

同期起動式揚水発電所の運転制御と保護

Controlling and Protective Systems for the Pump Stored Power Station Adopted the Synchronous Starting Method

小 俣 徳 郎*
Tokurô Omata

小 松 凱**
Gai Komatsu

平 野 一 暁**
Kazuaki Hirano

要 旨

揚水発電所の起動方式は従来低減電圧起動方式が採用されていた。しかし、最近、主機単機容量が150 MW以上に増大したため起動時の系統擾乱(じょうらん)が大きくなり、かつ主機および主回路機器の製作が困難になってきた。これらの問題に対処するために直結電動機起動方式および同期起動方式が計画、採用され始めた。

本稿では同期起動方式に関する運転制御と保護の概要、さらに最近好調に運転にはいった東京電力株式会社水殿発電所の運転実績について述べる。

1. 緒 言

最近の電力需要増加は著しく、これに応ずるため建設される大容量火力発電所や原子力発電所は、全出力一定運転が望ましいので、夜間軽負荷時の余剰電力の処理と有効利用が大きな問題となってくる。

この目的から、1日中においても深夜あるいは昼休みの負荷減少時には揚水してエネルギーを蓄積し、尖(せん)頭負荷時に発電する揚水発電所の建設が盛んに進められている。系統容量の増大とともに揚水発電所主機単機容量が増大するので、その起動方式はじゅうぶん考慮すべき問題となる。

主機単機容量の小さい従来の揚水発電所では、すべて制動巻線起動方式であるが、最近の大容量機では主機の製作が比較的容易で起動時の系統擾乱が小さい同期起動方式、あるいは直結誘導電動機起動方式が採用され始めた。

本稿では、制御側からみた同期起動方式の要点と、わが国で最初に同期起動方式が採用された東京電力株式会社、水殿発電所の運転制御と保護の実例について述べる。

2. 揚水発電所制御上の問題点⁽³⁾

2.1 起動方式の選択

揚水発電所の代表的な起動方式としては、次のものがある。

- (1) 直結小水車起動方式
- (2) 制動巻線起動方式
- (3) 直結誘導電動機起動方式
- (4) 同期起動方式
- (5) (3)～(4)を組み合わせた複合方式

これらの起動方式の選択にあたっては、

- (a) 主機および主回路機器構成の信頼性と経済性
- (b) 起動時および系統並列時に、系統に与える影響

などを検討することが必要である。各方式の特徴は次のとおりである。

- (1) 直結小水車起動方式
 - (a) ポンプ水車のほかに起動用小水車を直結するので、大形かつ複雑になる。
 - (b) 直結小水車により自己起動するので、起動時、並列時に系統に与える擾乱が小さい。

(2) 制動巻線起動方式

- (a) 発電電動機は強力な制動巻線を必要とするが単機容量が大きくなるにつれ、制動巻線の寸法が巨大になるとともに、単位体積あたりの抵抗が大きい特殊金属になるので設計製作が困難になる。
- (b) 制動巻線により誘導電動機として起動するので、低減電圧起動時でも系統に与える擾乱は、主機容量の80～120%程度と大きい。
- (c) 無励磁で、すべりを有する状態から、励磁を加えて強制的に同期入れを行なうので、同期入れ時に擾乱を生じやすい。
- (d) 低減電圧から全電圧への切り換えの機会は、低減電圧解列後主機減速中1回のみである。

(3) 直結誘導電動機方式

- (a) 起動用誘導電動機が余分にいるが、発電電動機は、強力な制動巻線を必要としない普通形が使用できる。
- (b) 起動用誘導電動機により自己起動するので、起動時に系統に与える擾乱は、主機定格容量の20～30%程度で、制動巻線起動方式より小さい。

また、系統並列の際の揃速(せんそく)は、主機より同期速度を大きく選んである誘導電動機の二次側の液体抵抗器を制御して行なうので、周波数偏差をじゅうぶん小さくすることができ、発電運転時の並列と同様、系統に与える擾乱は小さい。

- (c) 自己起動できるので、同期起動のような起動用発電機を必要とせず、自流のない純揚水発電所に適用できる。

(4) 同期起動方式

- (a) 起動用の発電機、母線、断路器、励磁装置を必要とし、主回路構成は複雑になるが、発電電動機は普通形のものが使用できる。
- (b) 系統から分離した状態で、起動用発電機と揚水用電動機を電氣的に接続して、同期起動するので、起動時に系統に擾乱を与えない。また、系統並列時の揃速操作は、起動用発電機により行なわれるので並列時の擾乱は小さい。
- (c) 1台の発電機で複数台の電動機を同期起動して同時並列できる。
- (d) 大きな起動トルクを与えることができるので、起動時間を比較的短くすることができる。
- (e) 起動には、必ず起動用発電機を必要とし、自己起動はで

* 東京電力株式会社

** 日立製作所大みか工場

きない。したがって自流のある発電所に適用できる。

(5) 複 合 方 式

(3), (4)の方式を組み合わせた方式である。これまでの比較検討の結果, 大容量揚水発電所の起動方式としては, 同期起動方式または直結誘導電動機起動方式が有利であることがわかるが, 主機の台数によっては両方式を組み合わせて長所を生かした複合方式が考えられる。たとえば, 主機3台中, 1台は直結誘導電動機起動方式にしておき, 他の2台が同期起動するとき, 起動用発電機として使用し, この後で直結誘導電動機により自己起動して揚水する。

このような複合方式は, それぞれの方式の長所が生かされる場合は非常に効果的であり, 今後ますます採用されると考える。以下同期起動方式について述べる。

2.2 同期起動方式の主回路構成

2.2.1 起 動 用 母 線

起動用母線は, 起動用発電機と揚水用電動機を系統から切り離し, かつ, 電氣的に接続するもので, 主変圧器の高圧側または低圧側に設置するかにより, (1)高圧起動母線方式, (2)低圧起動母線方式がある。それぞれの主回路構成の例を示したのが図1および図2である。その特徴は次のとおりである。

(1) 高圧起動母線方式

- (a) 高圧回路の電流を小さくできるので, 主回路機器の製作は容易になる。
- (b) 主変圧器と, 起動用母線を介して発電機, 電動機が接続されるので, 主変圧器の低周波過励磁の問題と, 電機子回路インピーダンスに, 主変圧器インピーダンスが加算されたとき, 起動加速トルクは支障ないか, などの問題がある。

(2) 低圧起動母線方式

- (a) 主回路機器が屋内に設置されるため, 信頼性を上げることができる。
- (b) 低圧回路電流は大きいので, 主回路機器の製作は, 大形, 高価になりやすい。
- (c) 主変圧器は, 起動時には介入しないが, 複数台の系統並列時には, 主変圧器が並列することがあり, 故障電流が大きくなる。主回路機器の強度, 保護方式をじゅうぶん考慮しなければならない。

2.2.2 主回路の切換方式

同期起動を行なう場合の主回路の切換えおよび主機まわりの制御順序の例は図3に示すとおりである。

図3(a)主回路構成は, 主変圧器1台に対して, 発電機1台, 電動機1台の組み合わせ, 2グループである。起動母線は主変圧器の低圧側に設けられた場合である。

以下, 発電機1台で, 電動機2台を同期起動する場合の主回路機器の切換えと, 主機の操作順序の要点を説明する。

図3(b)は, 主機の起動操作により, 起動から加速中の主回路接続(実線部分は電氣的に接続される)を示したものである。

電動機直結のポンプ水車は, ドラフト水位を圧縮空気により押下げ, またスラスト軸受を押し上げて, 静止摩擦トルクを軽減

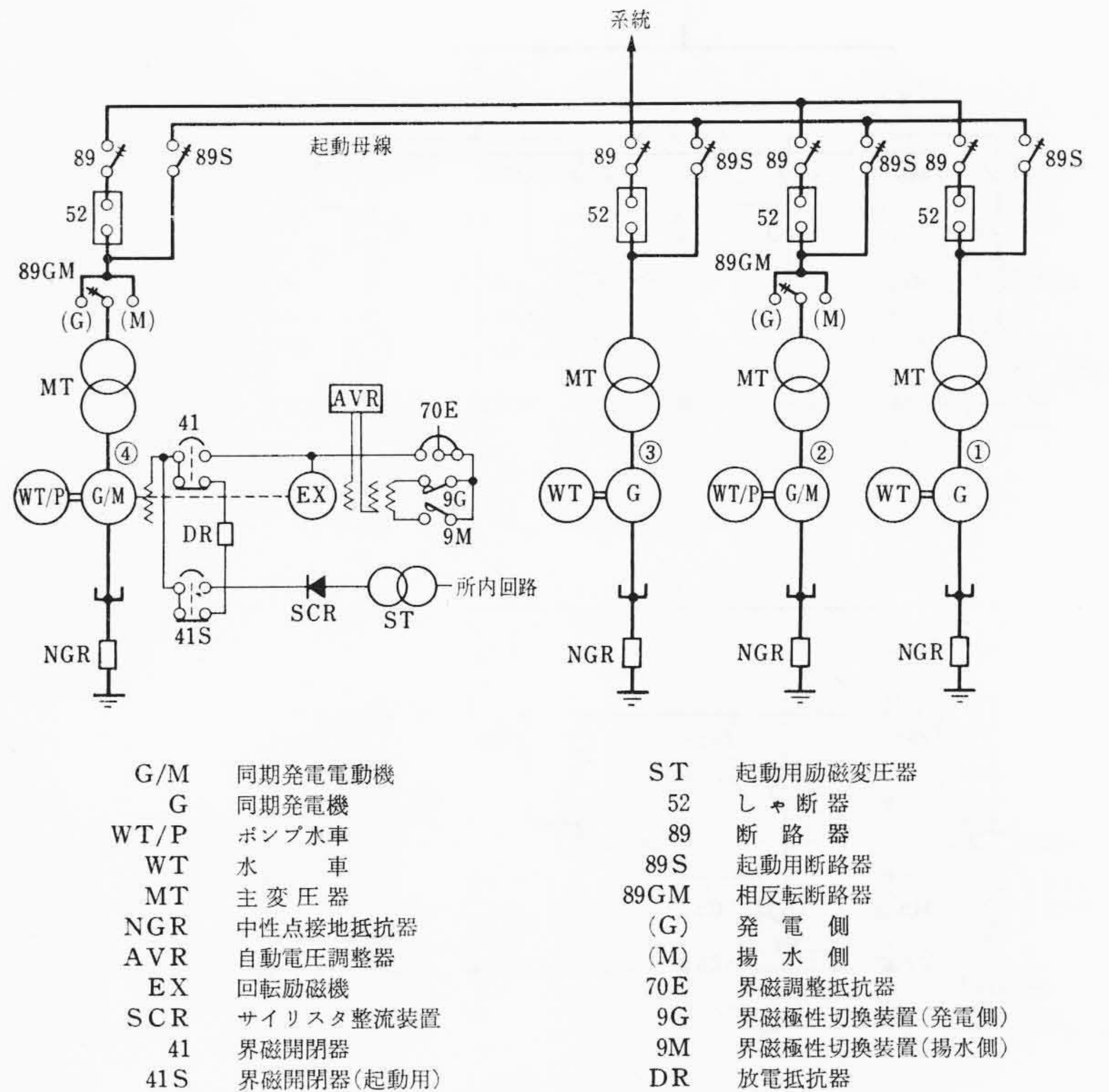


図1 単線接続図(高圧起動母線方式)

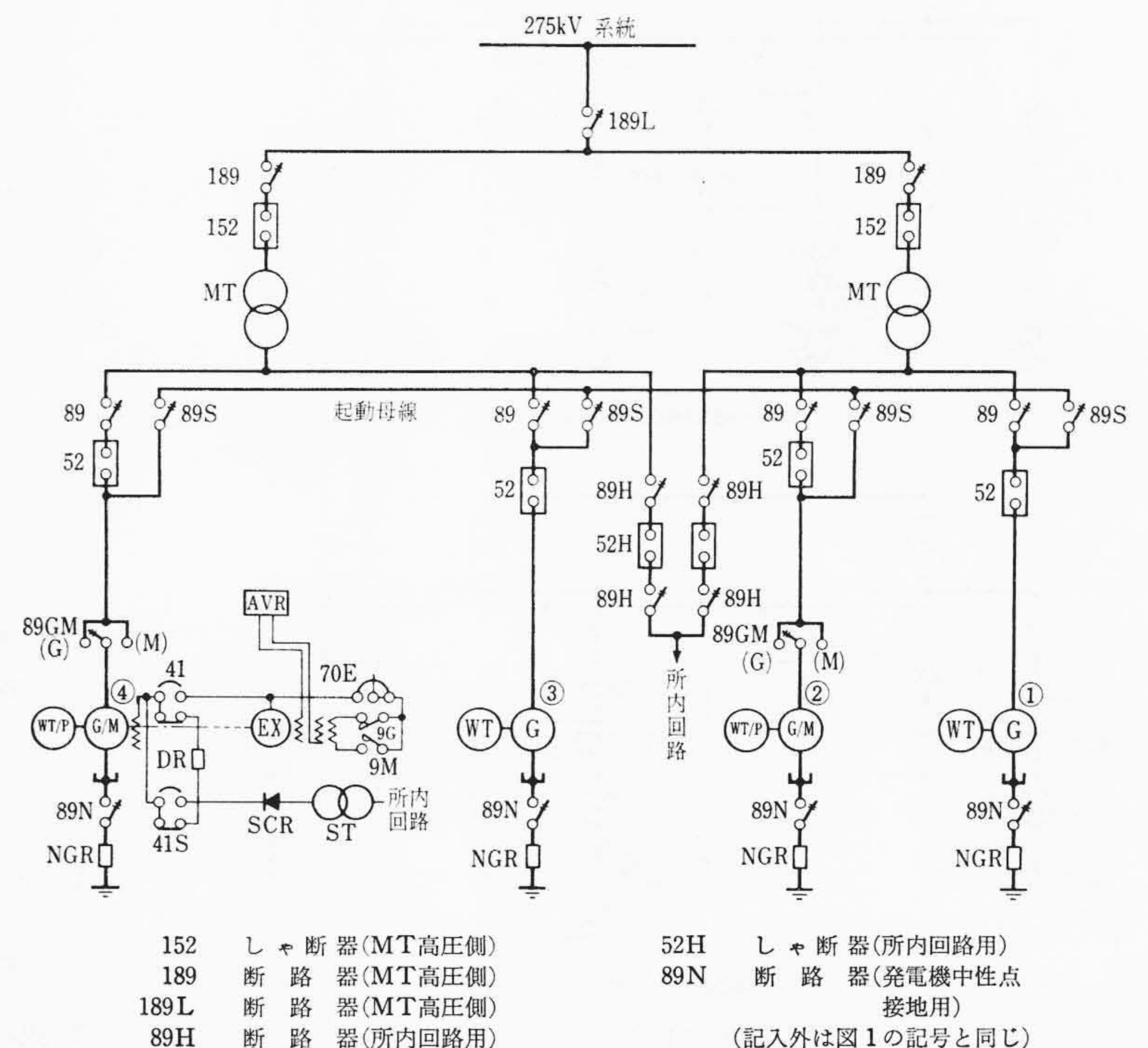
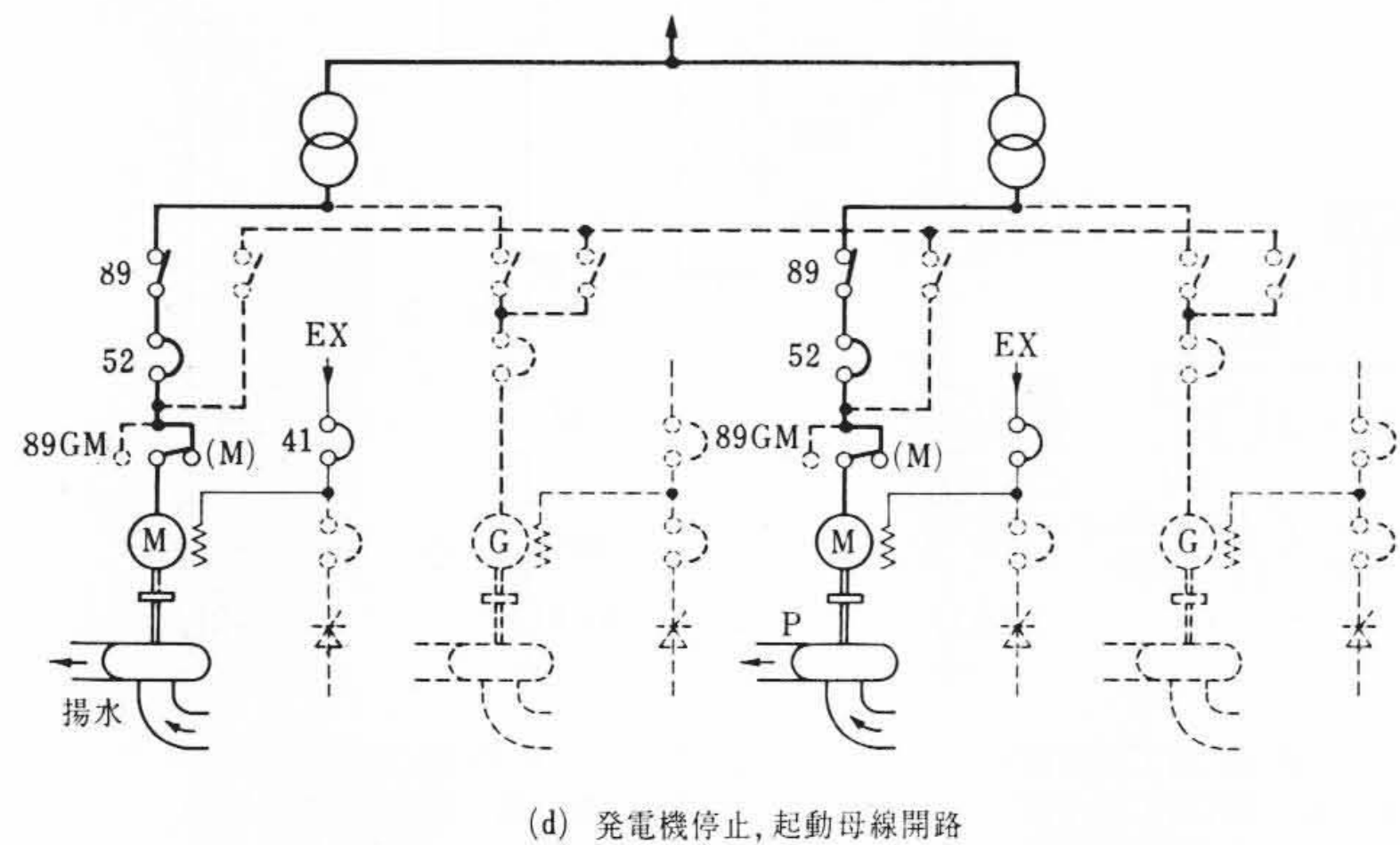
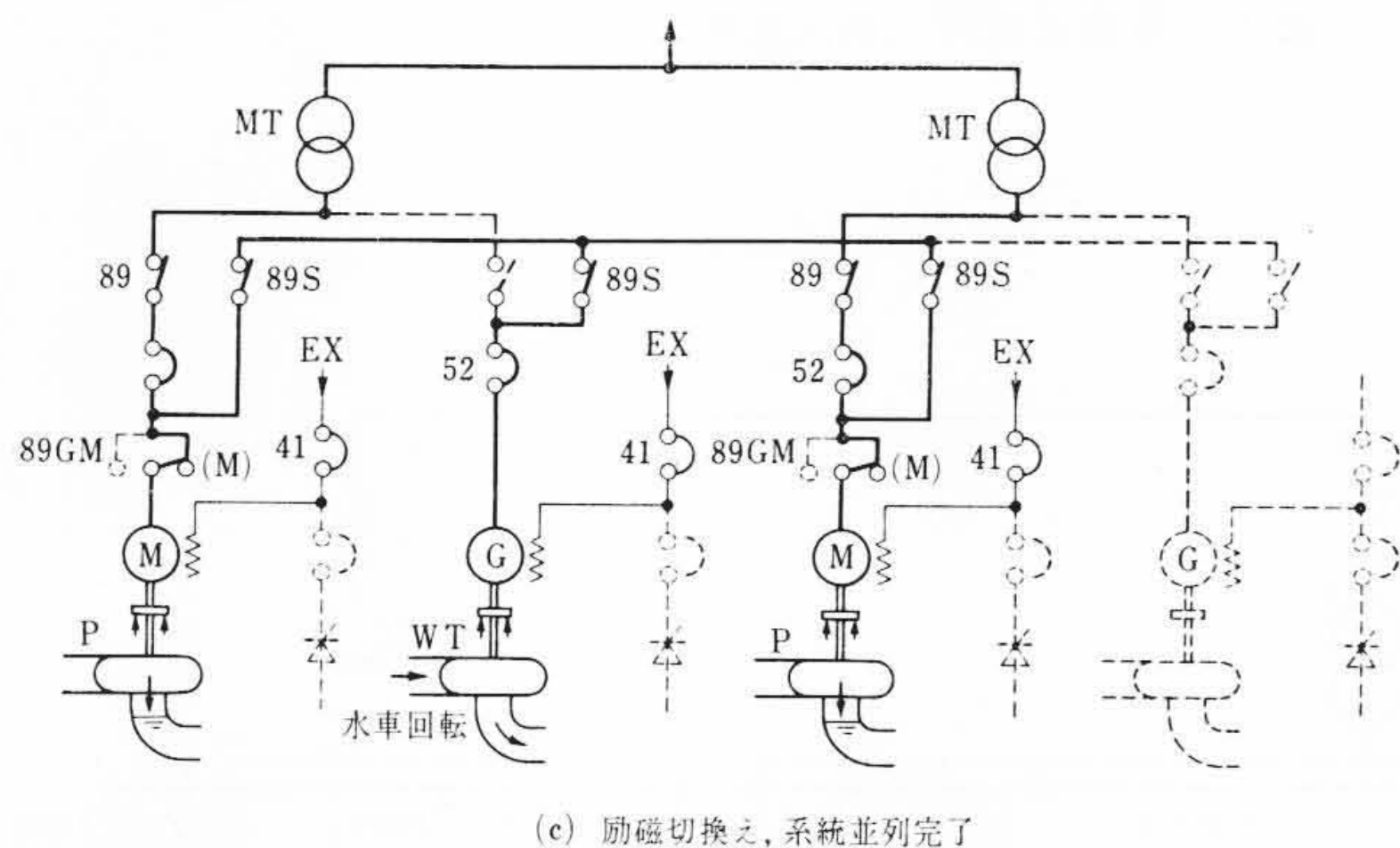
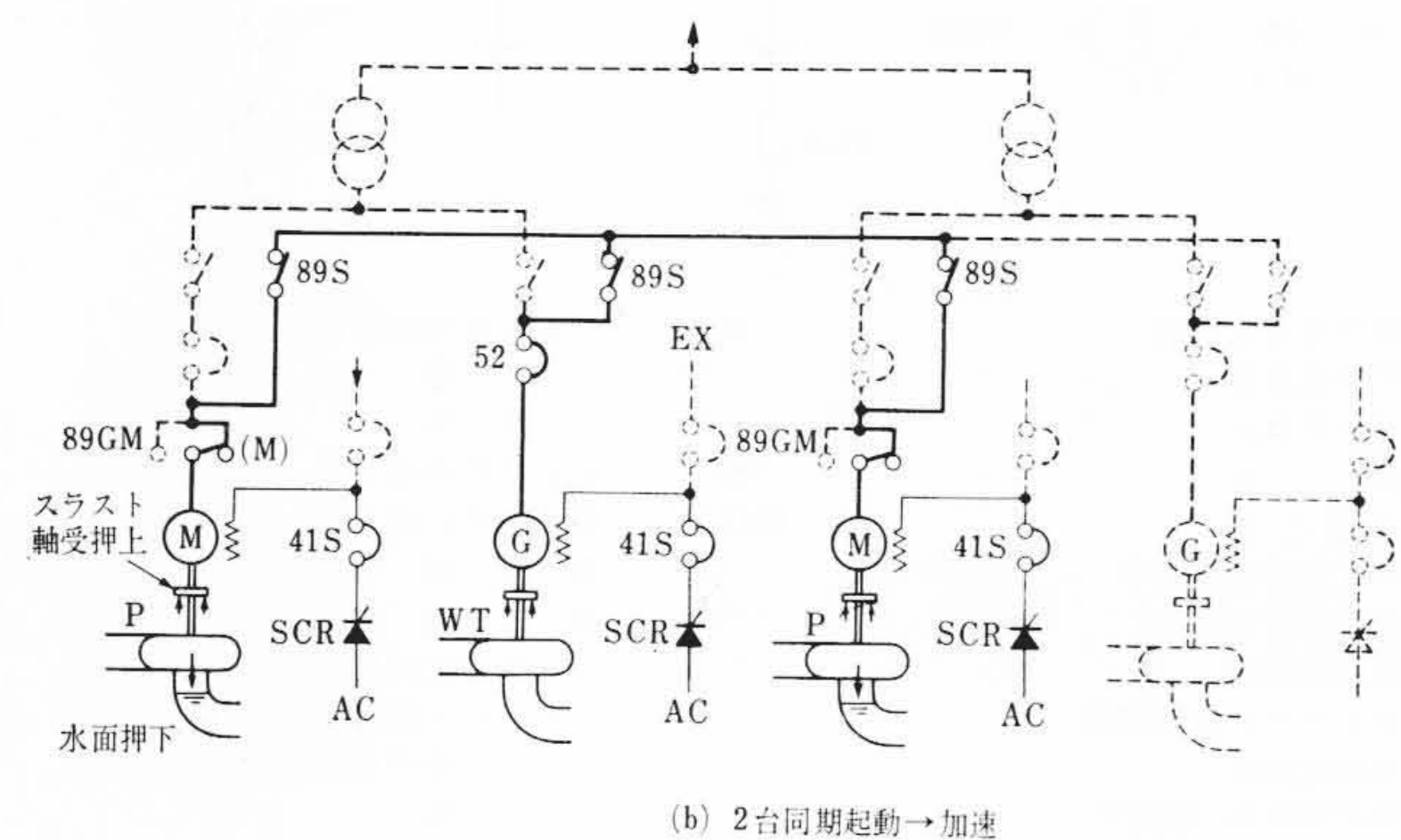
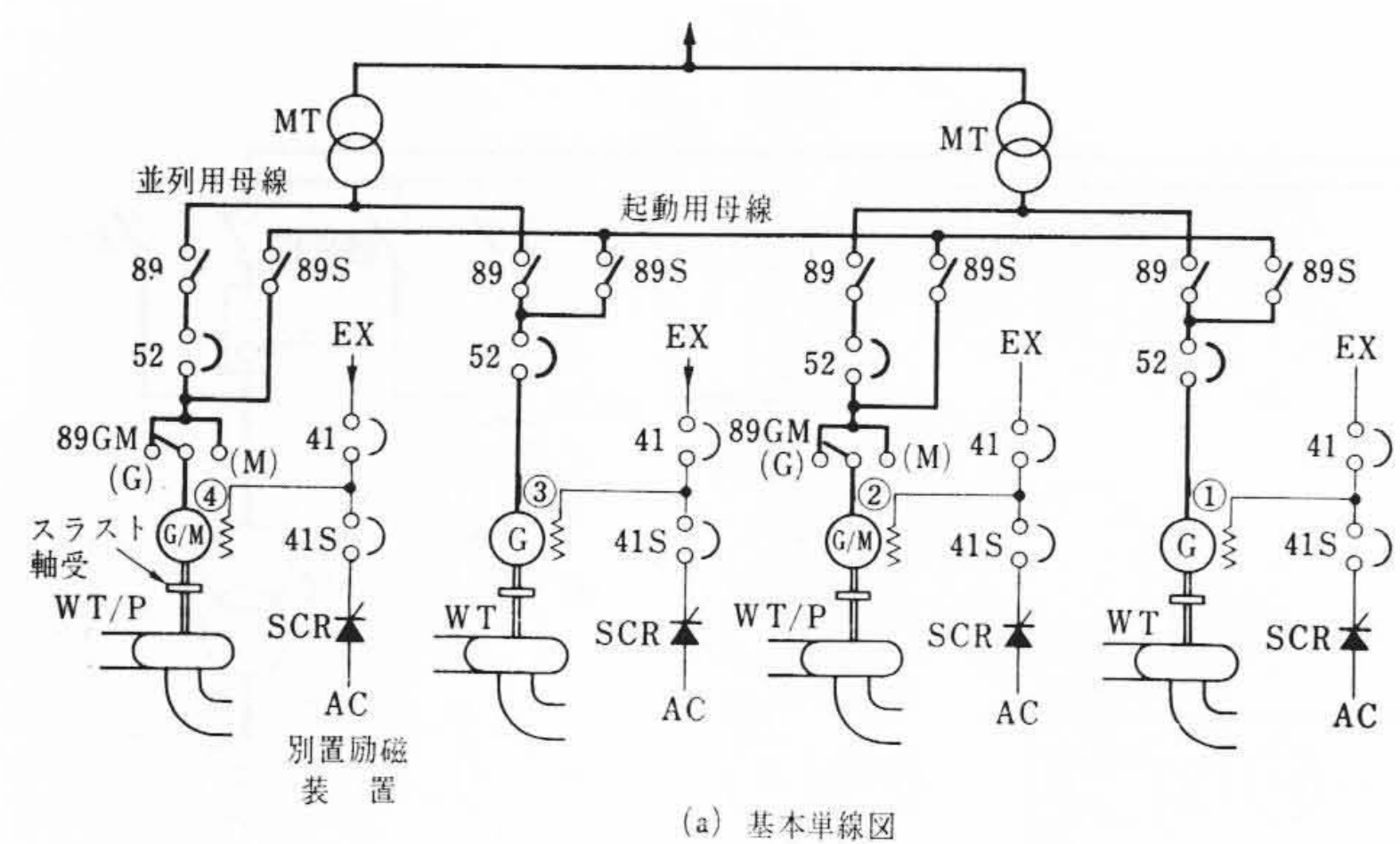


図2 単線接続図(低圧起動母線方式)

する。

このあと, 発電機と電動機に適当な励磁を与えて水車発電機を起動すれば, ほとんど停止の状態から電動機は同期を保って, 起動, 加速する。

図3(c)は, 発電機により電動機を系統並列した直後の主回路接続を示している。励磁回路は, 定格速度付近で別置の静止形励磁装置から, 主機直結の励磁機へ切り換えられる。また, 起動用



(記号は図1と同じ)

図3 主回路切換制御

発電機は自動同期並列操作により電動機を系統並列する。

図3(d)は、電動機の系統並列後、発電機が普通停止し、しゃ断器と、起動用断路器を開路したあとの主回路接続を示している。このあと、ポンプ水車は、水面押下げ操作を解除して、ドラフト充水後、案内羽根を開いて揚水を開始する。

2.3 励磁比の決定

じゅうぶんな電気トルクを発生させて、確実に同期起動させるためには発電機と電動機の励磁比を適正にしなければならない。励磁

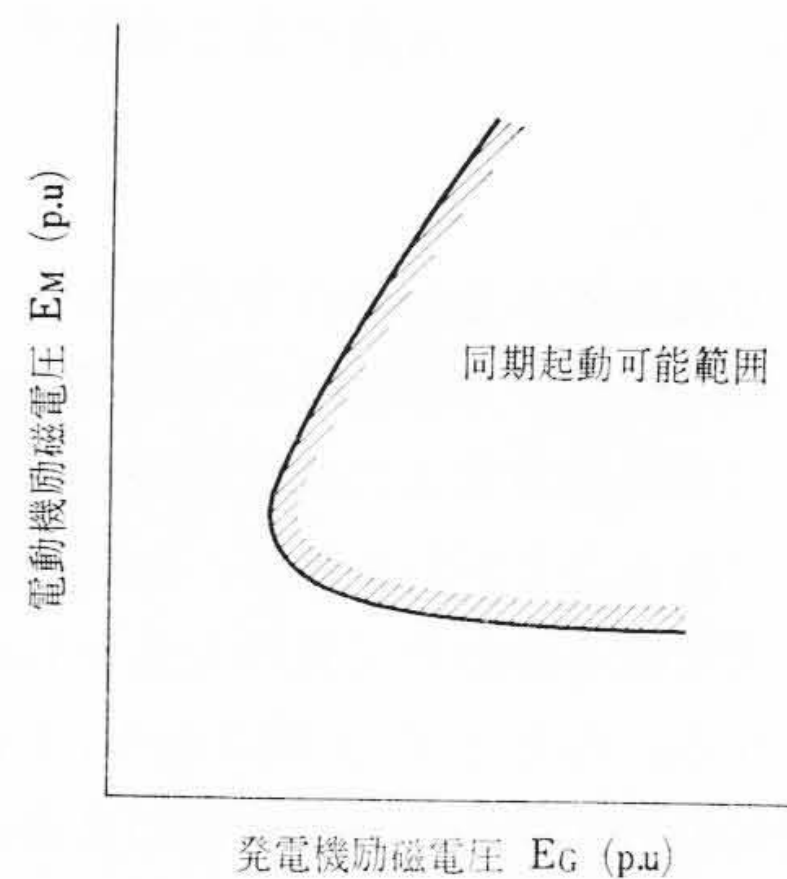


図4 同期起動可能範囲

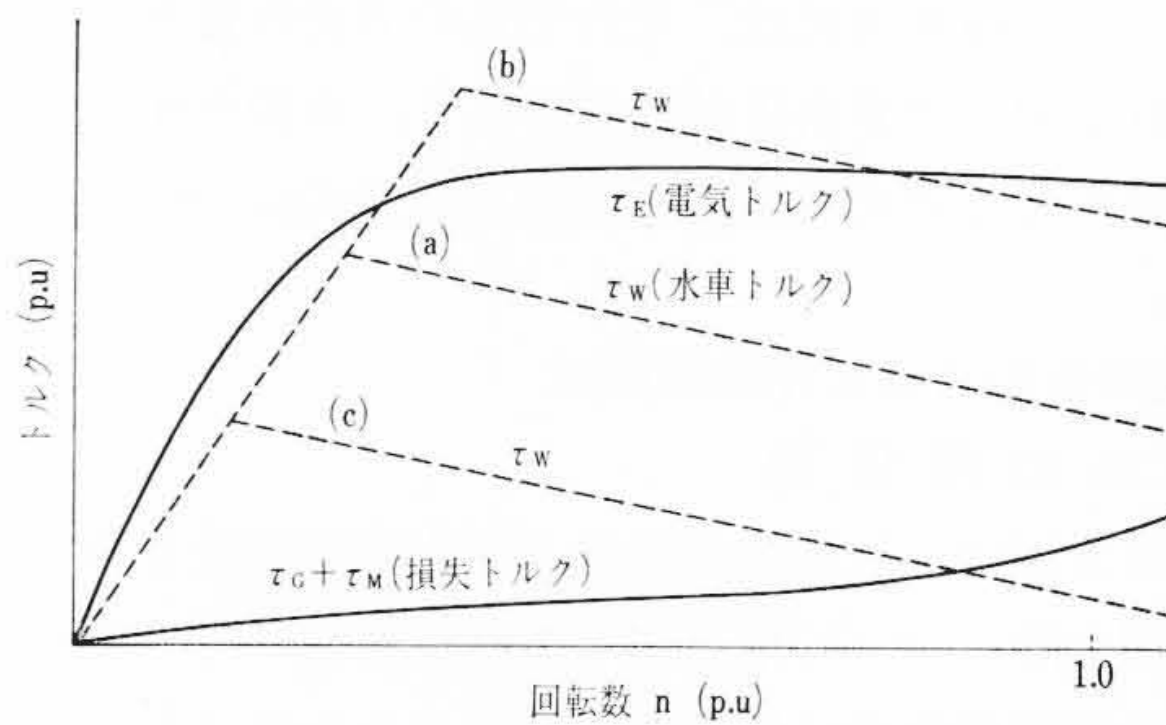


図5 水車トルクと電気トルク

電圧を E_G 、 E_M とすれば、発電機から電動機に伝達しうる最大電気トルク τ_E は、(1)式で表わされる⁽¹⁾。

$$\tau_E = \frac{E_G E_M \chi_q \sin \delta + E_G E_M \left(\frac{r}{n} \right) \cos \delta - E_G^2 \left(\frac{r}{n} \right) + \frac{1}{2} E_G^2 (\chi_d - \chi_q) \sin 2\delta}{\chi_d \chi_q + \left(\frac{r}{n} \right)^2} \dots (1)$$

ただし、 E_G ： 発電機の励磁電圧 (p.u.)

E_M ： 電動機の励磁電圧 (p.u.)

$$\chi_q = \chi_{qG} + \chi_{qM}$$

χ_{qG} ： 発電機の横軸リアクタンス (p.u.)

χ_{qM} ： 電動機の横軸リアクタンス (p.u.)

$$\chi_d = \chi_{dG} + \chi_{dM}$$

χ_{dG} ： 発電機の直軸リアクタンス (p.u.)

χ_{dM} ： 電動機の直軸リアクタンス (p.u.)

δ ： 発電機と電動機の内部位相差角 (rad)

n ： 回転数 (p.u.)

r ： 電機子回路抵抗 (p.u.)

(1)式は、起動初期には、 n が小さいので次式に変形できる。

$$\tau_E' = \frac{n}{r} E_G E_M \left(\cos \delta - \frac{E_G}{E_M} \right) \dots (2)$$

(2)式について、 τ_E' 、 n 、 r を定数と仮定すれば、 E_G と E_M の関係は、図4に示すような二次曲線で表わされるので、 E_G 、 E_M の整定範囲を求めることができる。予備計算で整定範囲を求めたあと、さらに、界磁巻線の温度変化、落差の変動範囲、別置の静止励磁装置の電圧変動なども考慮して、安定した起動ができる値に整定する。

2.4 案内羽根開度と開口速度

水車トルクを損失トルクより大きくし、かつ最大電気トルクよりも小さくしておいて、起動用水車の案内羽根開度と、開口速度を適正にしなければならない。すなわち、

$$\tau_E \div \tau_E' > \tau_W \dots (3)$$

図5の点線(a)は、水車の案内羽根開度と開口速度を適正に設定

保護方式	保護目的	デバイスNo.	使用範囲		備考
			揚水運転	発電運転	
非常停止	脱調	56	0	50Hz	
	界磁喪失	40		47Hz	並列前はロックされている。
	内部短絡(比率差動)	87			
	内部地絡(比率差動)	87G			
	地絡	51N			
	過電流	51			
	過電流	51P			
	過電圧	59		40Hz	

図6 保護継電器の使用周波数範囲

したトルク曲線の例で、水車トルク τ_w は、常に最大電気トルク τ_E より小さく、同期が保たれる。また、損失トルク ($\tau_G + \tau_M$) より大きいので規定速度まで加速することができる。

図5点線(b)は、水車トルク τ_w が最大電気トルク τ_E より大きい場合で、同期が保てなくなり脱調する。脱調後は、発電機のみ加速されて電動機は加速されない。この場合は、図5点線(a)のように、水車トルク τ_w を小さくする必要がある。

図5点線(c)は、規定回転付近で水車トルク τ_w が損失トルク ($\tau_G + \tau_M$) より小さくなり、 τ_w と $\tau_G + \tau_M$ が交叉(さ)する。水車トルク不足のため、発電機、電動機ともに規定速度まで加速することはできない。この場合は図5点線(a)のように案内羽根を開いて水車トルク τ_w を大きくする必要がある。

2.5 保護方式

起動から定格速度になるまでの加速期間は、回転速度に比例した低周波になる。保護方式の特徴は、規定速度のみならず、低周波時の異常現象をも保護することである。

(1) 保護継電器

一般に使用されている保護継電器の使用周波数範囲を示すと図6のようになる。界磁喪失(40)、内部短絡(87)、内部地絡(87G)、過電流(51)、過電圧(59)などの継電器は、30 Hz 以下では保護機能が低下する。このため、低周波時の保護には、低周波特性の良いトランジスタ形、またはプランジャ形の過電流継電器(51P)を設ける必要がある。さらに起動直後の脱調保護として、発電機と電動機の位相角を検出する脱調検出装置(56)を設ける必要がある。

(2) しゃ断器

一般に用いる空気しゃ断器は、固有の特性上、低周波ではしゃ断はできない。このため低周波では、保護継電器が動作しても、直ちに発電機回路しゃ断器を開路しないで、まず、界磁開閉器を開路し、発電機電圧がじゅうぶん低下してから、しゃ断器を開路する。

(3) 脱調検出装置

同期加速中の脱調のおもな原因には、次の事項が考えられる。

- (a) 水車発電機の水車トルク過大
- (b) 電動機の損失トルク過大
- (c) 励磁電圧不適當

ここで(a)、(b)は、図5の点線(b)と(c)にあてはまり、(c)は、図4の同期可能範囲外のケースにあてはまる。

脱調検出装置は、定格速度の1~2%以上の回転で、発電機と電動機の電気位相角約180度以上を検出するものである。

低速度では、PT、CTと組み合わせた継電器は適用できないので、機械的な位相を検出する脱調検出装置を設置する必要がある。詳細は、3.2で説明する。



図7 主配電盤

(4) 渋滞保護

同期起動方式では、発電機と電動機が、常に歩調を合わせて制御を進める必要がある。1台がなんらかの故障で進行が停止すると、他機に支障を与えることがある。

渋滞保護は、シーケンスを数段階に区分して、発電機と電動機のシーケンスの不一致が、ある程度を越すと渋滞を検出して保護するものである。おもな保護項目は、次のとおりである。

(a) 起動前、界磁巻線の通電時間過大保護

起動前に長時間界磁巻線に通電すると、熱不平衡により不具合を生ずるので、起動渋滞による長時間通電を防止する。

(b) ブレーキ除外渋滞保護

漏水による逆転を防ぐために、停止中ブレーキをかけておき、案内羽根を徐々に開いて水車トルクが発生したのち、ブレーキを除外する。万一、ブレーキがはずれないと危険なので、ブレーキ除外渋滞を検出して、ブレーキ破損を防止する。漏水量を増加して実施した現地試験結果では、漏水による逆転はそれ程問題にならなかった。

(c) 揚水開始渋滞保護

長時間ランナを空転すると、熱不平衡による不具合を生じることがあるので、不必要な空転を防止する。

3. 水殿発電所の運転実績

3.1 主要機器の概要

水殿発電所は、梓川水系の集中制御所である安曇制御所から遠方制御される無人揚水発電所である。主回路構成は、図2に示すように、起動方式には主回路機器の信頼性を上げるため、低圧起動母線による同期起動方式を採用している。

また、発電所の主配電盤は、図7に示すように、操作は直立盤で行なわれるよう、簡素化されている。

主要機器の仕様⁽²⁾は次のとおりである。

発電電動機	出力	65 MVA/63 MW	電圧	11/10 kV
	力率	0.95/1.0 P.F	周波数	50 Hz
ポンプ水車	出力	64 MW	回転数	150 rpm
	最大揚水量	90 m ³ /S		
しゃ断器	定格電流	4,000 A	定格電圧	12 kV
	しゃ断容量	1,500 MVA	しゃ断電流	76 kA
	短時間電流	120 kA		
母線および断路器CT	定格電流	4,000 A	短時間電流	120 kA
	定格電流	5,000/5 A	負担	40 V A
	過電流強度	40 倍		

制御方式は、図3のとおりで前章において説明されているので、ここでは省略する。

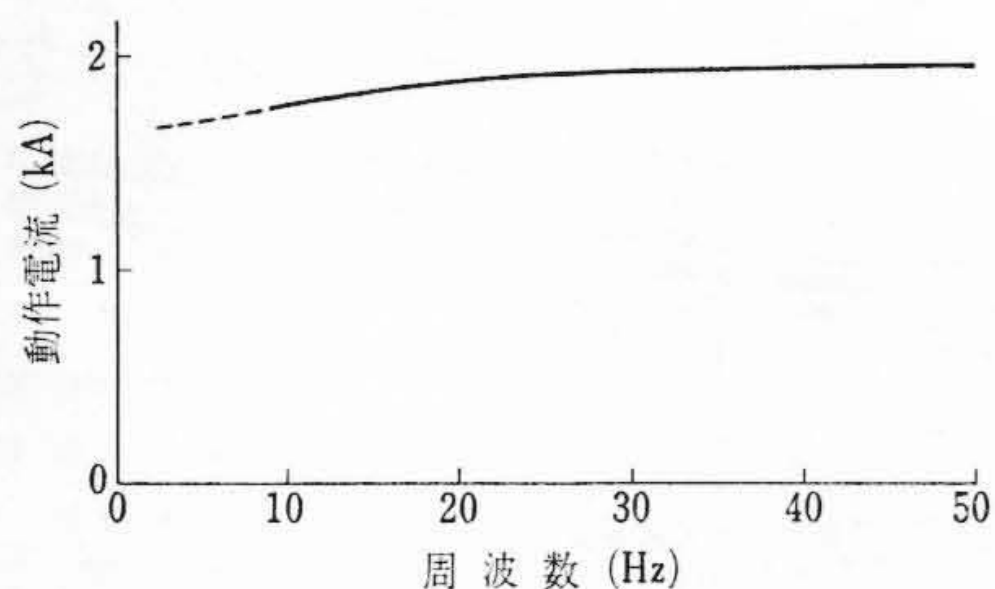


図8 過電流継電器の周波数特性

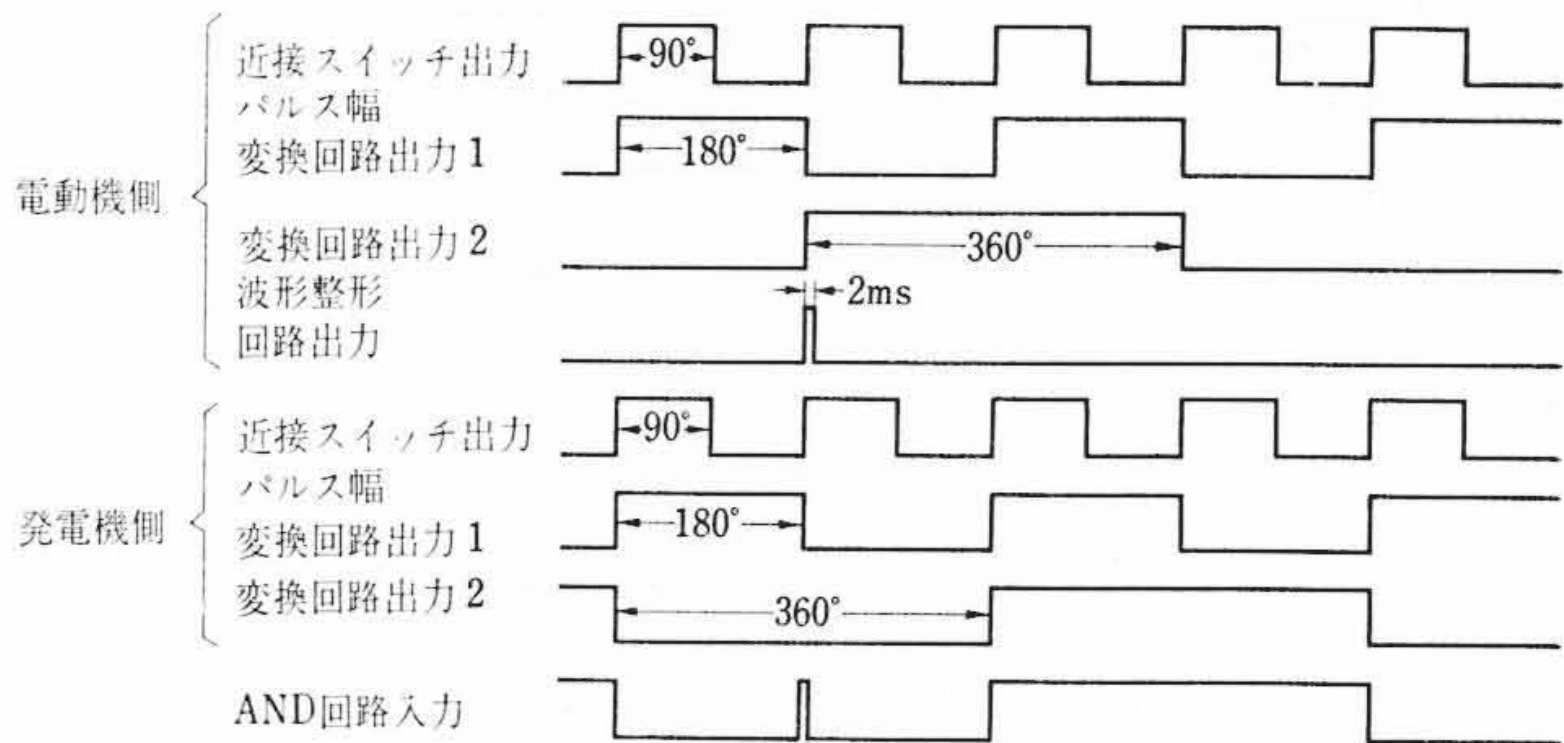


図10 脱調検出装置タイムチャート

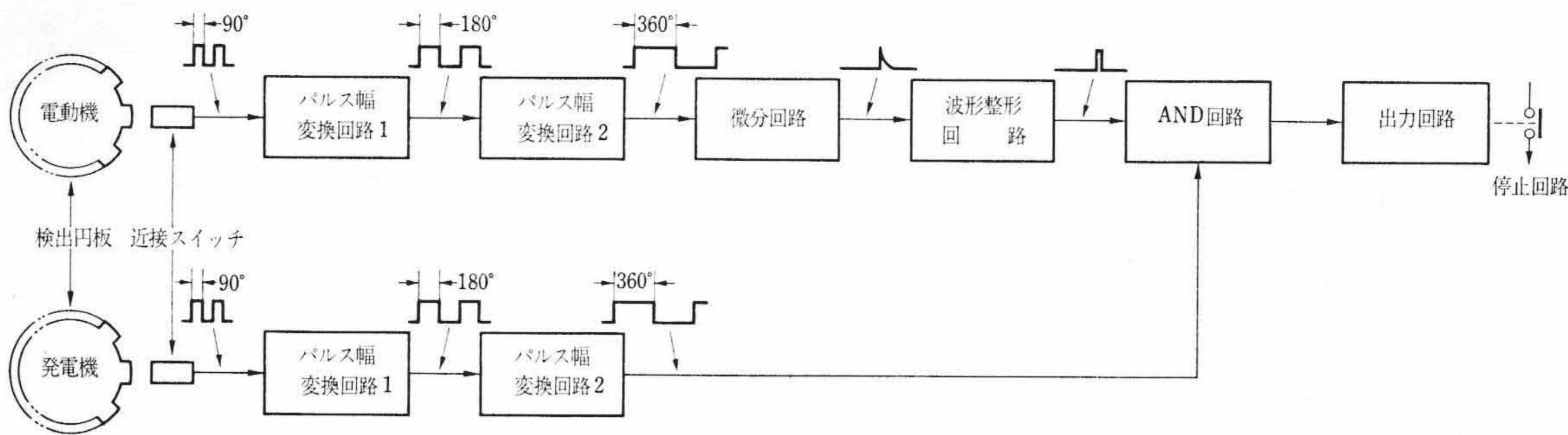


図9 脱調検出装置ブロック図

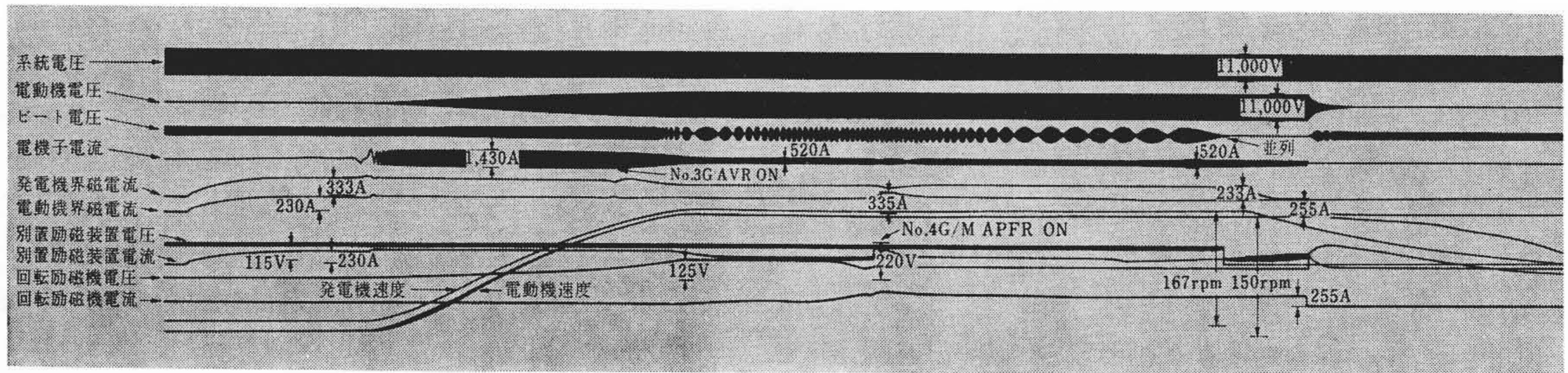


図11 発電機1台，電動機1台，同期起動オシログラム（空中起動）

3.2 保護装置

(1) 保護継電器

低速時の短絡事故を検出する過電流継電器の，周波数特性は，図8に示すとおりである。周波数15Hz以下でも良好な特性であることを確認した。

(2) 脱調検出装置

脱調検出装置の構成および動作原理を示したのが図9のブロック図である。

発電機と電動機の主軸に，主機の磁極数と同じ歯を有する金属円板を取り付け，固定子側には近接スイッチを設けてパルスが発生させる。近接スイッチから得られるパルスは，電気角で磁極中心に90度のパルスであるが，パルス幅変換回路1，2により，360度の幅に変換される。電動機側は，微分，波形整形回路を経て，磁極中心の2msの方形波パルスが得られる。発電機側の360度幅パルスと，電動機側2ms幅パルスを，AND回路に与えて同期と脱調を判別することができる。

図10は，同期加速中の脱調検出装置各部のタイムチャートを示している。

3.3 試験結果

(1) 発電機1台，電動機1台同期起動試験

発電機1台，電動機1台の同期起動時のオシログラムを，図11に示す。起動から定格速度までの加速時間は，約1分であった。

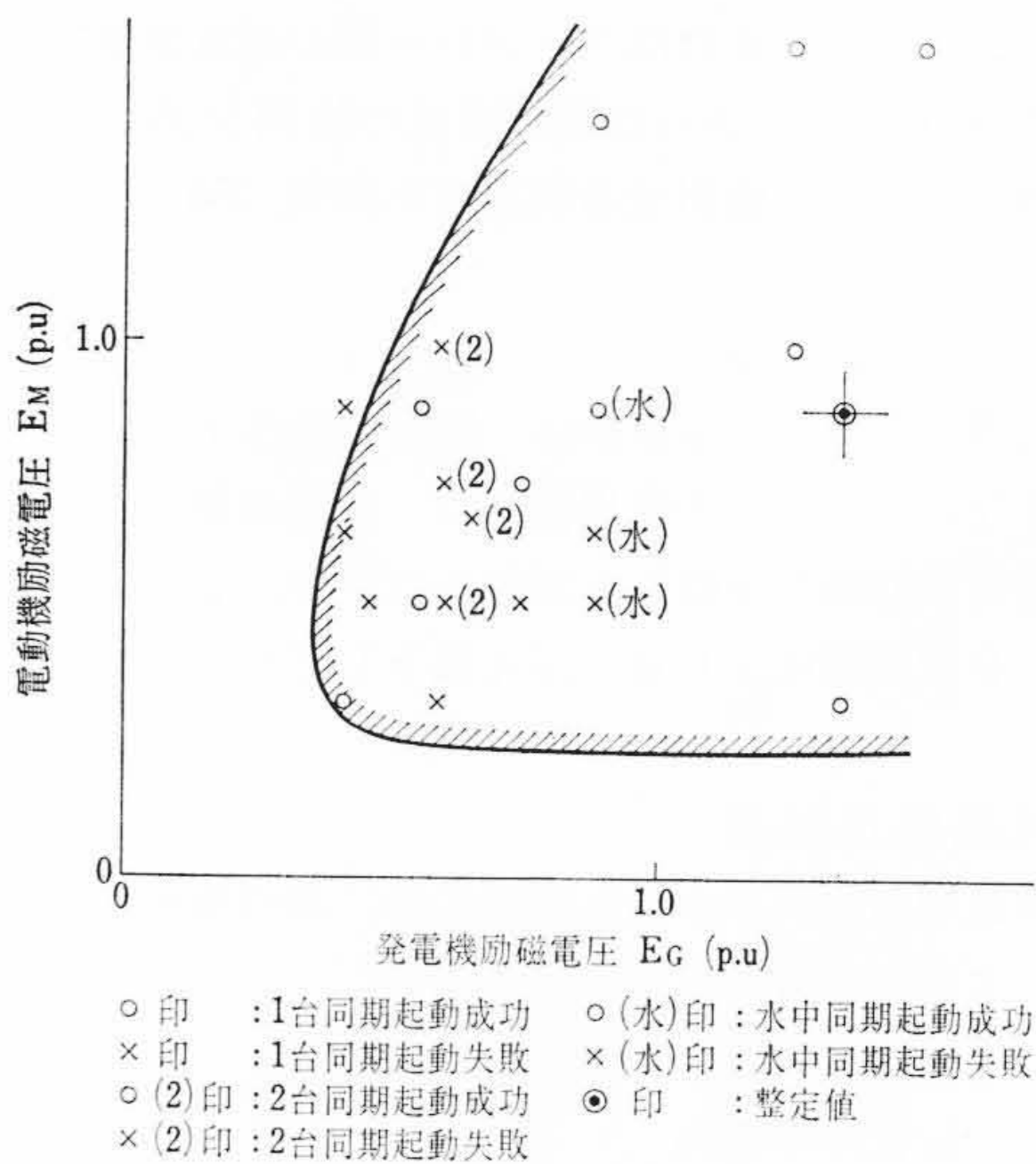


図12 同期起動可能範囲（実測値）

(a) 最適励磁比の試験結果は，図12に示すとおりであり，
 発電機励磁電圧 $E_G=1.35$ (p.u)
 電動機励磁電圧 $E_M=0.86$ (p.u)
 に整定されている。

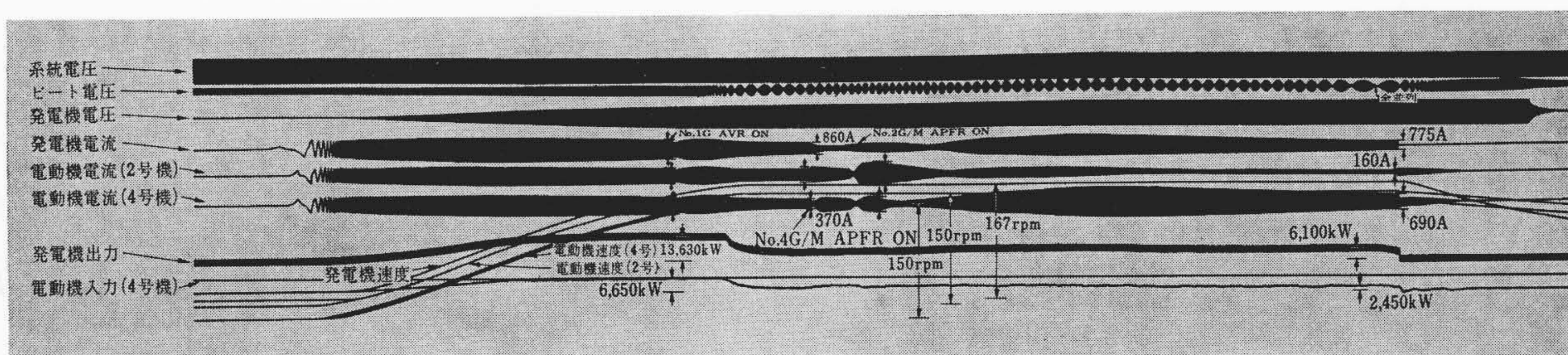


図13 発電機1台、電動機2台、同期起動オシログラム(空中起動)

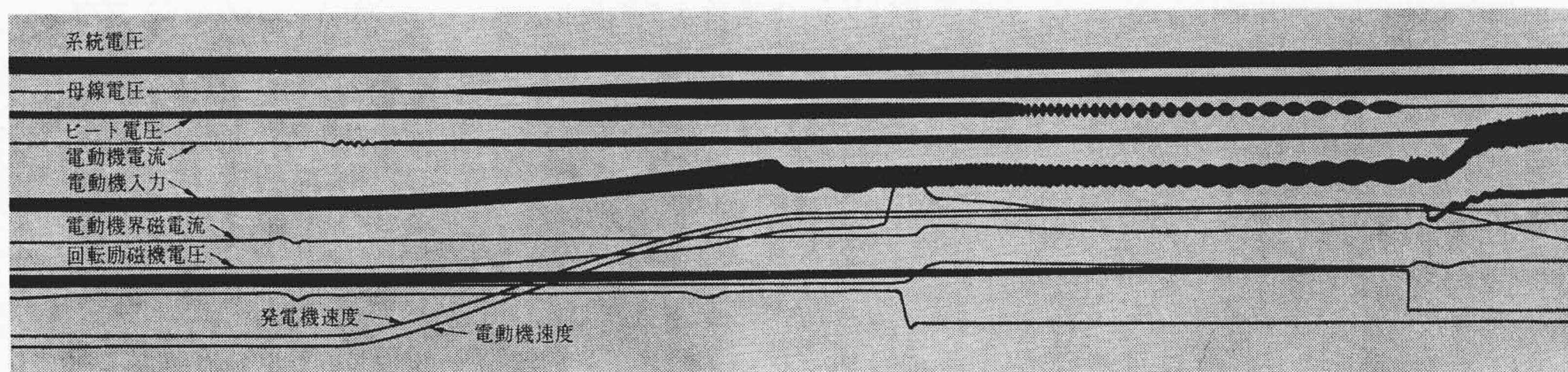


図14 発電機1台、電動機1台、同期起動オシログラム(水中起動)

- (b) 水車案内羽根開度と、開口速度は、電動機2台同期起動を考慮して

水車案内羽根開口速度 0.56%/s

最終水車案内羽根開度 35%

に整定してある。

- (2) 発電機1台、電動機2台同期起動

発電機1台と、電動機2台の同期起動でも、上記と同じ整定で起動できることを確認した。同期起動時のオシログラムは図13に示すとおりである。

- (3) 水中起動

一般に揚水起動は、損失トルクを小さくするために、水車ドラフト水面を押下げ、ランナ空転の状態にして起動させるが、この水中起動試験では、ドラフト、ケーシングに充水したまま起動させた。図14は起動時のオシログラムである。

- (a) 空中起動と比較するために、励磁比と水車案内羽根開口速度は変えていない。しかし、水車の損失トルクを考慮して、最終水車案内羽根開度は、空中起動時の35%に対して、55%と大きく整定した。
- (b) 試験結果は、起動から定格速度までの加速時間は、約1分40秒で、空中起動時に比べて約1.7倍かかるが、じゅうぶんに水中起動可能であることがわかった。

この試験結果から、将来、制御方式をあまり変更することなく、水中起動の同期起動を採用することの見通しを得た。

4. 結 言

東京電力株式会社水殿発電所の制御方式については、計画に先だち、東京電力株式会社と共同研究を行ない、じゅうぶんに検討した。

試験運転結果は、きわめて良好であり、実測結果が計算結果と、かなり良く一致することが確認された。要約すると

次のとおりである。

- (1) 起動時に、系統に与える擾乱はなく、また、系統並列時の擾乱はきわめて小さい。
- (2) 起動時間が短く、約1分である。
- (3) 1台の発電機で2台の電動機を同期起動加速し、かつ、同期並列ができる。
- (4) 同期起動方式の採用にあたって、次のことをじゅうぶん検討しなければならない。
 - (a) 起動母線と主回路機器の構成
 - (b) 最適励磁比
 - (c) 案内羽根開度と開口速度
 - (d) 保護方式

この経験、実績が今後の大容量揚水発電所の計画、設計に寄与することができれば幸いである。

終わりに、これまでの研究、開発、試験に絶大なるご協力をいただいた東京電力株式会社はじめ、関係者各位に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 庄山：日立評論 49, 677 (昭42-6)
- (2) 小俣ほか：オーム (昭44-6)
- (3) 小松、平野：電気評論 (昭45-6)