

揚水発電所の制御方式

Controlling System for Pumping-up Stations

齋藤 武*
Takeshi Saitō

内 容 梗 概

今後の水力電源開発の焦点の一つとなる揚水発電所は機動性の高い運転が第一の条件とされ、その制御は安全確実な自動方式とし制御時間の短縮に重点がおかれる。ポンプ別置式では水車によりポンプ起動を行うから制御上の問題点は少ないが、ポンプ水車式では発電電動機によりポンプ起動を行うので、ここに種々検討すべき特異点が多い。本文では主としてポンプ水車起動にともなう諸問題について述べる。

1. 緒 言

揚水発電所の重要性についてはいまさらうんぬんするまでもないが、揚水発電の経済性をより高めるため最近日間調整を主とするものが多くなっている。したがってその制御方式は機動性の高い運転が第一の条件であり、起動停止が随時短時間で確実にできるものとしなければならない。このためポンプ別置式あるいは可逆ポンプ水車式のいずれも制御方式は操作の簡単な一人制御とし、安全確実な自動方式を採用して、制御時間の短縮のための種々のくふうを払うことが必要である。

ポンプ別置式では水車によりポンプ起動を行うので、ポンプ着脱方式に特異性がみられるほかは、制御上とくに問題となる点は少ない。ポンプ水車式も最近の技術の進歩により、ポンプまたは水車のいずれの場合も高い効率で運転可能となり、容量も増大の一途をたどっているが、この方式では発電電動機によりポンプ起動を行うので起動に伴う諸問題を十分検討し、とくに系統に及ぼす影響を考慮してじん速確実な起動方式とする必要がある。以下主としてポンプ水車式の起動について述べ、またポンプ別置式の最近の傾向について簡単にふれることにする。

2. ポンプ水車式の制御

揚水運転のときは発電機を電動機として起動するが、容量に応じて起動およびポンプ充水時の系統に及ぼす影響、円滑確実な同期引き入れなどについて十分検討しておく必要がある。そのほか逆転のため主回路相順および副励磁機極性の切換えが必要であり、また起動トルクの軽減も重要である。

2.1 主回路切換え

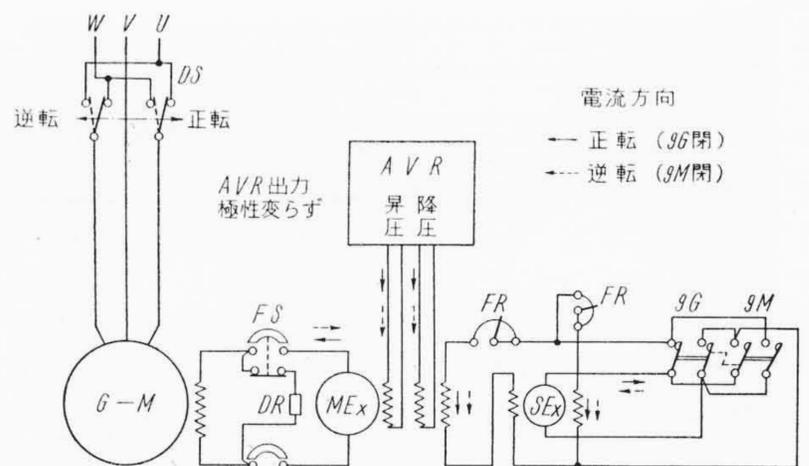
第1図に示すとおり発電電動機主回路に二極または三極双投断路器を設け起動に先立ち相順を切換える。また副励磁機は逆転によって残留磁気が消失しないよう極性を切換える。これらはすべて遠方制御とし発電機が停止していることを条件として操作する。

2.2 起動トルクの軽減

起動時は起動 kVA を減らし系統および電動機に与える負担を軽くするため起動トルクの軽減を図る必要がある。一般にポンプケーシング内の水面押下げ、スラスト軸受への高圧油送込が多く用いられる。特殊なものとして電磁石によりロータをつり上げる方法もあるが、構造および制御の面で複雑となる。いずれも主機シーケンスと関連して自動的に操作される。

2.3 電動機起動

大別して同期電動機式と誘導電動機式に分けられるが、前者は設備、運営上の制約があり実例は少ないのでここでは後者について述



第1図 発電電動機極性切換接続図

べる。

(1) 起 動

回転子磁極に設けられた強大な制動巻線によって起動する。起動突入電流はほぼ次過渡リアクタンスにより制限されるが、全電圧を印加すればその起動 kVA は定格の3~6倍程度に達し、電動機にとっても系統に対しても大きな影響を与えるので、できるだけ低電圧で起動することが望ましい。一方起動トルクはほぼ電圧の二乗に比例して減少するので、この電圧値の選定といかにしてこれをうるかが問題となる。設備の簡素化および所要起動トルクの点から主変圧器低圧△巻線の間中タップから低減電圧をとり出し、起動 kVA を定格以下とするのが適当である。この場合低圧巻線のアンペアターンのバランスの関係で50%電圧(60°移相となる)とするのが普通である。系統電圧の変動が大きく電動機起動トルクにも余裕が少ないときには、変圧器高圧側に負荷時調整タップを設ける必要がある。

また起動のとき界磁巻線を開放しておくとも高電圧を誘起して危険なので、適当な放電抵抗で短絡しておく必要がある。

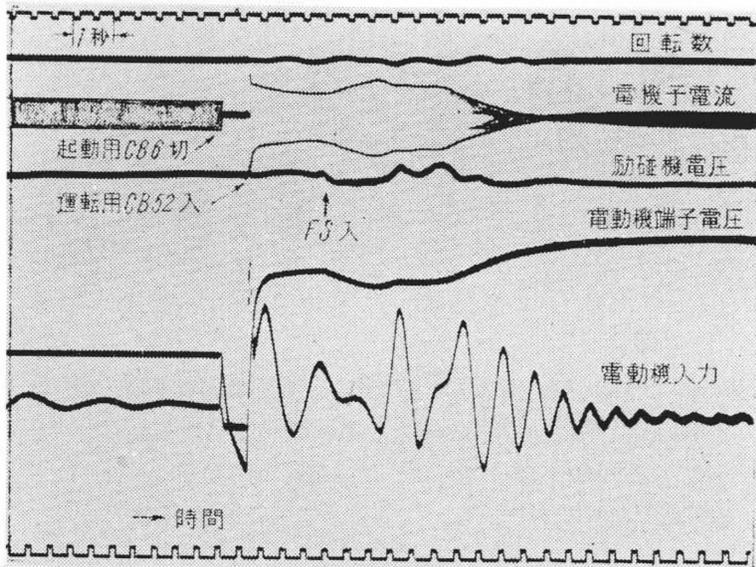
起動時に界磁巻線に流れる電流は大略次式で表わされる⁽¹⁾。

$$I_{fm} = 1.5 I_s \cdot \frac{N_s K_w}{N_f} \cdot \frac{Z_d}{Z_f} \dots \dots \dots (1)$$

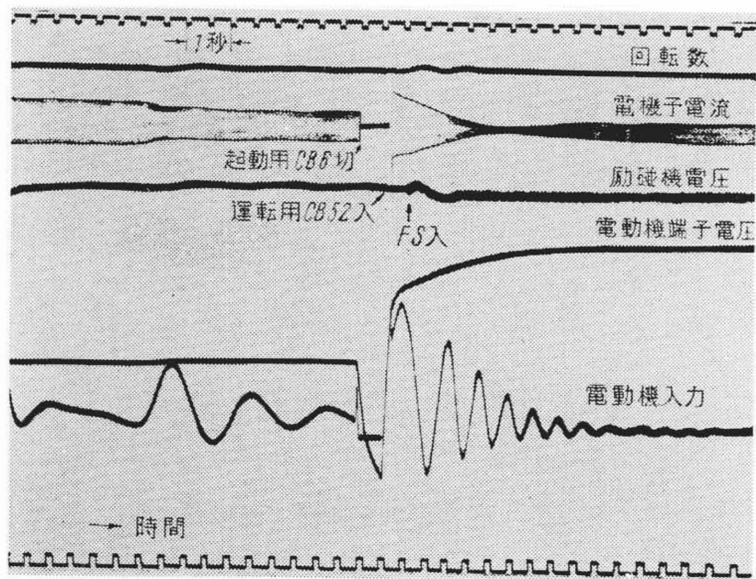
- ただし I_s : 電機子電流
- N_s : 電機子一相の巻数
- K_w : 電機子巻線係数
- N_f : 界磁総巻数
- Z_d : 制動巻線と界磁巻線との合成直軸インピーダンス
- Z_f : 界磁巻線の漏えいインピーダンス

この界磁電流 I_{fm} は界磁巻線のリアクタンスが大きいので、放電抵抗によってはあまり変わらない。また界磁巻線は一種の単相二

* 日立製作所国分工場



第2図 発電電動機同期引き入れ時のオシログラム (逆位相励磁の場合)



第3図 発電電動機同期引き入れ時のオシログラム

次巻線であるから50%速度までは正の起動トルクが発生し、放電抵抗の大きいほどそのトルクも大きくなるが⁽²⁾、制動巻線によるトルクと比較して小さいので抵抗値 R_d は主として界磁巻線の異常電圧をおさえるために決められる。一方運転中に界磁開閉器を開路したときに界磁巻線に誘起される最大電圧は、励磁電圧×放電抵抗 R_d /界磁巻線抵抗 R_f すなわち励磁電流 $I_{fg} \times R_d$ である。

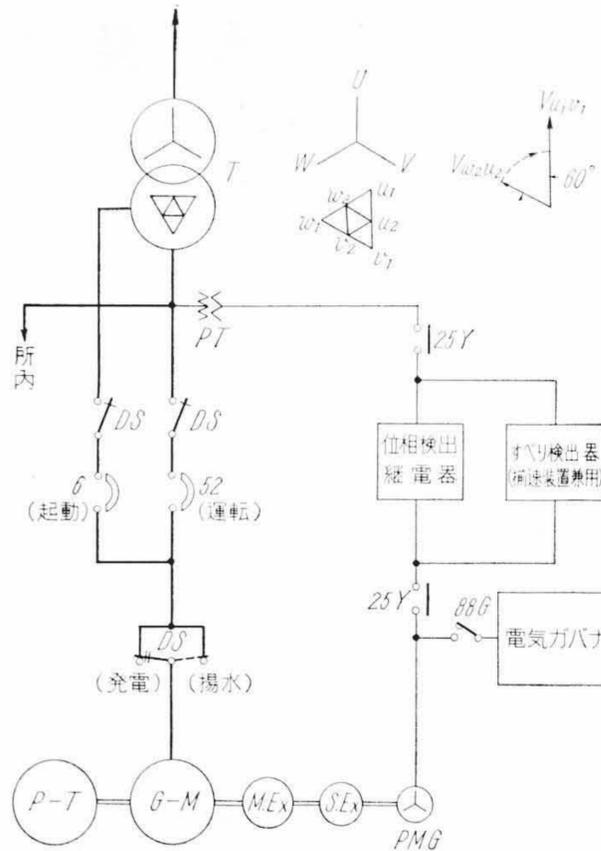
したがって放電抵抗 R_d は (I_{fm} または I_{fg} のいずれか大きいほう) × R_d が界磁巻線に許容される電圧より小さくなるように決めなければならない。一般に $R_d < 5 R_f$ が適当である。また起動時の界磁電流 I_{fm} はすべりがかなり小さくならないと減少しないので、放電抵抗は熱容量の十分なものとしなければならない。界磁開閉器の放電接触子についても同様の注意が必要である。

(2) 同期引き入れ

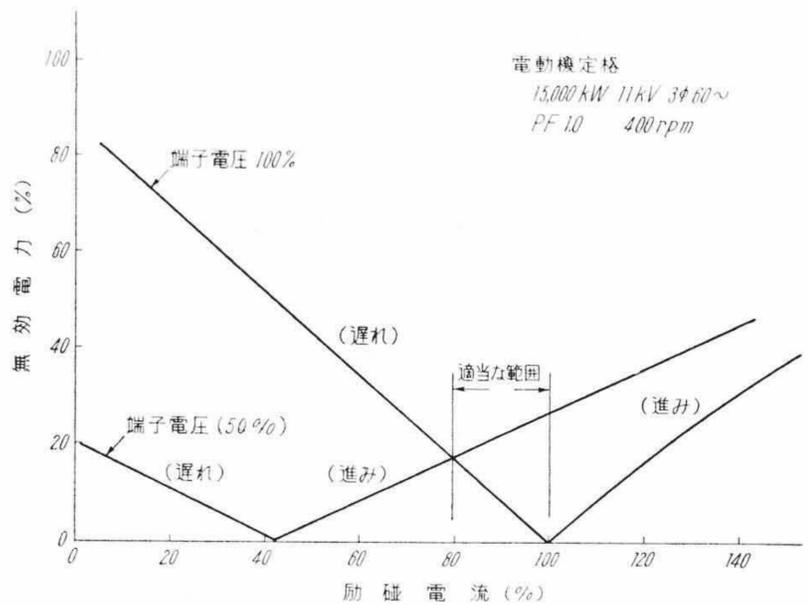
電動機速度が上昇し、すべりが小となれば励磁を与えて同期引き入れを行うが、凸極機の同期引き入れに関係する要素としては同期化トルク、慣性トルク、制動トルク、反作用トルク、界磁回路時定数などがある。発電電動機は負荷とするポンプが空転しているため、負荷トルクは小さく普通数%程度である。一方反作用トルクはかなり大きいので、励磁を与える前に同期化してしまうことがある。この反作用トルクは同期速度では一般に次式であらわされる。

$$T_r = \frac{E_t^2(x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta \dots \dots \dots (2)$$

- ただし E_t : 端子電圧
- x_d : 直軸リアクタンス
- x_q : 横軸リアクタンス
- δ : 内部相角



第4図 発電電動機低減電圧—全電圧切換え方式回路図



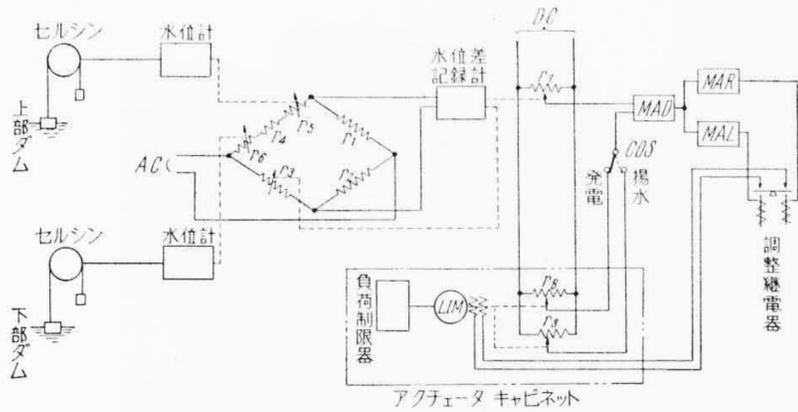
第5図 電動機無負荷(零力率)V曲線の一例 (ただし、無負荷定格電圧相当の励磁電流を100%として)

この反作用トルクによる同期化力は(2)式の微分形式で表わされるから0度および180度で正の最大、90度および270度で負の最大となるので磁極の安定な位置は0度および180度であり、しかも0度または180度のいずれに落ち着くかは偶然によるものである。これに対して励磁を与えたときの同期トルクは励磁電流の増加が指数関数的なので次式のようにあらわされる。

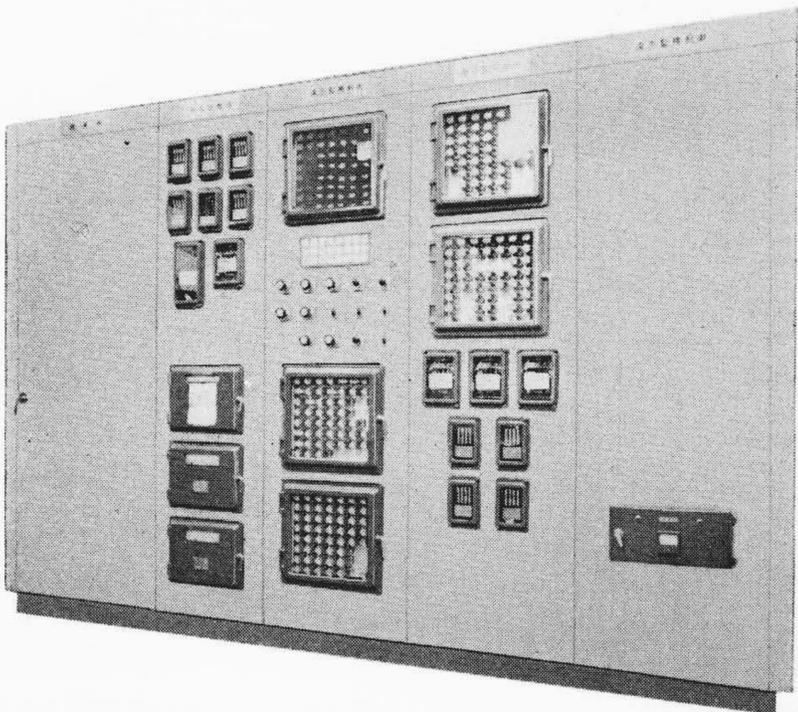
$$T_s = \frac{E_0 \cdot E_t}{x_d} (1 - e^{-\alpha t}) \sin \delta \dots \dots \dots (3)$$

- ただし E_0 : 内部誘起電圧
- α : 界磁回路時定数の逆数

したがって同期トルクによる磁極の安定位置は0度である。そこでもし反作用トルクで磁極が180度付近の位置に落ち着いたところで励磁が与えられると、そのままの位置で誘起電圧が発生してくるので、電動機は逆位相で並列されたことになり、大きな無効電流を流すばかりでなく、なんらかのショックにより速度が変化すれば0度の位置へ磁極が引き込まれることになるので、このときの加速エネルギーにより0度を中心とする振動を生ずる。このため制動トルクの大きさにもよるが、かなりの電力動揺をじゃく起すことになり好ましくない。したがって電動機のすべりが同



第6図 水位差応動案内羽根開度調整装置回路図



(左側より2番目)
第7図 水位差開度調整器盤

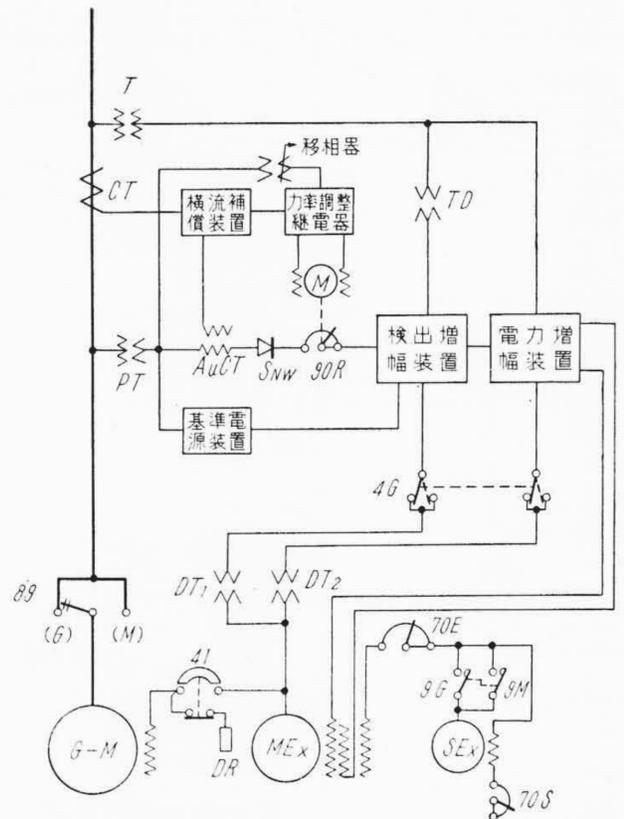
同期引き入れ可能なところまで小さくなれば、ただちに励磁を与えて同期化することが望ましい。第2, 3図は15,000 kW機における実例を示す。すなわち第2図では励磁を与える時期が遅れたため、その間に反作用トルクで磁極が180度付近で同期化してしまったので、励磁を与えたときのじょう乱が大きい。第3図ではすべりがあるうちに励磁を与えたのですみやかに同期化している。

すべりの検出方法は従来から種々発表されているが、揚水発電所用としてはガバナ用パイロット発電機と自動同期装置を利用する方法⁽³⁾が簡単確実である。

なお励磁を与えるとき、最も引き入れしやすい位相を検出していわゆる最適位相制御を行うこともあるが、発電電動機では負荷トルクが小さいのでその必要は少ない。

(3) 全電圧切換え

低減電圧から全電圧に切換えるとき、電動機はいったん系統から切離されるが、全電圧に切換えてから同期化させる方法と、低減電圧において同期化させたのち全電圧に切換える方法とがある。前者は低減電圧起動後すべり一定値以下を検出して全電圧に切換え、ただちに励磁を与えて同期化する方法である。全電圧切換えのときも起動突入電流が流れるが、電動機はすでに同期速度近くまで昇速しているから、全電圧印加により急速に加速されるので突入電流もきわめて短時間で減衰するから系統に与えるじょう乱は小さい。しかもこれは励磁並列の機会を失う心配のない安全確実な方法で一般に小容量または高速機に対して適用される。しかし大容量機では全電圧印加時の突入電流が大きく加速時間も長いので、後者の方法を採用することが望ましい。すなわち低減電



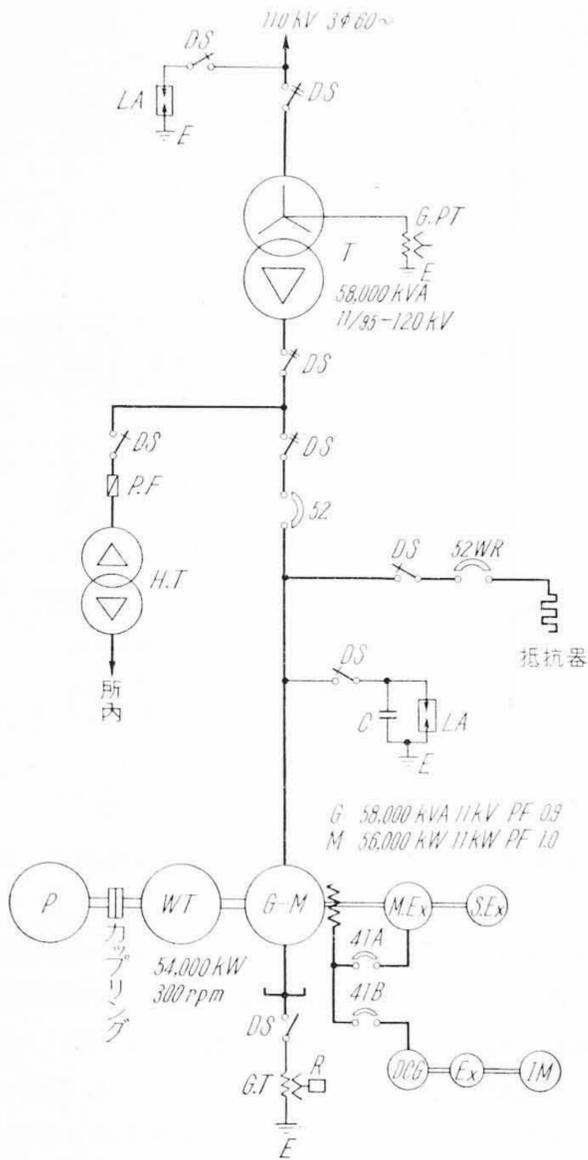
第8図 発電電動機励磁調整装置回路図の一例

圧起動後、定格速度近くで一度同期化してから低減電圧と全電圧との位相差を利用し、起動用遮断器が開路して同期機が減速し全電圧位相と一致したところで運転用遮断器を閉路して並列完了する方法で、起動突入電流は最初の1回のみである点が特長である。この減速に要する時間は、はずみ車効果および負荷トルクにより決まるが、大容量機では60度ずれるのに1秒前後を要するものもあり、簡単には定限時継電器で、またパイロット発電機と系統電圧との位相差を自動的に検出することにより、確実に同期化させることができる。その接続例を第4図に示す。なお、この場合の励磁電流の大きさは同期引き入れに必要とする値よりは大きく全電圧切換え後の無効電流があまり大きくならない程度にすべきで、第5図に示すようなV曲線から適当な値を選定することができる。

2.4 揚水および停止

電動機並列完了すればポンプケーシング内の空気を抜いて満水させ、ケーシング内の水圧上昇を確認してから案内羽根または主弁を開いて揚水を始める。ポンプ満水して流量零のときはいわゆる締切り圧力に相当する水圧が生じ、そのとき要求される軸トルクは定格の40~90%にも達する。したがってランナに水が当り始めてからどのような経過をたどって水圧が確立されるかが問題となる。このとき電動機にかかる負荷の模様については必ずしも明らかにされていないが、空気の抜き方、案内羽根および主弁の開き方に関連するので十分検討の上、最も衝撃の少ない操作方式としなければならない。いずれにしてもこの場合の負荷変動はかなり大きいので、系統に与える影響はむしろ起動時のそれよりも大きい場合もあるものと考えられる。とくに隣接して小発電所があるときは具体的に交流計算盤などにより検討しておくことが必要である。

流量調整は主弁または案内羽根により行うが、一般に揚水発電所では上、下ダムの水位変動が大きいので、水位差に応じて最適の流量で運転する必要がある。このため第6図に示すような水位調整器を設けて自動調整を行っている。またポンプ水車はその特性上落差の変動により水車起動開度および無負荷開度が相当大幅に変わるので、水車機起動のときもこの装置を利用すれば円滑な同期並列を行うことができ、きわめて合理的な自動運転とすることができる。第7図にこの水位調整器を組み込んだ配電盤の一例を示す。



第9図 諸塚発電所電気制動装置回路図

電動機の定格力率は一般に経済的な観点から 1.0~0.95 程度に選定され、しかも揚水運転中は負荷が急変することはないので、その励磁調整は常時定力率制御とし、系統電圧の急変に対しては一時定電圧に保って安定度を高め、しかるのち徐々に定力率とするのが適当である。第8図にその接続例を示す。

停止のときは案内羽根を全閉し電動機を解列する。しかしポンプ満水時の負荷が大きいときには、ふたたびポンプケーシング内の水面を押下げ空転無負荷として解列することもある。

3. ポンプ別置式の制御

ポンプ別置式ではポンプ着脱の制御と、発電-揚水の切換時間の短縮に重点がおかれる。停止時着脱式は最も安全確実であるが、水車停止に時間がかかるので、最近では電気制動装置を設けてこれを大幅にきりつめているものもある。第9図にその一例を示す。また欧州ではトルクコンバータによりポンプ着脱を行うものが実用化されているが、この場合はポンプ充水のまま起動もでき、切換時間も最短でポンプ別置式としては最も望ましい方式である。

4. 保護装置および配電盤

4.1 保護装置

ポンプ運転時の特異な保護装置として電源喪失、界磁喪失、同期はずれなどの保護リレーおよび放水路水位異常低下検出装置などが設けられる。またポンプ水車式に対しては下記が必要である。

- (1) 起動渋滞：制動巻線の過熱保護のため、電圧印加時より電動機回転し始めるまでおよび並列完了までの時間による。
- (2) 再起動：連続再起動のときの電動機および変圧器過熱保護のため長限時継電器を設ける。

4.2 配電盤

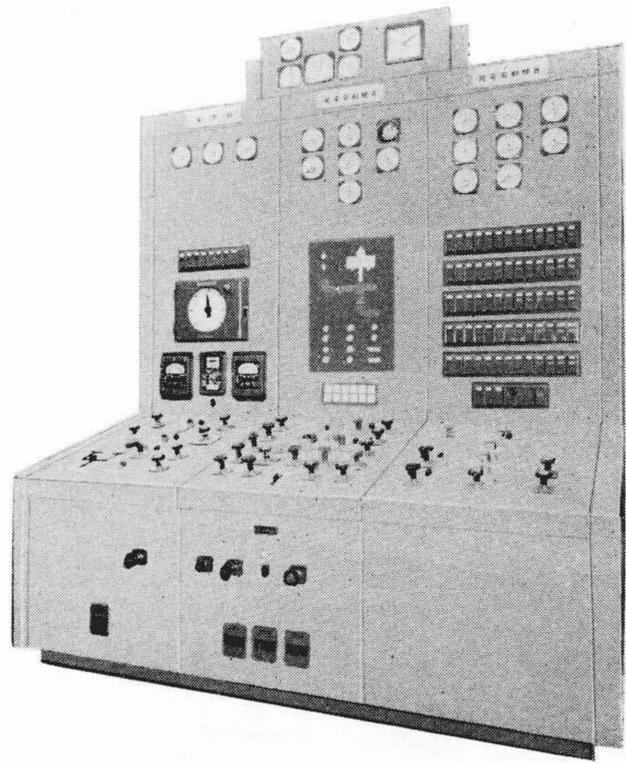
ひん繁な発電-揚水の切換え運転も誤りなく容易に行いうるよう、その構成、配置には十分な配慮が必要である。すなわち主機および補機のシーケンスはできるだけ自動運転として操作開閉器を少なくすること、監視計器類は最小限度にとどめ、主要なものは自動記録とすることなどである。そのほか電力計、回転計などの目盛、操作開閉器のハンドルなどを発電、揚水用に色分けし、また主盤には象形式の照光盤を設けて監視の便を図るなど、誤操作なく安全確実に運転できるものとしなければならない。第10図に照光盤を設けた配電盤の一例を示す。

5. 結 言

以上今後の水力開発の焦点の一つとなる揚水発電所の制御、特にポンプ水車における問題点について述べた。ポンプ水車式では低電圧起動、同期引き入れおよびポンプ充水方式に最も重点がおかれるが、具体的には個々の発電所における系統条件、主機の形式、容量などを勘案して最適の起動方式を決定しなければならない。日立製作所ではその検討結果を設計に盛りこんで、わが国初めてのポンプ水車式揚水機器を四国電力株式会社大森川発電所へ納入したが、すでに昭和34年8月より好調に運転されている⁽⁴⁾。この実績をもとにして現在さらに大容量機をあいっいで製作中で、揚水発電所に最も適合した安全で機動性の高い制御方式の確立のため、よりいっそうの研究と努力が払われている。

参 考 文 献

- (1) 藤田伊八郎：調相機，55 (昭17 コロナ社)
- (2) W. A. Thomas O. D. Whitwell E. E. Jan. 83(1952)
- (3) 特許出願中
- (4) 斎藤：日立評論 41, 1457 (昭34-11)



第10図 揚水発電所用主配電盤の一例