U.D.C. 621.316.717.077.3:621.316.729].001.4
621.313.32.026.448:621.224.7]-573

東京電力株式会社水殿発電所納め 65,000kVA/63,000kW発電電動機同期始動試験

Synchronous Starting Tests for 65,000kVA/63,000kW Generator/Motor for Midono Power Station, Tokyo Electric Power Co.

篠富士巳* *Fujimi Shino*
鈴木　登** *Noboru Suzuki*

Following the growth of pumped storage power plants in capacity, it has become difficult to start generator/motors by damper winding. Instead, pony motor starting method has been increasingly adopted. Actually, power stations at Kisenyama, Numappara, Shintoyone Okutataragi, Ohira, Takasegawa Nambaru, and Okukiyotsu employ this starting method. However, for starting many generator motors synchronous starting system turns out more economical. This system was adopted for the first time at Midono Power Station, Tokyo Electric Power Co. which has been in regular commercial operation since October, 1969. The results of tests conducted at this power station contributed much in the design of generator/motors for Ludington Power Station (388MVA-6 units) and Numappara Power Station (250MVA-3 units.) This article introduces a syncruonous starting system adopted for Midono Power Station.

1 緒　　言

同期始動方式は工場試験などでは古くから使われている方式である。われわれは，すでに工場試験設備により，5,000kVA発電機と5,000kWおよび110,000kW電動機を利用し各種特性の理論と実際の関係について検討済みであった(1)。東京電力株式会社水殿発電所の場合，これらの試験研究を基に同期始動の検討を行ない，現地試験結果も予想どおりの成果を得た。本発電所には専用発電機2台および発電電動機2台が設置され，1台の発電機で1台または2台の発電電動機を同時に同期始動を可能としている。

2 同期始動方式の基本原理

(1) 電気トルク（T）

任意速度（n）における発電機から電動機に伝達される電気トルクは一般に次式で表わされる。

$$T=\frac{E_G E_M(xq\sin\delta+\frac{r}{n}\cos\delta)+\frac{1}{2}E_G{}^2(xd-xq)\sin 2\delta-\frac{r}{n}E_G{}^2 \quad (\text{p.u})}{xd\cdot xq+(r/n)^2} \cdots(1)$$

ここに，

$xd=xd_G+xd_M$ （p.u） xd ：直軸同期リアクタンス（p.u）
$xq=xq_G+xq_M$ （p.u） xq ：横軸同期リアクタンス（p.u）
$r=r_G+r_M+r_0$ （p.u） r_G, r_M ：固定子巻線抵抗
r_0 ＝母線抵抗 （p.u） E_G, E_M ：励磁電圧（添字$_G$，$_M$はそれぞれ発電機および電動機を示す。）
δ ＝相差角 （rad）
n ＝回転速度 （p.u）

最大電気トルクを与える相差角をδ_0とすれば，

$$\cos\delta_0=-\frac{xq}{4(xd-xq)}\cdot\frac{E_M}{E_G}\pm\sqrt{\left\{\frac{xq}{4(xd-xq)}\cdot\frac{E_M}{E_G}\right\}^2+\frac{1}{2}} \cdots(2)$$

(1)式のδの代わりにδ_0を代入すれば，Tの最大値が求まる。

$$T\max=(T)\,\delta=\delta_0 \cdots(3)$$

またnの小さい始動初期はリアクタンスを無視できるため，

$$T\fallingdotseq\frac{n}{r}\cdot(E_G\cdot E_M)\cdot\left(\cos\delta-\frac{E_G}{E_M}\right) \cdots(4)$$

ここでTは電動機から発電機への流入を正とする。(4)式より同期始動を円滑に行なうためには$E_G/E_M\geqq 1$，すなわち，発電機側の励磁電圧（E_G）は電動機側の励磁電圧（E_M）よりも大きいことが必要条件である。(1)～(4)式からわかるように電気トルクは，E_GとE_Mの相乗積および励磁比で決まるので，E_GとE_Mの値を適切に選ばなければならない。

(2) 励磁電圧選定上の問題点

図1において，曲線（A）の内側領域は，初期同期始動可能範囲である。また曲線（B）は，加速途中で水車トルクが最大電気トルクより大きくなり発電機のみ加速して電動機が脱調し，100%速度まで同期始動できない場合があり，この限界を示したものである。

したがって初期始動可能で，しかも100%速度まで加速可能な励磁電圧選定領域は，曲線（A）および（B）の内側すなわち斜線で囲まれた領域でなければならない。それゆえ，励磁電圧の値はたとえばC_0に選ぶことになる。励磁電圧は界磁コイルの抵抗に比例するため，同期始動時の界磁コイルの温度によりC_0の位置は変化する。したがって，界磁コイルの温度が0～120℃に変化することを考えると，C_0はC_1-C_2-C_3-C_4で囲まれた面積の中のどこかに存在することになる。C_0はE_G, E_Mとも界磁コイルの温度が75℃の場合で考えた。この長方形（C_1-C_2-C_3-C_4）の面積が前述の斜線で囲まれた領域内にあるようにC_0の位置を決める必要がある。

* 東京電力株式会社　　** 日立製作所日立工場

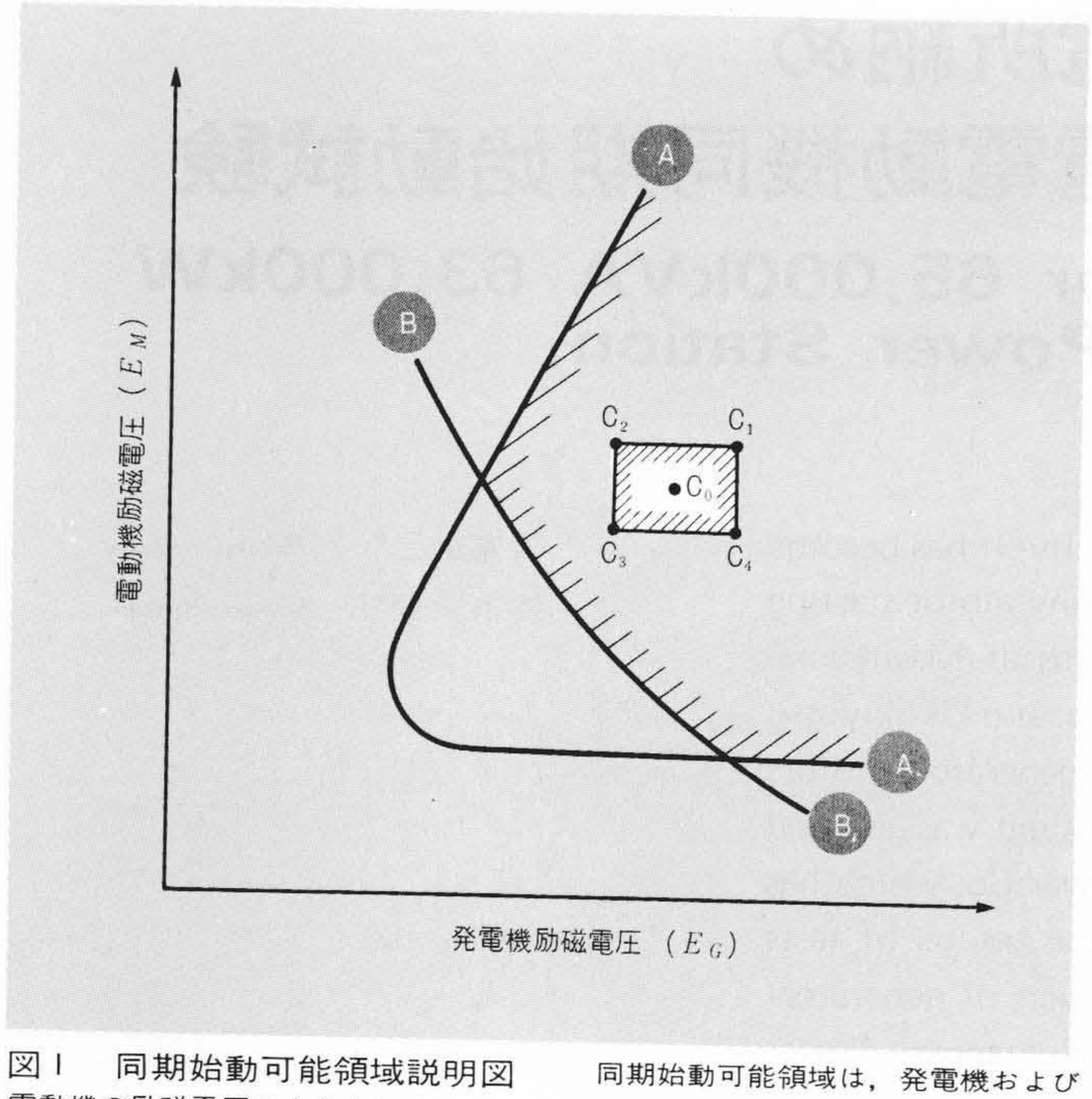

図1　同期始動可能領域説明図　　同期始動可能領域は，発電機および電動機の励磁電圧の大きさによって，ほぼ決まる。

Fig. 1　Excitation Limit of Synchronous Starting

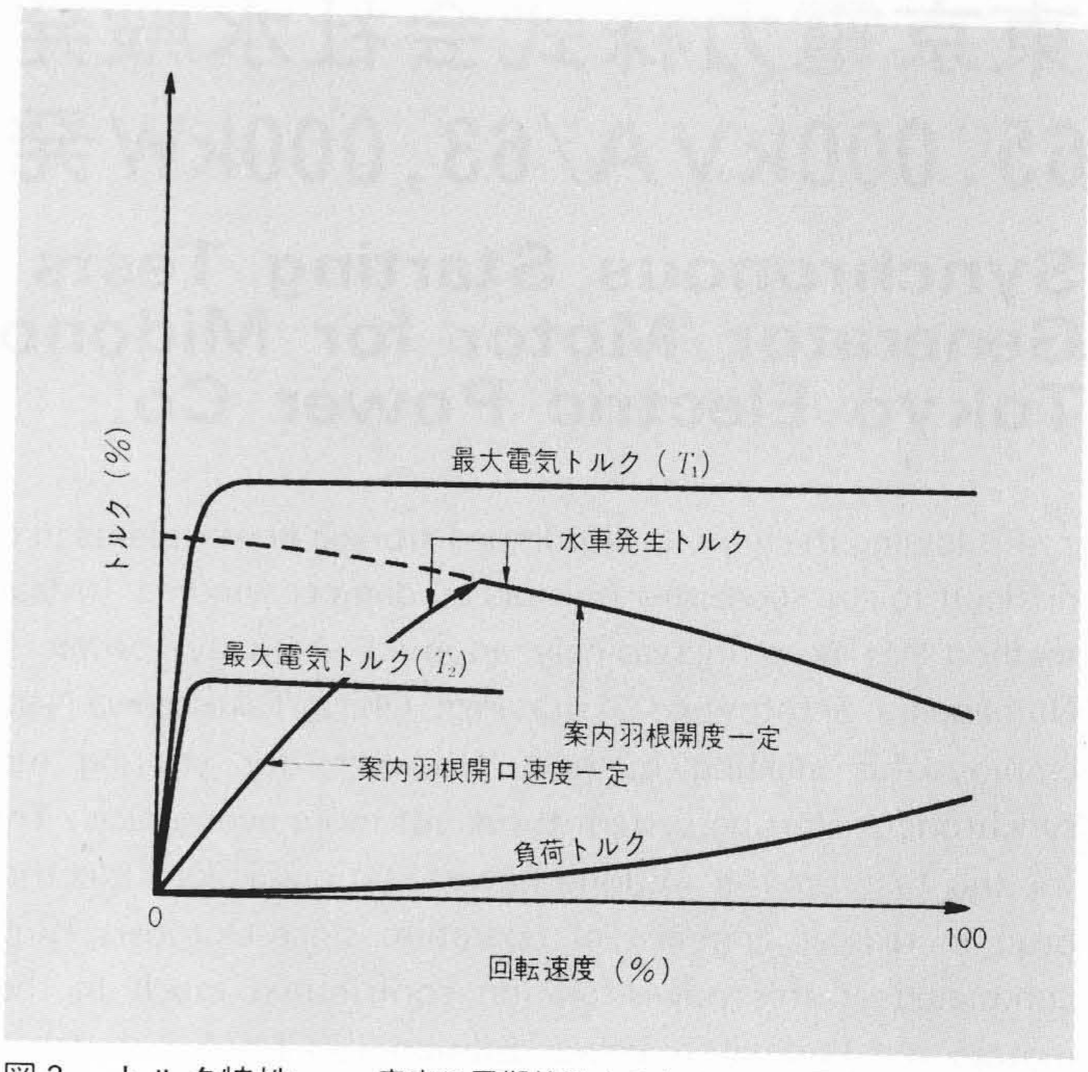

図2　トルク特性　　安定に同期始動するためには，最大電気トルクよりも必ず水車発生トルクが小さくなければならない。

Fig. 2　Torque Characteristic Curves for Synchronous Starting.

3　同期始動方式において考慮すべき一般的基本事項

3.1　始　動　前

(1)　ブレーキ印加

ポンプ水車の漏水トルクにより電動機が逆方向に回っていると，同期始動できぬ場合がある。そのため，あらかじめ発電機と電動機のブレーキを印加しておき，種々の始動準備を行ない始動直前に双方のブレーキをはずし，両者がはずれたことを条件に案内羽根を開き主機を始動させる必要がある。しかし，始動前に発電機および電動機の双方に励磁印加するので，電機子と回転子間に電磁力が働き漏水トルクに打ち勝つ場合がある。このときはブレーキ印加の必要はない。

(2)　励　　磁

同期始動は発電機を電源として電動機が電気的に結合され，両機が同時に同期加速されるものである。したがって始動前から励磁印加しておかなければならない。

一般に励磁電圧の値は，発電機が1.0～1.2p.u，電動機が0.8～1.0p.uぐらいである。ここで1p.uとは無負荷で定格電圧を発生するに必要な界磁電圧である。

励磁電源としては，主機直結の回転形励磁機は低速領域で電圧確立せず必要な励磁が得られないため，別置励磁装置が必要である。

(3)　界磁コイル過熱保護リレー

前述したように始動前から界磁コイルに通電するので，もし始動渋滞を起こし停止したまま通電されていると，界磁コイルは冷却が悪いため焼損のおそれがある，そこで励磁印加の条件でタイマを動作させ一定時限後に界磁しゃ断器を開く必要がある。正常に同期始動した場合は定格速度に達した時点で，この保護回路を開き，ある整定時間で界磁しゃ断器を開くような誤動作を防がなければならない。

(4)　案内羽根開口速度と案内羽根開度

図2はトルクと回転速度の関係を示すものである。定格速度まで安定に同期始動するためには最大電気トルクが水車トルクよりも大きいことが必要で，T_1曲線に相当する。T_2で示す最大電気トルクの場合は約20%速度で水車発生トルクが大となるため，発電機のみ上昇し，電動機の脱調を招くことになる。

したがって水車発生トルクは最大電気トルクよりも小さく，負荷トルクよりも大きいように，案内羽根開口速度と案内羽根開度を選定する必要がある。

3.2　加　速　中

(1)　脱調リレー

始動初期に電動機が発電機に対して同期並入する場合，発電機に対し電動機の回転速度が遅れたり，進んだりしながら同期並入する場合がある。この場合，もし脱調リレーが生きていると脱調と判断してしまうので，誤動作を防ぐため始動始めから同期化するまでの時間は，脱調リレー回路をタイマにより開いておく必要がある。

(2)　しゃ断器の開閉

同期始動時加速途中で脱調または短絡事故が起きた場合，まず母線側のしゃ断器を開き，次に界磁しゃ断器を開くようにしなければならない。低周波領域で始動母線側のしゃ断器が性能的に開路できない場合は，このときに限り最初界磁しゃ断器を開き，次に始動母線側しゃ断器を開くようにすべきである。

3.3　定格速度到達後

(1)　自動電圧調整器および自動力率調整器

定格速度に達すると両機の端子電圧を同一にするために，発電機側は自動電圧調整器(以下，ＡＶＲと略す)を生かし，電動機側は自動力率調整器(以下，ＡＰＦＲと略す)を生かす場合がある。この場合，ＡＶＲとＡＰＦＲを同時に生かすと両機の励磁電圧が異なるため両機間に横流が流れる。この横流を最小限にするため，ＡＶＲとＡＰＦＲの生かす時期を数秒以上離すと良い。

定格速度に達してからの揃(せん)速時間を短くするためＡＶＲは80～100%速度で生かすことも考えてよい。また，

電動機にはAPFRを設けずAVRのみとする場合もある。

(2)　系統並列

発電機と電動機双方を系統に投入し，その後，始動母線しゃ断器を開いて発電機を電動機から解列する。系統並列寸前に発電機を解列すると，電動機が強制並列することになり安全運転上好ましくない。

4　機器仕様と単線結線図

表1は機器の仕様を，**図3**は単線結線図を示す。

5　予備試験

同期始動試験に先だち単品の予備試験を行なった。

(1)　母線抵抗

しゃ断器および母線抵抗両機の電機子抵抗を含めた合成抵抗を測定した結果，0.03%であり，ほぼ予定どおりであった。

(2)　別置励磁装置

この装置はトランスの二次側のタップを変えることにより励磁電流の調整を行なう方式である。そのため各タップと励磁電流の値をあらかじめ求め，E_G, E_Mの選定値を決める資料とした。

(3)　水車始動トルク

同期始動初期には，初期印加トルクがある程度大きいほうが両機を円滑に同期化させることができる。あまり大き過ぎても発電機のみ加速してしまい電動機が追従できない。発電機は磁気推力軸受を有しているので，これの励磁電流を変化することにより始動時の初期印加トルク(静止摩擦反抗トルク)を加減できる。この値は8～10%にセットした。

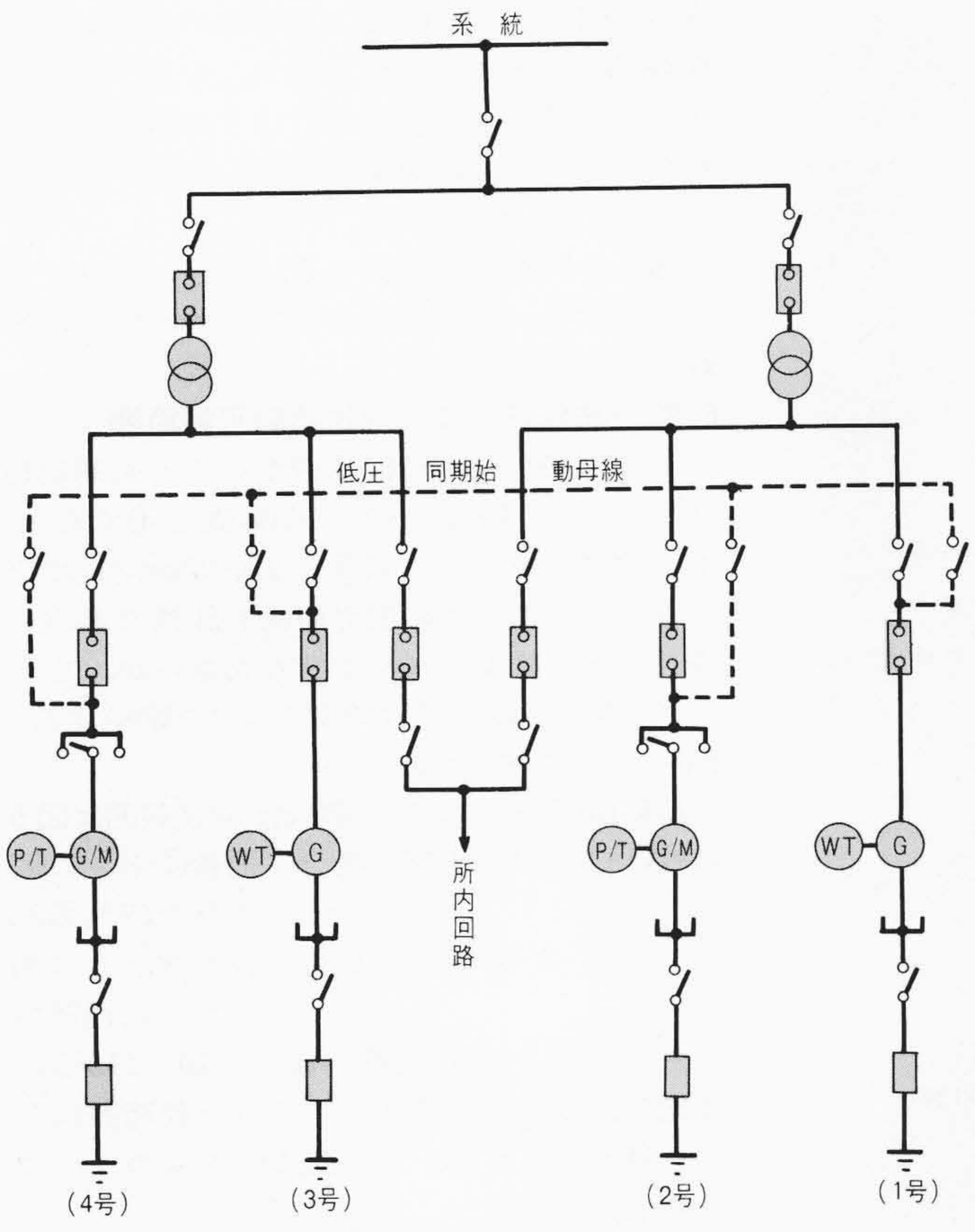

図3　単線結線図　　主変圧器はセントラル式で，発電機2台に対し1台を設置し，低圧同期始動方式である。

Fig. 3　One Line Diagram

表1　機器仕様　　1および3号機は発電専用機で，2および4号機は発電電動機である。

Table I　Specification of Generators and Generator/Motors

	項目	1および3号機	2および4号機
主機	形式	かさ形	かさ形
発電専用機または発電電動機	出力(MVA)	65	65/63MW
	回転速度(rpm)	167	150
	電圧(KV)	11	11/10
	周波数(Hz)	50	50
	極数	36	40
	力率	0.95	0.95/1.0
	GD^2 ($t\text{-}m^2$)	6465	10,283
	無負荷定格界磁電流(A)	394	330/285
	直軸同期リアクタンス(%)	95.4	90.3
	横軸〃(%)	67	59.6
	固定子巻線抵抗(Ω/相)75°C	0.0076	0.00692
直結主励磁機	出力(kW)	330	300
	電圧(V)	440	440
	電流(A)	750	682
別置励磁装置	出力(kW)	170	100
	電圧(V)	240	220
	電流(A)	700	455
専用水車またはポンプ水車	形式	フランシス形	フランシス形
	出力 79.7m時(kW)	64,500	63,400
	71.7m時(kW)	57,900	56,500
	65.7m時(kW)	52,900	50,900
	57.7m時(kW)	43,400	41,200
	水量(m^3/s)	90	90

(4)　案内羽根開口速度

電動機が発電機に追随して同期始動するためには水車発生トルクを徐々に増大して行くことが望ましく，計画では0.5～0.6%/sと考えていた。予備試験では開口速度が0.2～0.95%/sの範囲で調整可能であることを確認し，最終的には種々の開口速度で同期始動テストを行ない，0.56%/sに決定した。

(5)　ポンプ水車の漏水トルク

ポンプ水車の漏水トルクは，正常状態すなわち，案内羽根合せめのギャップがゼロの状態で，約0.2%であった。また，人為的に案内羽根合せめのギャップを3.5mmに拡大した場合でも漏水トルクは約0.4%であった。

(6)　低周波領域における保護リレー特性

一般の保護リレーは商用周波数用に設計されているので，低周波領域では周波数の影響を受ける。脱調検出リレーはパルス位相検出方式であり周波数の影響を受けないため，同期始動中はすべてこのリレーは有効に作動する。その他のリレーについても個々に周波数特性を測定した。

(7)　励磁切換試験

図4は発電電動機の励磁回路を示すものである。励磁切換方式は次のように行なった。まず直結励磁機の界磁調整抵抗器をあらかじめ無負荷規定電圧相当に整定しておき，主機回転速度が定格の80%になれば自動的に41を投入し，直結励磁機を生かす。41投入後，別置励磁装置の電流がほぼゼロになれば90Sが動作し41Sを開く。すなわち，別置励磁装置を切り離し，41S開路と同時にAPFRを強制投入する方式とした。

6　同期始動試験（空中始動）

図5は同期始動可能領域限界の測定結果を示すものである。図中の各記号については下記を参照されたい。

○印：20%速度まで同期始動可能なものを示す。

△印：20%速度まで同期始動可能であるが，同期化時乱調

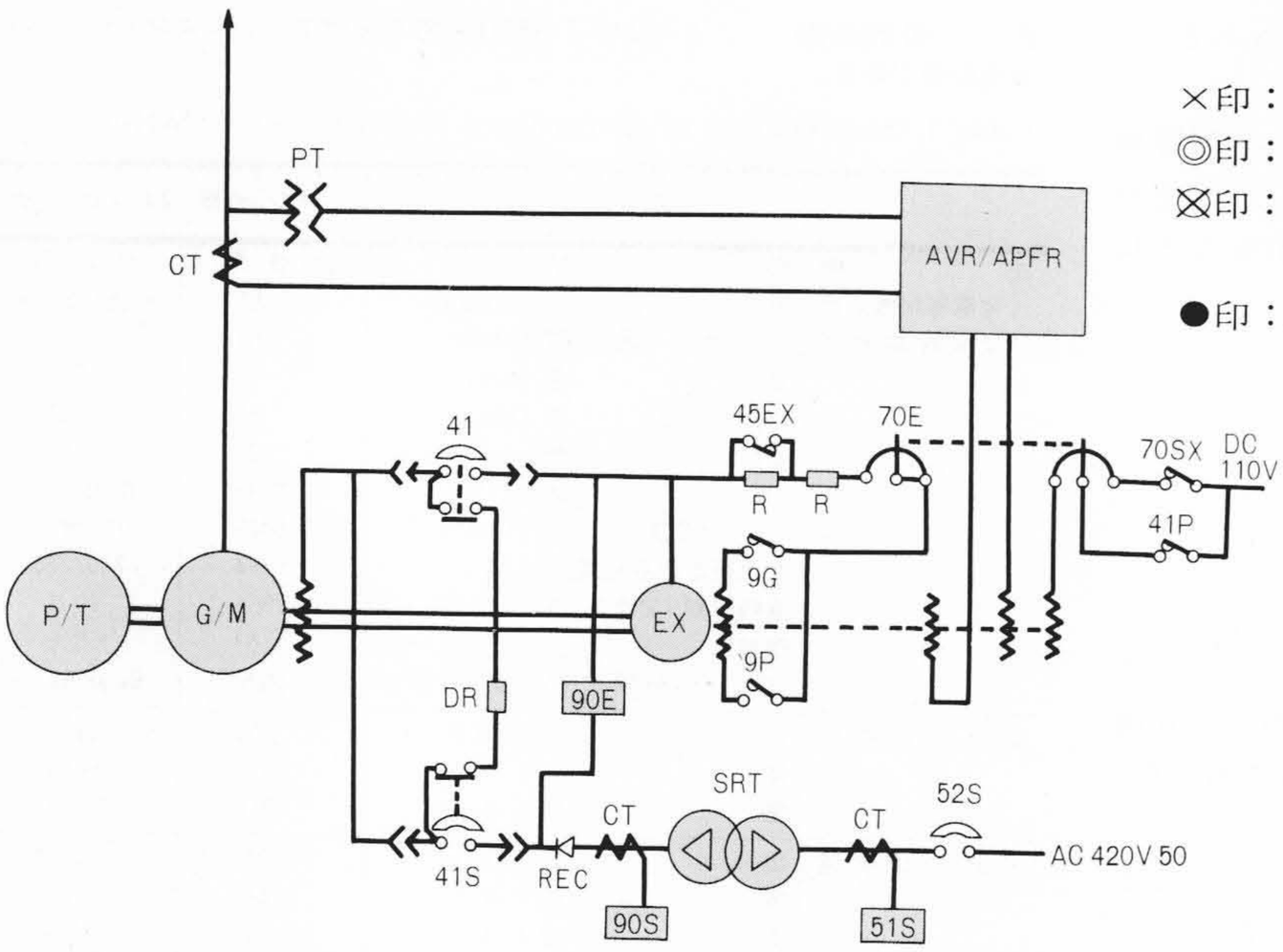

図4　発電電動機の励磁回路　発電電動機は，同期始動用別置励磁機と定常運転用直結回転形励磁機を有する。

Fig. 4　Excitation Circuit of Generator/Motor

を起こしたもので限界に近いものを示す。

×印：同期化不能のものを示す。

◎印：100%速度まで同期始動可能なものを示す。

⊠印：20%速度までは同期始動可能であるが，100%速度に到る途中で脱調したものを示す。

●印：水中始動にて100%速度まで同期始動可能なものを示す。

●印：水中始動にて同期始動はするが，途中で脱調し100%速度まで到達できないものを示す。

また，図中の各数字は試験番号を示し，分類は下記のとおりである。

1～33　：1G-1Mの空中同期始動

61～103：1G-2Mの空中同期始動

1W～8W：1G-1Mの水中同期始動

G：発電機

M：電動機

1G-1M：1台のGで1台のMを同期始動する場合

1G-2M：1台のGで2台のMを同期始動する場合

そして空中同期始動の場合は，案内羽根開口速度が，0.56%/s，案内羽根開度は35%とし，水中同期始動の場合は案内羽根開度のみ55%に変更した。

6.1　初期始動可能範囲

始動初期の低速領域(20%速度以下)における同期始動の可否を励磁比を変化させて測定した。その結果，**図5**の曲線①が1G-1Mの場合，曲線②が1G-2Mの場合の同期始動可能範囲であることがわかった。なお，この領域は計算値よりも実測値のほうが若干拡大されているので，計算値で検討しておけば問題ないことがわかった。

図6は同期始動限界に近い場合のオシログラムを示し，母線電流が脈動し約30秒後に始動した(試験番号12)。

6.2　100%速度まで同期始動可能範囲

1G-1Mの場合100%速度までの同期始動可能限界は，**図5**において曲線③と④であり，1G-2Mの場合は曲線④および⑤が測定結果より得られた。この限界曲線を計算で求める場合，水車発生トルクよりも大きいが，しかしぎりぎりの所の最大電気トルクを励磁比E_G/E_Mを変えて求めればよい。

結局100%速度までの同期始動可能範囲は**図5**において，1G-1Mの場合：曲線①と④に囲まれた内側領域

1G-2Mの場合：曲線②と⑤に囲まれた内側領域

である。そして界磁巻線の温度が20～110℃に変化し，かつ最高落差でも十分始動範囲に余裕を持たせるため，励磁比などを次のように最終設定した。

E_G =1.35p.u. 案内羽根開口速度=0.56%/s

E_M =0.86p.u. 案内羽根開度= 35%

曲線 ①	20%速度までの同期化可能限界(1G-1M 空中始動)
曲線 ②	20%速度までの同期化可能限界(1G-2M 空中始動)
曲線 ③	100%速度まで加速可能限界 {1G-1M 空中始動,最高落差において
曲線 ④	〃 {1G-1M 空中始動,最高落差において 1G-2M 空中始動,標準落差において
曲線 ⑤	100%速度まで加速可能限界 {1G-2M 空中始動,最高落差において 1G-1M 水中始動,標準落差において

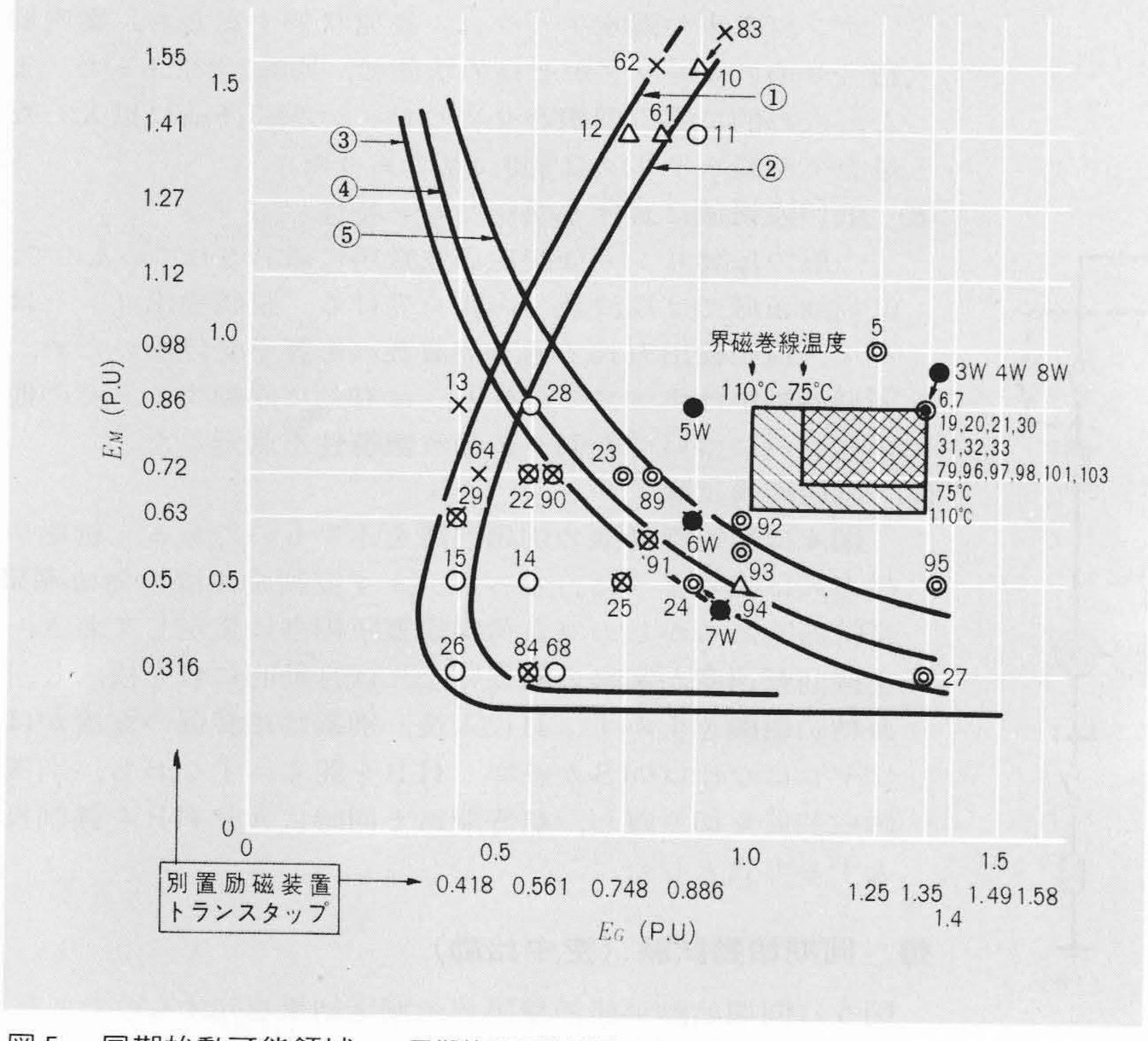

図5　同期始動可能領域　同期始動可能範囲の実測値を示す。1G-2Mのときは1G-1Mに比べて可能領域が10～20%小さくなる。

Fig. 5　Excitation Limit Region of Synchronous Starting (Measured Values)

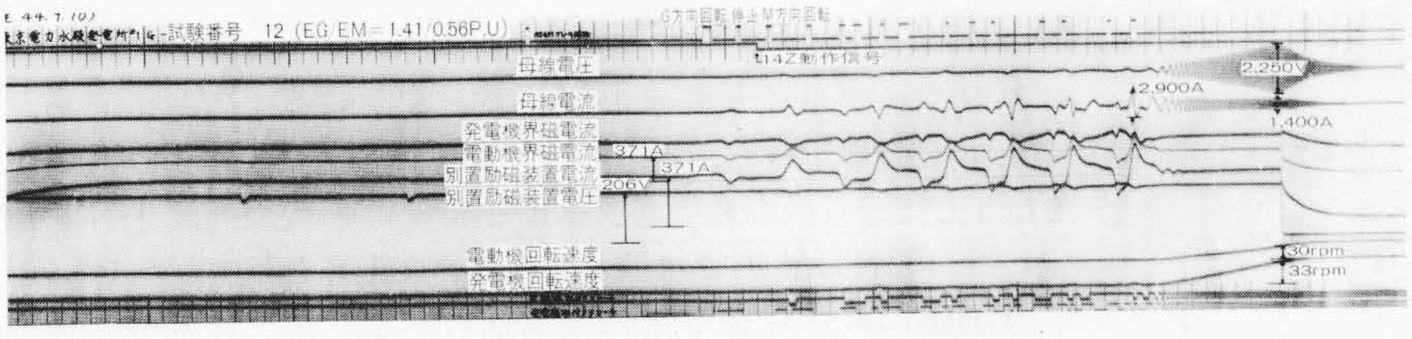

図6　同期化確認試験(限界)（IG-IM）　初期同期始動が辛うじてできた場合を示す。

Fig. 6 Trial Test of Synchronized Phenomena(Starting Limit Region)

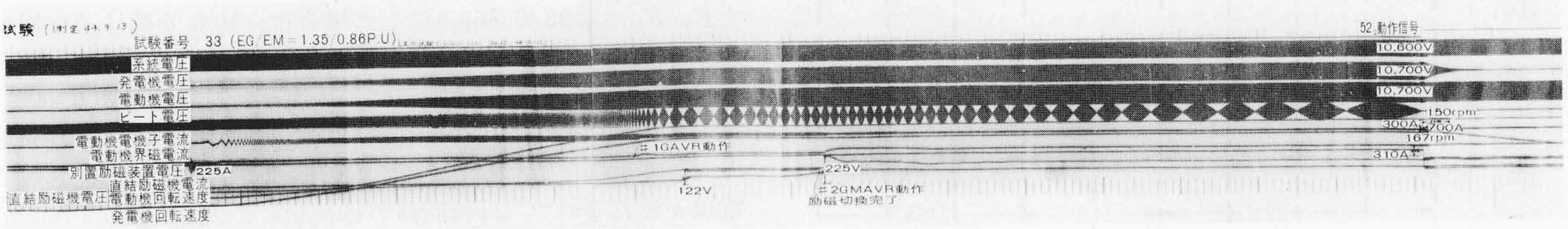

図7　系統並入試験(IG-IM)　最適励磁E_G/E_M=1.35/0.86p.uにて系統並列確認試験を行なった。

Fig. 7 Synchronous Starting Test to Fall into Line System (IG-IM)

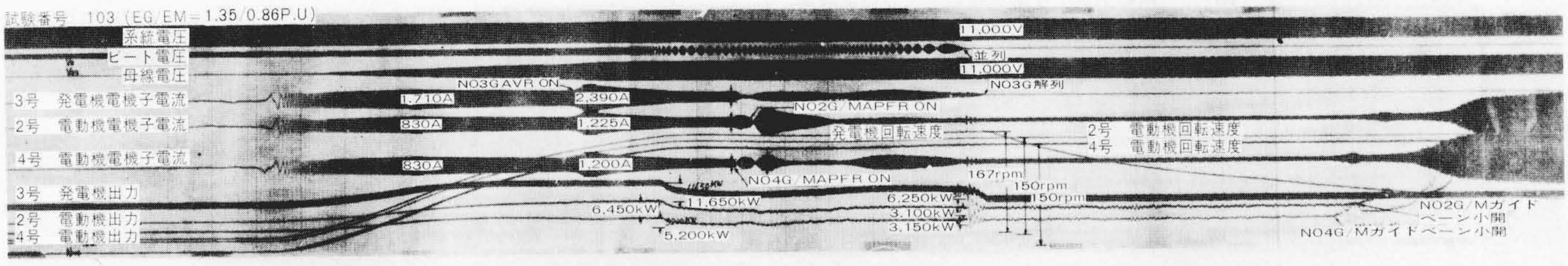

図8　系統並入試験(IG-2M)　最適励磁E_G/E_M=1.35/0.86p.uにて系統並列確認試験を行なった。

Fig. 8 Synchronous Starting Test to Fall into Line System (IG-2M)

6.3　系統並列

前記**6.2**で決めた最終設定条件で系統並列試験を行なった。**図7**は1G-1M(試験番号33)，**図8**は1G-2M（試験番号103）の場合の系統並列時オシログラムを示すものである。

母線電流は1G-1Mの場合，安定加速中および発電機側，AVR投入時ともに約35%，1G-2Mの場合は安定加速中約47%，発電機AVR投入時はショックがあり約65%であった。

6.4　励磁切換および始動時間

発電機側は80%速度で別置励磁装置から直結励磁機への切換およびAVR投入を強制的に行ない，電動機側は前記したように80%速度で直結励磁機が強制投入され，その後別置励磁装置の電流がほぼゼロとなれば，別置励磁装置が解列され同時にAVRが強制投入される。

図9は1G-1Mの場合の始動時間特性分析値を示すものである。水中始動の場合，空気抜き-充水-プライミング水圧確立の時間が不要のため，加速時間が長くなることを考慮に入れても揚水開始までの総時間は，空中始動の場合よりも約33秒短くなっている。#1ONから系統並列まで空中始動は7′-39″，水中始動の場合は7′-06″であった。(標準落差の場合)。

次に加速時間を各ケースにつき比較すると次のようになる。

	標準落差時	最低落差時
1G-1M（空中）：	58″	110″
1G-1M（水中）：	81.5″	——
1G-2M（空中）：	98″	130″

7　水中同期始動試験(1G-1Mの場合)

水中同期始動可能となれば水面押下げ装置は不要となり，揚水開始までの時間も短くなるので，将来考慮すべき方式であると考え本機にて確認試験を行なった。

(1) 始動初期の特性は空中始動の場合ほとんど同じのため，定格速度までの同期始動可能領域を求めた。**図5**における曲線⑤がそれを示すものである。

(2) 流量と落差の関係から試験時のプライミング水圧確立速度は，計算どおり86%であった。

(3) 水車室の騒音は空中始動で最大92dB，水中始動時最大98dBであった。

(4) 振動，軸振れ，水圧などはプライミング水圧確立付近より増大し，並列後に最大となる。その後案内羽根が開き始めるに従って減少し，空中始動の場合と同程度になる。

図10は水中同期始動-並列-揚水までのオシログラムを示すものである（試験番号8W）。

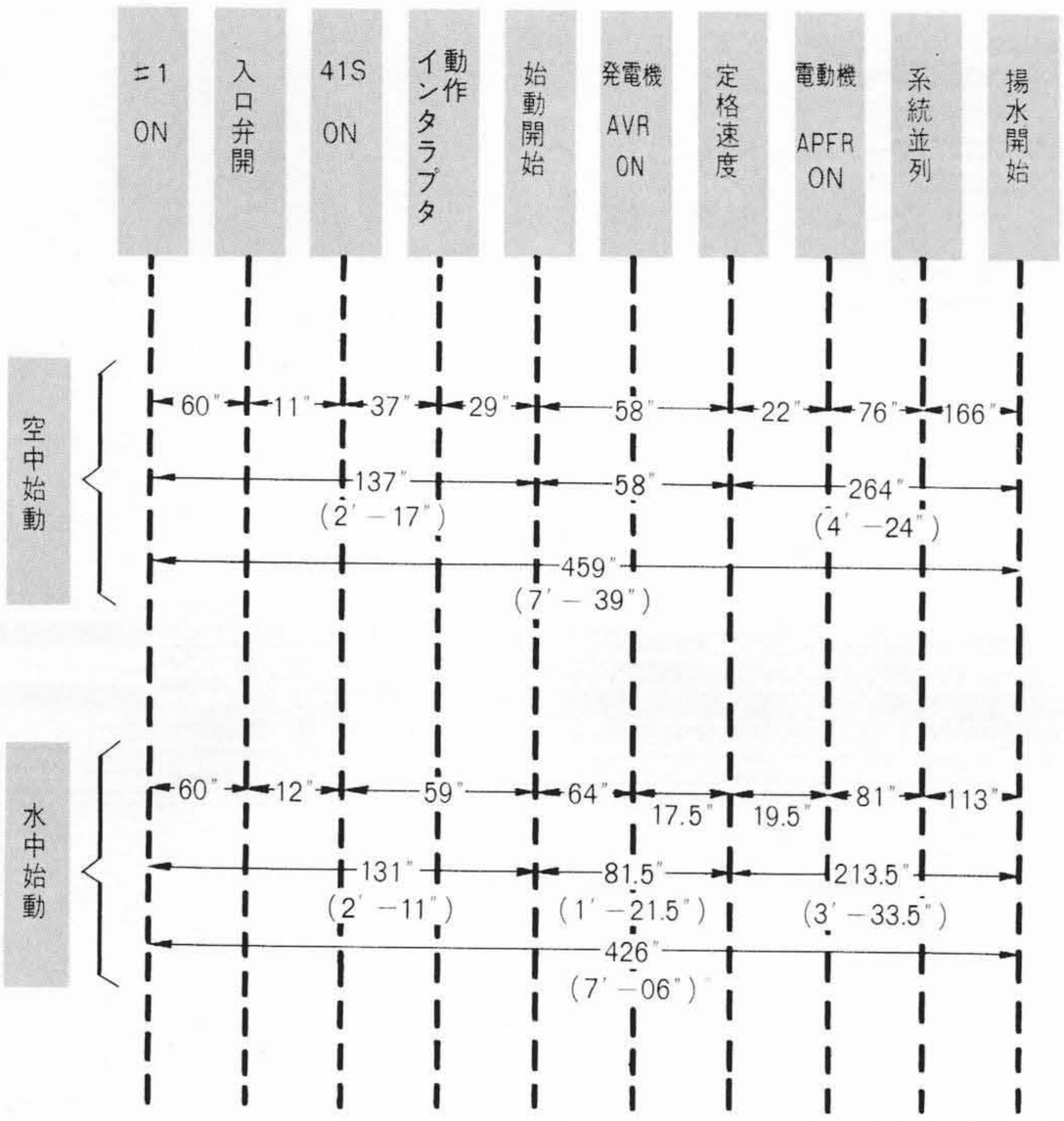

図9　始動時間特性(IG-IM)　始動準備から揚水開始までの始動時間間隔を各機能ごとに分析測定した。

Fig. 9　Synchronous Starting Time Characteristiec

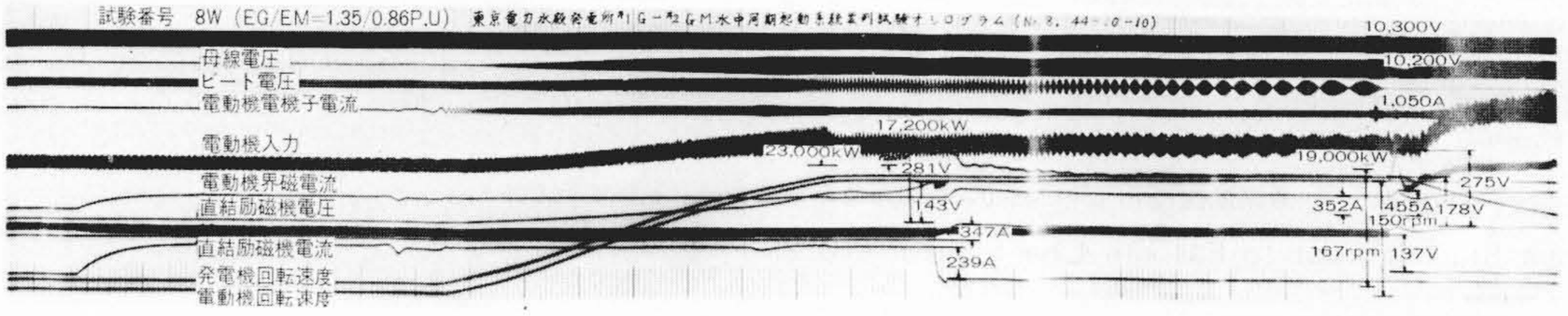

図10　水中同期始動系統並入試験(IG-IM)　ポンプ水車を水中で回した場合の同期始動試験を実施し，十分可能であることを確認した。

Fig. 10 Synchronous Starting Test in Pump/Turbine Runner in Water to Fall into Line System (IG-IM)

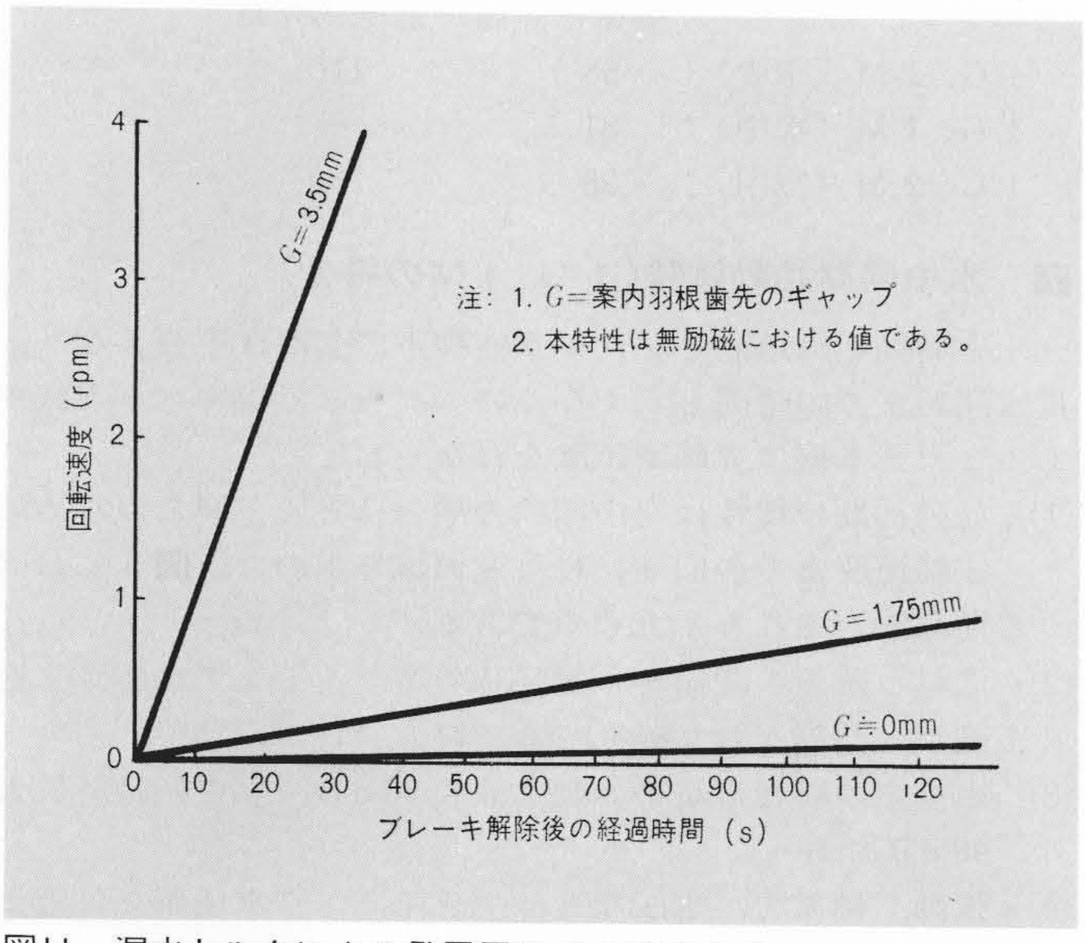

図11　漏水トルクによる発電電動機の速度上昇　案内羽根歯先のギャップが3.5mmの場合を漏水量最大と考えた。実用的には，このギャップが3.5mm以下で案内羽根を補修するのが一般的だからである。

Fig. 11 Generator / Motor Acceleration Curve Due to Pump/Turbine Leakage Torque

8　漏水最大時同期始動試験

発電電動機単独で漏水トルクによる逆転現象確認のため，停止中水面押下げし，オイルリフタを運転しておき，ブレーキをはずしてからの漏水トルクによる発電電動機の速度上昇を測定した。**図11**は無励磁状態における速度上昇を示すものである。

無励磁における発電電動機単独の漏水トルクに基づく速度上昇は，案内羽根合せ目のギャップが3.5mmのとき30秒後に3.4rpmであった。この場合，E_M=0.86p.uの励磁を加えると電磁力で拘束されるため速度上昇がにぶり，3分後に3.6rpmに落ち着いた。また，1G-1Mを電気的に結合し両機の励磁をE_G/E_M=1.35/0.86p.uにした場合は，約5分後に逆転回転速度0.01rpmに落ち着いた。電動機側漏水トルクは1.8t-m(0.43%)に対し，電動機側磁気不平衡トルクは1.0t-m(0.24%)であるため，その差0.8t-mのトルクで電動機は，逆方向(発電方向)に回転し始める。そして電動機側より発電機側へ低周波電流が流れるので，母線回路の抵抗損により電気制動トルクが働き逆転回転速度は0.01rpmで落ち着いたものと考えられる。

この現象は同期始動時漏水が多く，しかもブレーキを最初からはずしておいても十分同期始動可能の裏付けとなった。実際に案内羽根合せ目のギャップが3.5mm(漏水最大)にセットして，ブレーキを掛けずに1G-1Mおよび2Mで同期始動し安定に始動加速することを確認した。そして約半年間の運転実績により始動前ブレーキを掛けなくても問題のないことを確認し，その後，正式にこの方式を採用した。

9　脱調リレー

脱調リレーは始動開始を検出する微速度リレー(14Z)によりタイマを介して時間遅れを持たせて生かしている。その理由は3.2の(1)で説明済みであるが，試験結果では14Z動作後2～3秒で同期化が行なわれている。したがって実用運転での余裕を考えて脱調リレーは，14Z動作後5秒で生かすようにした。

10　結　　言

同期始動方式において考慮すべきほとんどの現象について実機で測定できたことは非常な喜びとするところである。本発電所で得られた成果は今後の揚水発電所計画への大きな原動力になるものと考える。

最後に本計画に参加された各位ならびに現地試験時常に適切な判断とご援助，ご協力をいただいた関係各位にそれぞれ深謝の意を表わす次第である。

参考文献

(1)　庄山：日立評論　49，69（昭42-6）