

他制式水銀逆変換装置と同期機

The Separately Excited Mercury Inverter and Synchronous Machine

高林 乍人*
Hayato Takabayashi

内 容 梗 概

他制式水銀逆変換装置に同期電動機を並列接続して運転する場合は負制動現象が生起する。よつてこれについての安定運転限界を検討した。

まず模擬回路により、同期化力ならびに電圧電流の状態をみるが、位相角が90度附近で極限受電電力が生じ、さほど特異現象はない。ただ端子電圧の様子が注目されるのみである。

しかし実回路により試験すると同期電動機に負制動現象が起り、その原因は、同期機よりみた交流電源としての他制式水銀逆変換装置の内部インピーダンスが、抵抗と静電蓄電器との直列回路とみなされることにある。これは並列負荷を大きくし、制御進み角を小さくすれば避けられる。しかして負制動現象をなくすためには、並列負荷容量を同期機容量の約2倍にすればよいことがわかった。

[I] 緒 言

水銀整流器を用い直流電力を交流電力に変換する水銀逆変換装置において、水銀整流器の制御格子に印加する制御電源を水銀逆変換装置が接続されている交流回路からではなく、別な交流電源よりうる方式は一般に他制式と称せられている。この方式を採用する場合は主交流回路の周波数をわずかな格子制御用電力で制御することができる。したがつて同期電動機の運転を他制式水銀逆変換装置によつて行えば、簡単に周波数を変化させて運転速度を増減させることができ、いろいろと都合のよいことがある。

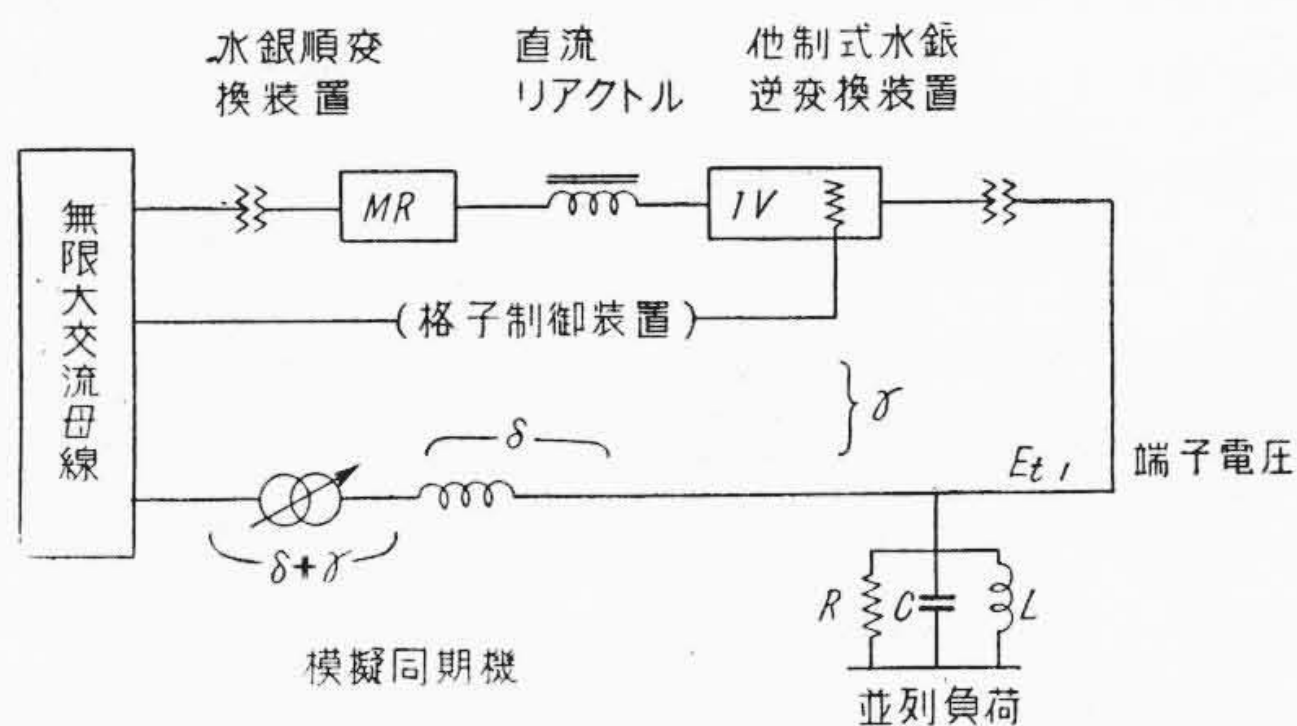
しかしながら、水銀逆変換装置は、一般の内部インピーダンスが誘導リアクタンスである交流電源と違つた性格をもつており、簡単に同期電動機を運転させることはできない。これらの問題の一部についてはすでに論ぜられ⁽²⁾、また筆者⁽¹⁾も述べているが、ここにその運転についてさらに検討したことを以下に論ずる。

[II] 実 験 結 果

実験を始めるにあたり負制動現象があると運転が困難であるため、まず模擬回路によつて同期化力および電圧、電流の変化を測定し、しかるのち、回転機により実験を進めた。

(1) 模擬同期機による実験

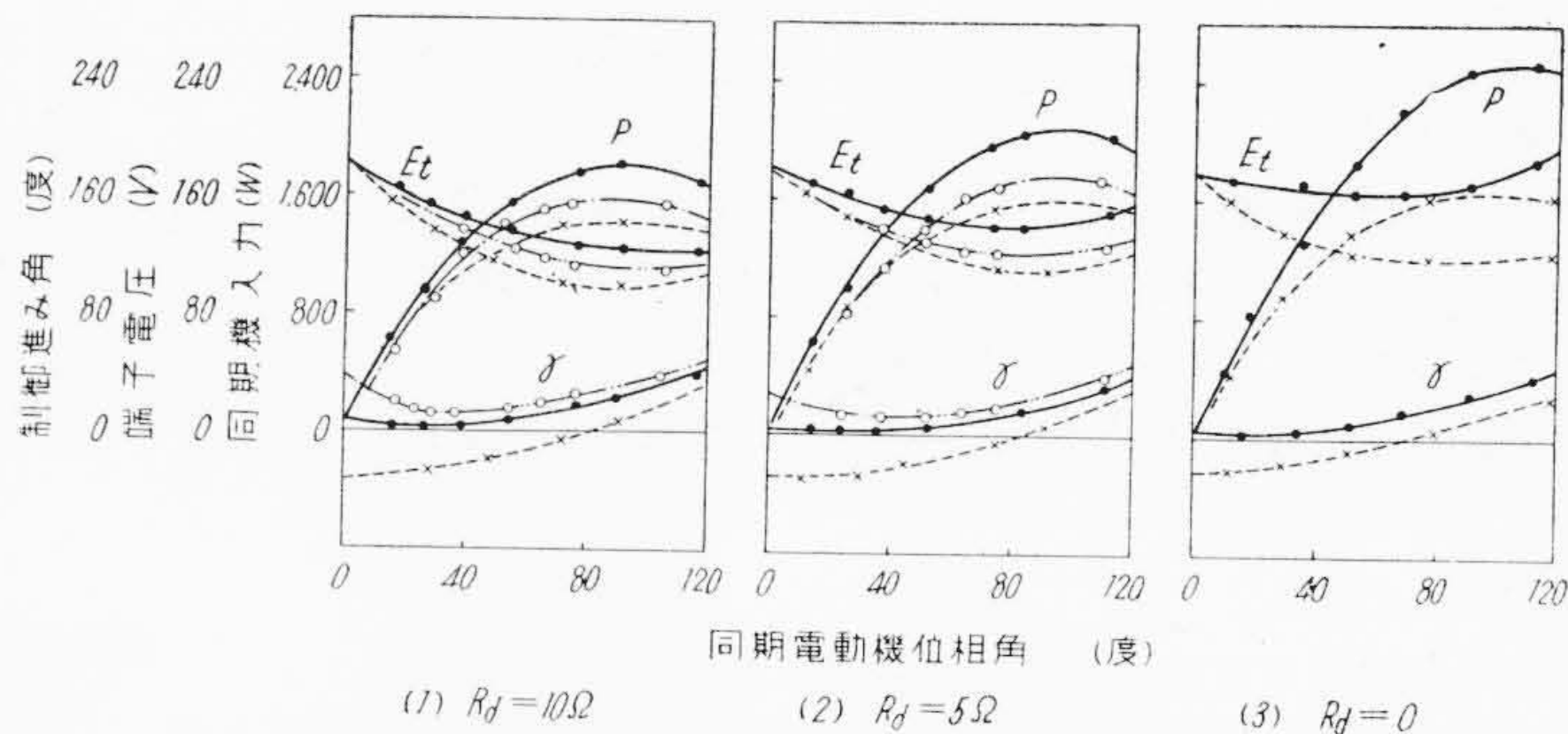
同期機を交流計算盤のごとく、交流リアクトルと移相器とを組合せた模擬回路でおきかえた実験回路は第1図に示してある。水銀整流器の制御格子電圧を基準ベクトルとし、水銀逆変換装置より出る交流電流を制御格子電圧と同相として、各部の電圧、電流の位相差をみると、水



第1図 他制式水銀逆変換装置と接続される模擬同期機の実験回路図

銀逆変換装置の端子電圧は、制御進み角 γ だけおくれる。

同期機の位相角 δ は交流リアクトルの両端子の電圧の位相差となり、よつて模擬回路の移相器は $\gamma + \delta$ を変化させることになる。移相器を動かすことにより模擬同期機の位相角が変化し、それに対応する制御進み角、端子



第2図 他制式水銀逆変換装置に接続される同期電動機の位相角 δ に対する同期機入力P、端子電圧Etおよび制御進み角 γ の関係

ただし R_d は直流回路の抵抗を示す。

回路定数は

$$X = 13.2\Omega \quad R = 26\Omega$$

水銀変換装置用変圧器の巻線は (6相)

一次200V 二次 $260 \times \sqrt{3}$ V

* 日立製作所日立研究所

電圧ならびに電流の変化が求められる。

第 2 図は実験結果の例である。模擬同期機の位相角が零なる場合を基準として、制御進み角および水銀逆変換装置の内部直流電源電圧変動率の影響をみたもので、同期機入力为零なる時の水銀逆変換装置の力率 ($\cos \gamma$) のよいほど、また電圧変動率の小さいほど同期電動機の極限受電電力が大きく、かつ極限受電電力は位相角が 90 度附近に生じている。ただし、水銀逆変換装置は強制転流方式⁽⁸⁾⁽⁹⁾を採用し、制御進み角が負になつても転流失敗しないようにしている。

ここに注意されねばならないのは交流端子電圧の変化する有様である。もし交流電源の内部インピーダンスが誘導リアクタンスであれば、同期機の位相角に対し余弦的に変化するのであるが、第 2 図の結果はこれと違う様子を示している。あとに述べる解析結果のように、他制式水銀逆変換装置の交流電源としての内部インピーダンスは、負荷の性能によつて変化するが、静電蓄電器と抵抗との直列回路 (ただし $\gamma > 0$ のとき) となる。

(2) 回転機による実験

第 3 図のごとく回路を組み、水銀逆変換装置と並列負荷とにより他制自励的に運転して、その端子電圧を、同期機の無負荷端子電圧と等しくし、同期をとつて並列接続する。水銀逆変換装置の転運状態を表わすには、同期をとつたときの力率 ($\cos \gamma$) をもつてする。

第 4 図は同期並列接続をした場合の負制動現象の電磁オシログラムである。

実験は負制動力を測定し、並列接続される負荷の影響を調査する。負制動力の測定法は、電源オシログラムにて同期機の振動の発散、あるいは減衰の時定数を求め、その GD^2 とより計算する。

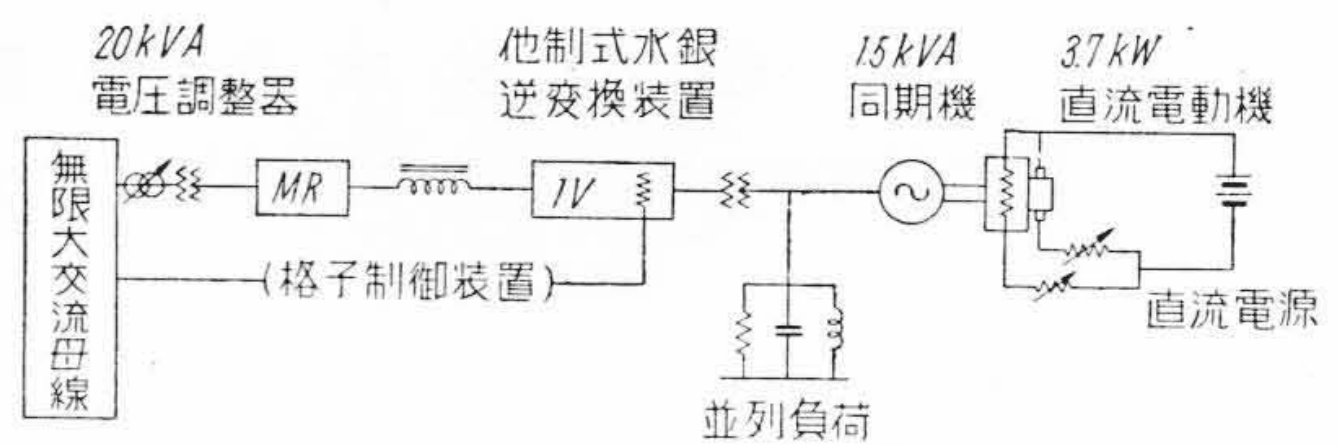
しかして、並列接続される同期機に現われる制動力は同期機を駆動する直流電動機の制動力、同期機自身の制動巻線作用によつて生ずる制動力、および水銀逆変換装置と同期機間に相互作用として現われる負制動力の合成したものであるから、前者の二つを別に測定しておいてここに問題とする後者の負制動力を取り出す。

実験結果は第 5 図にして、並列負荷抵抗値の小さいほど、また制御進み角の小さいほど、負制動力が小さくなるのがみられる。

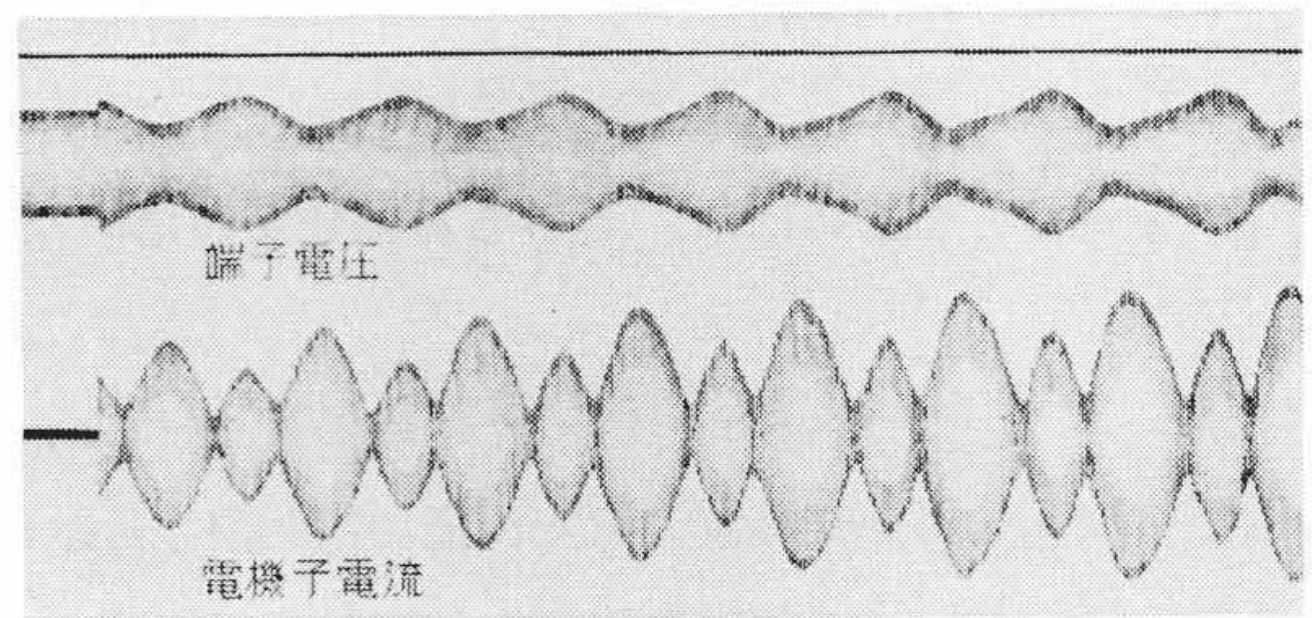
この実験結果を検討するに、第 6 図(上)のごとく、無限大母線に静電蓄電器ならびに抵抗との直列回路を挿入し、同期機を運転する場合の負制動力を求め、第 6 図の結果をうる。

また一方、直流リアクトルの影響をみるため、そのインダクタンスを変化させたが、これは実用的にはあまり問題にならない。

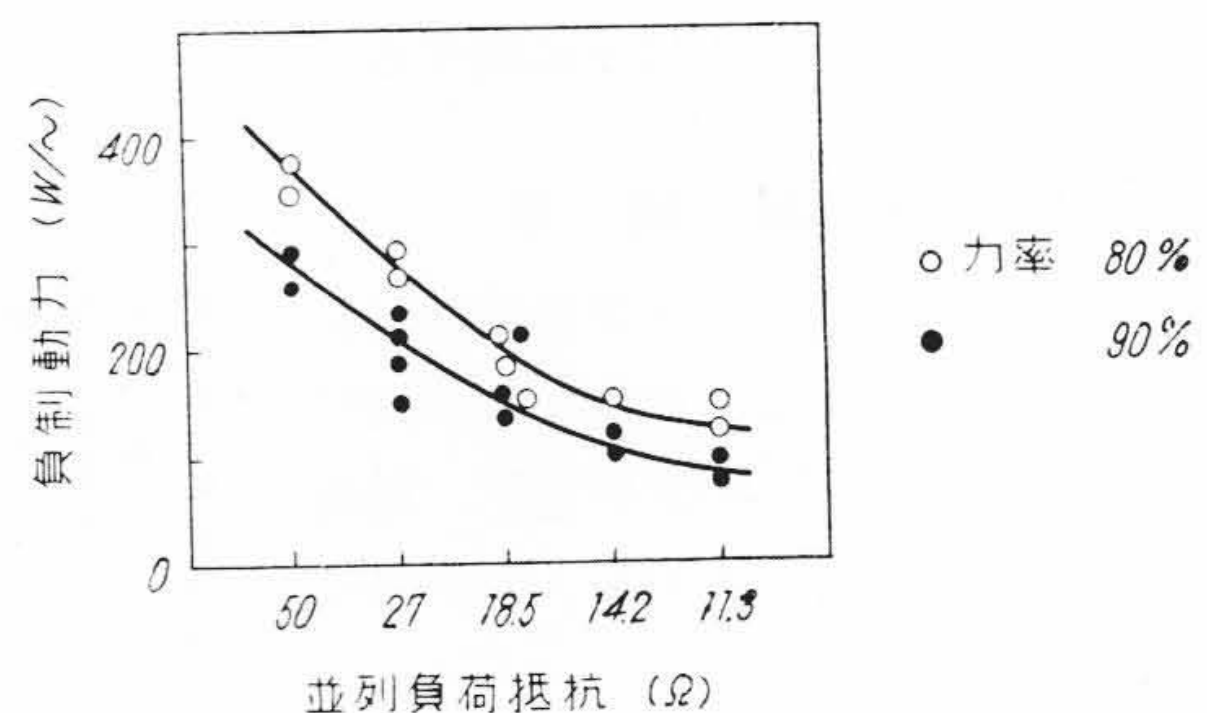
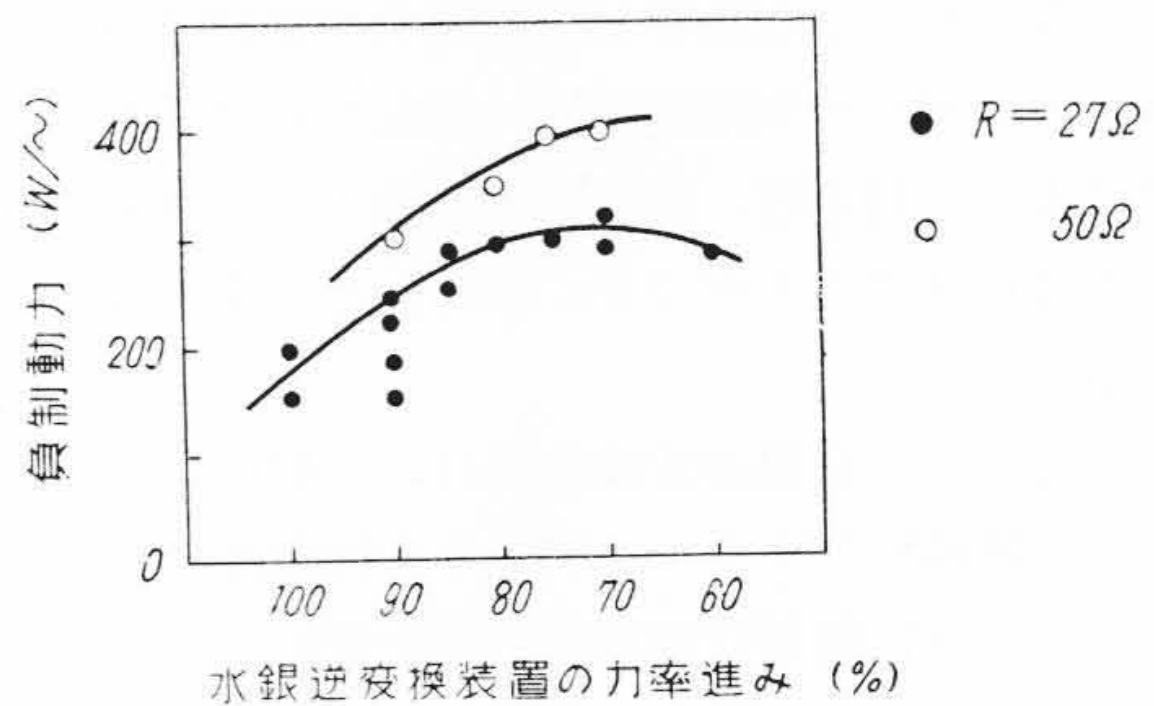
さらに違った面より観察するため、同期投入したとき



第 3 図 他制式水銀逆変換装置と接続される 1.5kVA 同期機の実験回路図

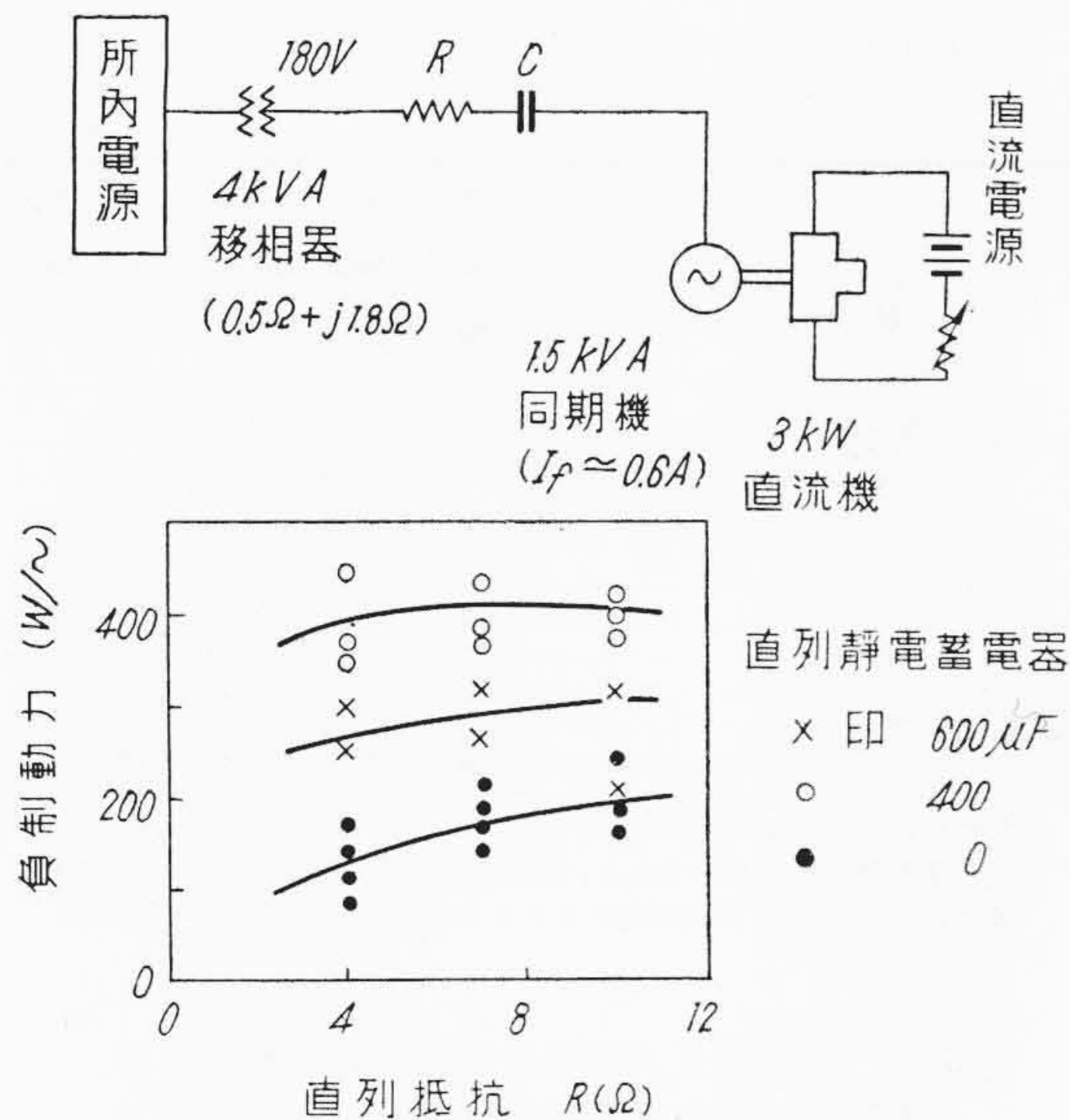


第 4 図 他制式水銀逆変換装置に接続される同期機の負制動現象

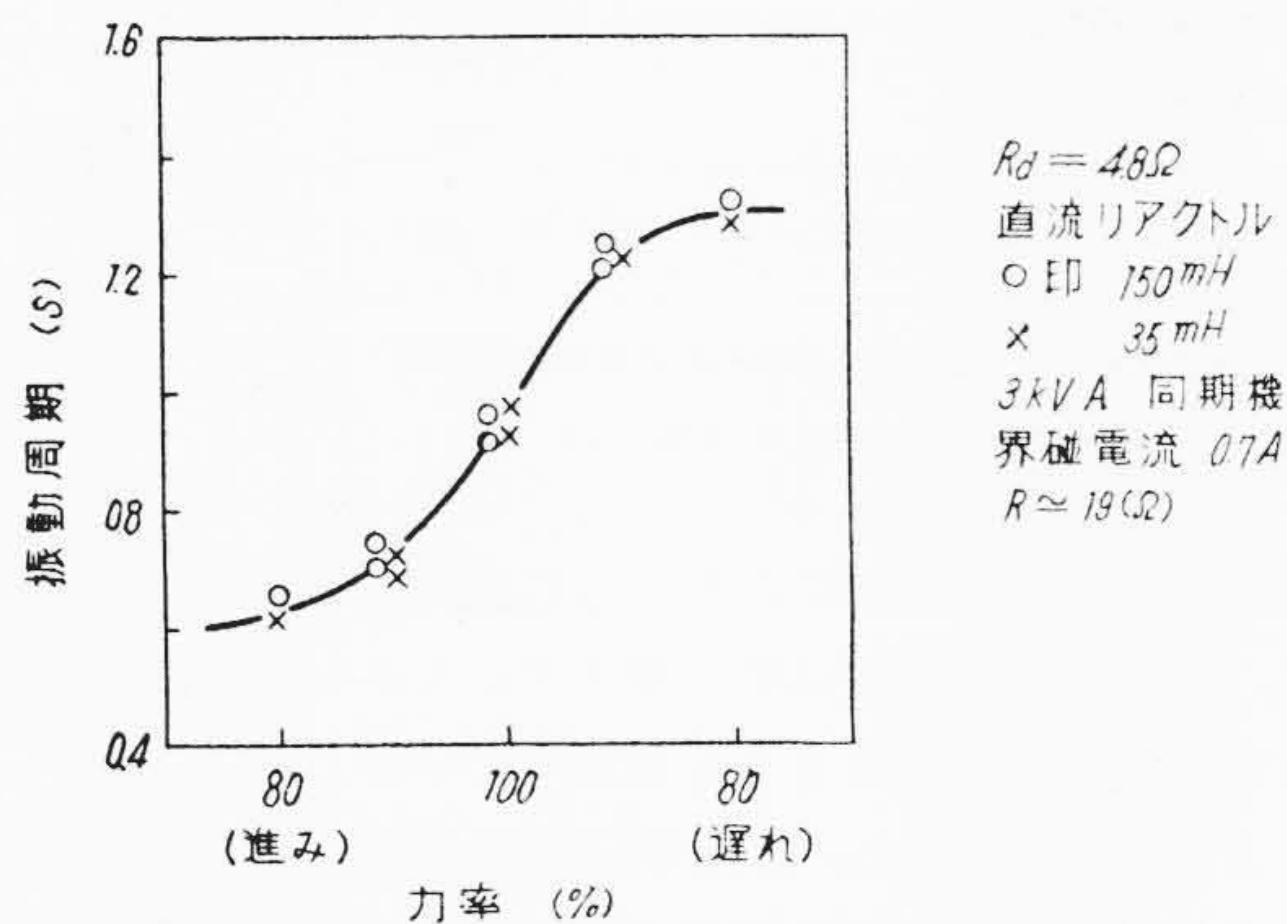


第 5 図 他制式水銀逆変換装置に接続される 1.5kVA 同期機に現れる負制動力
ただし 1.5kVA 同期機の定数は
 $X_d = 25 \Omega$ $X_q = 14 \Omega$
 $X_d' = 5 \Omega$ $X_q' = 14 \Omega$

に現われる同期機の振動について求め、第 7 図の結果をうる。制御進み角が小さくなり、負になると振動周期が延びるのがみられる。



第6図 交流電源の内部インピーダンスが静電蓄電器と抵抗との直列回路となるとき、1.5kVA同期機の負制動力、ただし同期機の位相角 $\delta=0$ の場合



第7図 他制式水銀逆変換装置による交流電源に3kVA同期機を同期投入したときの同期機の振動周期と水銀逆変換装置の力率との関係

〔III〕 実験結果の検討

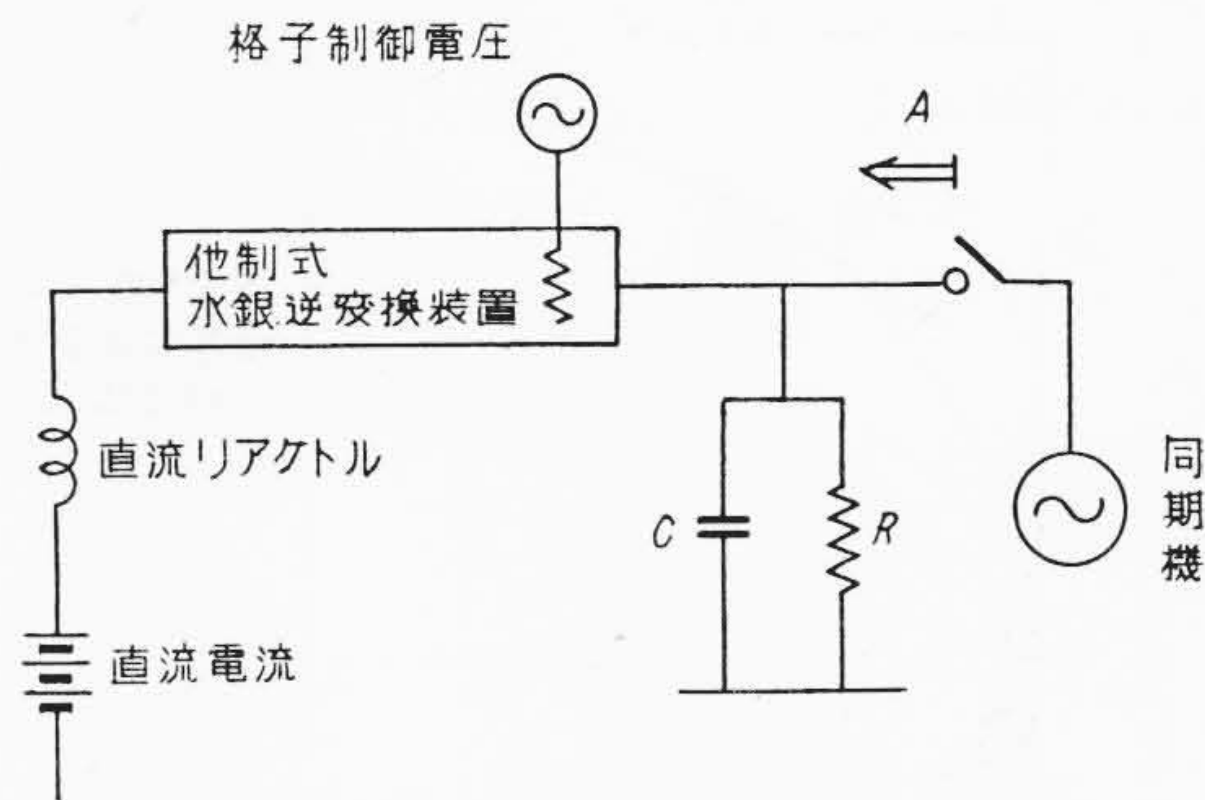
(1) 見掛けのインピーダンス

一般の電源の内部インピーダンスを求めるには(・印は複素ベクトル表示)

- \dot{E}_{to} : 無負荷時の端子電圧
- \dot{E}_t : 負荷時の端子電圧
- \dot{E}_o : 内部電圧
- \dot{Z}_o : 内部インピーダンス
- \dot{Z} : 負荷インピーダンス

とすれば

$$\dot{E}_{to} = \dot{E}_o \quad \dot{E}_t = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + \dot{Z}_o} \dot{E}_o \dots\dots(1)$$



第8図 他制式水銀逆変換装置を交流電源とみると、A点よりその内部インピーダンスを求める説明図

$$\dot{Z}_o = \dot{Z} \left(\frac{\dot{E}_{to}}{\dot{E}_t} - 1 \right) \dots\dots(2)$$

となる。他制式水銀逆変換装置が自励的に運転されている第8図の回路で、A点よりみたこの交流電源としての見掛けの内部インピーダンス(これをとくに見掛けのインピーダンスという)を求める。水銀逆変換装置回路で成立する関係式は⁽¹⁾

$$E_d - E_t \cos \gamma = r I_d \dots\dots(3)$$

$$I_d \cos \gamma = E_t / R \dots\dots(4)$$

$$I_d \sin \gamma = \omega C E_t \dots\dots(5)$$

ここに E_d : 制御進み角 $\gamma=0$ なる場合において出力電流 $I_d=0$ なるときの端子電圧

I_d : 水銀逆変換装置を通流する電流(交流と直流は適当に変換して同じ値とす)

r : 直流電源の内部抵抗

$R, \omega C$: 並列負荷

E_t : 端子電圧

これによりA点の端子電圧を上式より求めると

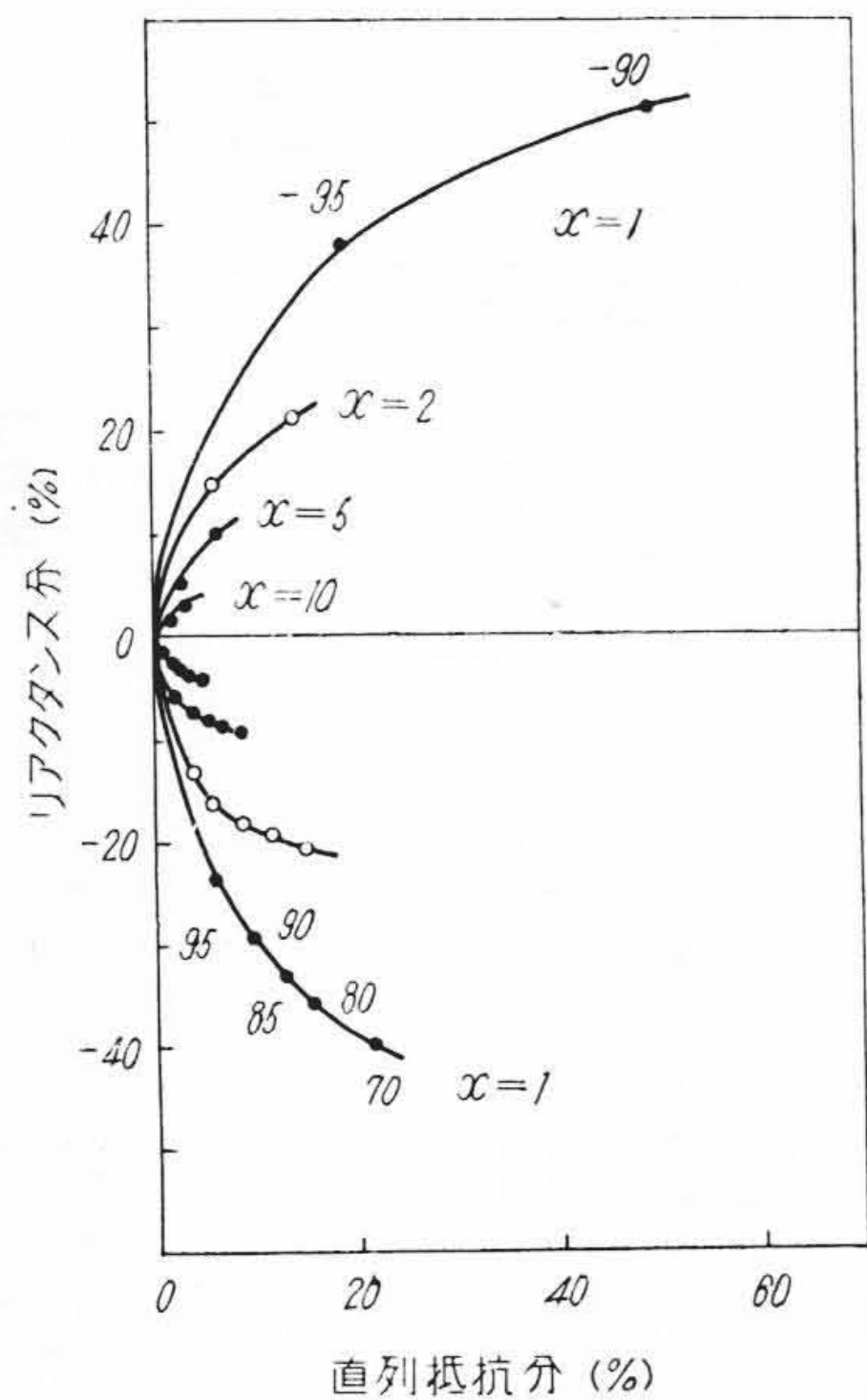
$$E_{to} = \frac{E_d}{\frac{r}{R} \sqrt{1 + (R\omega C)^2} + \frac{1}{\sqrt{1 + (R\omega C)^2}}} \dots\dots(6)$$

しかして格子制御電圧を基準ベクトルとすると、この位相は制御進み角だけおくれているから

$$E_{to} = \frac{E_d}{\frac{r}{R} \sqrt{1 + (R\omega C)^2} + \frac{1}{\sqrt{1 + (R\omega C)^2}}} e^{-j\gamma} \dots\dots(7)$$

いまA端子に抵抗 R' (ただし $\frac{R}{R'} \ll 1$) を接続したときの端子電圧を(7)式と同様に求めて、(2)式より見掛けのインピーダンスを求めると

$$Z_o = R \left[\sin^2 \gamma + \frac{\frac{r}{R} (\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma)}{\frac{r}{R} + \cos^2 \gamma} - j \sin \gamma \cos \gamma \right] \dots\dots(8)$$



各々の数字は他制式水銀逆変換装置の効率を示す

第9図 同期機に対する他制式水銀逆変換装置の交流電源としての内部インピーダンスただし同期機リアクタンス x を100%として示す。ただし $R=1, \delta=0$ である。

$$\text{ただし } wcR = \tan \gamma \dots\dots\dots (9)$$

となる。見掛けのインピーダンスは $\gamma > 0$ のとき、静電蓄電器と抵抗との直列回路となる。

A点に同期電動機を接続するとき、同期機に対する見掛けのインピーダンスを $\gamma = 0, \delta = 0$ のところでは求めると第9図のごとくなり、次式で示される。

$$Z_o = \frac{x}{1 + \frac{R}{x} \sin 2\gamma + \left(\frac{R}{x} \sin \gamma\right)^2} \times \left[\frac{R}{x} \sin^2 \gamma - j \left(\frac{R}{x} \sin \gamma \cos \gamma + \frac{R^2}{x^2} \sin^2 \gamma \right) \right] \quad (10)$$

この見掛けのインピーダンスも $\gamma > 0$ のときは静電蓄電器と抵抗の直列回路で表わされる。第9図はこの同期機の場合における(10)式の計算値である。

(8)式について検討した結果が第1表にして、 $R=26\Omega$ なるとき $R'=30\Omega$ を追加接続する実験を評価したものである。計算値は回路定数を用い(8)(9)式より算出したもので、実測値は端子電圧および力率の変化を測定した値より(2)式にて算定したものである。

(2) 負制動現象

同期機の負制動現象については C. A. Nickel⁽³⁾氏の論文以来、あきらかにされているが、詳細なことがさらに Livischitz⁽⁴⁾氏、Concardia⁽⁵⁾氏および熊沢氏⁽⁶⁾が述べている。

無限大母線に接続されている同期機において、電機子

第1表 見掛けのインピーダンスの計算値と実測値との比較

		単位					
		$\cos \gamma$	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
計算値	(1) $R=26$	抵抗分	6.7	10.3	13.2	15	15.5
		リアクタンス分	-10.4	-12.5	-13	-12.5	-11.2
	(2) $R=1/(1/26+1/30)$	抵抗分	3.1	3.5	4.6	5.8	6.8
		リアクタンス分	-3.5	-4.9	-5.7	-6.6	-7.0
上記の平均値		抵抗分	4.9	6.9	8.9	10.4	11.1
		リアクタンス分	-7.0	-8.7	-9.3	-9.5	-9.1
実測値	(3)	抵抗分	3.6	5.7	7.5	9.3	12
		リアクタンス分	-6.5	-9.6	-11.4	-12	-12.8

ただし、 $\cos \gamma$ は $R=26\Omega$ のときの値にして、(±)(1)(2)は(8)式により計算したものである。実測値は $R=26\Omega$ のとき、さらに $R'=30\Omega$ の抵抗を並列接続するときの変化量より求めたものである。

第2表 他制式水銀逆変換装置に接続するときと無限大母線に見掛けのインピーダンスを通して接続するときの1.5kVA同期機の負制動力の比較

水銀逆変換装置の力率(%)	100	80
水銀逆変換装置と接続された同期機の負制動力(W/〜)	190	320
同上における見掛けのインピーダンス(Ω)	3	4.6-j8.5
無限大母線に見掛けのインピーダンスを直列接続するときの同期機の負制動力(W/〜)	120	380

回路の抵抗分が問題になり、もし直列静電蓄電器があると、とくにこの現象は生じやすく、しかして界磁回路がこの現象と関係があることを示している。

さて、第5図の他制式水銀逆変換装置と接続される場合の結果と、第6図の通常の交流電源に直列静電蓄電器および直列抵抗とのあるときの結果とを対比し、その負制動力を比較すると、第2表のようにほぼ同じ大きさになる。

また第9図の見掛けのインピーダンス計算値の傾向と第7図の実験結果の傾向は互に説明がつけられるものであるから、ここの負制動現象は、見掛けのインピーダンスが静電蓄電器と抵抗との直列回路となることに主原因がある。

一方、通常の交流回路ではみられない性格を有する直流リアクトルの作用をみるに、水銀逆変換装置より流出する電流は、直流リアクトルのため、同期機の振動によつて生ずる端子電圧の変化に対し遅れているので、負制動力に影響をもつ。

振動が小さいとし、Lyon氏⁽⁷⁾の方法により虚数分の振動電力を計算して、直流リアクトルによる制動係数を求めると(単位法)

$$Td = -\frac{L}{R} \frac{P_o}{G_o} \left[a - \frac{E_{to}/R}{E/x \times \sin \delta_o + E_{to}/R} - \frac{\sin 2\gamma_o}{L} (a^2 + 1) \right] \dots (11)$$

$$a = R \left(wc - \frac{1}{x} \right) \dots (12)$$

$$G_o = \left[(a \cos \gamma_o - \sin \gamma_o) (\sin \gamma_o \cos \gamma_o + \frac{E_{to}/R}{I_{d_o}} \sin \gamma_o) - \left(\frac{\gamma}{R} + \cos^2 \gamma_o \right) (a \sin \gamma_o + \cos \gamma_o) \right]^2 + \left[\frac{SL}{R} (a \sin \gamma_o + \cos \gamma_o) \right]^2 \dots (13)$$

ただし、指標 0 は振動の中心で、S は振動の角速度、L は直流リアクトルのインダクタンス
 実験では、水銀逆変換装置の直流回路側での時定数は交流側の負荷の影響をも受けて、0.1 秒以下であるので負制動現象に対する効果はほとんど認められず、実用回路では問題にならないものである。

〔IV〕 実用機での実験

同期機が無負荷で交流電源に接続されるときは、電機子抵抗はかならずあるので、負制動現象の理論からはつねに負制動現象が生起するはずである。しかし、一般には直結されている機器の制動力、および同期機自身の制動巻線や極表面の過電流あるいは界磁線輪の制動巻線作用により、使用上差支えがないのが普通である。

使用上差支えるか否かを判定する目安としては電機子回路抵抗 ra と横軸同期インピーダンス Xq との比 ra/Xq を取り、制動巻線のないときは 10% 以上、あるときは 30% 以上になると負制動現象が生じるとされている。

他制式水銀逆変換装置を交流電源とする場合も、これを若干補修して、見掛けのインピーダンスの抵抗分を ra に含ましめ、容量リアクタンス Xc を用いて ra/(Xq - Xc) を利用すれば一応の目安になりうる。

250kW 制動巻線付同期電動機による第 3 表の実験結果はこの目安が用いうる。

さて、250kW 同期電動機を他制式水銀逆変換装置による交流電源回路に同期投入したときの制動力を測定し、水銀逆変換装置と同期機との相互作用として現われる負制動力を分離して、1.5kVA 同期機による実験結果と比較すると第 4 表のごとくなる。いずれも同期機容量を基準電力とし単位法にて表わしているが、機器容量の差による違いはあまりみられない。

また一方、250kW 電動機では安定に運転できる場合、たとえば第 3 表(3)のような状態で 2,000kW 同期機を同期投入すると負制動現象により安定運転は不可能になり目安の判定はこれでも成立している。

すなわち、水銀逆変換装置の交流電源としての電氣的定数で表わす容量は並列負荷の状態でも左右されるものと

第 3 表 250kW 同期電動機を他制式水銀逆変換装置の電源に同期投入したときの試験結果

	直流回路		並列負荷			同期投入試験
	電圧 (V)	電流 (A)	電圧 (V)	損失 (kW)	進相容量 (kvar)	
1	840	560	3,300	440	250	同期投入後数十秒で負制動現象により振動増大し転流失敗す。
2	850	620	2,800	500	250	投後 5 分間運転し。電源の擾乱にて負制動振動が発生する。
3	860	720	2,700	580	240	電機子電流 ± 5% 程度の振動あるも一応安定に運転される。

第 4 表 250kW 電動機と 1.5kVA 同期機との水銀逆変換装置に接続するとき発生する負制動力係数の比較

同期機	250kW	1.5kVA
同期インピーダンス X (Ω)	30	25
X に対する並列抵抗 R (Ω) の比 (R/X)	0.87	1.04
水銀逆変換装置の力率 (%)	81	80
負制動力係数 (単位法)	0.034	0.031

みられ、並列接続される同期機の位相角変化による負荷変動に対し、電圧や位相角の変化の少ないようにするためには、並列抵抗負荷が大きく、水銀逆変換装置の力率をよくする必要がある。

以上の実験より、通常他制式水銀逆変換装置を電源として、同期電動機を安定に運転するには、同期電動機容量の約 2 倍の並列負荷が必要であることがわかる。

〔V〕 結 言

他制式水銀逆変換装置を交流電源として、同期電動機を運転する場合には、見掛けのインピーダンスが問題になり、主としてこれに起因する負制動現象が生じる。これは並列負荷が大きく、制御進み角が小さくなると消失するものである。

同期機の受電極限電力は、おおむね位相角が 90 度になるところに生ずる。

もちろん、安定運転限界としては転流限界をも考慮せねばならないが、ここでの考察ならびに実験では一応強制転流方式の採用などによつて、検討項目より除いている。

終りに臨み、始終御懇切なる御指導を賜った東京大学山田教授、日立製作所日立研究所主任研究員西堀博士および日立工場毛利課長に対し謹んで感謝の意を表わすとともに、実験の遂行に協力された金原和夫君および柴田満男君に深く感謝する。

参考文献

(1) 高林; 日立評論, 37, 1501 (昭30~11)
 (2) 永井; 東芝レビュー, 6, 355 (昭26~6)
 (3) C. A. Nickel; T. A. I. E. E. 51, 966, (1932)
 (4) M. M. Livischitz; T. A. I. E. E., 60, 120 (1941)
 (5) C. Condordia; T. A. I. E. E. 60, 116, (1941)

(6) 熊沢; 電気評論, 17, 46 (昭4)
 (7) W. V. Lyon; Transient Analysis of Alternating Machinery 240 (1954)
 (8) C. H. Willis; T. A. I. E. E., 52, 701 (1933)
 (9) 執行; 電論集, 2, 6 (昭16)



特許の紹介



特許第227443号

和田正脩・小林長平
市川義三

X線写真狙撃撮影装置

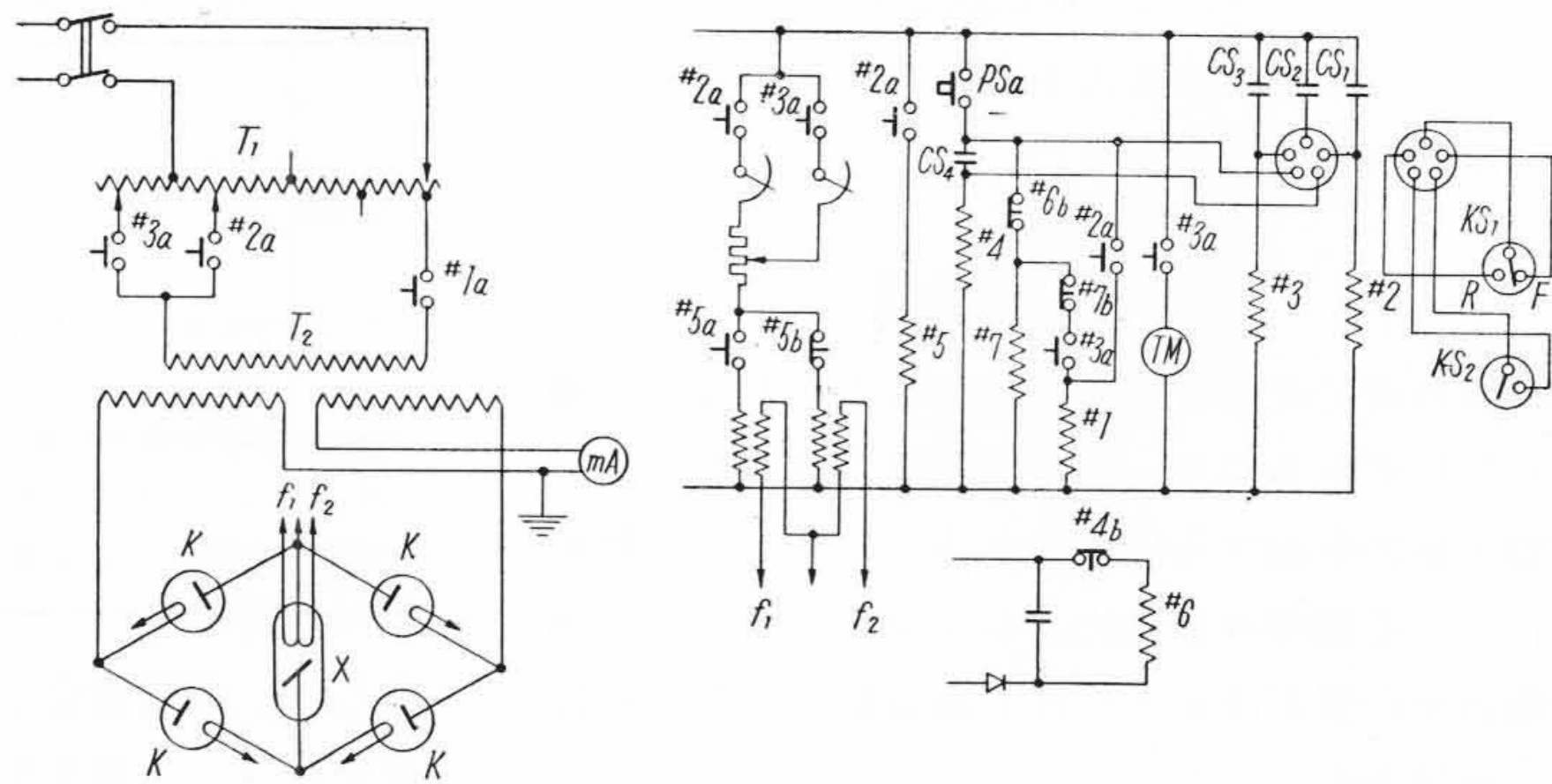
X線装置で胃腸などの撮影をする場合には造影剤の通過状況を透視により観察して造影剤がもつとも適当な位置にきたときに撮影を行う必要がある。したがってこれに用いる狙撃撮影装置としては透視終了から撮影までの所要時間が短いほど良いことはあきらかである。

ところがこの切換えに当ってX線管フィラメントが撮影に必要な一定温度になるまでにはかなりの時間を要するので、カセットを撮影位置に移動してからフィラメントの加熱を開始したのではそれだけ撮影が遅れることになる。

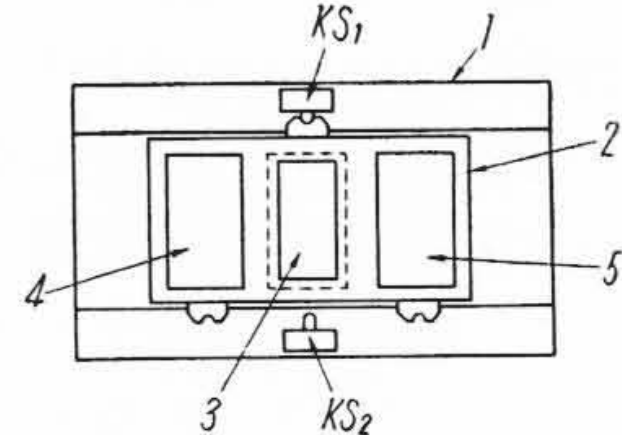
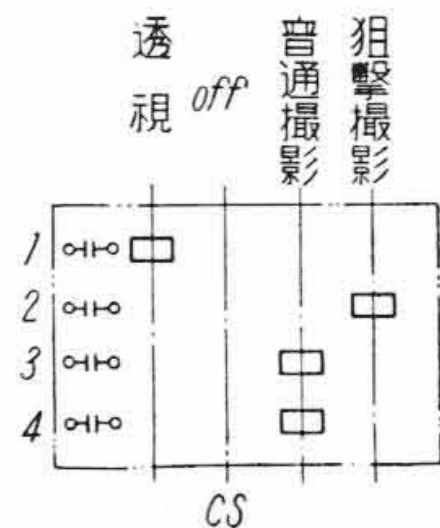
この発明はカセットと連動する開閉器によりカセットの移動開始と同時に透視を止めてX線管フィラメントの撮影条件による加熱を開始し移動中の時間を利用してフィラメントの加熱を行うことにより透視終了から撮影までの所要時間を短縮して迅速に撮影を行う

ようにしたものである。図示の装置は外枠1に沿って移動するカセットホルダ2に蛍光板3とカセット4, 5を取付け、透視の場合はこれを中央におき、撮影の場合はこれを右または左に移動させて2枚の写真を順次撮影できるようにしたもので、その動作はつぎの通りである。

- (1) カセットホルダを中央におくと連動開閉器KS₁がF位となつて#2が励磁され、#2aが閉路、X線管の小焦点側フィラメントが加熱されて透視準備態勢となる。
- (2) この状態でPS_aを押すと#1が励磁されて#1aが閉路し、透視用のX線が出る。
- (3) PS_aを押したままカセットホルダを移動し始める



第1図



- T₁: 単巻変圧器
- T₂: 主変圧器
- K: 整流管
- X: 二重点X線管
- f₁: 小焦点側フィラメント
- f₂: 大焦点側フィラメント
- TM: タイマーモータ
- KS₁, KS₂: カセット連動開閉器
- PS_a: 押ボタン開閉器
- #1...#8: 電磁接触器コイル
- #6: 時間遅れリレーコイル
- #7: タイマー始動コイル
- CS₁...CS₄: 切換開閉器

第2図

とKS₁はR位となり、#2aが開路、#1の励磁が止まつて透視を終り、一方#3が励磁されて#3aが閉路、X線管の大焦点側フィラメントが加熱されて撮影準備態勢に移る。

(4) カセットホルダが端まで移動すると連動開閉器KS₂が閉路して#4が励磁されるため#4bが開路し、これにより時間遅れリレー#6が動作して一定時間後に#6bが閉路、#1が励磁されて撮影用のX線が出る。

この場合カセットが撮影位置にきたときにはフィラメントの加熱が相当進んでいるから、その後短時間加熱するだけでフィラメントは所要の温度になり、迅速に撮影を行うことができる。(坂本)