ s} \quad (36)$$

となる。

一方、過度応答のオシログラム第11図からこの場合の時定数を求めると約0.57sとなり、ほぼ一致している。

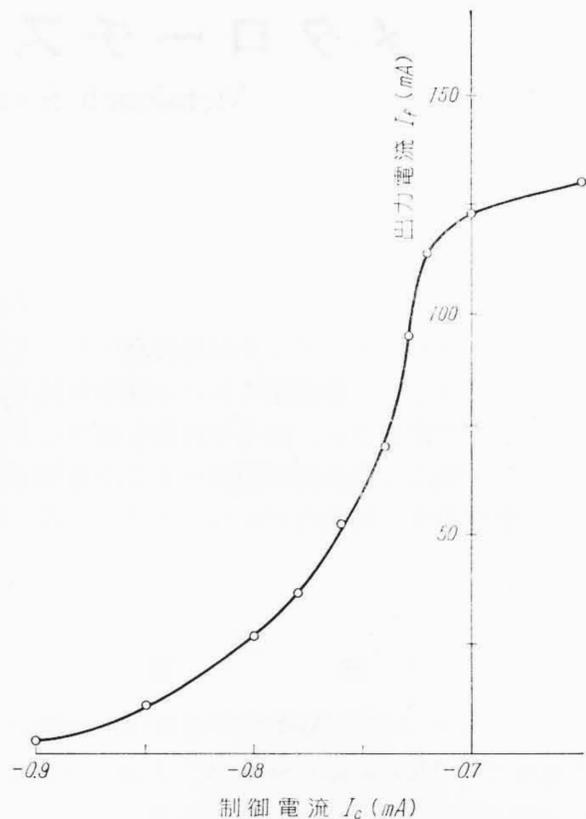
次に、この場合の性能係数  $m$  を計算してみると、

$$\begin{aligned} m &= \frac{A_p}{T} = \left( \frac{A_I^2}{T} \right) \left( \frac{R}{R_c} \right) \\ &= \left( \frac{800^2}{0.56 \text{ s}} \right) \times \left( \frac{611}{4,405} \right) \\ &= 1.6 \times 10^5 \text{ s}^{-1} \quad (37) \end{aligned}$$

となって、予定どおり  $10^5 \text{ s}^{-1}$  を越える値となる。

### 3.3 性能係数 $m$ を最大にした場合の実験

この磁気増幅器は上述のように、性能係数  $10^5 \text{ s}^{-1}$  の程度では十分安定であったので、電源に定電圧電源を用い、かつ整流器並列抵抗  $R_p$  を大きくすることにより最大どの程度までの性能係数が得られ



第12図 性能係数  $m$  を最大にした場合の静特性実験結果

るか実験してみた。

並列抵抗  $R_p$  を  $14.5 \text{ k}\Omega$  にした場合の静特性の実験結果が第12図である。このときの最大電流増幅度は  $-740 \mu\text{A}$  から  $-730 \mu\text{A}$  の間におけるもので約5,000倍となり、性能係数  $10^6 \text{ s}^{-1}$  を得ることができた。

## 4. 結 言

以上、高性能係数磁気増幅器の理論的解析と実験結果について述べた。すなわち、まず磁気増幅器の性能係数について検討し、これを大きくするには電源周波数を大きくするか、あるいは帰還率  $\beta$  を1に近づけることが必要であること、したがって周波数が一定のときは帰還率を1に近づけることのみが残された手段となるが、このためには、まず帰還用整流器の整流率を一定に保つようにし、かつ励磁電流を小さくし、その値が電源電圧の変化などによって変化しない安定な範囲に設計すべきことを明らかにした。

そして、この理論にもとづき、性能係数  $10^5 \text{ s}^{-1}$  以上を実現するため、 $50 \text{ c/s}$   $110 \text{ V}$   $5 \text{ VA}$  の磁気増幅器を設計し実験したところ、設計仕様の状態では約  $1.6 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  の性能係数が得られ、さらに電源に定電圧電源を使用し最大性能係数が得られるように調整したときには  $10^6 \text{ s}^{-1}$  の性能係数を得ることができた。

終わりに、この研究に当たりご指導ご激励をいただいた日立製作所日立研究所平田部長ならびに水戸工場、日立工場の関係各位、実験に協力をいただいた水戸分室田淵氏に厚くお礼申しあげる。

## 参 考 文 献

- (1) 小野田：第5回自動制御連合講演会，245（昭37）