

東北電力株式会社納
沼澤沼揚水発電所の制御装置

森 井 進*

Controlling Equipments of Numazawanuma
Pumping Power Station of Tohoku Electric Power Co., Inc.

By Susumu Morii
Taga Works, Hitachi Ltd.

Abstract

Numazawanuma Pumping Power Station of Tōhoku Denryoku Co., Ltd., equipped with Hitachi made two sets of 23,000 kW horizontal shaft Francis water turbine, direct coupled 23,000 kVA alternator and 21,000 kW double stage double suction turbine pump, has been taken into service since December, 1951. This power station represents the first stage in electric power development of Tadami River and is one of the largest pumping power station in the world.

To pump up water, the synchronous generator is operated as the synchronous motor and is started by the water turbine. The operation of this power station is divided into three kinds, that is;

- (1) Generating without the turbine pump
- (2) Generating with the turbine pump
- (3) Pumping

In the second case, as the pump races, the water supply device to the impeller of the pump is attached and in the third case, the water in the casing is forced down with special equipment. And controlling of these complicated equipments can be done safely and surely by a single attendant using a sequence controller with two stepped mechanism, and perfect supervisory and protective devices.

In this treatise the out-line of the generating and controlling equipments of this power station is described.

[I] 緒 言

揚水発電所は豊水期及び軽負荷時における系統の余剰電力を利用して貯水池に揚水し、渇水期及び尖頭負荷時にその水によつて発電するもので、その際下流の発電所も同時に発電量が増大し、水力の利用率を向上すると共に火力発電用燃料を節約する効果があり、ダム式発電所と共に我国の電力事情を改善する重要な方策の一つである。

今回只見川電源開発⁽¹⁾の一環として東洋一の大容量で世界でも有数の規模を持つ 2×23,000 kVA の東北電力

* 日立製作所多賀工場

株式会社、沼澤沼揚水発電所が発電開始されるに至つたことは非常に意義深く、渇水期に一大威力を発揮することになる。本発電所の制御装置は主機と共にすべて日立製作所製である。

由来揚水発電所の型式⁽²⁾は縦軸型と横軸型に大別されその方式には

- (1) ポンプ専用の電動機を設置する方式
- (2) 発電機を電動機として使用し、水車とポンプを直結とする方式
- (3) 発電機を電動機として、水車をポンプとして使用する方式等あり、それぞれ得失を有しているが、沼澤沼発電所は横軸型で大容量機として最も適した水車——

発電機(電動機)——ポンプ直結の(2)の方式が採用された。而してポンプの起動は水車による方式で、ポンプ運転中水車は直結のまま空運転とするが、発電の場合はポンプを切離し、損失を少なくしている。但し必要な場合にはポンプ直結のまま発電することも出来るので、短時間に発電から揚水へ、又揚水から発電へ切替えることが出来る。

本発電所の制御装置は幾多斬新な設計による新方式が採用されており、複雑多岐な制御を日立独特の二段操作式順序制御器による一人制御方式によつて、統制ある自動操作をなし、誤操作のない、簡易確実な制御が出来ると共に監視装置、保護装置にも特に考慮を払い万全を期している。以下設備の概要と制御装置について述べる。

〔II〕 設 備 概 要

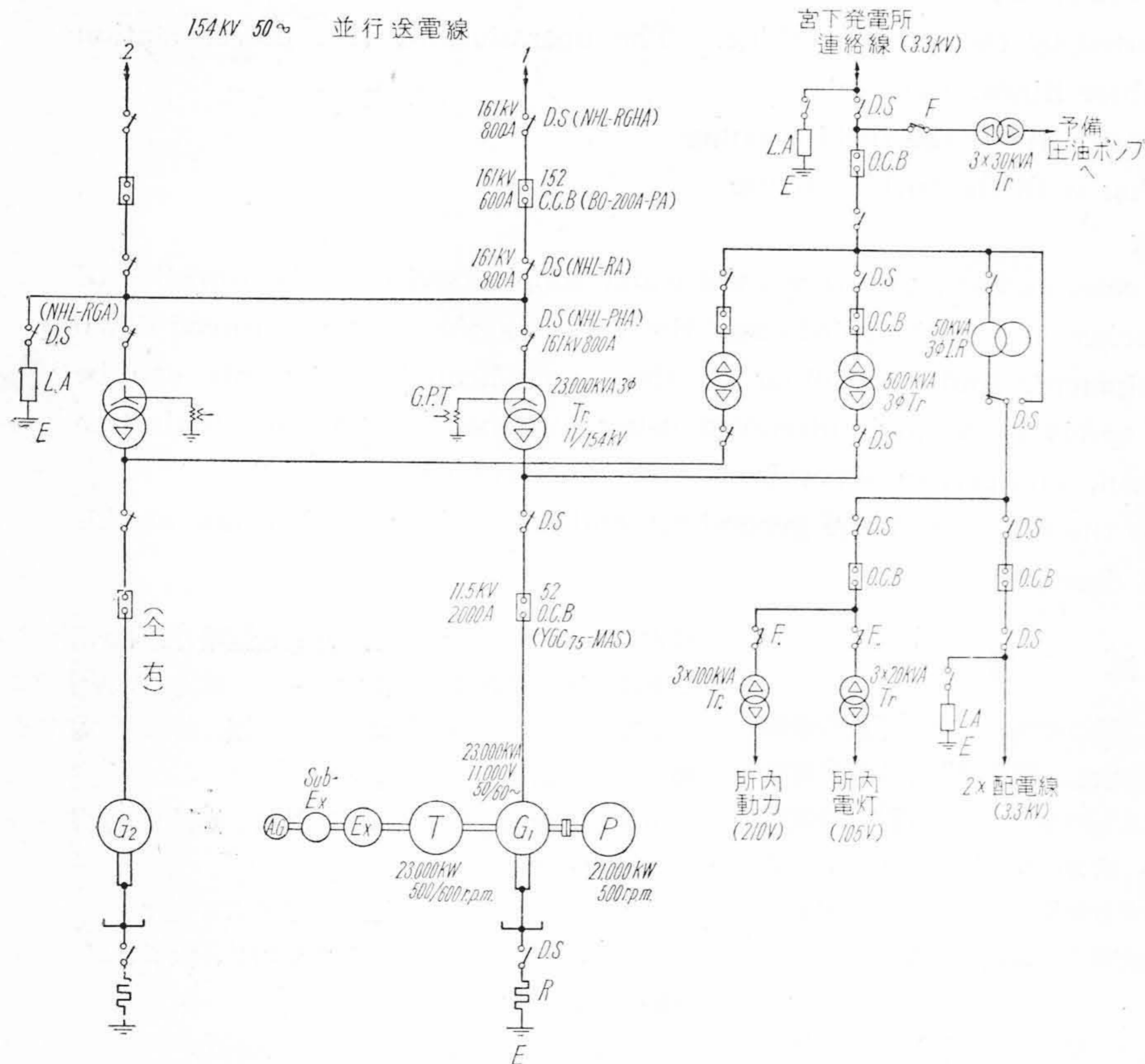
沼沢沼揚水発電所は第1図に示す如く、水車——発電機(電動機)——ポンプ 2 組を設置し、154kV 2 回線の系統に連結されている。豊水期の余剰電力を渇水期の尖頭負荷時電力に変換するを目的とするが、当初は天然に

貯えられた水を放水して発電し、ポンプ運転は今夏からの予定である。

上部貯水池である沼沢沼は有効貯水量 85,203,000 m³ 利用水深 30 m となつており、下部貯水池としては 4 km 下流の只見川宮下発電所ダムによる調整池を利用している。

発電所主要機器の概要は次の通りである。

- 水 車 23,000kW 横軸単輪複流渦巻型フランシス水車、基準落差 200 m 使用流量 11.6 m³/sec 回転数 500/600 r. p. m.
- 発電機 23,000 kVA 11 kV 50/60 \sim 三相交流同期発電機、横軸回転界磁閉鎖風道循環型、(ポンプ運転用電動機として使用)
- 励磁機 100kW 220V
- 副励磁機 3kW 110V
- ポンプ 21,000 kW 横軸両吸込 2 段タービンポンプ 基準総揚程 211m 基準揚水量 7.9m³/sec 回転数 500 r. p. m.
流量調節法 吐出口ニードルバルブによる



- 主変圧器
 - 三相屋内用送油水冷式
 - 23,000kVA
 - 11/154kV
 - Δ/Δ
- 送電線
 - 154kV
 - 並行 2 回線
- このほか多数の補助ポンプ類を設けてあるが、主機に直接関係のあるものは下記の通りである。これらはすべてユニットシステムとし、主機 1 組に対し各 2 台宛を設け、内 1 台を常用機、1 台を予備機として使用し、何れも電動機運転である。
- (1) 圧油ポンプ (Q₁. Q₂)
- (2) 潤滑油ポンプ (QB₁. QB₂)
- (3) 主変圧器用冷却水ポンプ

第 1 図 沼 沢 沼 揚 水 発 電 所 単 線 接 続 図
Fig. 1. Skeleton Diagram of Numazawanuma Pumping Power Station

- (4) 主変圧器用油循環ポンプ (QT)
- (5) 冷却水用給水ポンプ (W₁、W₂)
- (6) 軸用封水ポンプ (WB₁、WB₂)
- (7) 水面押下用空気圧縮機 (A₁、A₂)
- (8) ポンプ満水用真空ポンプ (V)

上記の内 Q₁、QB₁ 等の記号は略号を示し、運転表示灯の表示文字と同一である。(5)の給水ポンプは発電機空気冷却器及び潤滑油冷却器用冷却水の給水用で、封水ポンプは水車及びポンプ空運転時ランナーへの注水用にも共用している。

これら補機の制御電源としては第1図に示す如く主変圧器一次側 11kV に接続の 500kVA 三相所内変圧器から取るが、宮下発電所の高圧母線からも取れるように連絡線を設けてある。又最も重要な圧油ポンプに対してはその予備機電源を宮下連絡線から直接専用の変圧器を経て取り得るようにして万全を期している。

2 台よりなる各種補助ポンプの内何れを予備機とするかは配電盤上の切換開閉器により自由に選択出来る。又常用機が故障を起した時、予備機を自動起動する方式で補助ポンプ類は凡て配電盤及び現場の何れからも操作出来るようになっている。

直流制御電源としては 216 AH 110 V の蓄電池とその充電用 30A グラインバー整流器を設け、常時両者を浮動接続としている。

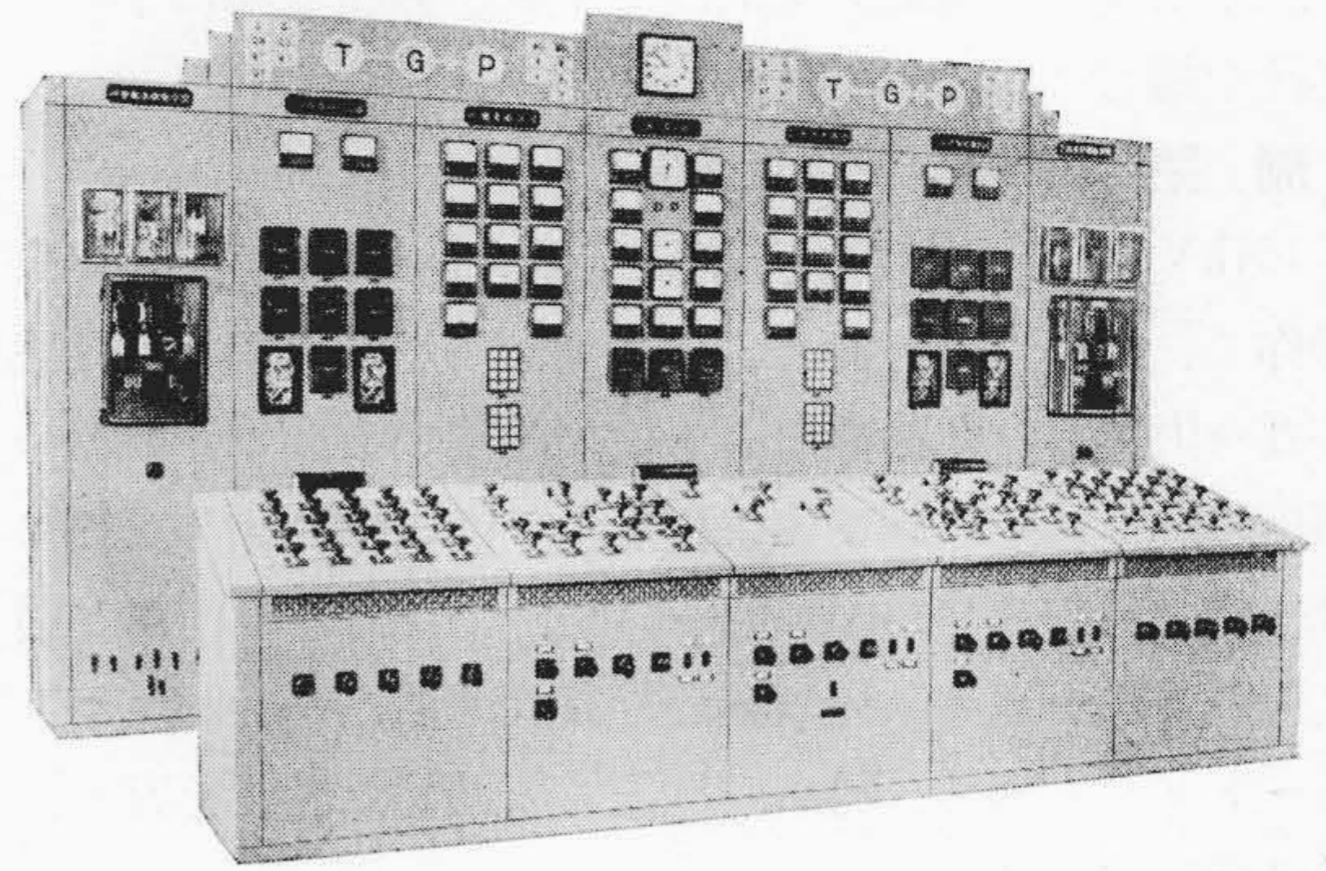
【Ⅲ】 配電盤及び開閉器具

配電盤

発電所制御の中樞をなす配電盤は主配電盤と高圧及び低圧配電盤の二群に分れ何れも優美で落着きある暗灰色塗装である。主配電盤は第2図の如く、中央が送電盤、その両側に発電機盤、同補助盤、自動電圧調整器盤を配置し、左右頂部に照光式運転表示盤を取付けた BD+EF 型の分離机型鋼板製配電盤で、制御及び監視に便利な構造となっている。直立計器盤の背面には第3図に示す継電器盤を付し、保護継電器並びに自動操作用継電器を装備している。

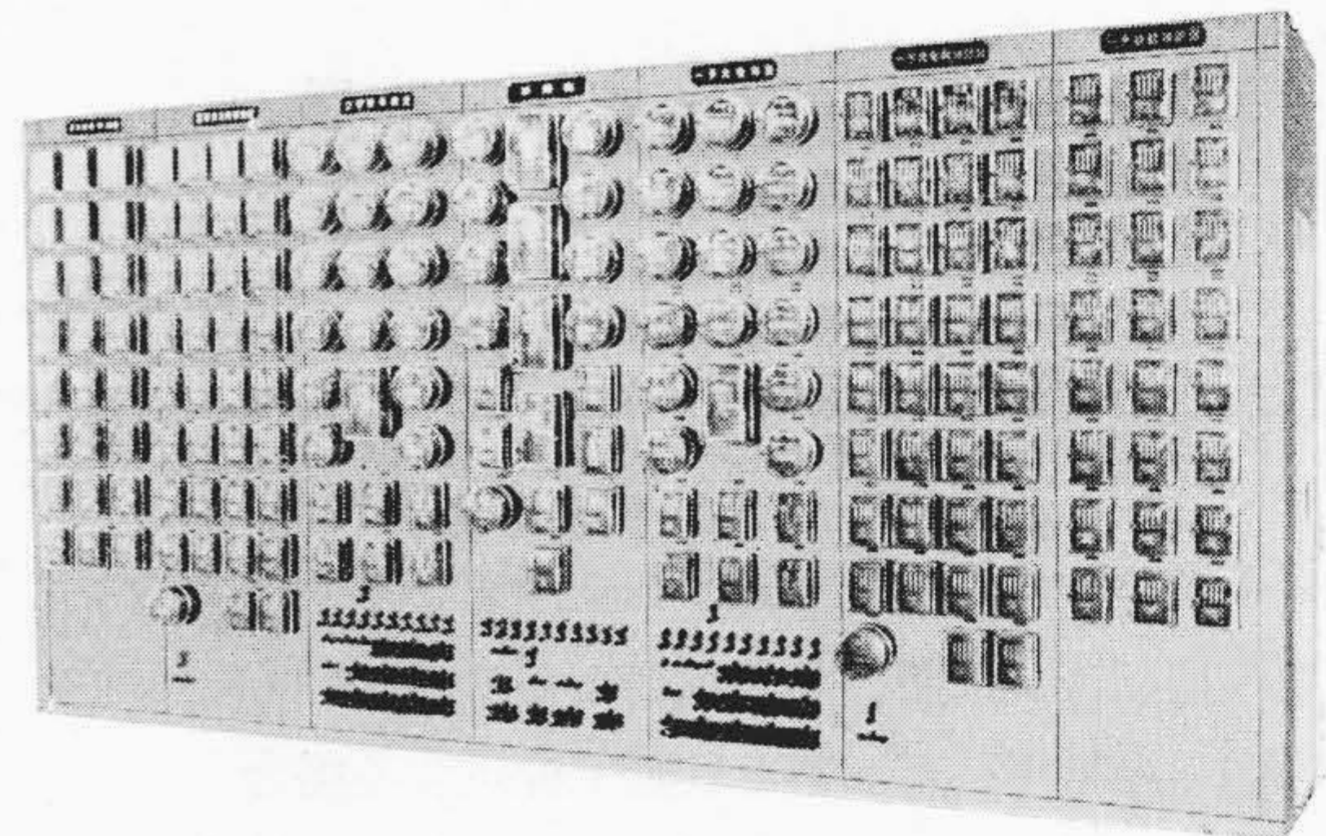
高圧及び低圧配電盤は普通高圧盤 3 面、自動電源盤 2 面、所内電灯盤、直流開閉器盤及び整流器盤から成り、側面扉付壁支持直立型鋼板盤で主配電盤とは直角に配置されている。

配電盤用指示計器は洗練された意匠で遠方からの読みとりの容易な S₂₄ 型半埋込角型を採用し、沼及び水槽水位計には測定範囲 40 m の広範囲で、しかも 10 cm 程度を読む必要があるので、第4図の如き SD₂₄ 型セルシオンモーター式複針型水位計を採用した。又同期検定器は



第2図 2×23,000kVA 揚水発電所用 BD+EF 型主配電盤

Fig. 2. Type BD+EF Main Switch Boards for 2×23,000kVA Pumping Power Station



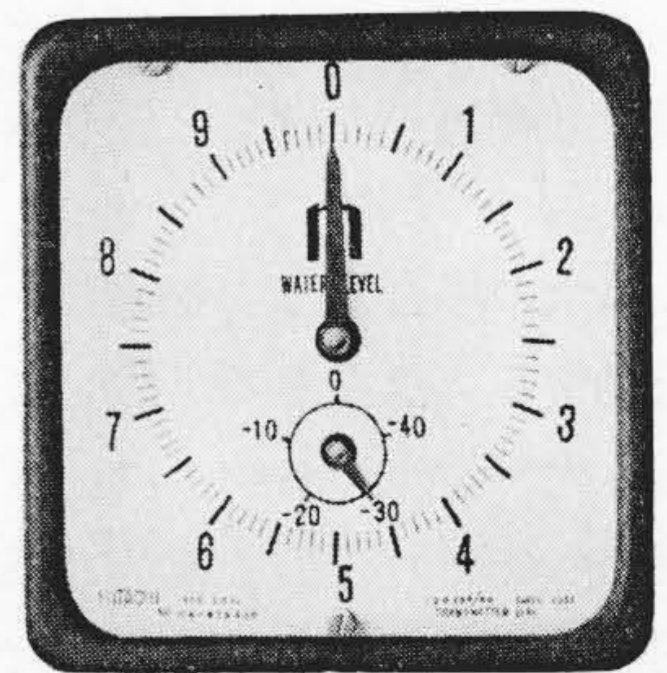
第3図 背面継電器盤

Fig. 3. Rear Relay Board.

大型で小勢力の可動鉄片型 [SD₁₁ 型とし、周波計は 45—55 〃 目盛の指針型で遠方からの読み取りも容易である。

操作盤に取付の順序制御器並びに操作及び切換開閉器は QS 型捻回型とし、制御の目的及び種類に応じて把手の形状を変え、制御器具番号を刻印し、急停止用釘開閉器の把手は赤色として、非常の場合でも誤操作のないよう考慮を払っている。

盤裏面配線としては耐燃性、耐湿性及び耐油性等においてゴム線より優れた性能を持ち電気的特性にも遜色のない塩化ビニール線を使用し、回路の種類に応じて色別し各配線には線番号及び相別の色バンドを付して点検を容易にするは勿論、塩化ビニールの被覆に毀損



第4図 SD₂₄ 型複針型水位指示計

Fig. 4. Type SD₂₄ Water Level Indicator

の生じないよう配線押えクリート及び盤組立等に十分の処置を構じている。

開 閉 器 具

161kV 制弧遮断器は定格気圧 4.5kg/cm^2 の圧縮空気操作で、補助気槽を有し、別に交直両用の圧縮空気発生装置を附属し、断路器用にも使用している。本遮断器の開極時間は 0.1 秒以下で、再点弧 1 回以下、動作責務は O—(1 分)—CO—(3 分)—CO となっている。第 5 図にその外観を示す。発電機同期投入用油入遮断器はコンパクトメント型で、特に同期投入に適した性能を有し、電磁操作式である。

主変圧器二次 154kV 側には励磁電流の開閉に耐える性能の圧縮空気操作式断路器を設けることにより、遮断器を省略し、制御の簡素化を計っている。この外観は第 6 図に示す通りである。

[IV] 主 機 制 御 装 置

発 電 所 運 転 方 式

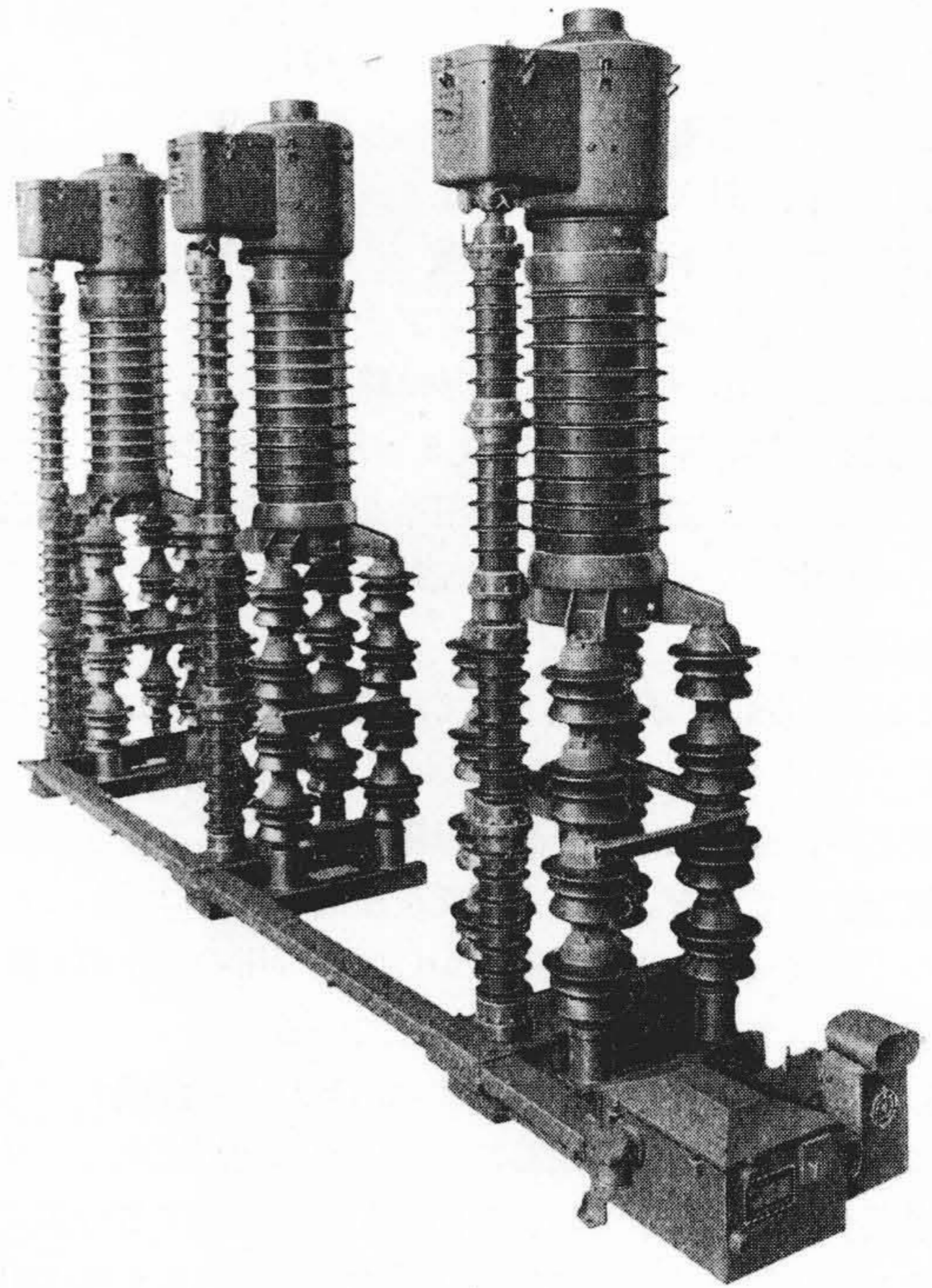
主として冬期渇水期に全負荷発電をし、その他の一般豊、平水期は系統の余剰電力を利用して揚水するを原則とする。但し夏季渇水期に尖頭負荷時だけ発電し、深夜軽負荷時に短時間揚水を繰り返えすことがある。従つて発電所運転方式は下記の三種類となる。

- (A) 発電Ⅰ ポンプを切離し発電する場合
- (B) 発電Ⅱ ポンプ直結のまま発電する場合（ポンプ空運転）
- (C) 揚水 水車で起動し、電動機に負荷を移してポンプを運転する場合（揚水中は水車ランナー直結のまま空運転とする）

「発電Ⅰ」はポンプ直結空運転の損失をなくし、高能率運転が出来るので長期間発電を続ける冬期渇水期に適用される。

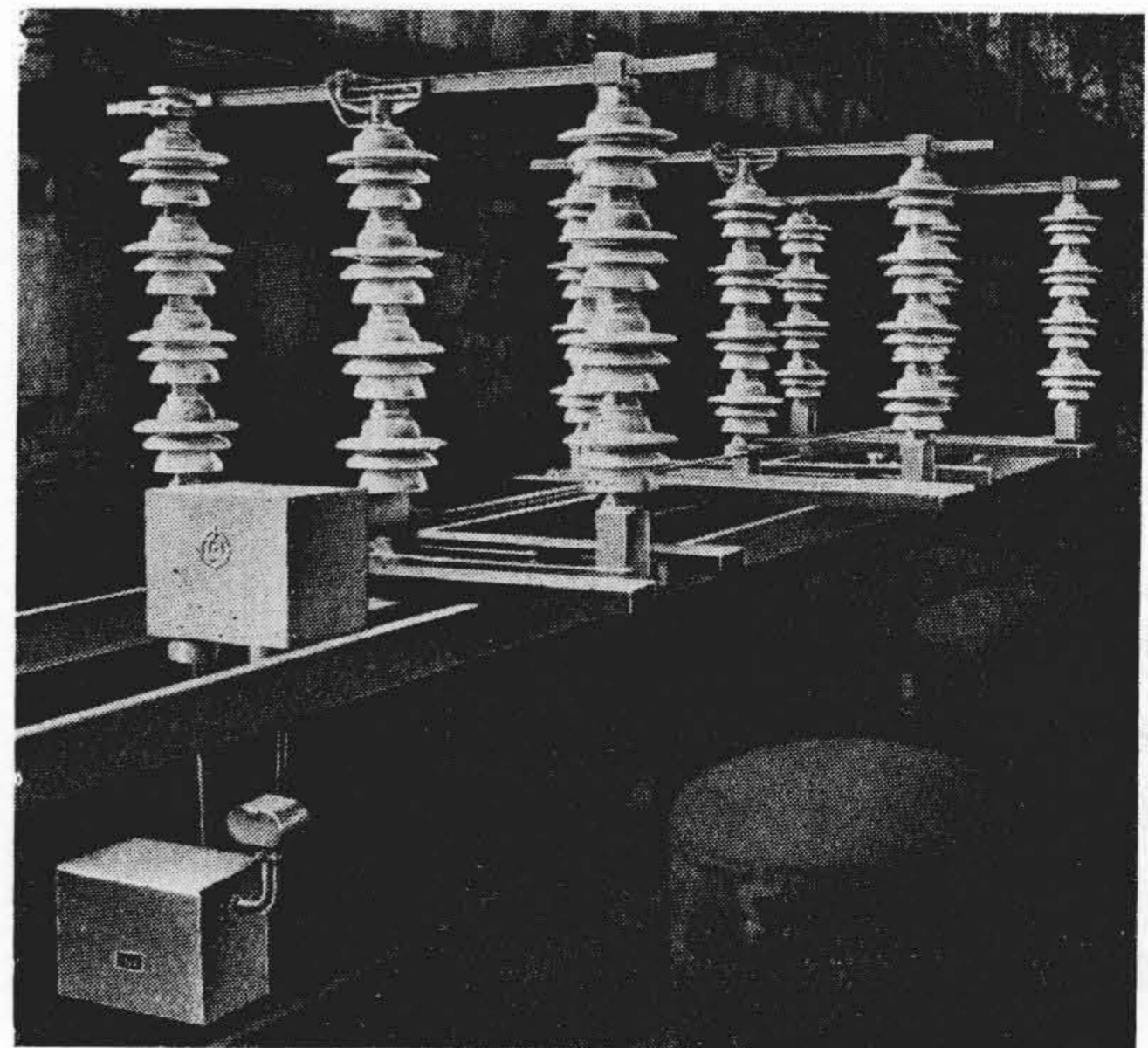
「発電Ⅱ」と「揚水」は何れも水車—発電機—ポンプを直結して運転するもの故、発電機—ポンプ間のカップリングを切離し或は連結するに要する時間と手数をばぶき揚水と発電がしばしば繰り返えされる場合に簡便である。

揚水の場合水車を切離し、発電機を電動機として自己起動する方法もある。然しこの方法によれば本発電所の如く大容量機においては、ポンプ満水起動時の軸動力は定格の約 40% にも及び、老大な起動補償変圧器及び開閉器具等が必要となる上、起動突入電流により系統に大きな衝撃を与え動揺を起す原因となる惧れがある。たとえ起動時の軸動力を小さくするため、ポンプ内の水を排除して起動するとしても、同期運転後ポンプを満水させることは大容量機にては危険である。依つて本発電所に



第 5 図 BO-200A 型, PA 式, 161kV 600A 制弧遮断器

Fig. 5. Type BO-200A, Form PA, 161 kV 600A. Contrarc Circuit Breaker



第 6 図 NHL 型 161 kV 800A 圧縮空気操作式断路器

Fig. 6. Type NHL 161 kV 800 A Pneumatic Operating Disconnecting Switch

においては水車によりポンプを起動する方法が採用された。而して電動機に負荷を移した後水車を切離して損失を少くすることが望ましいが、大容量機のため流体継手

に問題があり、前記の如く揚水運転中は水車直結空運転とした。

制御方式

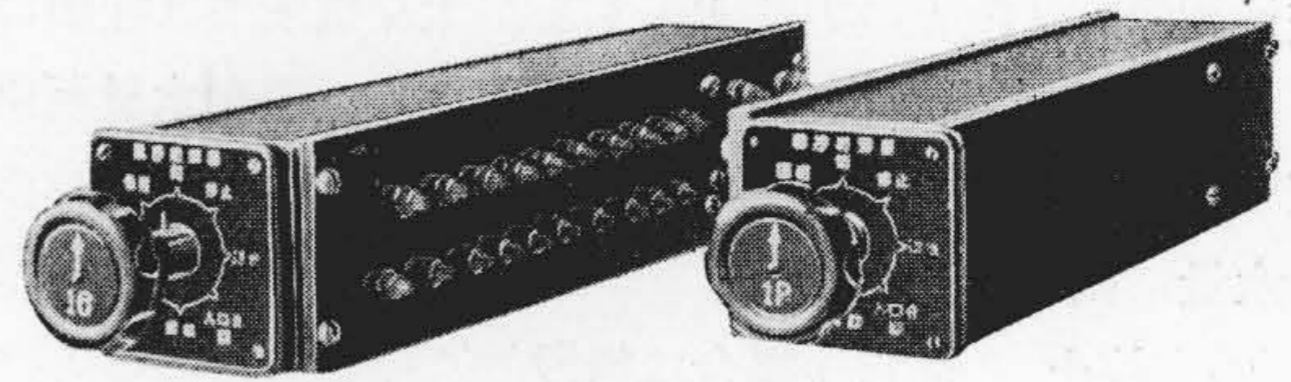
水車発電機及びポンプの制御方式は回動及び引きの二段操作式順序制御器による順序制御方式で、所謂一人制御方式である。計器盤に取付けの照明式集合運転表示器及び計器盤頂部取付の照光式運転表示盤により、操作進行状況を一々確認、監視しながら簡易確実に制御出来るもので、箇々の操作は可及的に自動化して少数の人員によつて完全な保守が出来るよう考慮されている。

順序制御器（主幹制御器）は第7図の如き発電用 1G と揚水用 1P の二箇を各発電機盤の操作机に取付けてある。1G は準備、入口弁開、起動、励磁、並列、負荷、切及び停止の段階を有し、1P も「負荷」の位置が「運転」となるほかは 1G と全く同じ段階で、各段階に分けて階段的にも又連続的にも任意に制御することが出来る。尙 1G の方は逆制御即ち負荷から停止の方向へも階段的に制御出来る所謂可逆式である。送電、受電による計器指示切換接触を付した操作切換器によつて、発電と揚水の操作回路と計器回路とを同時に切換え、且 2 箇の順序制御器の内使用しない側を必ず「切」の位置におかなければ操作回路が出来ないように互鍵回路を作り誤操作を防止している。

前述の「発電Ⅰ」と「発電Ⅱ」の判別は発電機ポンプ間のカップリングを切離し或は連結する際、ポンプ側を極く僅か動かすので、これを利用した位置開閉器により自動的に操作回路を切換えると共に集合運転表示器に明示される。従つて何れの場合も発電用 1G により制御すればよいのである。

水車及びポンプの起動、停止等の各操作は機械室設置のマグネットボードに取付けた、複電磁石式の電磁圧油操作弁を配電盤から電氣的に遠方操作して行うが、マグネットボードにおいてこの圧油操作弁の捻回型把手を直接手動操作することによつても制御出来る。而してマグネットボードには計器及び照明式集合運転表示器も取付けて機械室における監視も容易ならしめている。以下各運転方式における制御の大要を一般の発電所と異なる点を主として述べる。

(A) 発電Ⅰ ポンプを切離し発電するもの故一般の発電所と制御方式は殆んど変りない。圧油ポンプ及び封水ポンプは主機停止中も連続運転とし、主変圧器用冷却水及び油循環ポンプは主機起動に先立ち予め手動にて運転しておく。而して発電用順序制御器 1G を「準備」に進め操作すると潤滑油ポンプ及び給水ポンプが自動起動する。斯くて補助ポンプが正規運転となれば「準備完了」の表示が出る。以下入口弁開から負荷まで一般の発電所



第7図 順序制御器

Fig. 7. Sequence Controllers

と同様である。

(B) 発電Ⅱ 「発電Ⅰ」と異なる処はポンプを直結空運転とする点である。従つて発電機ポンプ間のカップリングを圧油制御にて連結し、ランナーへの過熱防止用注水及び軸の封水を行うは勿論、押込揚程のためケーシング内の水を排除する必要がある、予め水面押下げ用空気圧縮機を運転して空気槽の圧力を規定値に上げておく。而して 1G を「準備」に操作すればポンプケーシングの水面押下げ装置を動作させて、規定水面まで押下げて保持する。規定水面まで下がれば、「準備完了」の点灯によつてこれを表示する。以上の操作が追加されるほかは「発電Ⅰ」と全く同様である。

(C) 揚水

(a) 起動、運転 カップリングの連結、注封水、空気圧縮機の運転等は「発電Ⅱ」と同様で、揚水用順序制御器 1P を「準備」の段階へ操作すると、起動条件を満足しているときは真空ポンプを自動起動してポンプ内を満水させる。満水すれば浮子開閉器により準備完了の表示を出す。次いで水車入口弁を開き起動の位置で案内羽根を開くが、ポンプが満水しているため、水車は約 40% 負荷で起動することになるので、それに必要な起動開きまで負荷制限用電動機により、自動的に開度制限を上げて緩起動させる。速度上昇し約 80% 速度に達すれば遠心力開閉器の動作により、又ポンプケーシング内の水圧が規定値以上に上昇すれば圧力継電器の動作により、吐出弁の側弁を開き、満水運転のための過熱を防止する。

発電の場合と同様に発電機を励磁し、並列投入されると、水車の負荷制限用電動機を自動制御して案内羽根を徐々に閉め始める。斯くして発電機は電動機となり水車の負荷が移行し、案内羽根全閉により完全に電動機運転となる。水車入口弁及び側弁が全閉すれば水車を空運転とするため、水車ケーシングの水面押下げ装置を動作させ圧縮空気により規定水面まで押下げて保持させる。これらの制御はすべて自動的に行われる。

1P を「運転」の位置に進めると吐出弁開用電磁弁が附勢され、吐出口のニードルバルブを任意の開度を開くことが出来る。

(b) 流量調整 揚水の場合、電力事情及び河川の流量によつてポンプの揚水量を調節する必要がある。その

流量調節には色々の方法⁽⁴⁾があるが本発電所では吐出口のニードルバルブによる方法が採用され、電動水量制御装置を配電盤上の操作開閉器により遠方操作して任意の揚水量に調節する。

(c) 停止 揚水の場合は段階的に停止させることはその必要性がないので行わず、1P を「停止」まで廻し操作することにより自動的に最も合理的な停止操作を行う。即ち先ず水量制御装置の電動機を遠方操作して徐々に吐出弁（ニードルバルブ）を閉め揚水量を減少せしめるが、その閉路時間は水槌現象による水圧管内の圧力上昇を最小限に止めるよう考慮されている。吐出弁が全閉すれば閉鎖用電磁弁により閉鎖し、同時に交流遮断器を遮断し、次いで吐出弁の側弁も閉じる。

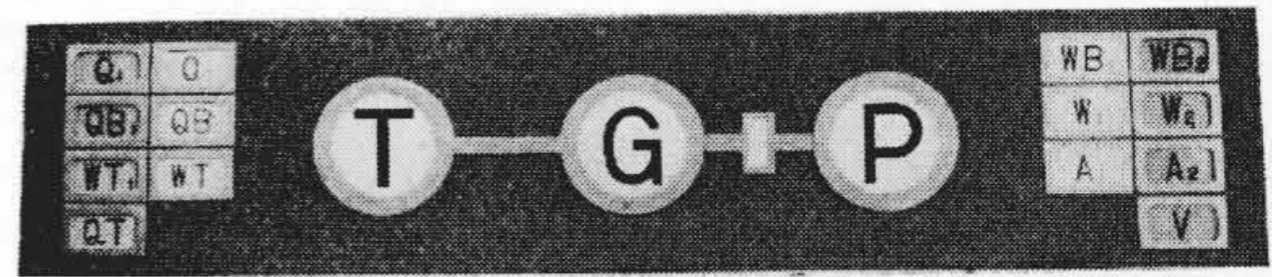
運 転 表 示 装 置

上述の如く複雑な制御を一人制御方式で遠方操作するためには、制御しながら刻々と進行する起動状態を明確に操作者に知らせ、少しの不安もなく操作出来るようにすることが望ましい。本揚水発電所においては照明式集合運転表示器に「発電Ⅰ」「発電Ⅱ」「揚水」の内何れの運転方式であるかを先ず表示し、次いで各制御段階毎に所定の操作が完了したことを直ちに表示する。即ち「準備完了」「入口弁開」「起動」「励磁」「並列」「負荷」「運転」等順次表示され並列後はそれ以前の表示は消灯し、一方 AVR 使用中及びその動作も点灯によつて表示している。

主機の運転状態と補機の運転とは密接な関係があるので、これらの状態表示を一箇所に纏めて一目瞭然とすることが極めて大切である。そのため第 8 図に示す如き照明式運転表示盤を配電盤頂部の見易い処に設けて監視を容易にしてある。即ち補機は前記 Q₁、QB₁…等の略号で表示し、運転中のものは点灯によりこれを明示する。主機の方は水車を T、発電機を G、ポンプを P で表わしそれぞれ内部に赤、緑及び白色の電球を内蔵せしめ、この点灯により運転状態を表示し一目で判るようになっていく。即ち水車、ポンプの空運転中及び発電機無負荷無励磁運転中は緑色に、又それぞれ正規運転中は赤色に照明され、その正規運転に至る過程においては白色照明を以つてこれを表示する。カップリングは赤、緑色照明により連結、切離しを表示している。

保 護 装 置

保護装置は優秀な特性の保護継電器を使用するは勿論その動作による処置を適当ならしめることが必要である。その処置は発電の場合と揚水の場合とは当然相異なるものがある。例えば発電機過電流、主変圧器内部故障等に対して、発電の場合は単に交流遮断器を遮断する等の処置で停止させないが、ポンプ運転のときは遮断と同



第 8 図 照 光 式 運 転 表 示 盤
Fig. 8. Illuminated Type Running State Indicator

時にポンプ吐出口のニードルバルブを閉鎖して急停止させる。しかも水槌作用による水圧上昇を最小に止めるよう閉鎖時間に十分考慮を払っている。

又揚水運転の場合は発電の時必要な保護装置を完備するほかに、停電及び低電圧に対する保護装置等が必要となる。停電に対して誘導型低電力継電器(IW 型 UC式)及び後備保護として誘導型低電圧継電器(IV 型 UC式)によつて検出し、自動遮断して系統から切離すと共にポンプ吐出弁を前述と同様閉鎖する。

ポンプ直結発電のときはポンプを、揚水運転中は水車をそれぞれ空運転とし、ケーシング内の水面を規定水位まで押下げているが、この水面押下装置の故障に対する保護装置も完備している。尚このケーシング内押下げ水位は配電盤上の水位指示計によつて常に監視出来る。

発電或は揚水運転中、異常状態が発生して人為的に急停止を必要とする場合には発電、揚水共用の赤卸付急停止用引卸開閉器により故障停止と同様に急停止させる。

[V] 結 言

我が国に於る揚水発電所は池尻川及び小口川第三の両発電所があるのみで、今回沼沢沼揚水発電所が発電開始されたのを機会にその概要と制御装置について述べた。本発電所の下流には現在多数の発電所があり更に 4 発電所の建設が計画予定されており、揚水発電所としての効果は一層増大するであろう。水車によつてポンプを起動する方式は本邦においては始めてのものであり、複雑な操作及び 3 種類の運転方式にも、誤操作の絶対のない制御方式を確立し、順序制御器による簡便な制御と、完璧の監視装置及び保護装置によつて、揚水発電所としての使命を全うすることが出来るものと信ずる。揚水発電所の重要性が今後ますます増大するものと考えられる時本発電所の経験を生かし、更に発展することを期待するものである。

終りに臨み、画期的な本揚水発電所を建設され、機器の設計製作に際し終始御鞭撻を賜つた東北電力株式会社の関係者各位に対し、深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 徳田、相木：送電技術、送電計画編 p. 1.3.48 (昭 25)
- (2) 電気学会：電気工学ハンドブック p. 1035 (1951)