

最近の大容量発電電動機

Recent Large-capacity Generator-motors

北野 豊\*  
Yutaka Kitano

要 旨

最近の揚水用発電電動機の単機容量は、経済性の見地から飛躍的に増大されるにいたった<sup>(1)</sup>。われわれは今までに10数種の発電電動機を製作してきたが、本文はこれらの発電電動機の電圧の選定、始動の問題点および構造上の特長についてのべ、揚水発電所を建設する場合の参考に資するものである。

1. 緒 言

われわれが製作する機会を与えられた発電電動機は表1のように単機容量が数年間に10,000~50,000 kW級から、50,000~100,000 kW級のものに増大しており、さらに250,000 kW級のものが設計中である。諸外国では、大容量発電電動機として、アメリカのTaum Sauk 発電所、204 MVA機、イギリスのCruachan 発電所、110 MVA機などが最近建設されたが、わが国の大容量発電電動機の設計製作技術も欧米のそれに比肩すべき状態にあると考えられる。

2. 発電電動機仕様

2.1 発電電動機の単機容量

発電機の出力と機械の大きさには次の関係がある。

$$\frac{P}{N} = K \cdot D^2 L \quad P = K \cdot N \cdot D^2 L \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、P：出力 (kVA)
- N：回転数 (rpm)
- D：固定子鉄心内径 (m)
- L：固定子鉄心長 (m)
- K：出力係数

Kは電気装荷と空げき磁束密度に比例する常数である。電気装荷および空げき磁束密度を大きくすれば、同一マシンサイズD<sup>2</sup>Lで、P/Nを大きくすることができるが、電気装荷を大きくすることは、

固定子鉄心に配置される固定子巻線の発生熱の集中と、電機子反作用を打消すための界磁アンペア回数の増大による界磁巻線の過大をきたし、また空げき磁束密度を大きくすることは、電機子鉄心歯の磁束密度の過大をきたすので、いずれもあまり大きくすることができない。空気冷却式水車発電機の場合、Kの値は大略5~8程度である。今回転子の定格速度および無拘束速度における周速をそれぞれVo(m/s)、Vr(m/s)とし、Vr/Vo=Rとする。D=60Vo/πN=60Vr/πNRを(1)式に代入すると

$$P = K \cdot (60 V_r / \pi R)^2 (L / N)$$

この式でわかるように同一固定子鉄心長LにおいてはVrをますほどPはます。市場にて容易に入手できる材料で、無拘束速度における回転子応力の降伏点に対する安全率を1.5とすると、無拘束速度における回転子周速Vrは、設計によっても異なるが、大略150~170 m/sにとることが可能である。たとえばK=8、Vr=150(m/s)、R=1.5、L=3.5 とすると上式より

$$P \approx 10^8 / N$$

すなわち、200 rpmでは500 MVA機、300 rpmでは333 MVA機ということになり、空気冷却式水車発電機の製作限界はかなり大きい所にあるということが出来る。大容量発電機を設計するにあたっては輸送限界より制限をうける場合があり、計画当初より留意する必要がある。

2.2 電 圧

固定子コイルの絶縁はマイカテープを主体とした絶縁層に合成樹

表1 発 電 電 動 機 一 覧 表

| 発 電 所 名  |       | 製造年  | 台 数 | 形 式   | 出 力<br>( $\frac{\text{MVA}}{\text{MW}}$ ) | 電 圧<br>(kV) | 回転数<br>(rpm) | 原動機種類            | 始動方式    | 始動時<br>電 圧<br>(%) | 全電圧<br>切 換 | 同期引入<br>れ時電圧<br>(%) | 負荷トルク低減法     |              | 推力軸受<br>荷 重<br>(t) |
|----------|-------|------|-----|-------|-------------------------------------------|-------------|--------------|------------------|---------|-------------------|------------|---------------------|--------------|--------------|--------------------|
|          |       |      |     |       |                                           |             |              |                  |         |                   |            |                     | 水 面<br>押 下 げ | オイル<br>リ フ ト |                    |
| 東北電力株式会社 | 沼 沢 沼 | 1951 | 2   | 横 軸   | 23/21                                     | 11/11       | 500/600      | (フランス)<br>+(ポンプ) | 水 車     | —                 | —          | —                   | —            | —            | 30                 |
| 四国電力株式会社 | 大 森 川 | 1958 | 1   | 普 通 形 | 14/15                                     | 11/11       | 400          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期前        | 100                 | ○            | ○            | 152.1              |
| 九州電力株式会社 | 諸 塚   | 1960 | 1   | 普 通 形 | 58/56.5                                   | 11/11       | 300          | (フランス)<br>+(ポンプ) | 水 車     | —                 | —          | —                   | —            | —            | 468                |
| 中部電力株式会社 | 畑 薙   | 1961 | 2   | か さ 形 | 50/46.5                                   | 11/11       | 200          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 489.6              |
| 関西電力株式会社 | 三 尾   | 1962 | 1   | 普 通 形 | 37/37                                     | 11/10.5     | 277          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期前        | 100                 | ○            | ○            | 366                |
| 電源開発株式会社 | 池原(Ⅰ) | 1963 | 2   | か さ 形 | 78/80.5                                   | 13.2/12.6   | 180          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 822.3              |
| 四国電力株式会社 | 穴 内 川 | 1963 | 1   | 普 通 形 | 14.5/14                                   | 6.6/6.6     | 360          | 斜 流              | 制 動 巻 線 | 50                | 同期前        | 100                 | ○            | ○            | 166                |
| 神奈川県     | 城 山   | 1963 | 2   | 普 通 形 | 70/73                                     | 18/17       | 300          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 457.3              |
| 東京電力株式会社 | 矢 木 沢 | 1965 | 1   | か さ 形 | 85/87                                     | 13.8/12.6   | 150          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 817.4              |
| 電源開発株式会社 | 池原(Ⅱ) | 1965 | 2   | か さ 形 | 110/110                                   | 16.5/15.7   | 150          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 1,248.9            |
| 電源開発株式会社 | 長 野   | 1967 | 2   | か さ 形 | 120/120                                   | 16.5/15.7   | 150          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 1,300              |
| 中国電力株式会社 | 新成羽川  | 1967 | 3   | か さ 形 | 79/73                                     | 13.2/12.6   | 144          | フランス             | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 924.2              |
| 四国電力株式会社 | 蔭 平   | 1967 | 1   | 普 通 形 | 51/47                                     | 13.8/13.2   | 240          | 斜 流              | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 597.9              |
| 中部電力株式会社 | 高根第一  | 製作中  | 2   | 普 通 形 | 100/97.7                                  | 13.2/13.2   | 277          | 斜 流              | 制 動 巻 線 | 50                | 同期後        | 50                  | ○            | ○            | 891.5              |
| 関西電力株式会社 | 喜 撰 山 | 製作中  | 1   | 準かさ形  | 245/240                                   | 16.5/16.5   | 225          | フランス             | 誘導電動機   | —                 | —          | —                   | ○            | ○            | 1,500              |
| 東京電力株式会社 | 水 殿   | 製作中  | 2   | か さ 形 | 65/63                                     | 11/10       | 150          | フランス             | 同 期 始 動 | —                 | —          | —                   | ○            | ○            | 875                |

\* 日立製作所日立工場

脂を真空注入して形成される。合成樹脂としては、近時絶縁層の絶縁破壊強度(kV/mm)の高いエポキシレジンが採用されるにいたり、十分信頼性の高い20kV級のコイルが製作できるようになっている。発電機の定格電圧をきめるにあたっては、発電機、母線および付属機器(変圧器、遮断器、計器用変成器など)を含めた経済性を検討して決定すべきである。一般に大容量発電機の固定子コイルは1ターンコイルが採用される。この場合発電機の電圧を決めるにあたっては次の基本事項を考慮する必要がある。

- (1) 1スロット内のアンペアコンダクタが適当な値であること。
- (2) 各相および各並列回路の電圧がバランスしていること。

1スロット内のアンペアコンダクタが過大になると、電機子コイルからの発熱が集中し、スロットの大きさが過大となり、経済設計とはならない。またその値が過小になると、2.1にのべた出力係数が小さくなりこれまた経済設計とはならない。通常1スロット内のアンペアコンダクタは2,500~5,000程度(3,500~4,500程度が望ましい)にとられる。

次に各相および各並列回路の電圧がバランスするためには、極数およびスロット数によってとり得る並列回路数が決まってくる。一般に(極数)/(並列回路数)が整数でない場合はアンバランスとなる。

これらを考慮して出力、電圧に応じてとられる並列回路数の傾向を示せば表2のようである。表中の数値は電流(A)を示す。( )内に示した並列回路数は、( )外の並列回路数をとり得ない場合に考慮してよい並列回路数を示したものである。

城山発電所用73,000kVA/73,000kW発電機では発電機から変圧器までケーブルが長く、ケーブルが立坑を通るため、ケーブルを細く計画する必要がある、18/17kV Y結線が採用された。

### 3. 始 動

ポンプ水車の始動方式としては、制動巻線始動、同期始動、直結電動機始動の三者が用いられている。同期始動は専用の発電機を必要とし、また直結電動機始動は機器建設費を高めることが問題であるので、制動巻線始動が可能であれば、この方法が最も簡単で経済的といえる。

#### 3.1 制動巻線始動の問題点

##### (1) 始 動 ト ル ク

発電電動機の始動トルクとして必要な条件は

- (a) すべりが1から同期引き入れ可能最大すべりまでの全域にわたって、始動トルク  $T_D$  は、ポンプ水車と発電電動機の機械損に相当する負荷トルク  $T_L$  より大きいこと
  - (b) 最終すべりが同期引き入れ可能最大すべりより小さいこと
  - (c) 予定時間内に加速できること
- である。

発電電動機の逆相インピーダンス、リーケージインピーダンスを経済性をそこなわない範囲でなるべく小さく設計し制動巻線の設計に留意するとともに、負荷トルク低減法(水面おし上げ、オイルリフト付メタルの採用)を採用することにより半電圧始動で(a)(b)の条件を容易に満足することができる。実測例の傾向は大略図1のとおりである。

始動時間  $t$  を算出する運動方程式は、始動トルクを  $T_D(\text{kg-m})$ 、負荷トルクを  $T_L(\text{kg-m})$ 、定格トルクを  $T_o(\text{kg-m})$  とし単位慣性

表2 出力、電圧と並列回路数

| MVA<br>kV | 50         | 75         | 100        | 125                | 150                | 175                | 200                | 225                | 250         | 275                | 300                |
|-----------|------------|------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|
| 11        | 2620<br>2Y | 3940<br>2Y | 5250<br>3Y | 6560<br>3Y<br>(4Y) | 7870<br>4Y         | 9180<br>4Y         | 10500<br>6Y        | 11810<br>6Y        | 13120<br>6Y | 14430<br>6Y        | 15750<br>8Y        |
| 13.2      | 2190<br>Y  | 3280<br>2Y | 4370<br>2Y | 5470<br>3Y<br>(4Y) | 6560<br>3Y<br>(4Y) | 7650<br>4Y         | 8750<br>4Y         | 9840<br>4Y<br>(6Y) | 10930<br>6Y | 12030<br>6Y        | 13120<br>6Y        |
| 16.5      | 1750<br>Y  | 2620<br>2Y | 3500<br>2Y | 4370<br>2Y         | 5250<br>3Y         | 6120<br>3Y<br>(4Y) | 7000<br>4Y         | 7870<br>4Y         | 8750<br>4Y  | 9620<br>4Y<br>(6Y) | 10500<br>6Y        |
| 18        | 1600<br>Y  | 2410<br>Y  | 3210<br>2Y | 4010<br>2Y         | 4810<br>2Y<br>(3Y) | 5610<br>3Y<br>(4Y) | 6410<br>3Y<br>(4Y) | 7220<br>4Y         | 8020<br>4Y  | 8820<br>4Y         | 9620<br>4Y<br>(6Y) |
| 20        | 1440<br>Y  | 2170<br>Y  | 2890<br>2Y | 3610<br>2Y         | 4330<br>2Y         | 5050<br>3Y<br>(2Y) | 5770<br>3Y<br>(4Y) | 6500<br>3Y<br>(4Y) | 7220<br>4Y  | 7940<br>4Y         | 8660<br>4Y         |

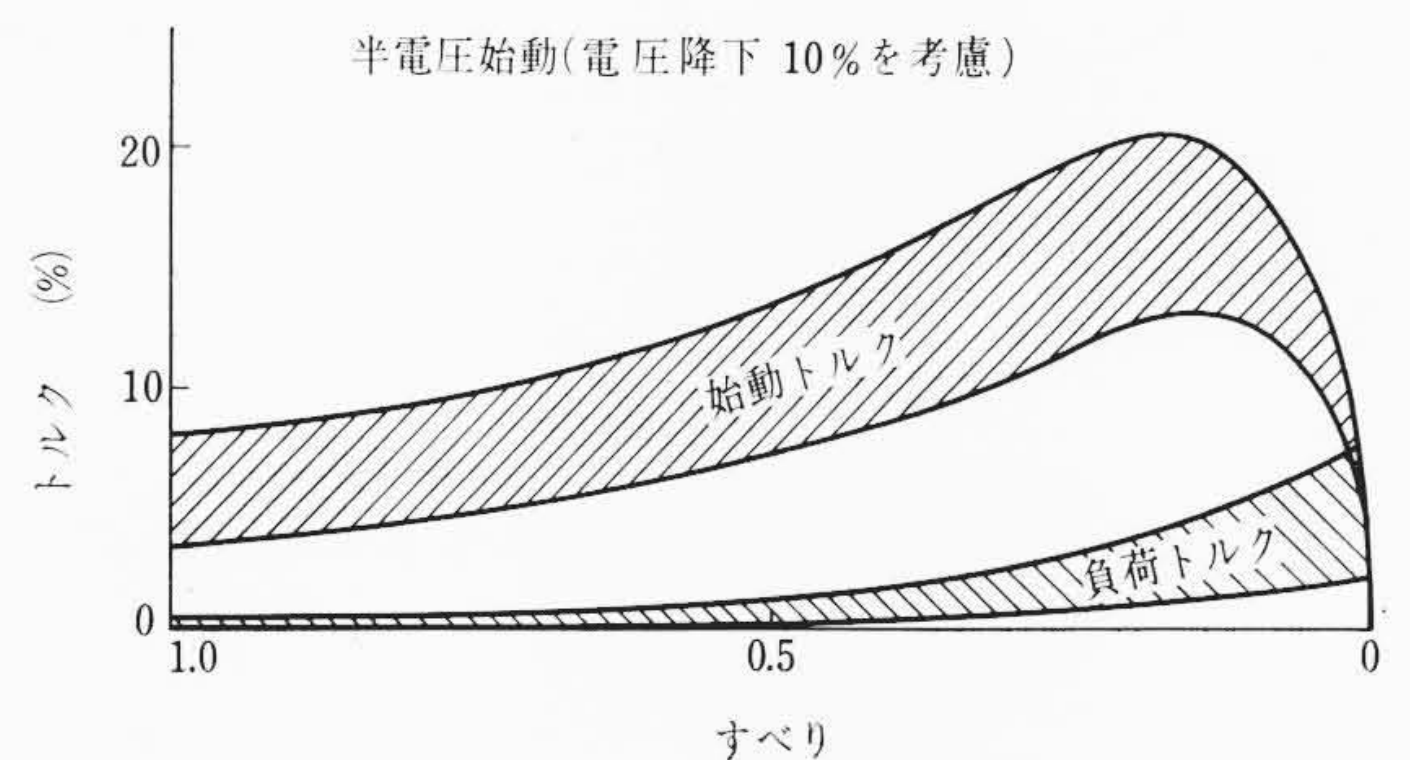


図1 トルクーすべり曲線

定数を  $H(\text{kW-S/kVA})$ 、すべりを  $s$  で表わせば、次式で与えられる。

$$T_D - T_L = -2T_o H \frac{ds}{dt}, \quad H = \frac{1.37GD^2 \text{rpm}^2}{\text{kVA}} \times 10^{-6},$$

$$GD^2: \text{kg-m}^2 \dots\dots\dots (2)$$

したがって、すべりが1から  $s$  に達するまでの時間  $t(\text{s})$  は次式から求められる。

$$t = 2H \int_s^1 \frac{T_o}{T_D - T_L} ds \dots\dots\dots (3)$$

( $T_D - T_L$ ) をほぼ一定とみなして、 $s \div 0$  とすれば、(3)式は

$$t \div \frac{2HT_o}{T_D - T_L} = 2H \left/ \left\{ \frac{(T_D - T_L)}{T_o} \right\} \right. \dots\dots\dots (4)$$

通常的设计においては、 $H=2.5 \sim 5$ 、半電圧始動で(4)式で表わされた等価の  $(T_D - T_L)/T_o = 0.04 \sim 0.1$  程度であり、同期引き入れ可能すべりに達するまでの時間は実績によれば大略1~5分である。

##### (2) 始 動 電 流

制動巻線始動においては、一般に主変圧器に中間タップを設け半電圧を発電電動機に印加する。発電電動機の逆相リアクタンス  $x_2$  は通常20~30%程度であるから、電動機の始動電流  $i_0$  (単位法) は始動瞬時の数サイクルのピーク電流を無視すれば、

$$i_0 = (1/2)v(1-e)/x_2 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、  $v$ : 定格電圧(単位法)

$e$ : 電圧降下(単位法)

$x_2$ : 逆相インピーダンス(単位法)

$e$  は通常0.1、 $x_2$  は通常0.2~0.3であるので

$$I_0 = (1/2) \times 1 \times 0.9 / (0.2 \sim 0.3) = 1.5 \sim 2.25$$

図2は始動オシログラムの一例を示したものである。

始動電流が送電系統に及ぼす影響を検討する必要がある。

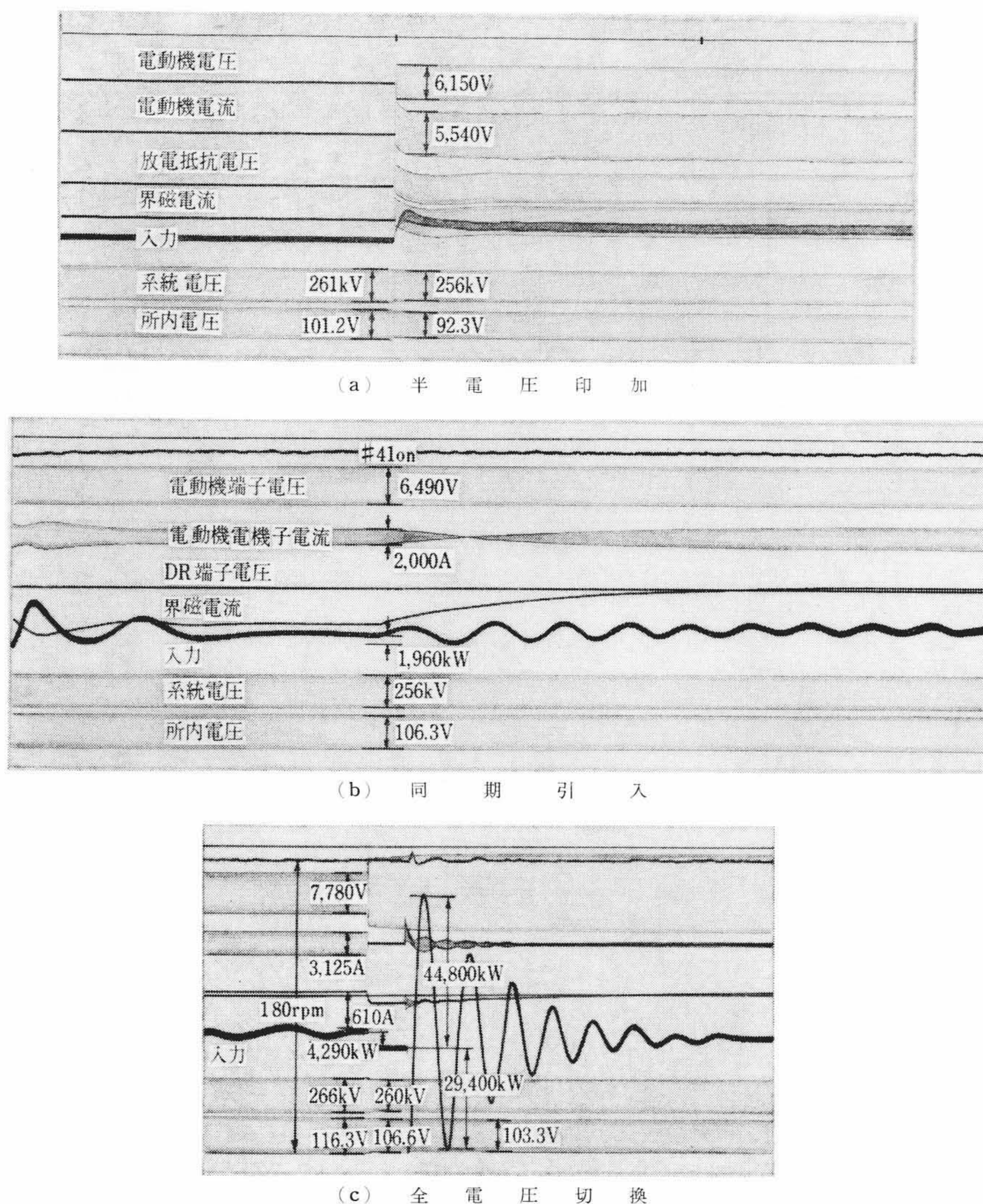


図2 池原発電所納 78 MVA/80.5 MW 発電電動機現地起動試験オシログラム

### (3) 全電圧切換時の電力動揺

通常制動巻線始動の方式としては、主変圧器の中間タップを用いて半電圧で始動して、半電圧で同期引き入れを行ない、いったん発電電動機を電源からきりはなし、半電圧と全電圧の位相差60度だけ、発電電動機を減速させてのち主変圧器の主端子を用いて全電圧を印加する方式がとられる。このときの電力動揺についてのべる。

定格速度  $n_0$  における負荷トルクを  $\tau$  (単位法) とし、位相差60度ずれたときにおけるすべりを  $s_0$ 、位相差60度ずれるに要する時間を  $t_0$  とする。(2)式において  $T_D=0$ 、 $T_L/T_0=\tau$  としてとけば

$$t_0 = (2H/\tau) s_0 \quad (6)$$

また位相差を  $\theta$  (rad) とし、極数を  $P$ 、電源周波数を  $f$  (50 または 60 サイクル) として、

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -\frac{1}{n_0} \frac{dn}{dt} = -\frac{P}{120f} \frac{d}{dt} \left( \frac{60}{P\pi} \frac{d\theta}{dt} \right) \\ &= -\frac{1}{2\pi f} \frac{d^2\theta}{dt^2}, \quad T_D=0 \end{aligned}$$

なる関係を(2)式に入れて解けば

$$|\theta| = (\pi f \tau / 2H) t^2 \quad (7)$$

(7)式において  $\theta = \pi/3$  (角度で言えば60°)、 $t = t_0$  とすれば

$$t_0^2 = 2H/3f\tau \quad \therefore t_0 = \sqrt{2H/3f\tau} \quad (8)$$

(8)式を(6)式に代入すれば

$$s_0 = \sqrt{\tau/6fH} \quad (9)$$

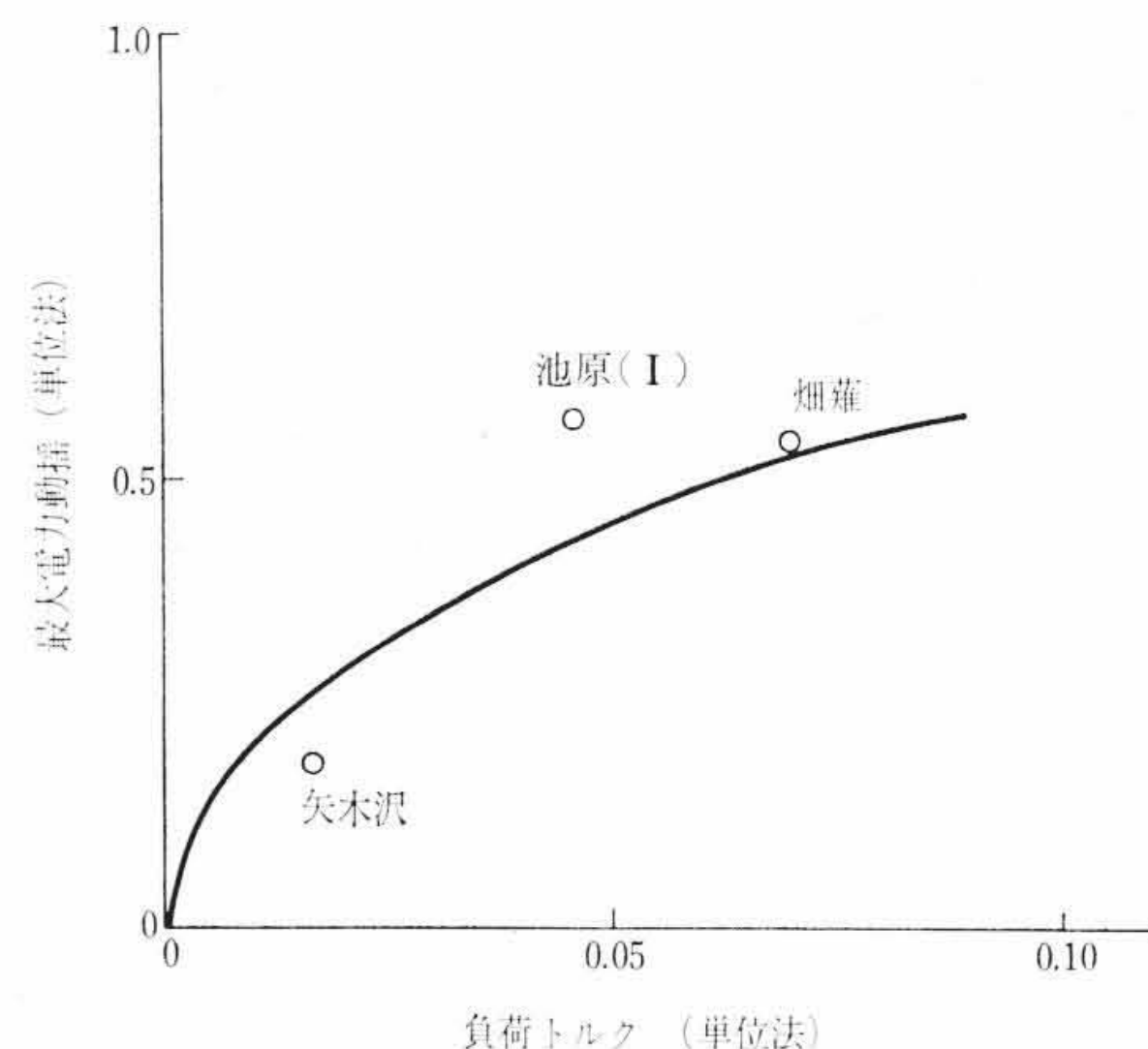


図3 負荷トルクと最大電力動揺

実機では  $\tau=0.02\sim0.08$ 、 $H=2.5\sim5$  程度であるから(8)(9)式より

$$t_0 = 0.6\sim1.8 \text{ 秒}$$

$$s_0 = 0.003\sim0.01$$

程度の値になる。

次に系統電圧と発電電動機の相差角が零で全電圧を印加した場合の電力動揺を求める。簡単のために発電電動機の同期化トルクを、相差角  $\theta$  に比例するとして  $T_M\theta$  で与えると、運動方程式は次式となる。

$$-T_M\theta - T_L = -2T_0H \frac{ds}{dt} \quad (10)$$

ただし  $\theta$  は発電電動機電圧の位相が系統電圧より進んでいるときを正とする。

$$\therefore \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{2\pi f}{2H} \frac{T_M}{T_0} \theta + \frac{2\pi f}{2H} \frac{T_{L0}}{T_0} = 0 \quad (11)$$

この解は

$$\theta = \theta_m \sin(\alpha t + B) - T_{L0}/T_M, \quad \alpha = \sqrt{2\pi f T_M/2T_0H} \quad (12)$$

一般に  $T_{L0}/T_M$  は小さいので計算を簡単にするために無視すると

$$\theta = \theta_m \sin(\alpha t + B) \quad (13)$$

一つの初期条件としては、 $t=0$  のとき  $\theta=0$  であるから

$$\theta = \theta_m \sin(\alpha t) \quad (14)$$

もう一つの初期条件として、 $(d\theta/dt)_{t=0}$  を求める。(14)式より

$$(d\theta/dt)_{t=0} = \alpha \theta_m \quad (15)$$

一方(7)(8)式より

$$(d\theta/dt)_{t=t_0} = (\pi f \tau / H) t_0 = \pi \sqrt{2f\tau/3H} \quad (16)$$

(14)式の  $t=0$  は、(7)式では  $t=t_0$  であるから(15)(16)式の右辺は等しくなる。すなわち

$$\alpha \theta_m = \pi \sqrt{2f\tau/3H} \quad \therefore \theta_m = \sqrt{2\pi\tau T_0/3T_M}$$

よって発電電動機の出す最大トルク (単位法) は

$$T_M \theta_{\max} / T_0 = \sqrt{2\pi\tau T_M/3T_0} \quad (15)$$

この式は単位法で表示しているから最大電力動揺  $p_m$  (単位法) は

$$p_m = \sqrt{2\pi\tau T_M/3T_0} \quad (16)$$

と書ける。いま  $T_M/T_0=2$  として(16)式をグラフに描けば図3が得られる。○印は現地の実測データの数例を記入したものである。上記は省略計算なので厳密解ではないが、大略の傾向をつかむことができる。電力動揺の周期は(12)式に見るように、 $H$  の値によってかわるが、電力動揺の振幅は(16)式に見るように、 $H$  の

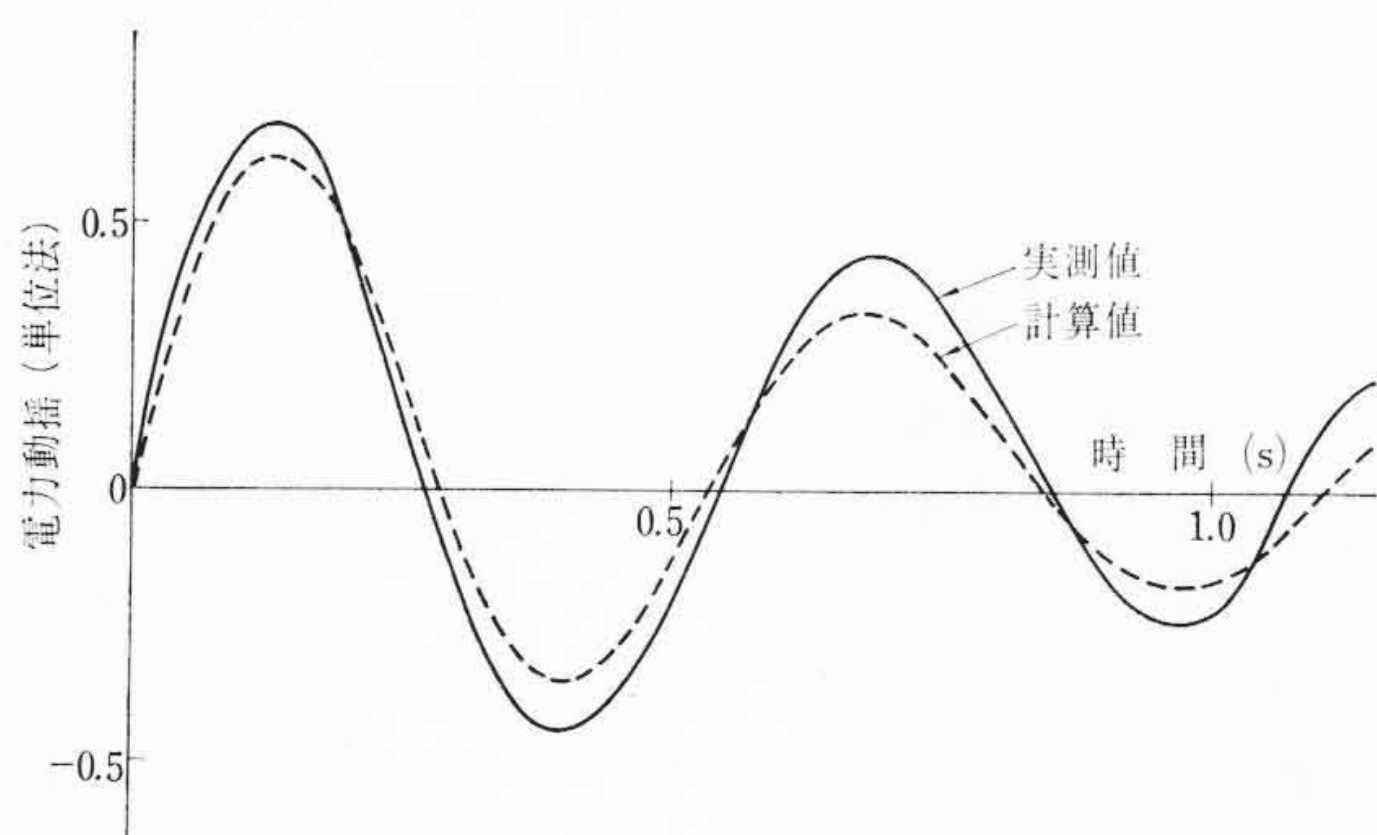


図4 電力動揺の一例

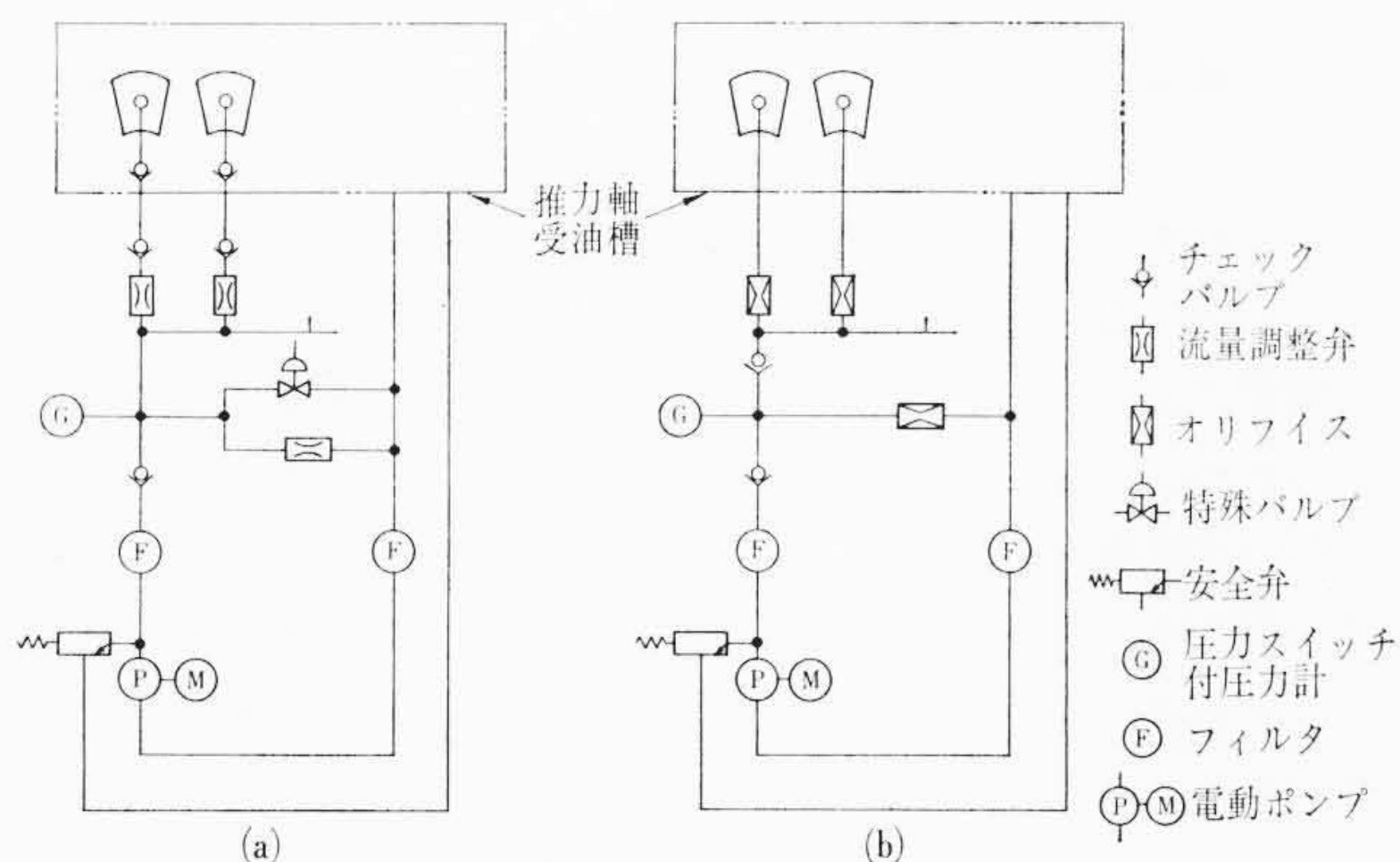


図5 オイルリフト圧油系統図

値に影響されない。これは興味ある事項であり、電力動揺の振幅を減らすには、負荷トルクを減らすことがたいせつであることがわかる。これらの厳密解は電子計算機によって解くことができる。計算結果と実測値の比較の一例は図4に示すとおりである。

以上のように、全電圧切換時の電力動揺の振幅は、始動時の突入電流より小さく、すぐに減衰してしまうので、あまり問題にしなくてもよいと考えられる。

(8)式に示すように負荷トルク  $\tau_0$  が一定であれば、半電圧より全電圧に切り換えるに必要な時間  $t_0$  は一義的にきまるので  $t_0$  をタイマによって整定することができる。負荷トルク  $\tau_0$  はポンプ水車の漏水などによって大幅に変化する場合もあるときは、系統電圧と発電電動機電圧の位相差を検出して全電圧を印加する方法がとられる。実際には発電電動機電圧とアクチュエータ発電機電圧が一致するように機械を組立てておき、系統電圧とアクチュエータ発電機電圧の位相差を検出すればよい。位相差が  $\pm 10^\circ$  (電気角) くるっていても、電力動揺の大きさがそれほど変わらないことが計算結果と実測結果から知られている。

#### 4. 推力軸受

発電電動機の推力軸受は

- (1) 正逆回転に適した軸受であること。一般に中心支持形が用いられる。
- (2) 始動時の摩擦損失を減らすため、ランナとのしゅう動面に圧油を送りこむ装置 (オイルリフト) が用いられる。

中心支持の推力軸受は、偏心支持のそれにくらべて、いわゆるくさび状油膜を形成しにくく、また軸受の損失も大きいので、平均面圧は偏心支持軸受の80%程度に下げて設計している。

オイルリフトの圧油系統は図5(a)のように各シューにチェックバルブと、流量調整弁を用いる方式とし、チェックバルブの不具合を検出する保護装置には圧力検出用油圧回路を設け、その回路に特殊な機能をもたせた特殊バルブを用いていたが、その後のモデル試験

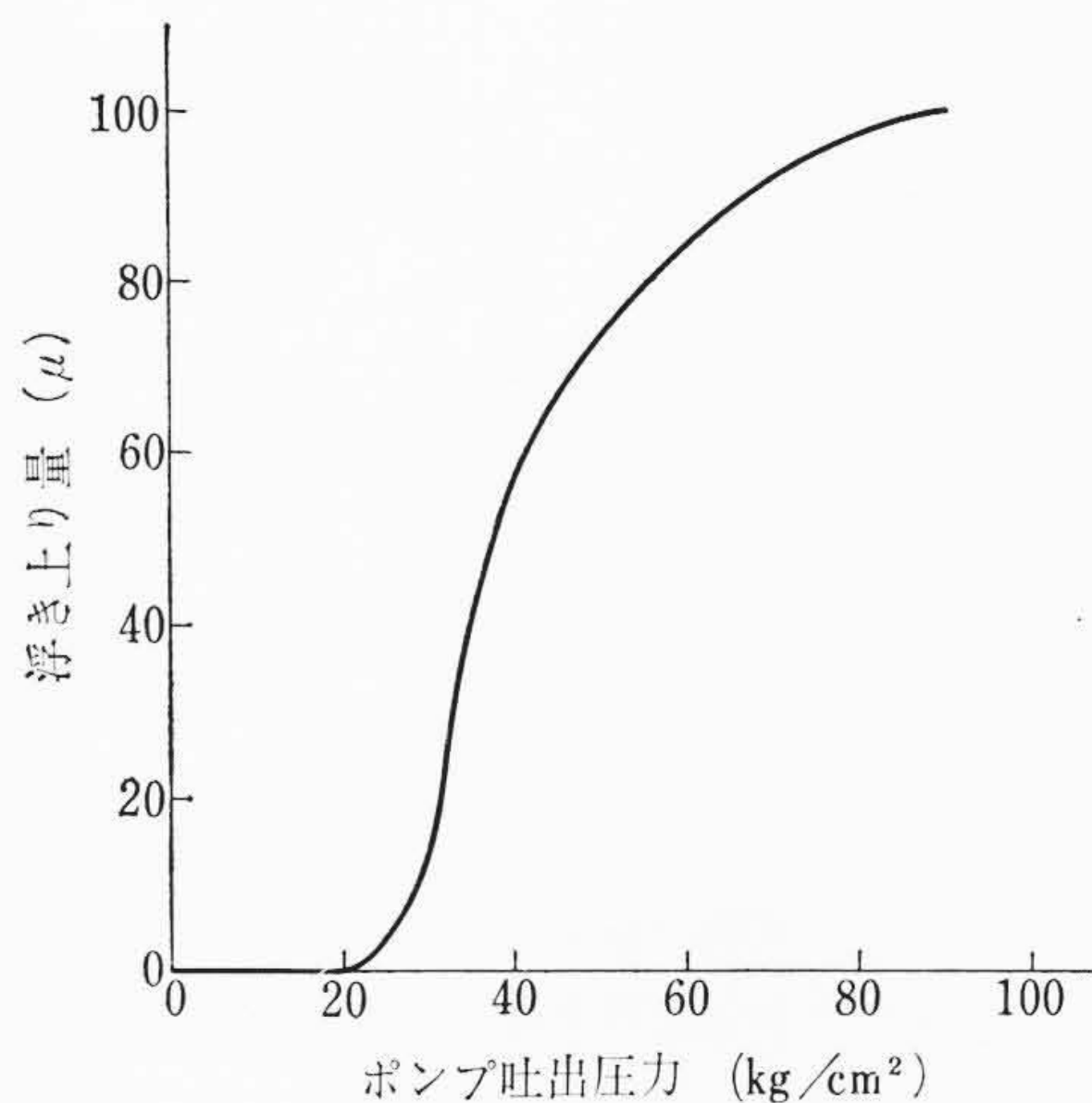


図6 オイルリフトによる回転子浮上り量

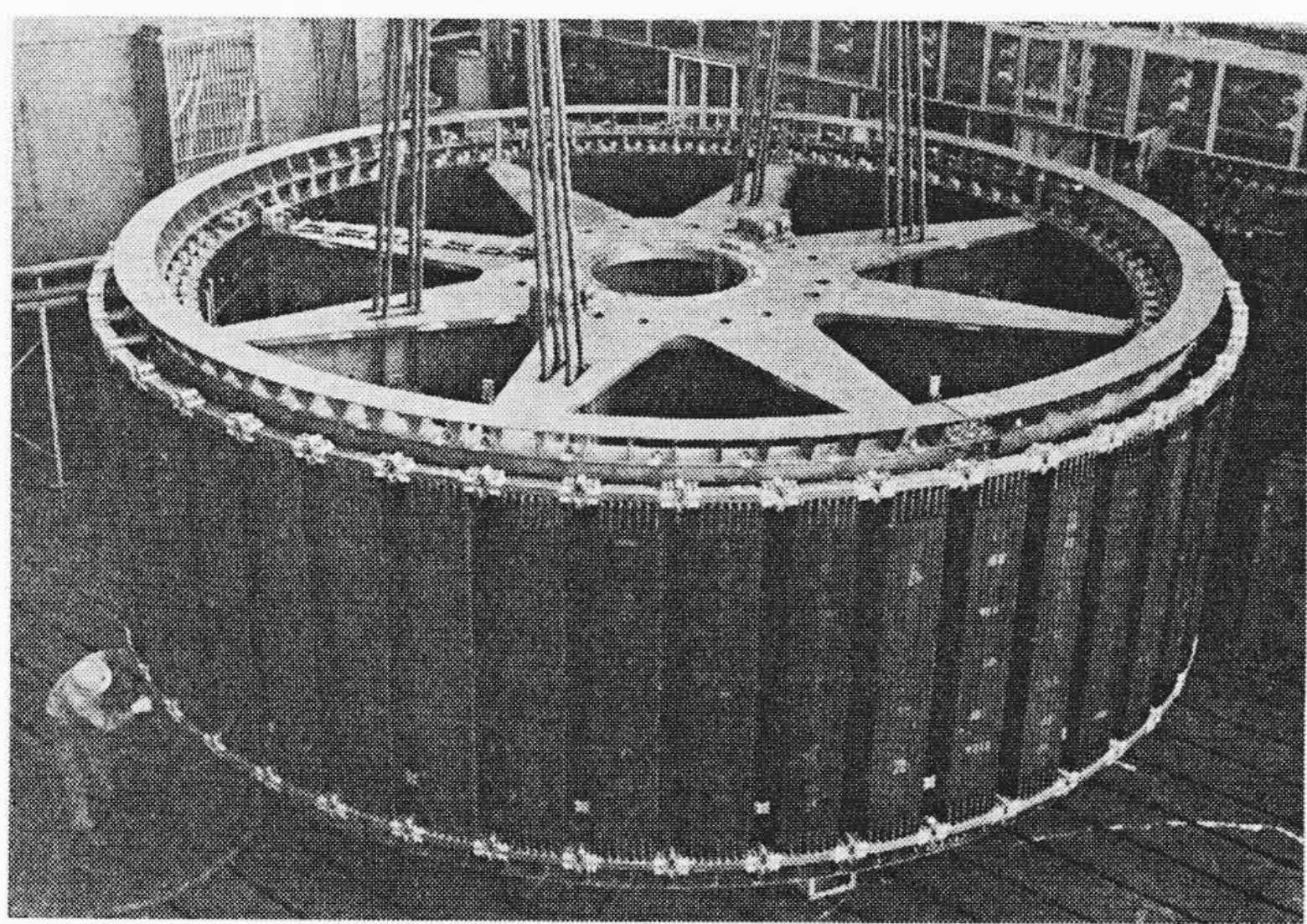


図7 長野発電所用回転子

および実機での確認により、図5(b)のように比較的簡単な回路に改善し、保守の便をはかっている。ポンプ吐出圧力と回転子の浮き上り量の工場試験時の一例を示せば図6のようである。回転体の浮き上り量が  $50\mu$  以上であれば摩擦係数が0.005程度にいちじるしく小さくなり、始動所要トルクが1%(単位)以下になることが知られている。

#### 5. 構造

固定子は、制動巻線始動の場合に、突入電流による大きい電磁力および、始動中に  $2sf$  サイクル ( $s$ : スリップ,  $f$ : 周波数) の電磁力をうけるので、固定子わくは通常の水車発電機より剛性を大きく設計製作される。

ポンプ水車に直結される発電電動機は、通常の水車に直結される発電機より、一般に無拘束速度が低いので、回転子リムの半径方向の長さが少なくすむ。したがって発電電動機の回転子リムの剛性は通常発電機にくらべて小さくなるので、それを考慮して、回転子リム、スパイダの設計をする必要がある。図7は回転子の一例を示したものである。

発電電動機のブレーキは使用ひん度が高いので、高ひんどにたえるよう設計しなければならない。従来のブレーキは図8(a)のように、単にピストン上のシュー受け台にシューをのせた構造であるが、回転中のブレーキリングのふれに自由に応動できるように、シュー受け台にピボットを設ける構造を開発した (図8(b)参照, 特許出願中)。

このようなブレーキにすることにより、ブレーキシューのかた減

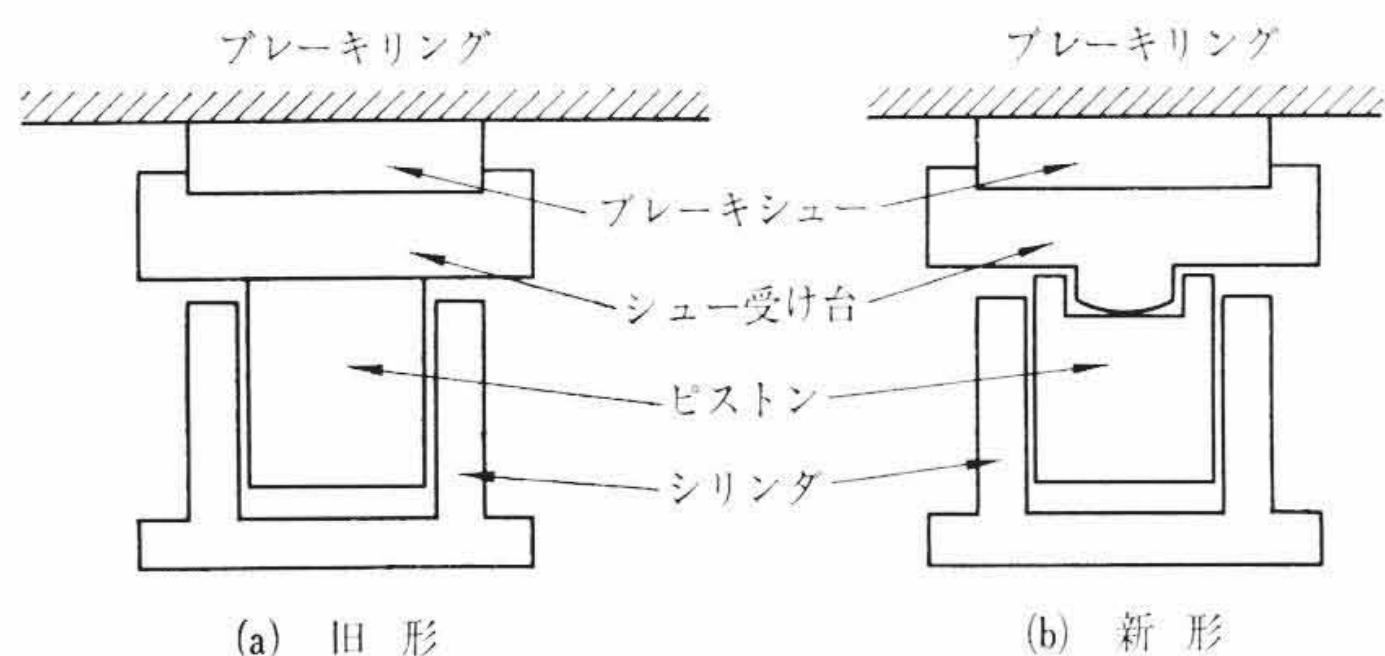


図 8 ブレーキ

り、ブレーキピストンのカジリなどの不具合を少なくすることができ、工場でのモデル試験の結果、ブレーキ動作時のショック音が小さく、またブレーキシューの不均一なあたりを防止できることが確認された。

## 6. 今後の問題

建設費の低減、効率の上昇などから単機容量は増大する傾向にあり、現在設計中の関西電力株式会社喜撰山発電所用 245 MVA, 240 MW, 225 rpm をはじめ、数地点で 200~300 MW 級 200~450 rpm 機の計画が行なわれている。これらの巨大な発電機を安全確実にしかも経済的に設計製作するために、検討を要するおもな問題は次のとおりである。

### (1) 海水揚水機

海辺に設置されるために各部品および冷却水管のさび止め対策、固定子および回転子コイルの絶縁抵抗の低下防止、整流子、スリップリングの集電性能の低下対策などが重要である。整流子、スリップリングの集電性能に問題があるときは、ブラシレス励磁装置の採用も検討すべきであろう。

### (2) 回転子の構造

高速大容量機では、極力鉄心積厚を小さくするほうが望ましいもので回転子外径が大きく設計されることになる。2.1 にのべたように、無拘束速度を 150% とすると、定格回転数における回転子の周速は約 100 m/s になる。回転子の出張り部分を極力小さくし通風摩擦損をへらすための構造上の工夫が必要であり、また、回転子コイルの絶縁や、回転子コイルのリード線の絶縁の機械的耐力を考慮しなければならない。

### (3) 通風冷却方式

鉄心積厚が 3 m を越えると、必要な風量が機械の中央部に十分行きわたるような構造に特に留意しなければならない。回転子に設けたファンや、磁極のファンアクションで通風が不十分である場合には、風道内に通風ファンを十数個配列して強制通風するこ

とが有効である。

さらに一步進めて、コイルの導体内に直接に液体(油または水)を通す穴を設けて、コイルを直冷する方法を採用したほうが経済的な場合もあると考えられる。とくに回転子コイルを直冷にすると、磁極間に風の通風路を設ける必要がないので、円筒機と類似の構造となり、通風摩擦損をいちじるしく小さくできるので、効率が向上する<sup>(2)</sup>。

### (4) 振動

高速大容量機では、鉄心積厚が大きくなり、発電電動機の全高が高くなるので、とくに振動を考慮した設計とする必要がある。回転系の危険速度を高くするために、主軸の剛性を高めることはもちろん、軸受、ブラケット、固定子わくを含めた固定部分の横方向の剛性を高めるために、特別な構造にせねばならない場合がでてくる。コンクリート風道の場合はコンクリートから上部ブラケットを水平方向に支持する方法も有効と考えられる。

### (5) 推力軸受

軸受シュー 1 枚の受ける荷重をあまり大きくすると、軸受の温度が上昇し、支持方法に困難を伴う。通常的设计では大略 100 t くらいが限度とされている。推力軸受支持荷重が 2,000~3,000 t にもなると、シューの数が 20~30 個となり、また形状も細長いシューとなる。通常中心支持軸受の平均面圧は 25~30 kg/cm<sup>2</sup> に設計されているが、これをさらに大きくとることが、経済設計上望ましい。また面圧を高くすれば推力軸受損失もへるので、効率向上にも役立つ。軸受シューの形状、および支持方法の改善をはいれば、上記の面圧を上げうる見通しのあることは、推力軸受試験装置を用いたモデル試験の結果から得られている。

## 7. 結 言

電力会社その他の関係者各位のご努力により、わが国における揚水発電所の建設はここ 10 年間にめざましい発達をとげ、250 MW 級の発電電動機的设计が開始されている。関係各位のご指導のもとにわれわれは十数発電所の発電電動機を製作してきたが、本稿では仕様をきめるにあたり検討すべき電圧の問題、制動巻線始動の諸問題、今後の問題などに重点をおいてのべた。今後の揚水発電所の進展に参考となれば誠に幸いである。

## 参 考 文 献

- (1) 深栖, 田附: 日立評論 46, 1851 (昭 39-11)
- (2) E. Wiedemann: Hydro-Electric Generators with Liquid Cooling in the Stator and Rotor, Brown Boveri Review Vol. 51, No. 5 p. 267~273 (1964)