

# D → 最近のドイツ技術

## 増幅発電機の実出力と性能係数(ラピダインを例として)

### Output and Figure of Merit of a Rotating Amplifier (Rapidyne, as an example)

#### I. ま え が き

一般的に用いられる回転電気機械については、過去十数年にわたって電気的あるいは機械的諸問題が検討され、出力、電圧、回転数、回転数調整範囲、効率、出力係数などについて理論的考察と実際上の経験が積み重ねられ、価格も下げるように努力が続けられてきた。

しかしここ数年来、特殊用途の回転機が要求され、開発されてきた。これらの回転機は特殊な特性を必要とし、それを満足するように設計製作しなければならない。たとえば水中ポンプ用電動機、砂糖遠心分離機用電動機、エレベータ用電動機、増幅発電機などである。

ここではそのうち増幅発電機をとりあげ、その大きさの決定法と設計上の問題を検討する。主としてラピダイン構造の二段増幅発電機を対象とするが、その前に一段増幅発電機の基本概念をのべ、その基礎にたつて二段増幅発電機を検討することとする。

#### II. 一段増幅発電機

一定回転数で駆動される直流発電機は、一種の増幅機といえる。励磁巻線の端子に加えられた電圧は入力量であり、電機子端子に生じた電圧は出力量である。しかしこのままでは制御用または調節用の増幅機として適当であるとはいえない。すなわち直流発電機はその目的に応じて適当な鉄心寸法と設計を考慮すれば、増幅発電機として利用できるのである。このためには単に要求されている出力を出すのみならず、所要の増幅度を持ち、時定数が決められた限度を越えないようにしなければならない。そしてまた入力と出力間の直線性、1対1の対応、反作用のないこと、安定であることも要求される。ここで三つの重要な特性、すなわち出力、増幅度、時定数を考える。増幅度と時定数はまとめて性能係数と称される。したがって増幅発電機についてはその出力と性能係数により特性の大半が決めることになる。この二つの量は鉄心の寸法と電気的磁気的条件に関連している。

一つの増幅発電機の設計が完了すれば、出力と性能係数がいかなる電気的關係にあるかを示すことができる。

一段増幅発電機の実出力  $N$  は

$$N = EI \left( 1 - \frac{IR}{E} \right)$$

であらわされる。電流  $I$  の代りに電気装荷  $A$ 、誘導起電力  $E$  の代りにギャップ磁束密度  $H$  を入れれば

$$N = C_1 A H \left( 1 - C_2 \frac{A}{H} \right) \dots\dots\dots(1)$$

(1)式から出力は  $A/H$  および  $AH$  に関係することがわかる。 $A$  や  $H$  は任意にかえることはできない。電気装荷を大とすれば銅損が増し温度上昇が大きくなり、ギャップ磁束密度を大とすれば電機子内の鉄損および励磁巻線中の損失が大となる。また鉄心の飽和現象からも制限されてくる。

この両者の限界を考えると、出力に対してはギャップ磁束密度の最大値と損失の許容最大値により(1)式から二つの関係式がでてくる。

まず、 $H_{\max}$  を固定して  $A$  を少しずつ増大してゆくと  $A/H$  は大きくなってゆき、遂には電機子内の損失の許容限界点にまで達する。これ以上  $A/H$  を大とすることは  $H$  を小としなければできなくなる。この第1の場合は

$$N = C_1 H^2_{\max} \frac{A}{H} \left( 1 - C_2 \frac{A}{H} \right) \dots\dots\dots(2)$$

第2の場合は  $W$  を電機子損失とすれば

$$W = W_{Fe} + W_{Cu} = K_1 H^2 + K_2 A^2$$

と考えられ、これを(1)式に分子、分母として掛ければ

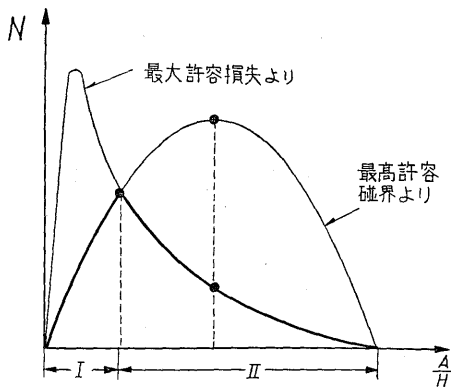
$$N = C_1 \cdot W \frac{AH \left( 1 - C_2 \frac{A}{H} \right)}{K_1 H^2 + K_2 A^2}$$

いま最高許容損失を  $W_{\max}$  とすれば

$$N = C_3 W_{\max} \frac{\frac{A}{H} \left( 1 - C_2 \frac{A}{H} \right)}{1 + C_4 \left( \frac{A}{H} \right)^2} \dots\dots\dots(3)$$

以上の関係を図で示したものが第1図で、Iの領域では(2)式に、IIの領域では(3)式によることになる。

性能係数  $G$  に着目してみると、鉄心内のうず電流による制動作用を無視すれば



第1図 電気装荷とギャップ磁束密度の比の関数としての一段増幅発電機の実出力

Fig. 1. Output of one-stage rotating amplifier as a function of ratio of ampere loading to air-gap flux density

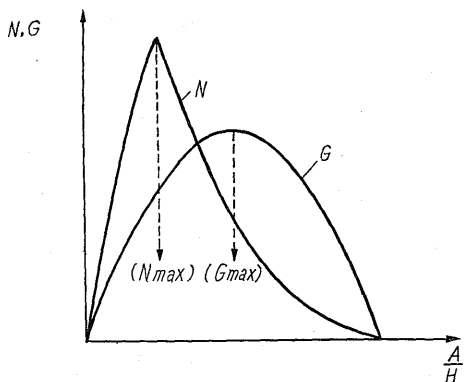
$$G = \frac{V}{T} = \frac{N}{NeT} = \frac{N}{I_e^2 R_e T} = \frac{N}{I_e^2 L_e} \dots (4)$$

(∵  $T = L_e/R_e$ )

(4)式の分子は出力を示し、分母は磁気エネルギーの2倍となっている。 $N$ に(1)式を代入し、磁気エネルギー  $I_e^2 L_e = K_3 H^2$  とすれば

$$G = C_5 \frac{A}{H} \left( 1 - C_2 \frac{A}{H} \right) \dots (5)$$

(5)式から  $G$  も  $A/H$  に関係することがわかった。これを図示すると第2図となり、ある  $A/H$  の値で  $G$  は最大となる。増幅発電機として良い制御特性を望むなら  $A/H$  は  $G$  が最大となる付近の値をとるべきであろう。



第2図 一段増幅発電機の実出力と性能係数

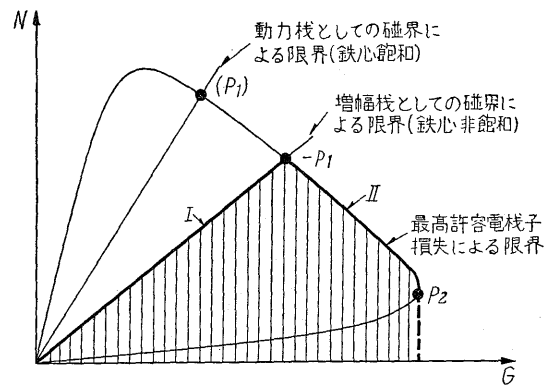
Fig. 2. Figure of merit and output of one-stage rotating amplifier

第2図で出力  $N$  と性能係数  $G$  を対比してみると、 $G$  の最大となる  $A/H$  の値では  $N$  はすでに減少しているし、また  $N$  の最大のところでは  $G$  は最大付近にあ

るとはいえない。一般用直流機として考える場合は  $N$  が最大となればよいわけで、 $G$  を考える必要がない。しかし増幅発電機としては、性能係数をできるだけ大きくするとともに、もちろん費用の点から出力も可能な限り大としなければならない。

第2図から  $A/H$  の値として当然  $G_{max}$  に相当する  $A/H$  より小さい範囲内で、大きな  $G$  とするか大きな  $N$  とするかを考えればよいわけである。

二段増幅機について検討する前に、別の立場から上述の事柄を解明してみよう。(2)(3)および(5)式から  $A/H$  を消去すると出力と性能係数の関係がでてくる。これを  $N, G$  の座標軸としてあらわすと第3図のごとくなる。ここで示された限界曲線以下の出力は可能であり、細線を引いた全領域の  $N$  および  $G$  の値をとることができる。曲線IIの  $P_2$  点より下の部分は出力が小さすぎて実用的でない。増幅発電機としては  $P_1, P_2$  の2点間なるべく限界曲線に近いものが好ましい。 $P_2$  は性能係数の最大点、 $P_1$  は出力の最大点である。



第3図 一段増幅発電機の実出力と性能係数の関係

Fig. 3. Relation of output and figure of merit of one-stage rotating amplifier

つぎに出力や性能係数と鉄心寸法の関係を調べてみる。電機子内の誘導起電力はギャップ磁束密度のみならず、電機子の直径、長さ、回転数に関係している。回転数を一定に保った場合誘導起電力  $E$  は、電機子直径を  $d$ 、長さを  $l$  とすると

$$E = K_4 \cdot d l H$$

電気装荷  $A$  は

$$A = \frac{I}{K_5 d}$$

電機子回路の抵抗  $R$  は  $d$  が大きくなると小さくなるから、 $d$  と反比例関係にあると仮定して

$$R = K_6 \frac{1}{d}$$

前述の  $N=EI\left(\frac{1-IR}{E}\right)$  にこれらを入れると

$$N=C_6 d^2 l A H \left( 1 - \frac{C_7}{dl} \frac{A}{H} \right) \dots\dots\dots(6)$$

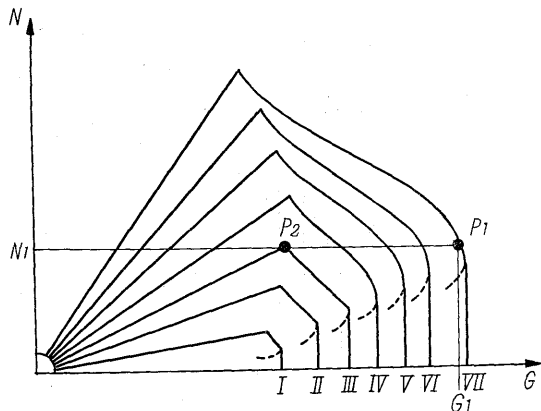
性能係数についてはまず、磁気エネルギーは本質的にギャップに貯えられており、ギャップの容積に比例するものとする。ギャップは電機子直径と共に増大するから

$$I_e^2 L_e = K_7 d^2 l H^2$$

の関係式を得る。したがって(4)式は次のごとくなる。

$$G=C_5 \frac{A}{H} \left( 1 - \frac{C_7}{dl} \frac{A}{H} \right) \dots\dots\dots(7)$$

$N$  と  $G$  はともに電機子直径が大きいほど大きくなる。一段増幅発電機の鉄心寸法をいかにすればよいかは、第3図のような出力と性能係数の関係をあらわした図をいろいろな大きさのタイプについて書いておけばよい。第4図はこれを示し、横軸のローマ数字はタイプの大きさを示す。



第4図 一段増幅発電機のタイプの大きさによる性能係数の関数としての出力

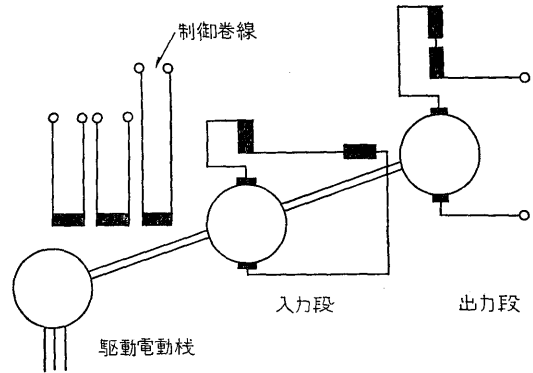
Fig.4. Output, as function of figure of merit for various size of type of one-stage rotating amplifier

もし出力  $N_1$  と性能係数  $G_1$  が要求されたなら、第4図からVII形を選ばなければならないことがわかる。出力  $N_1$  のみでよいならIII形が良い。この結果から出力のみならず性能係数も大きいことが要求される場合には、一段増幅機では非常に大きなタイプとなって非生産的であり、この点で二段増幅発電機が非常にすぐれているのである。

### III. 二段増幅発電機

以下の考察の基本となっているラピダイン形式の二段増幅発電機は、二つの直流発電機を縦続接続した形のも

のである。すなわち一段目の機械は二段目の励磁用に使われている。二つの発電機は同軸で一つの電動機で駆動される(第5図参照)。



第5図 ラピダイン構造の二段増幅発電機基本回路  
Fig.5. Fundamental circuit of two-stage rotating amplifier of Rapidyne construction

一段増幅発電機と異なり、二段増幅発電機では出力段は性能係数を考えることなく出力に必要な大きさをとり、入力段で所要の性能係数を得るようにすることができるとが特長である。したがって出力段は比較的低い性能係数のもので良いが、時定数を無制限に大きくしてよいというものではない。それゆえ出力段の励磁巻線は温度上昇ぎりぎりまでつめることによって性能係数と時定数、およびこれらによって定まる増幅度がおのずからきまる。

増幅発電機全体としての性能係数をできるだけ大きくするには入力段をいかにすべきかを検討するために、まず全体としての性能係数を考えてみよう。性能係数は増幅度と時定数の比であるが、二段増幅機ではその時定数の概念を考えねばならない。入力段に電圧を突然加えた場合に出力段の電圧は指数関数的な変化をせず、制動作用と鉄心の飽和現象を無視しても、二つの異なる指数関数の和の形式で増大する。したがって、時定数としては二つの指数関数のおのおのの時定数の和を考えるのが便利である。こうするとこの仮定した時定数は、二つの時定数を持って上昇する曲線が最終値の59~63%に達する時間に相当する。この59~63%という数値は二つの時定数の相対的大きさがどのように変わってもこの範囲に入っている。

このようにして定義した時定数によると二段増幅発電機全体としての性能係数は

$$G = \frac{V}{T} = \frac{V_1 V_2}{T_1 + \eta T_2}$$

となる。増幅度は両段の増幅度の積となり、時定数は和

となっている。ここで  $\eta (<1)$  は、二段目の時定数が一段目の電機子抵抗が前置死抵抗となっているために小さくなることを示すものである。  $V_1, V_2$  を各段の性能係数で置きかえると次のごとくなる。

$$G = G_1 G_2 \frac{T_1 T_2}{T_1 + \eta T_2} \dots\dots\dots (8)$$

すでに  $G_2, T_2$  はきまっており、  $G_1$  を(7)式であらわせば

$$G = C_5 G_2 T_2 \frac{T_1}{T_1 + \eta T_2} \frac{A_1}{H_1} \left( 1 - \frac{C_7}{d_1 l_1} \frac{A_1}{H_1} \right)$$

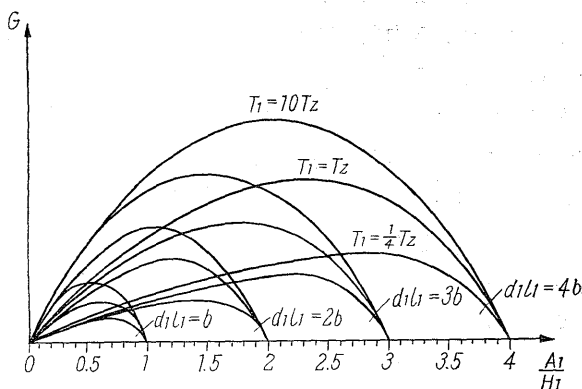
となり、  $\eta$  が入力段の内部電圧降下に関連することを考えると

$$\eta = 1 - \frac{R_1 l_1}{E} = 1 - \frac{C_7}{d_1 l_1} \frac{A_1}{H_1}$$

であるから、性能係数については

$$G = C_5 G_2 T_2 \frac{\frac{A_1}{H_1} T_1 \left( 1 - \frac{C_7}{d_1 l_1} \frac{A_1}{H_1} \right)}{T_1 + T_2 \left( 1 - \frac{C_7}{d_1 l_1} \frac{A_1}{H_1} \right)} \dots\dots\dots (9)$$

を得る。この式は三つの独立した変数  $T_1, A_1/H_1$  および  $d_1 l_1$  の関数となっており、他はすべて定数である。  $d_1 l_1$  は入力段の電機子寸法に、  $T_1$  は入力段の固定子の大きさに、また  $A_1/H_1$  は入力段の電気および磁気装荷に関連している。(9)式からわかるように、二段増幅発電機では性能係数が時定数と無関係ではなく、入力段の時定数を大きくすると性能係数も大きくなっていく場合もある。しかし  $T_1$  の値が大きいと関数はほとんど一定となるので、あまり大きくすることは無意味である。三つの変数に対する関数の関係を示したものが第6図で、二つのパラメータ群による曲線が示されている。これによれば、第1に  $G$  は  $A_1/H_1$  のある値に対して最大値を持つことがわかる。この最大値のところは  $A_1/H_1$  に対



第6図 入力段の電気装荷とギャップ磁束密度の比の関数としてのラピダインの性能係数  
Fig. 6. Figure of merit Rapidyne as function of ratio of ampere loading to air gap flux density

する微係数を求め0とすることにより求められる。これを  $A_1/H_1$  について解くと

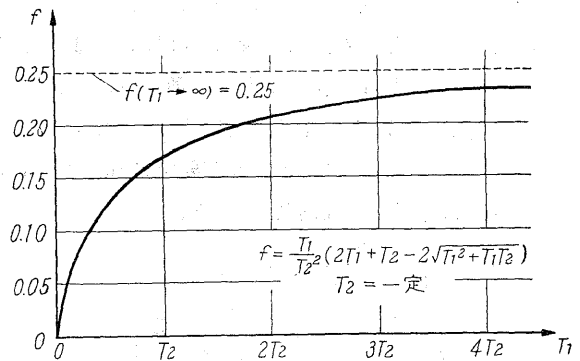
$$\frac{A_1}{H_1} = \frac{d_1 l_1}{C_7 T_2} (T_1 + T_2 - \sqrt{T_1^2 + T_1 T_2}) \dots\dots\dots (10)$$

となる。(10)式を(9)式に入れることにより性能係数について次の式を得る。

$$G = \frac{C_5}{C_7} G_2 T_2 \cdot d_1 l_1 (2T_1 + T_2 - 2\sqrt{T_1^2 + T_1 T_2}) \frac{T_1}{T_2^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left[ (2T_1 + T_2 - 2\sqrt{T_1^2 + T_1 T_2}) \frac{T_1}{T_2^2} = f \text{ とおく} \right]$$

これによると  $G$  は入力段の電機子の大きさ  $d_1 l_1$  に比例することがわかる。  $f$  の  $T_1$  との関係は第7図に示されるが、これにより  $T_1$  を  $2T_2 \sim 3T_2$  よりも大きくすることはなんら意味のないことがわかる。適当な値は  $T_1 = 0.5 T_2 \sim 2 T_2$  である。



第7図 入力段時定数のラピダインの性能係数に対する影響

Fig. 7. Effect of the time constant of input stage on the figure of merit of Rapidyne

検討を容易にするために  $T_1 = T_2$  と考えておく。すると  $G$  は次のごとくなる。

$$G = \frac{C_5}{C_7} G_2 T_2 \cdot d_1 l_1 \frac{1}{6} = C_5 \cdot G_2 T_2 \cdot d_1 l_1 \dots\dots\dots (12)$$

第2段目の性能係数はこの段の大きさに関係しており、この時定数を

$$T_2 = K_8 d_2 l_2 \dots\dots\dots (13)$$

とする。性能係数はこの  $A/H$  を出力のみに着目し、かつ鉄心飽和を避けた値  $A_2/H_2$  とすれば(7)式より

$$G_2 = C_5 \frac{A_2}{H_2} \left( 1 - \frac{C_7}{d_2 l_2} \frac{A_2}{H_2} \right)$$

となる。これらを(12)式に入れると

$$G = C_5 \frac{A_2}{H_2} \left( d_2 l_2 - C_7 \frac{A_2}{H_2} \right) d_1 l_1 \dots\dots\dots (14)$$

を得る。出力と寸法の関係は

$$N=N_2=K_9 d_2^3 l_2 \approx K_{10} \cdot d_2^2 l_2^2 \dots\dots\dots(15)$$

$$\therefore d_2 l_2 = \sqrt{\frac{N}{K_{10}}}$$

ここでは電機子長は大体直径に比例するものとしている。(14)(15)式から全体の性能係数に関して次の式を得る。ただし  $A_2/H_2$  の値は通常応用される出力の範囲内ではほぼ一定とみなしている。

$$G=C'(\sqrt{N}-C'') d_1 l_1$$

これを入力段の電機子寸法  $d_1 l_1$  についてみると

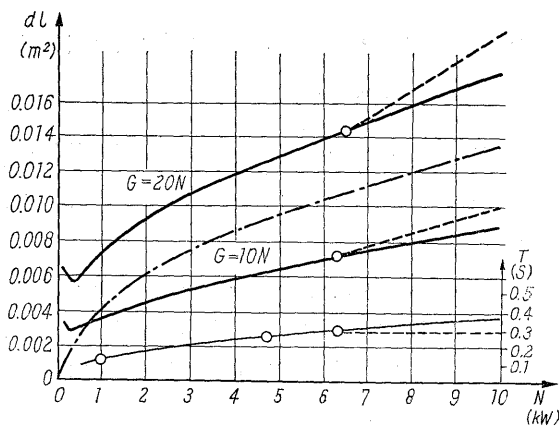
$$d_1 l_1 = \frac{G}{C'(\sqrt{N}-C'')} \dots\dots\dots(16)$$

これによって要求される  $N$  と  $G$  に対して入力段の電機子寸法  $d_1 l_1$  をいかにとるべきかがわかってくるが、いまのところ  $d_1 l_1$  の積として与えられただけである。

ここで出力と性能係数が実際にどのようなようになっていたらよいかを調べてみる。実際の要求は種々雑多であるが、一般的に性能係数と出力とは大体比例した値が要求される。1kW の出力に対しては増幅度は 1,000~2,000 で、時定数は大きくても 0.1 秒ぐらいが望ましい。これで性能係数は 10,000~20,000 s<sup>-1</sup> となる。10 kW では性能係数はこの 10 倍位が要求されるであろう。この関係を基として数値を入れると

$$d_1 l_1 = \frac{CN}{C'(\sqrt{N}-C'')} \\ = \frac{10 N}{12750(\sqrt{N}-9.4)} \sim \frac{20 N}{12750(\sqrt{N}-9.4)}$$

となる。第 8 図にこの上限下限を示してある。



第 8 図 所要出力に対する入力段の寸法と出力段の寸法  
(—入力段, — · —出力段, —時定数)

Fig. 8 Size of input stage comparing with size of output stage for required output  
(— input stage, — · — output stage, — time constant)

この入力段の寸法が、出力段の寸法とどのような関係にあるかに注目するため第 8 図に出力段についても鎖線で画いてある。これによると出力段の  $dl$  は入力段の  $dl$  の上下限のほぼ中央にきているから、両者の寸法を大体等しくとればよいことがわかる。

製造工作上から考えると、この両者の寸法が完全に等しいことが好ましい。材料費の面ではできるだけ小さくした方がよいかもしれないが、これは工場での加工(打抜き作業など)が容易になることで充分埋め合わせがつくはずである。結論として、500W から 10kW 程度の二段増幅発電機については製造上、入力段と出力段の電機子寸法を同じくすることが適切な設計であるといえる。

10 kW 以上の出力に対しては、性能係数を出力に比例して増加させる意義はあまりなくなってくる。実際問題として性能係数を 100,000 以上としても意味はない。そこで入力段寸法を出力段とそろえる必要はなくなるが、やはり製造作業を考えて電機子直径は等しくとり、長さの方で入力段を小さくすることを考えるべきである。

500W 以下のものについては事情が逆となり、所要の性能係数を得るために入力段寸法を出力段より大きくしなければならなくなる。これは製作上思わしくないから、出力段の大きさを所要出力相当分より幾分大きくし、入力段の寸法をこれに合わせるべきである。

いままでは入力段の時定数が等しいと仮定してきたがもし入力段の時定数を小さくしたとすれば、(これにより総時定数は小となる) 上述の考察に変更を加えなければならない。この時は第 8 図の入力段寸法の曲線は上にずれてくる。したがって入力段と出力段の寸法を等しくするとき、性能係数は幾分小さな値となる。しかし、このときでも性能係数の値は充分高いから、別に困ることはない。他方入力段の時定数が小さくなるという利点が生じてくる。入力段には一つ以上の励磁巻線、たとえば安定化用のフィードバック巻線などを置く必要がしばしばでてくるが、固定子寸法も出力段とそろえるために巻線スペースが限られてくるとしても、第 1 の巻線スペースを小とし時定数を小さくすることは他の第 2, 第 3 の巻線のスペースを空けてやることになる。このようにした場合温度上昇が懸念されるかもしれないが、入力段のギャップ磁束密度が非常に低く、励磁 AT もきわめて小さいため、励磁巻線内の電流密度も充分低く押えられるので全然問題ない。第 8 図には総時定数を 0.3 秒に押えた場合の曲線が破線により示してある。総時定数も同時に書いてある。

#### IV. む す び

上述の検討から、増幅発電機が主として要求される普通の出力の範囲では、ラピダインの入力段と出力段の電機子および固定子の寸法を等しくすることが、技術的、製造上の目的に合致することがわかった。両段の電気的設計をいかにすべかきには触れていないが、出力段では要求される出力に応じたものとし、入力段では性能係数が最大となるようにすべきである。この関係は両段に同じ電機子を利用している増幅発電機、たとえばアンブリダイン、二段ロートロールなどと比較してみても興味を引く事実である。これらの機械でも入力段と出力段は同じ大きさの電機子、固定子を持っており、本論文で得た結論に自然に合致している。これらの増幅発電機では一つの段がないために当然材料はすくなくて済むはずであ

るが、二つの目的が磁氣的、電氣的に重畳されているのだから、その電機子固定子ともかなり大きなものとなっている。また、このように重畳することにより、制御回路への反作用、整流への影響、短絡軸ブラシ回路および出力回路の電圧の関連などの付随する現象を持っている。

以上総括すると、増幅発電機はいかに設計され、いかに説明されるかの系統的数値的な検討を行ない、さらに制御技術上生ずる要求を満たしつつ、製造上の費用、工作の容易さをも考慮することを示したわけである。

原書： F. Nechleba: "Die wirtschaftliche Dimensionierung einer Verstärker machine, erläutert am Beispiel einer Rapidyne" Sonderbauformen elektrischer Maschinen (1958)

訳者： 設計部回転機第一課 鈴木 慶 三

#### 発明の紹介

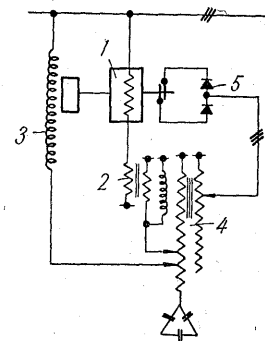
### 同期機の励磁調整装置

(実用新案登録 第 507529 号)

この考案は自励式複巻同期発電機の急速励磁調整装置に関するものであります。自励式複巻同期発電機の励磁電流を、発電機1の負荷回路から変流器2を介して負荷電流に比例する電流を取り出し、また負荷回路にリアクトル3を介して電圧に比例した電流を取り出し、両電流を電圧変成器4および整流器5を介して発電機の界磁巻線に加えることは知られております。この場合前者は負荷電流の増大と共に励磁電流を増大させ電圧降下を補償します。後者は負荷増大による原動機の回転数の低下に伴う周波数の低下で、リアクトルのインピーダンスを減じて励磁電流を増します。これによって急速な励磁補償が過渡的に行なわれます。

このような装置においては、励磁の補償作用を良好にするために変流器2の変流比を大とすることが望まれますが、変流比をあまり大とすると負荷の短絡時に変流器の二次は高電圧となり変成器4、整流器5を破損する危険が生じます。

したがってこの考案によれば、発電機の負荷回路に接続された変流器2とリアクトルを介して変成器4に給電し、その二次電圧を整流器5を介して発電機の界



磁巻線に供給する装置において、前記の変流器2の二次に短絡電流で飽和する可飽和リアクトルを接続します。

したがって短絡時に変流器二次の電圧が上昇すると、可飽和リアクトルは飽和しますので、自己のインピーダンスを減じ、変流器の二次の電流を分流させて電圧制限を行ないます。したがって変流器は充分変流比を大として精密制御を行なわせることができます。なおこの際の励磁の補償はリアクトル3によって良好に行なわれます。(特許課 吉田)



\*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。