

同期機の負制動現象

Negative Damping of Synchronous Machines

奥 田 健 三*
Kenzo Okuda

内 容 梗 概

同期機の負制動現象について、同期機単独の場合はすでに研究されているが、送電回路の各種機器の制動効果については明らかにされていない。そこでこれらの影響を小形機および中形機を用いて試験を行い、従来明らかにされていなかった点のいくつかを解明することができた。本稿ではその概要について記す。

1. 緒 言

交流発電機を送電線に並列に入れる場合や小形の同期機を並列運転する場合、乱調を起したりはなはだしいときは発散振動を生ずることは往々経験するところである。これらはその原因が原動機側にある場合と送電系統側にある場合とがあるが、本文では後者に属する負制動振動について主に述べる。

同期機の負制動に関しては 1930 年以降かなり研究されているが^{(1)~(7)}、いずれも同期機が無限大母線に直接接続される場合かあるいは単独な 2 機系の場合であって、送電回路の各種機器の影響を考慮に入れたときについては未解決のようである。そこで筆者は送電系統内のはかの同期機および並列負荷が、対象とする同期機の制動現象にいかなる影響を及ぼすかを小形機を模擬回路に接続して実験するとともにさらに 3,000 kVA その他の交流発電機を用いて検討を行い、二、三の注目すべき結果をうることができたのでその概要を述べる。

2. 負制動の概念

同期機に振動が発生している場合、そこに働くトルクを二つの成分に分けることができる。すなわち、回転速度によるものと変位角によるものとで、これらをそれぞれ制動トルクおよび同期化トルクという。振動が小さい場合、任意の瞬間の制動トルクは変位角の時間的变化率に比例し $[T_d(\text{定数})] \times [\text{変位角の時間的变化率}]$ で表わされ、同期化トルクは $[T_s(\text{定数})] \times [\text{変位角}]$ で表わされる。

同期機の回転部分の振動方程式は

$$\frac{M}{2\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} + T_d \frac{d\delta}{dt} + T_s\delta = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

上式において

M = 単位慣性定数

T_d = 制動係数

T_s = 同期化力係数

* 日立製作所日立研究所

f = 周波数

δ = 変位角

t = 時間

であって、これを解けば

$$\delta = e^{\alpha t} (C_1 \sin \beta t + C_2 \cos \beta t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

上式において

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= -\frac{\pi f T_d}{M} \\ \beta &= \sqrt{\frac{2\pi f}{M} T_s - \left(\frac{\pi f T_d}{M}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

C_1, C_2 : 定数

(2), (3) 式より明らかなように、 $T_d < 0$ の場合に振動が発散して負制動現象を起すことになる。

無限大母線にインピーダンスを介して同期機が接続される場合、負制動を発生するか否かの判定の大まかな目安として、制動巻線のない場合には (電機子回路の全抵抗) / (横軸リアクタンスと外部リアクタンスとの和) = $r / (x_q + x_e) < 10\%$ 、制動巻線のある場合には $r / (x_q + x_e) < 30\%$ ならば安定に運転できると一般にみられている。

理論的には Nickle, Pierce および Liwschitz 氏らにより解析されている。Nickle, Pierce 氏らの 1930 年の論文では⁽¹⁾、制動トルクは直軸上の界磁巻線と横軸上の制動巻線に流れる電流によるものと仮定しており、制動巻線のない機械では

$$T_d = KB(x_q \tan \delta' - r) \quad \dots\dots\dots(4)$$

上式において

K = 機械定数および運転条件で決まる値で常に正である

B = 機械定数および運転条件で決まる値であるが、発電機として普通の運転をしている場合には正の値になる

δ' = 変位角の平均値

(4) 式に示すように、出力を出せば δ' が大きくなり制動トルクは増加する。また電機子回路の抵抗は零にすることはできないので、無負荷では制動係数は負になり発散振動になることを示しているが実際には界磁極表面

における損失や直結される機器の影響をうけるため、無負荷時に常に負制動を起すわけではない。また、制動巻線のある機械が無負荷において負制動を起さないための条件は、(4)式ほど簡単ではないが次のように与えられている。

$$r < \sqrt{bd + \frac{d}{b}(x_d - a)^2} \dots \dots \dots (5)$$

上式において

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{(x_d - x'_d) \omega^2 T_{do}^2}{1 + \omega^2 T_{do}^2} \\ b &= \frac{(x_d - x'_d) \omega T_{do}}{1 + \omega^2 T_{do}^2} \\ d &= \frac{(x_q - x'_q) \omega T_{qo}}{1 + \omega^2 T_{qo}^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

ただし

x_d = 直軸リアクタンス

x'_d = 直軸過渡リアクタンス

x_q = 横軸リアクタンス

x'_q = 横軸過渡リアクタンス

ω = 振動角速度

$$T_{do} = \frac{x_{md} + X_{lda}}{R_{da}}$$

x_{md} = 直軸相互リアクタンス

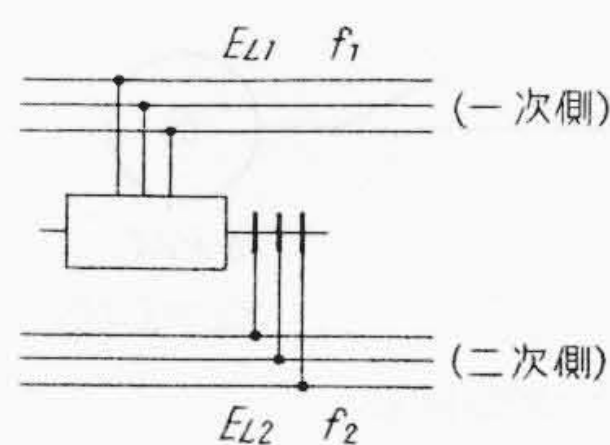
X_{lda} = 直軸界磁漏洩リアクタンス

R_{da} = 直軸界磁抵抗

$T_{qo} = T_{do}$ に準ず

第1図は Nickle 氏らの計算によるもので、電機子回路の抵抗が大きいほど、また軽負荷時ほど負制動を起しやすいことを示している。

Liwschitz 氏はその後研究された回転機理論を用い負制動の物理的意義をよく伝えている⁽⁴⁾。第2図に示すよ



第2図 機械接続図

うに固定子も回転子ともに多相巻線を有し、異なった周波数の電圧が印加される対称的な機械を考える。同期機は回転子側の周波数 $f_2 = 0$ 端子電圧は界磁巻線の抵抗による電圧降下に等しい特殊な場合に相当する。いま固定子側の電圧、周波数を一定とすれば、制動トルクは次式で与えられる。

$$T = \frac{1}{l^2 + m^2} (e_1^2 s r_2 - e_2^2 r_1) \dots \dots \dots (7)$$

上式において

$$l = s \left[\left(1 + \frac{x_2}{x_m} \right) r_1 + \left(1 + \frac{x_1}{x_m} \right) \frac{r_2}{s} \right]$$

$$m = s \left[x_1 + \left(1 + \frac{x_1}{x_m} \right) x_2 - \frac{r_2}{s} \cdot \frac{r_1}{x_m} \right]$$

x_1, x_2 = 漏洩リアクタンス

r_1, r_2 = 抵抗

x_m = 相互リアクタンス

e_1, e_2 = 端子電圧

s = すべり

(7)式に示すように、第1項は正の制動力を与え回転子制動トルクと呼ばれ、第2項は負の制動力で固定子制動トルクと呼ばれる。第1項は普通の誘導機トルクであって、一次電圧の自乗、二次抵抗およびすべりに比例し同期速度ではトルクが零になることを表わしている。第2項は二次電圧 ($e_2 = I_2 r_2$) の自乗と一次抵抗とに比例することを示しており、換言すれば励磁が低くかつ電機子抵抗および送電線の抵抗が少なければ負制動トルクは小さくなるのがわかる。

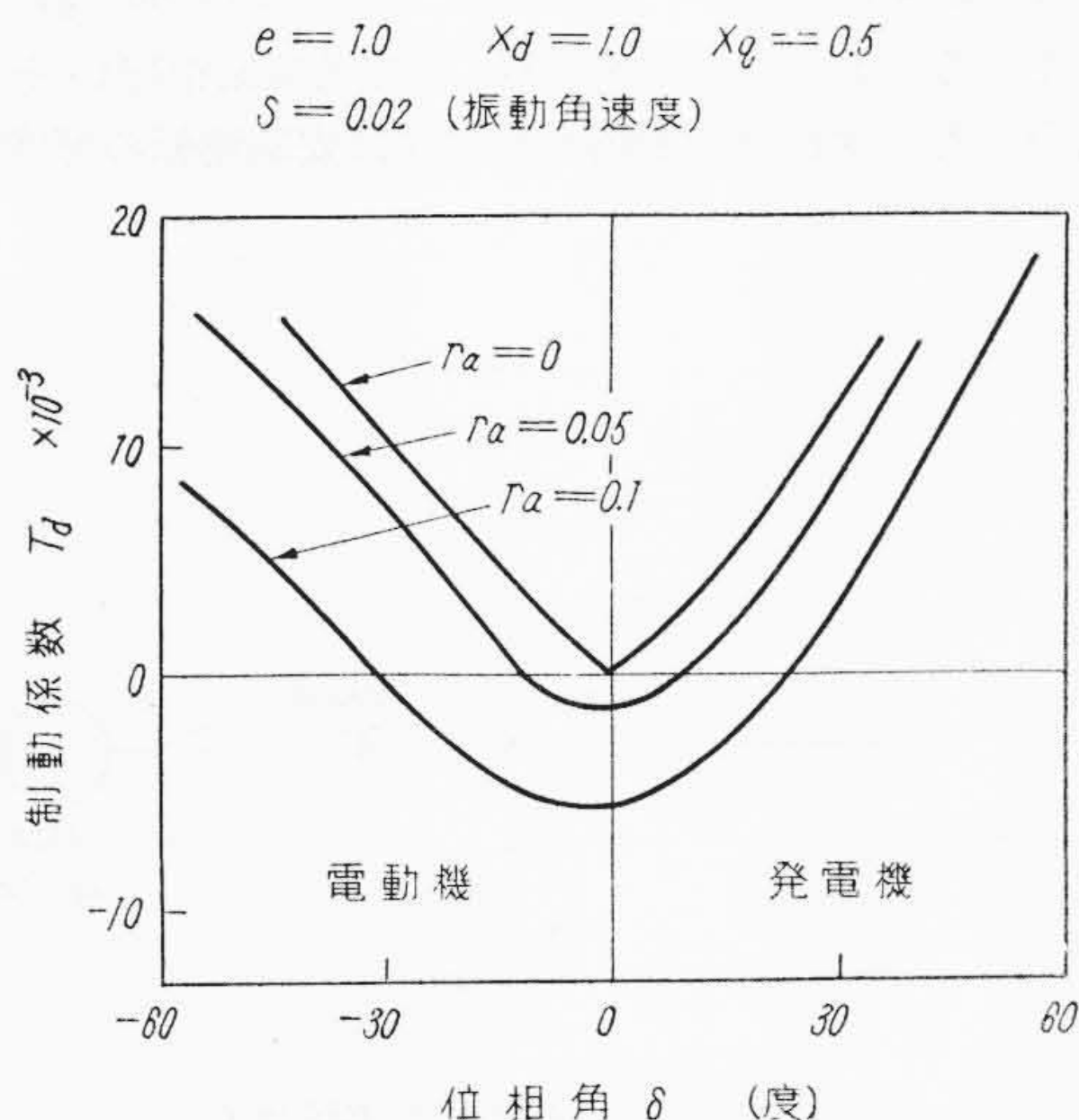
3. 実験ならびに結果の検討

従来本問題について明らかにされている点は前章までに述べたとおりであるが、送電回路のほかの機器の影響については解明されていないので、この点に着目して各種の実験を行う。

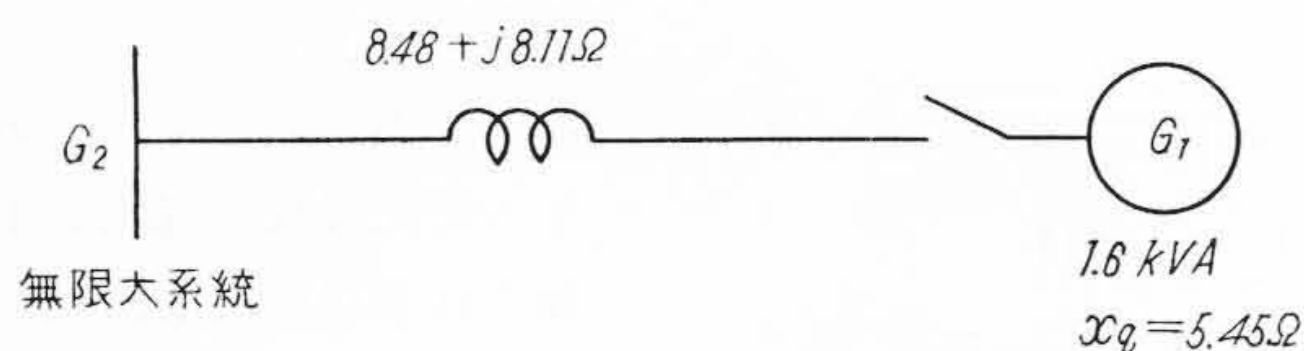
3.1 2機系の場合

3.1.1 励磁の影響

実験回路は第3図に示すごとくであって、第4図は1.6kVAの同期機を直列インピーダンスを介して無限大系統に並列接続するときの電流の振動状況をオシログラフで測定し制動係数を求め、その結果をまとめたものである。同図における制動係数の算出方法は次のとおりである。すなわち、オシログラムの電流の振動曲線の包絡線を測定して、 t 秒後に振幅が N 倍になっ



第1図 Nickle 氏計算による制動係数



第3図 2機系の実験回路

たとすれば

$$eat = N$$

$$\therefore \alpha = \frac{2.303}{t} \log N$$

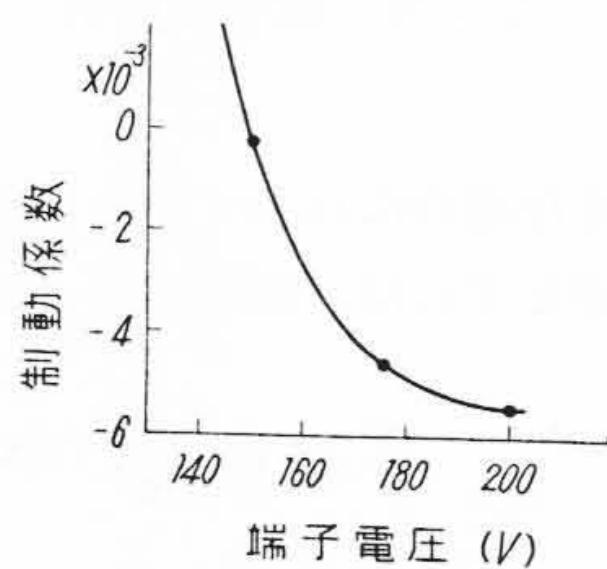
.....(8)

(8) 式より α が得られこれを (3) 式に代入すれば制動係数 T_d が求められる。

第4図によれば励磁を下げれば制動係数は正の方向に増加し安定な傾向にあることがわかる。

3.1.2 直列外部インピーダンスの影響

第1表に示すような特性を有する 1.6 kVA および 40 kVA の同期機を直列インピーダンスを介して無限大系統に並列接続する際の制動係数を、直列インピーダンスを変化して測定する。結果は第5図および第6図に示すように、同図では横軸に電機子抵抗と外部抵抗との和 r に対する同期機の横軸リアクタンスと外部リアクタンスとの和 $(x_q + x_e)$ の比をとってあるが、これから明らかなように回路の抵抗分が少ないほど制



第4図 励磁の影響

動係数は増加し安定な傾向にあることがわかる。この傾向は前記の (4) 式や (7) 式に述べるところと一致している。この場合の持続振動の条件は第5図および第6図より

$$1.6 \text{ kVA 同期機 } r/(x_q + x_e) = 16.2\%$$

$$40 \text{ kVA 同期機 } r/(x_q + x_e) = 19.5\%$$

であることが示されている。上記の持続振動の条件はいずれも制動巻線のない場合の目安と考えられている 10 % と大体一致している。

3.2 3機系の場合

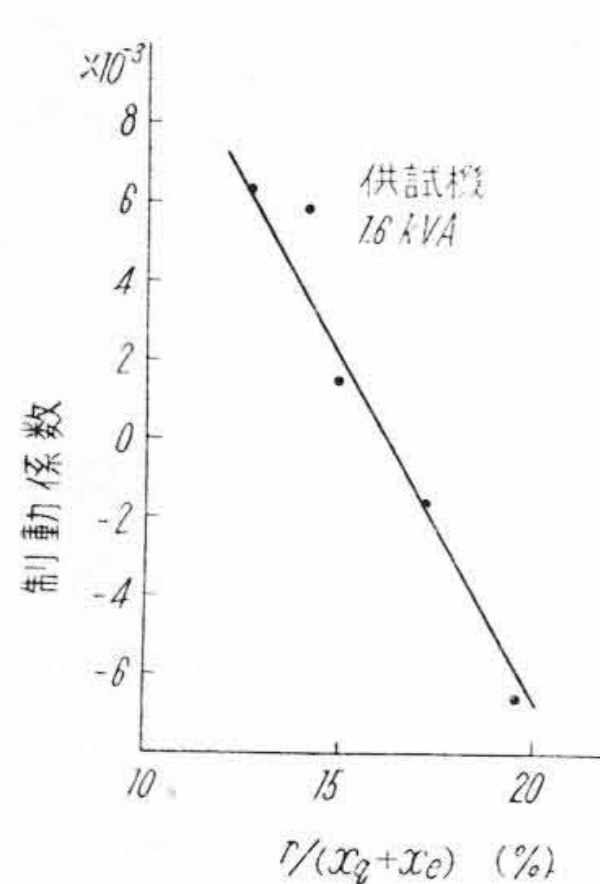
3.2.1 送電系統内のほかの同期機による影響

無限大系統にインピーダンスを介して二台の同期機が第7図のように接続される回路において、同期機 G_1 を並列接続するときの制動係数を、中間の同期機 G_3 の運転条件とその原動機の制動力を変化して測定する。第8図は同期機 G_1 の原動機の制動係数 T_{dp} を変化し、かつ中間の同期機 G_3 が系統に並列に入る場合と入らない場合とについて実験した結果であって、 G_1 の電気的特性がまったく同じであっても原動機の制動力を変化すれば制動状態は大きく変化する。また中間の同期機 G_3 が並列に入れば G_1 の運転は安定化される。

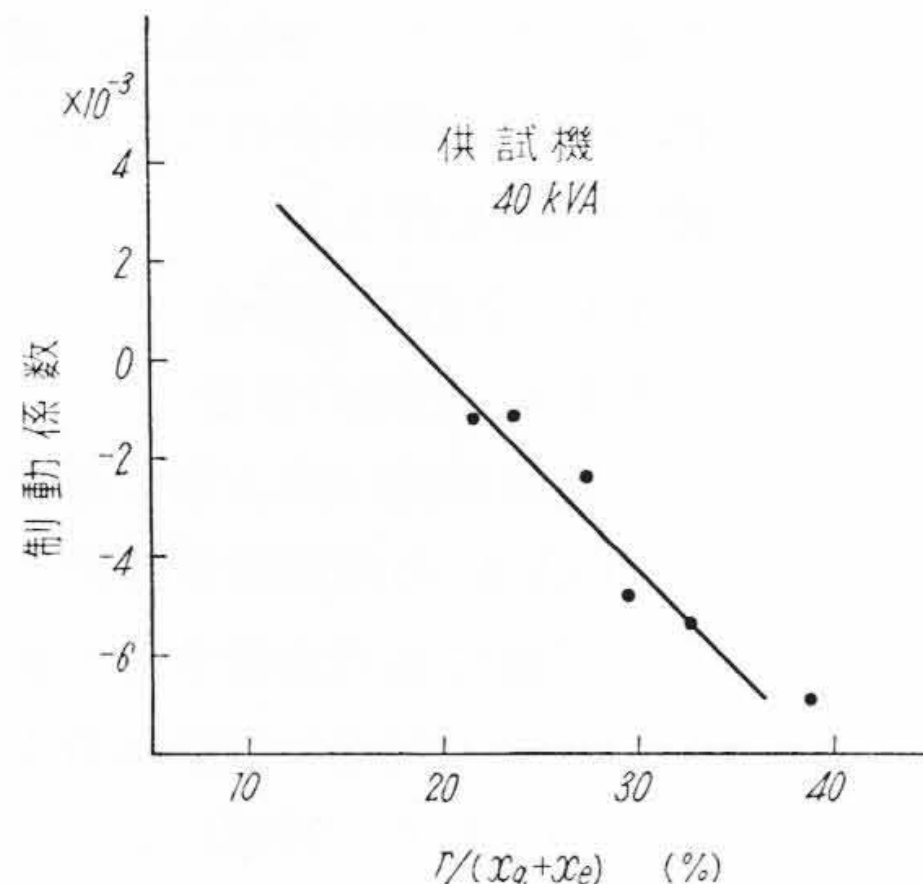
第9図は同じ実験回路で G_1 の原動機の制動力を一定に保っておき (原動機の制動係数 2.47×10^{-3})、 G_3 の出力および原動機の制動係数 T_{dp} を変化して、 G_1 を並列接続する際の制動係数を測定した結果を示す。この図から明らかなことは、 G_3 の原動機の制動力が強いほど、また G_3 の出力が大きいほど G_1 を並列接続するときの制動係数は増加し G_1 の運転は著しく安定化される。たとえば G_3 がない場合には2機系となり負制動振動の生じない条件は前実験より $r/(x_q + x_e) < 17\%$ とみられるが、実験回路ではこれが 60 % に達しているにもかかわらず、 G_3 が並列運転を行いその出力が大きければ負制動を起さずに安定運転の可能な

第1表 供試機の特性

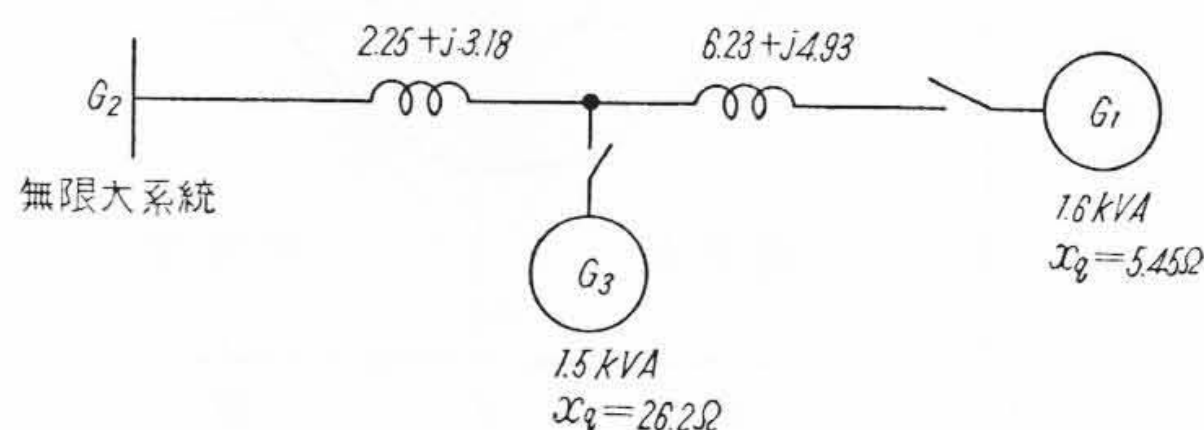
容量 (kVA)	1.6	40	3,000
定格電圧 (V)	220	220	3,300
x_d (%)	27	116	31
x_q (%)	18	69	37
x_2 (%)	7.6	27	26
r (%)	3.6	12	2
M (単位慣性定数) (sec)	7.6	7.6	5.3



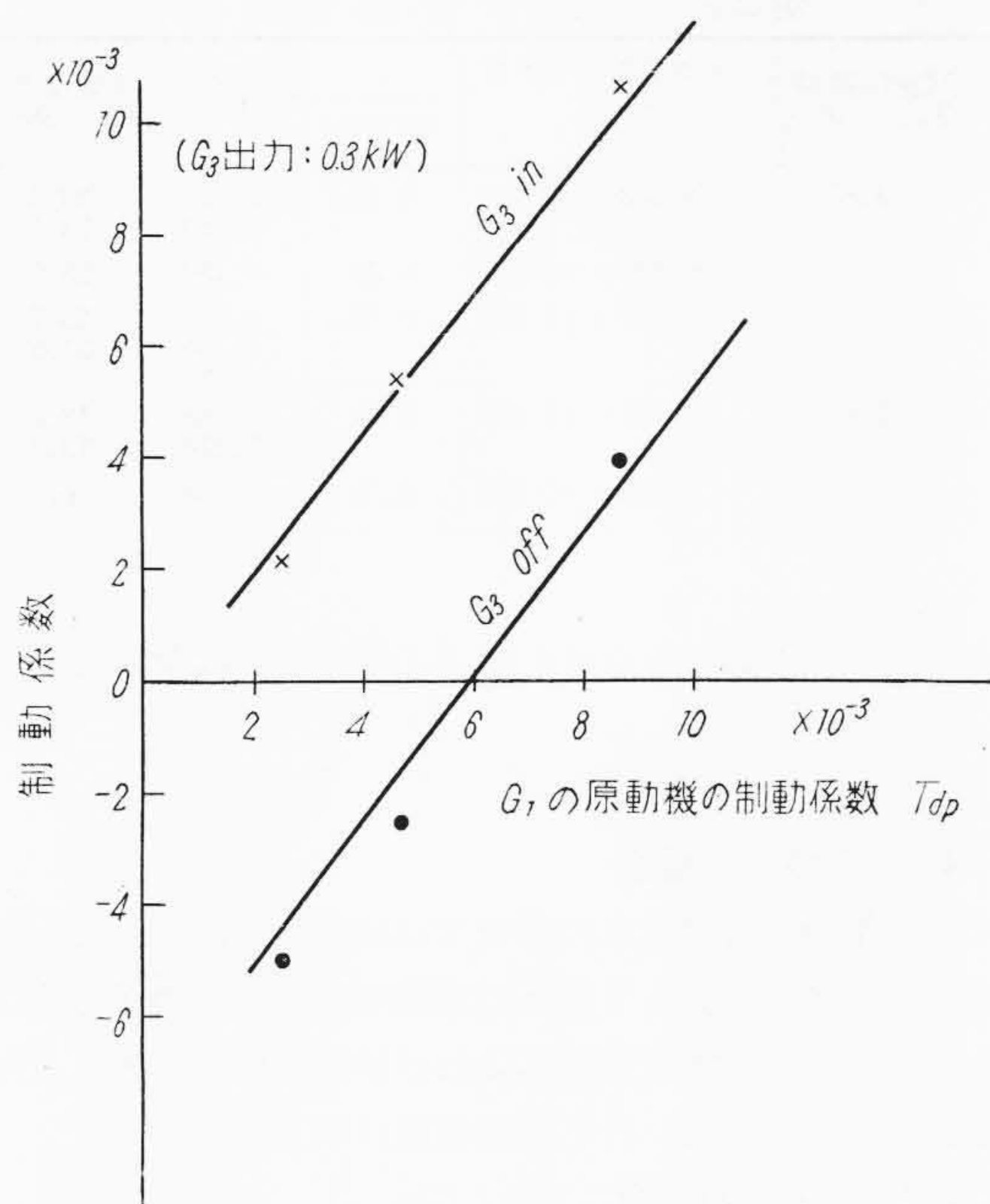
第5図 直列インピーダンスの影響



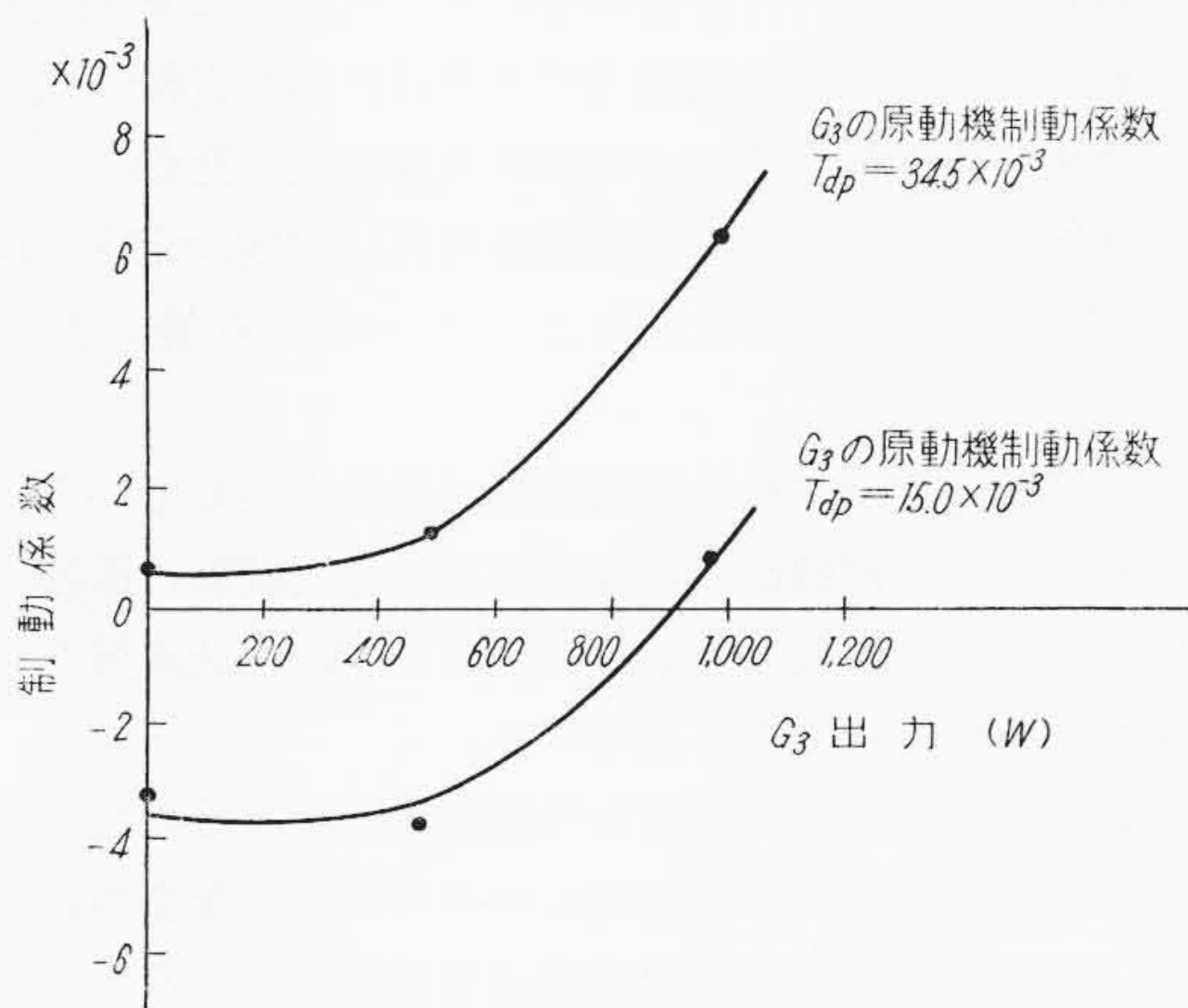
第6図 直列インピーダンスの影響



第7図 3機系の実験回路



第8図 原動機の制動係数の影響



第9図 並列同期機の影響

ことを示している。この点は送電系統内の同期機の制動現象を論ずる場合見逃がすことのできないところである。

原動機の制動力の影響に関して、第8図の G_3 解列の場合をみると、 $T_{dp}=6 \times 10^{-3}$ において、 $T_d=0$ であるのに対し、 T_{dp} がこれより変化すればそれだけ T_d も増減する。すなわち、最終的に現われる現象から求めた制動係数は同期機および外部回路によって決まる制動係数と原動機の制動係数との代数和であることが明らかにされている。

第9図についてみれば、両曲線は回路中のほかの同期機 G_3 の原動機の制動力が今対象としている G_1 の

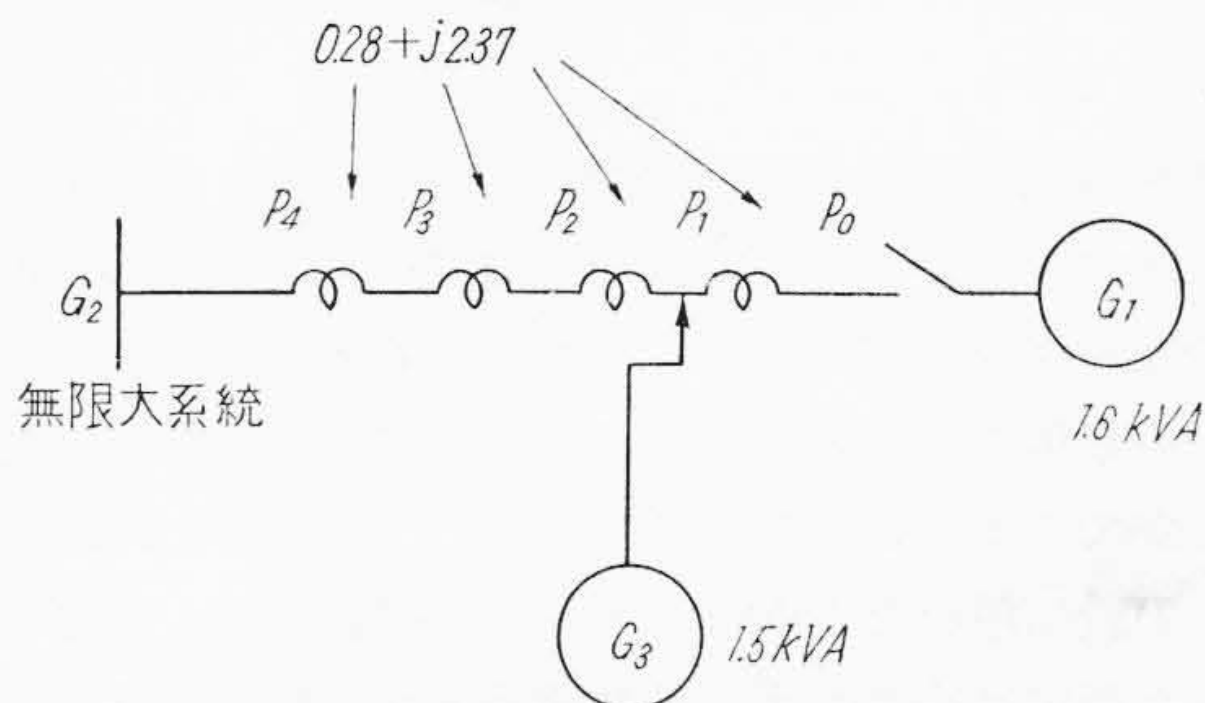
制動現象にいかなる影響を及ぼすかを示しており、両曲線をみると、 G_3 の出力と無関係に両者の制動係数の差は約 5×10^{-3} になっている。他方両曲線における原動機の制動係数の差は $(34.5 - 15.0) \times 10^{-3} = 19.5 \times 10^{-3}$ である。すなわち、両者の間には比較的簡単な一定の関係があることが推定される。

なお、実験においては原動機として直流電動機を使用しているので原動機の制動係数は発電機出力と無関係に一定であるが、これに対して蒸気タービンや水車では出力に比例すると考えられるのでこの点がことなる。さらにまた調速機の数値調整率や過渡調整率は等価的に原動機の制動効果に直接影響を及ぼすから、これらについても考慮する必要がある。

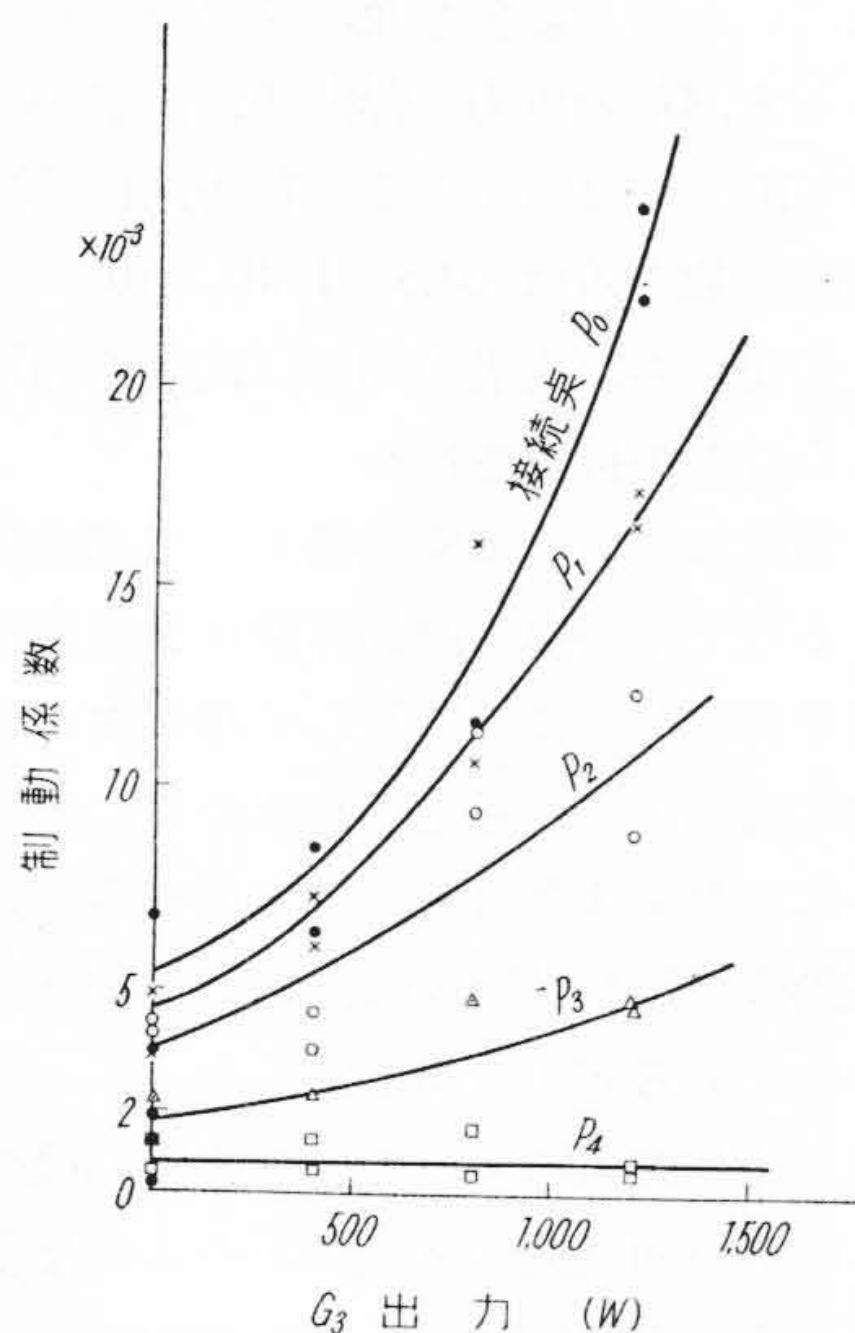
次に同じく3機系において、ある同期機の制動現象に対してほかの同期機の位置がどのような影響を及ぼすかを調べる。第10図はこの実験回路を示しており無限大系統 G_2 に対してインピーダンスを介して2台の同期機 G_1 , G_3 が接続される。いま中間の同期機 G_3 の位置を G_1 の端子 P_0 から順次移動して無限大母線 P_4 まで変化させるとともに、各接続点において G_3 の出力を無負荷から増加させる。第11図はこのような条件において G_1 を並列接続する際の制動係数を測定した結果である。同図より明らかな点は回路の抵抗分が少ないため制動係数はすべて正になっており、かつ中間の同期機 G_3 の出力が増加すれば制動係数も増大している点は前述の各実験と同じであるが、並列同期機 G_3 の位置が G_1 に近接しているほど制動効果はきわめて顕著である。しかして、並列同期機の位置が無限大線 P_4 になると G_3 の影響はほとんど無視できる程度になることがわかる。

3.3 中容量機による実験

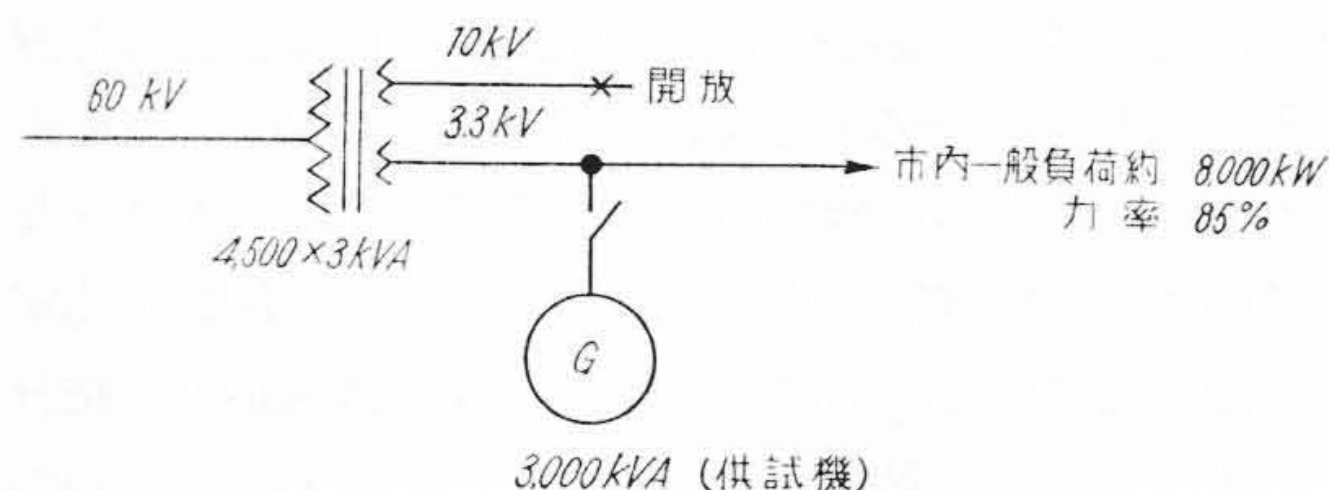
以上の実験は小形機によるものであるがこれらの結果を中容量の機械で確認し、かつ小形機では模擬できない点を補うため次の実験を行う。試験系統は第12図に示すごとくであって、供試機には第1表の特性を有する3,000kVA 交流発電機を使用する。試験系統は変圧器一



第10図 3機系の実験回路



第11図 並列同期機の影響



第12図 中容量機による試験系統図

次側は 60 kV で受電し、二次側は試験の際開放されており、三次側は 3.3 kV で供試機をはじめ一般負荷に供給されている。このような回路で発電機端子に直列に抵抗およびリアクタンスを接続し、発電機を系統に並列投入する際の制動係数を測定する。

第2表はこの実験結果であって、直列インピーダンスを変化する場合、 $r/(x_q+x_e)$ が大きくなれば制動力は弱まるが $r/(x_q+x_e) > 17\%$ でも負制動を起すに至っていない。この理由は原動機の制動力のほか、供試機と並列に入る一般負荷の影響によるものと考えられる。すなわち、実験時の並列負荷は約 8,000 kW 力率 85% 程度であり、負荷の大半は誘導電動機などの動力負荷とみることができる。

誘導機負荷の場合は Liwschitz の (7) 式に示すように回転子制動トルクが正の制動力を有するため、供試機の制動現象は安定化されるものと考えられる。このように小形機では実験室の商用電源を無限大母線とみなすことができ並列負荷の影響は無視して差しつかえないが、実験に用いた 3,000 kVA 程度の機械ではもはやこのような仮定は許されず一見 2 機系とみられる回路でも、並列機器の影響を考慮する必要がある、系統のいずれの

第2表 制動係数測定結果

原動機制動係数 $T_{dp}(\times 10^{-3})$	直列外部インピーダンス (Ω)	$\frac{r}{x_q+x_e}$	発電機電圧 (V)	制動係数 $T_d(\times 10^{-3})$
4.87	$0.303 + j 0.288$	0.18	3,195	29.3
			3,180	24.1
	$0.492 + j 0.288$	0.30	3,180	25.0
1.02	$1.236 + j 0.288$	0.75	3,180	23.7
			3,190	21.5
1.02	$0.492 + j 0.288$	0.30	3,105	12.1
			3,210	13.2
	$1.236 + j 0.288$	0.75	3,030	6.7

点を無限大母線とみなすかはよく検討せねばならない。

4. 結 言

4.1 2 機系の場合

2 機系の場合は従来の研究では明らかにされているので、筆者の実験も 3 機系の実験を行うための予備的なものであるが、実験結果によれば励磁が低いほど、また回路の抵抗分が低いほど制動係数は増加する。

4.2 3 機系の場合

同期機の制動現象を考える場合、直結される機器の影響を考慮に入れなければならないが、たとえば交流発電機においては原動機の制動力が大きければ発電機の制動現象は安定化されるので、実際の大容量機の運転に当っては並列投入時および軽負荷運転時には速度調定率や過渡調定率の選定を適切に行うことは一つの対策となろう。

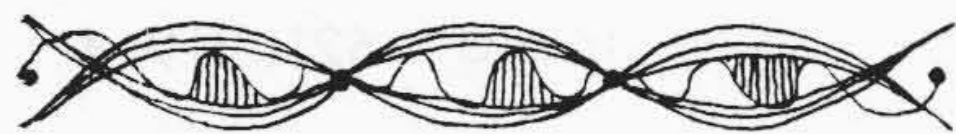
次に系統内のほかの並列同期機が出力を出しているほど、またその同期機が今対象としている同期機に近接しているほど制動現象は安定化されるので、系統運用に当り一つの重要な示唆を与えている。

系統負荷のうち誘導機は正の制動力を有するので、これらの負荷の多くかかる昼間ピーク時の方が深夜の軽負荷時より発電機の制動現象は安定な傾向をたどるものと考えられる。

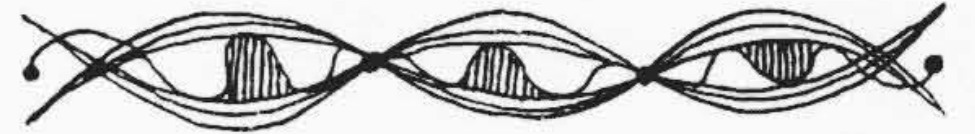
以上送電系統を考慮に入れた同期機の制動現象について二、三の実験結果を述べたが、今後さらに研究を進め負制動対策を確立したい。終りに臨み本実験の遂行に終始御指導を賜った日立製作所日立研究所高林主任研究員に衷心より謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) Nickle, Pierce: TAIEE 49, 338 (1930)
- (2) Wagner: TAIEE 49, 1,011 (1930)
- (3) Hamilton: TAIEE 51, 775 (1932)
- (4) Liwschitz: TAIEE 60, 210 (1941)
- (5) 熊沢: 電気評論 17, 46 (昭 4)
- (6) 奥田: 昭 32. 電気学会東京支部大会 163.
- (7) 上之蘭親佐, 上之蘭博: 昭 33. 電気四学会連大 470



特許と新案



最近登録された日立製作所の特許および実用新案

(その2)

(第9頁より続く)

区 別	登録番号	名 称	工 場 別	氏 名	登録年月日
特 許	246356	駆 動 チ ェ ン の 緊 張 装 置	亀有工場	神尾昌史	33. 10. 21
"	246357	変 速 機	亀有工場	松原為治	"
"	246349	印 刷 用 紙 の 帯 電 消 去 装 置	川崎工場	鳥山藤山	33. 10. 21
"	245633	冷 凍 装 置	栃木工場	片小南部	33. 9. 20
"	245630	密 閉 リ ミ ッ ト ス イ ッ チ	多賀工場	横河内村	"
"	245631	光 電 測 光 装 置	多賀工場	水野仙太郎	"
"	245640	伝 導 装 置	多賀工場	田沢	"
"	245634	電 源 開 閉 器	戸塚工場	田島喜平	33. 9. 20
"	245688	多 数 共 同 電 話 割 込 防 止 方 式	戸塚工場	水大塚上	33. 9. 22
"	246347	戸 波 増 幅 器	戸塚工場	江森邦五	33. 10. 21
"	246350	イ ン パ ル ス 修 整 装 置	戸塚工場	田朝比奈	"
"	246351	信 号 受 信 装 置	戸塚工場	平子叔好	33. 10. 21
"	245642	電 子 管 ス テ ム の 製 造 方 法	茂原工場	田村秋二	33. 9. 20
"	246355	真 空 管 ス テ ム の リ ー ク テ ス ト 方 法	茂原工場	杉江二朗	33. 10. 21
"	246346	樹 脂 状 合 成 物 製 造 方 法	絶縁物工場	石塚村田	33. 10. 21
"	245629	含フルフリル基有機化合物の重合物製造法	中央研究所	田鶴古飯	33. 9. 20
"	245632	ガ ラ ス と 金 属 と の 溶 封 方 法	中央研究所	高沢田良	"
特 許	245641	単 相 位 相 調 整 装 置	日立研究所	小野田芳光	33. 9. 20
実用新案	482546	高 圧 水 銀 弧 光 変 換 器 保 護 装 置	日立工場	曾根田瑞夫	33. 10. 1
"	482557	扉 把 手 回 り 止 め 装 置	日立工場	石垣喜重郎	"
"	482567	直 流 継 電 器	日立工場	田所武夫	"
"	482568	逆 流 継 電 器 誤 動 作 防 止 装 置	日立工場	高品忠治	"
"	482570	過 電 流 継 電 器	日立工場	白桜土井	"
"	482574	遠 心 力 開 閉 装 置	日立工場	白須土田	"
"	482576	電 機 の 運 転 制 御 装 置	日立工場	本間千代一	"
"	482579	2 段 動 作 遠 心 力 開 閉 器	日立工場	藤木勝奎	"
"	482580	電 機 子 巻 線	日立工場	菅野政雄	"
"	482581	補 償 巻 線 支 持 装 置	日立工場	菅野政雄	"
"	482582	回 転 電 機 の 冷 却 装 置	日立工場	小野崎一男	"
"	482589	交 流 整 流 子 電 動 機 の 速 度 設 定 装 置	日立工場	荻沢功隆	33. 10. 1
"	482868	誘 導 電 動 機 の 低 周 波 速 度 制 御 装 置	日立工場	角田昌春	33. 10. 8
"	482876	誘 導 同 期 電 動 機 運 転 制 御 装 置	日立工場	加藤春雄	33. 10. 8
"	482558	交 流 電 気 車	国分工場	滑川清	33. 10. 1
"	482572	油 入 遮 断 器 の 復 動 緩 衝 器	国分工場	落合正郎	"
"	482578	変 圧 器 コ イ ル 輸 送 装 置	国分工場	今村武直	"
実用新案	482588	タ ッ プ 切 換 器 付 変 圧 器	国分工場	滑川清	33. 10. 1

(第20頁へ続く)