

四国電力株式会社納

大森川発電所用 14,000 kVA/15,000 kW 発電電動機

The 14,000 kVA/15,000 kW Generator-Motor for the Omorigawa
Power Station, Shikoku Electric Power Co., Inc.

高橋 昭吉*
Shōkichi Takahashi

内 容 梗 概

わが国最初の可逆式揚水発電所である四国電力大森川発電所が完成した。ここに設置された 14,000 kVA/15,000 kW 発電電動機は同期電動機としてわが国最大のものであり、かつ可逆式であるため推力軸受に中心支持方式を採用し、なお起動トルク減少のため圧油送入構造となっている。また起動は制動巻線に生ずるトルクにより行う方式であるため、特に強大な制動巻線がとりつけてあるなど、幾多の新しい構造を長期にわたる実験をともにして盛り込んで完成したものである。本稿は揚水発電所用発電電動機の諸問題および大森川発電所用の発電電動機の構造、特性につき概述したものである。

1. 緒 言

最近各所において揚水発電所の計画がなされ、具体化しつつある気運にあるが、このときに当りわが国最初の可逆式揚水発電所である大森川発電所が、好調裡に運転に入ったことはまことに意義深い。可逆式は従来の横形ポンプ水車別置方式とはまったく方式を異にし、同一のランナを正逆転することにより発電および揚水を行わせるものであるため、直結される発電機も逆転して電動機として使用されることとなり、電動機としての起動および同期入れの問題、正逆転の問題など普通の発電機とは異なった、特性上、構造上の問題を有している。これらについては設計上特に考慮を払いあるいは実験により解明するなど、万全の手段を講じて運転の確実性を計った。大森川発電所用 14,000 kVA/15,000 kW 発電電動機は堅形同期電動機としてはわが国最大のものであり、これが最初の可逆式に使用されたということも興味深い。以下発電電動機につき概略を述べる。

2. 発電電動機の諸問題

2.1 容量の選定

単一仕様の発電機であれば、その設置される地点の落差、水量により出力が決定され、負荷により力率が決定されて発電機容量は一義的にきめられるのが常であるが、揚水発電所用発電電動機の容量は、その発電所の運営方法により経済的に選定されなければならない。すなわち揚水量、揚水可能時間、下流増を含めた発電量、揚水および発電のコストおよび年間使用時間などを考慮し、設備費も含めて検討されるべきである。ほかの要素で必然的に発電出力あるいは揚水時の入力規定される場合は問題ない。経済的にみた場合発電電動機自体としても発電機容量と電動機出力との関係に有利な点があ

る。いたずらに発電機容量、または電動機出力ばかり大きいのはそれぞれほかの使い方の場合不経済な機械となる。一般に発電機の場合には力率が 0.85~0.9 おくれ、電動機の場合 0.95~1.0 進みで使用される。機械の大きさはその発生熱量でほぼ規定されるゆえ固定子側は電機子抵抗損、鉄損などを、回転子側は界磁抵抗損を発電機、電動機の場合にそれぞれ合わせるように容量を決定すれば経済的であるが、前記のように使用される力率が異なるためこれは望みえない。したがって固定子側、回転子側のそれぞれのコストと発生熱量のバランスを考え経済的な容量の比を求めてみると、前記の力率の範囲では電動機出力 (kW) の値が発電機出力 (kVA) の値の 1.05~1.15 程度となる。

大森川発電所の場合にはこの点を考慮し出力が決定されたが、発電機出力 14,000 kVA 力率 0.9 に対し電動機出力 15,000 kW 力率 1.0 でありその比は 1.07 となっている。

2.2 起動の問題

これはポンプ運転時の起動に対する問題で、ヨーロッパにその例の多い水車ポンプ別置の揚水発電所においては起動はすべて水車で進行するため、発電電動機としては起動の任務を負う必要がない。しかし可逆式の場合にはほかに駆動源がない限り発電電動機自身により起動しなければならない。

起動について問題となる点は

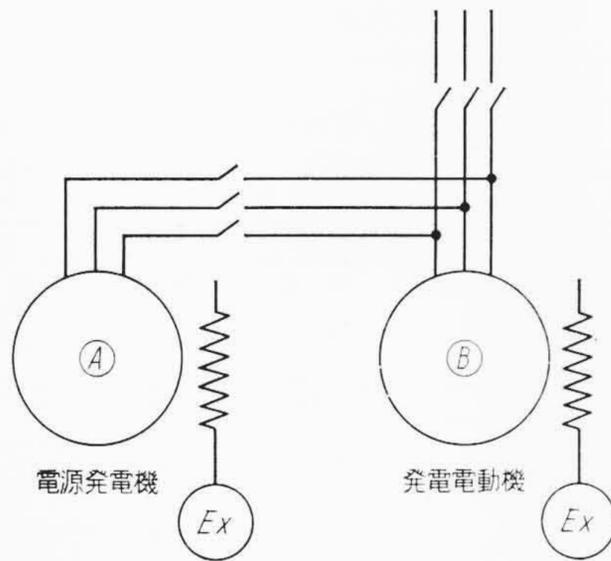
〔A〕 起動の方法

〔B〕 所要起動トルクの低減

である。

〔A〕は発電電動機をどのように電源より電力をとって起動させるかという問題であり、〔B〕は起動時のトルクをいかにして小さくして系統へのじょう乱を小さくし、かつ加速中の電力をへらして発電電動機に与える負担を軽くするかという問題である。

* 日立製作所日立工場



第1図 同期起動法

〔A〕 起動の方法

起動の方法としては

(a) 制動巻線による方法

- (i) 全電圧 (定格周波数) 印加
- (ii) 低電圧 (定格周波数) 印加
- (iii) 低電圧 (低周波数) 印加

(b) 同期起動法

がある。

(a)は磁極面に埋込まれた制動巻線によるトルクを利用するものでかご形誘導電動機と同じ原理にもとづくものである。制動巻線による場合は、発電電動機および可逆ポンプ水車を定格回転数まで上げるためのエネルギーの大部分をこの巻線で負担しなければならないため、普通の発電機のものよりはるかに強大で十分な熱容量をもったものとする必要があり、かつ起動に十分なトルクを発生させねばならず、その設計製作に当っては特に考慮を払う必要がある。(i)は定格電圧、定格周波数を発電電動機に印加し、起動させるもので、発生起動トルクは最大であり定格回転数にいたるまでの起動時間も最も小さく、同期入れも容易であるが、定格電圧を印加するため起動時の突入電流が大きく、したがって起動 kVA が大きくなり系統に対するじょう乱も大きい欠点がある。きわめて強力な系統に連結された発電所か、あるいは小容量のものに適用されるものである。カナダの Sir Adam Beck No. 2 発電所の 31,000 kVA/55,000 HP 機は本方式を採用している。これはすぐ隣りに 80,500kVA 14 台の大発電所があり条件は良好である。

一般に起動 kVA は発電電動機特性によりきまることが、その概略の値は次のようになる。電圧印加時の突入電流はほぼ次過渡インピーダンスによって制限され、次過渡インピーダンスの値は大略 35~15% であるから全電圧印加時の突入電流は定格電流の 295~670% となる。したがってこのときの起動 kVA は定格容量

(kVA) の 2.9~6.7 倍となるわけである。

上記のように全電圧印加の場合には非常に大きな起動 kVA を必要とし、系統に与えるじょう乱も少なくないため、所要起動トルクを低減し、これに見合うトルクを発生させるに十分なだけの電圧を印加する方法が考えられる。これが(ii)の方法である。ただし、印加電圧を下げると起動 kVA は電圧の二乗に比例して小さくなるが、発生起動トルクもほぼ二乗に比例して小さくなっていくため、極端に下げると起動不能の場合も起る。可能性がありかんばしくない。大体 50% 程度の低電圧が使用される。50%電圧印加のときの起動 kVA は定格容量の約 0.7~1.7 倍に低下する。低電圧源は起動用変圧器を設置するか、あるいは主変圧器の二次巻線に中間タップを設けるか、または主変圧器の二次巻線に中間タップを設ける案は電圧が限定される欠点があるが、ほかには系統電圧の変動または起動所要トルクに応じ任意にタップを切換える利点がある。アメリカの Hiwassee 発電所の 102,000 HP 機は主変圧器の中間タップを使用し、50% 電圧で起動しており、起動後 50%電圧のまま同期に入れ、その後 100%電圧に切換える方式を採用している⁽¹⁾。

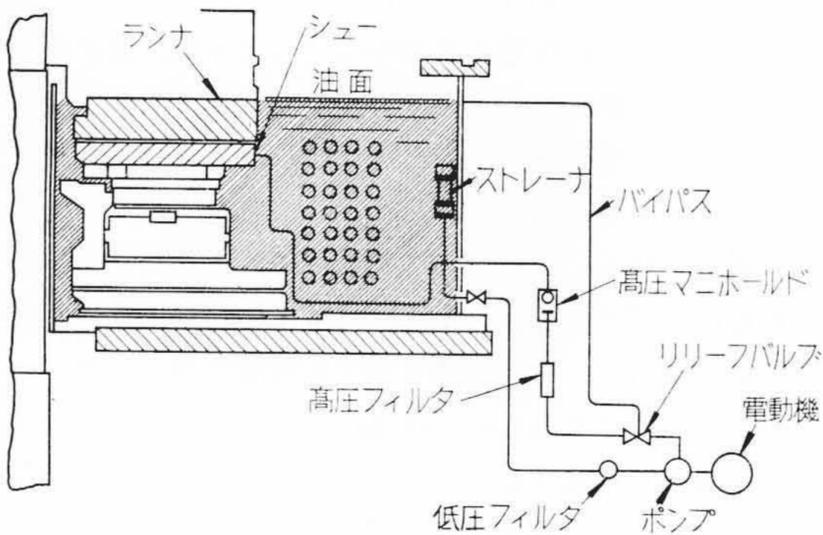
起動 kVA を低減させるために発電電動機の固定子線輪を分割巻線として使用する方式もある。

(iii)の方法は特殊で、専用の電源をもっている場合に適用される。専用の電源を速度調整し、低周波数低電圧において発電電動機を接続して起動させ、起動後は電源の周波数および電圧を定格まで上げてゆく方法である。

(b)は(iii)と同様専用の電源を必要とする方法である。第1図に示すように専用の発電機(A)と発電電動機(B)を停止時において接続しておき、それぞれ適当な励磁を与えておく。この状態より(A)を原動機(たとえば水車)により徐々に回転させて行くと、(A)に発生した電圧により電流が(B)に流れ込みトルクを発生して(B)が起動し、(A)と同期する。次に(A)の原動機を制御し回転を上げて行けば(B)も同じ周波数で回転が上って行きついでには同期速度にすることができる。この方法によれば系統や機器になんらの衝撃を与えることなく、かつ回転上昇後の同期投入の問題もなく大容量機においては最も好ましい方法である。同一発電所に2機以上設置される場合とか近くに発電所がある場合には考慮すべきと考える⁽²⁾。

〔B〕 所要起動トルクの低減

起動時の所要トルクを低減させることは、起動 kVA を減らしたり、発電電動機に与える負担を軽くする意味で非常に重要なことである。



第2図 圧油送入説明図

所要起動トルクは推力軸受の摩擦トルクが大部分である。この摩擦トルク T は下式で表わされる。

$$T = P \cdot \mu \cdot r$$

P : 起動時推力軸受にかかる荷重

μ : 起動時の摩擦係数

r : 推力軸受の平均半径

したがって T を減少させるには P, μ, r のいずれかを小さくすればよい。このうち r は常規運転時の全推力を考慮しなければならず、かつ、後述のように推力軸受が可逆運転に耐えねばならぬためあまり小さくすることはできない。 P, μ を減少させる方法は種々考案されているが、具体的なものは電磁石により回転子をつり上げる方法と推力軸受部に圧油を送入し、しゅう動面に油膜を形成させる方法である。前者は上部ブラケット下面に電磁石をとりつけ、回転子にこの電磁石と相対する面を作り、電磁石を励磁電源により励磁して面間に発生する吸引力を利用して回転子を上方に引張り推力軸受面にかかる荷重をへらす方法である。吸引力が面間距離の二乗にほぼ逆比例して増大するため、採用に当っては上部ブラケットの偏位量、面間距離を十分考慮する必要がある。またトルク低減には回転子重量の大部分をつり上げる必要があり、この場合かさ形機では上部ブラケットをつり上重量に耐える構造にしなければならないから、あまり経済的にならぬきらいがある。後者は高圧油ポンプを使用し、起動時高圧油を推力軸受に送り込む方式で、常規運転時推力軸受面の油が逆流しないように高圧逆流阻止弁を設けたものである。これは Hiwassee, Sir Adam Beck No. 2 PS など可逆式発電所に広く採用されている⁽³⁾。

第2図は圧油送入式の一例を示すもので、推力軸受油槽内に設けられたストレーナを通った油が高圧油ポンプに入り、高圧側フィルタを通過して各シューに送入される。

以上は発電電動機側であるが、ポンプ水車側にもト

第1表 可逆式揚水発電所と起動方法

国名	ブラジル	アメリカ	アメリカ	カナダ
発電所名	Pedreira	Flatiron	Hiwassee	Sir Adam Beck No. 2
電動機出力(HP)	13,100	13,000	102,000	55,000
形式	かさ形	普通形	かさ形	かさ形
回転数(rpm)	150	300	105.9	92.3
起動方式	制動巻線利用	同左	同左	同左
印加電圧(%)	50	100	50	100
変圧器結線	Δ - Y	Y - Y	Y - Y	Y - Y
電圧切換	同期前	ナシ	同期後	ナシ
同期引込時電圧(%)	100	100	50	100
トルク低減装置	水面押下 圧油挿入	同左	同左	ランナベン全閉 圧油挿入

ルク源がある。ポンプ水車は必然的にランナが水中にある。この水を排除して起動することは起動トルク低減とともに、加速中の入力を激減させるものでポンプ水車にとっては不可欠のことである。水の排除には圧縮空気を使用した水面押下が行われる。

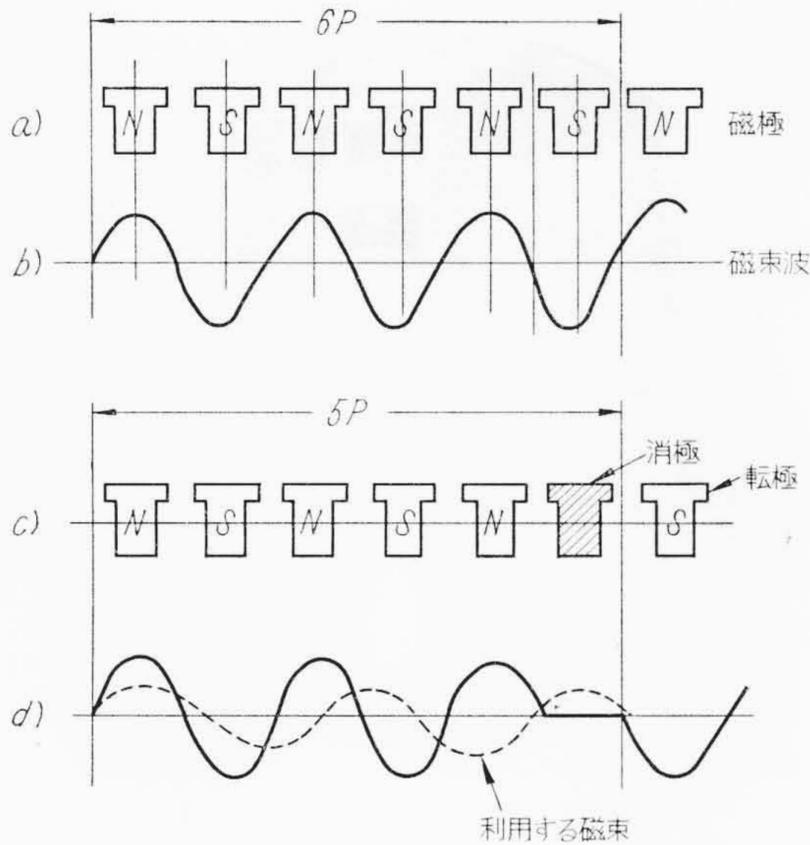
第1表に著名可逆式揚水発電所の起動方法を示す。

2.3 正逆転の問題

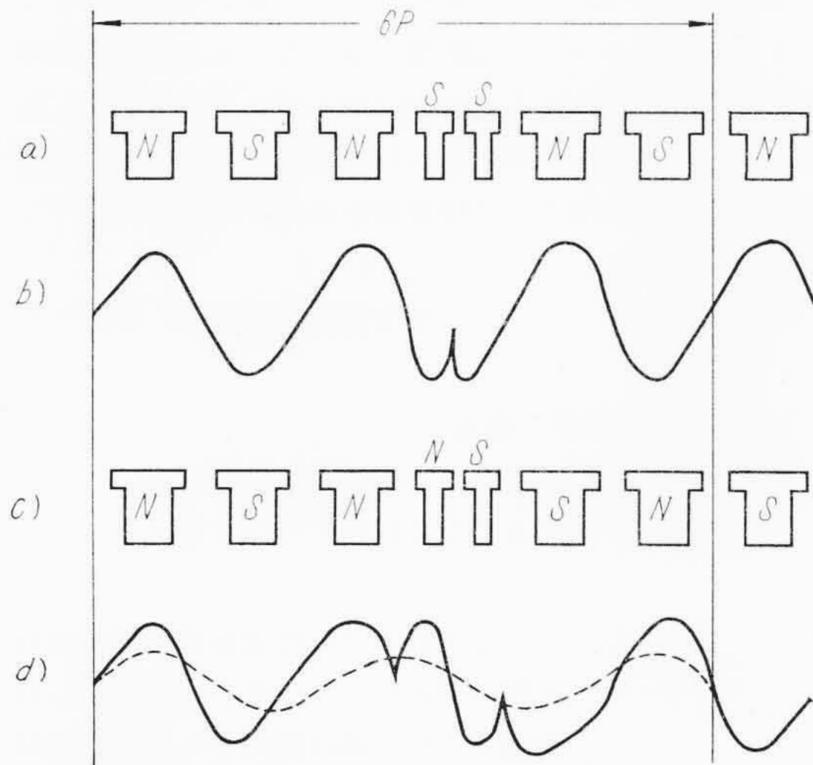
可逆式ポンプ水車に直結される発電電動機においては正逆転を行う必要がある。このため (a) 発電時と揚水時と相回転を逆にする開閉器を設ける、(b) 推力軸受および案内軸受は両回転に対し十分油膜が形成されるような構造とする、(c) ファンは両回転に対し同一効果をもたせるような構造とする、(d) 副励磁機には極性反転装置をつける、などの考慮を払わなければならない。このうち特に重要なものは (b) である。推力軸受としては、正逆転に加えてポンプ充水時の急激な水圧変動や、ポンプ運転時電源喪失による急激な正逆転の変化に十分耐えねばならない。

2.4 二速度の問題

水車運転時およびポンプ運転時においてそれぞれ良好な特性のもとに使用するため、発電電動機を同一周波数のもとで回転数をかえて使用しうる二速度の極数変換機とすることも考えられる。アメリカの Flatiron 発電所の 8,500 kVA 機において採用されている⁽³⁾。凸極形の機械において極数変換を行わせる方法としては第2~4図に示すように、正規極のみを使用し、転極あるいは消極するもの、小磁極を2個設置して行うもの、小磁極を6個使用するものなどがあり、その極間隔をかえあるいは極の形をかえるなども行って、できうる限り有効に極変換を行うるように考案されているが、正規機械に比較して磁束の利用率が悪くかつ多くの高調波磁束を含んでいるため機械が大きく効率も低下する欠点がある。また極数変換のために固定子および回転子巻線の接続替えをするための付属設備も必要であり経済上、保守上の欠点を有し



第3図 正規磁極のみの場合の極数変換

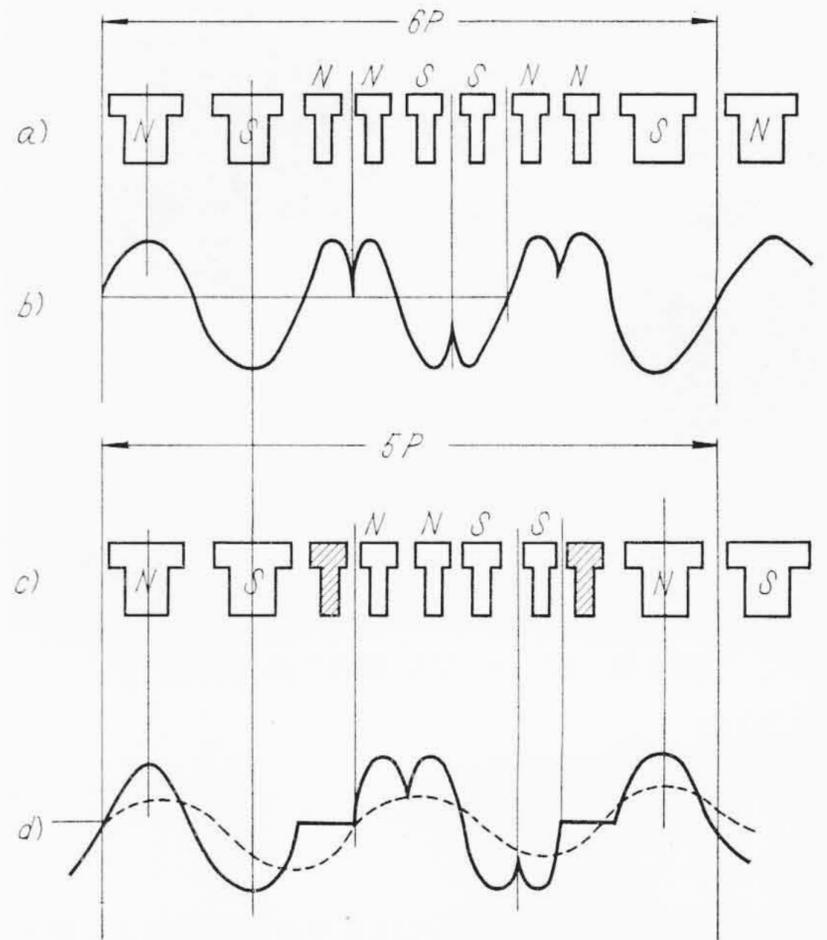


第4図 小磁極 2 個の場合の極数変換

ている。

日立製作所においては昭和28年より試作機により各種方法の諸特性の解明につとめてきており、最近12,000 kVA機について試作を行い大形機における諸特性、振動の問題などを確認し、今後計画される大形極数変換機に対する態勢をととのえつつある。前記のように極数変換機は経済上、保守上の欠点があるゆえ、その採用に当っては発電所運営方法を十分検討して決定されるべきと考える。

なお、揚水発電所のための専用電源となる水車発電機が得られる場合には極数変換を行わなくても、周波数制御により任意の回転数が得られ有効に運転することが可能である。



第5図 小磁極 6 個の場合の極数変換

大森川発電所の場合においても二速度機についての検討が行われたが、単一速度機でも十分所要の特性が得られることがわかったため二速度機は採用されなかった。

3. 大森川発電所用発電電動機

3.1 仕様

発電電動機

形式 VEFW-RD

堅軸閉鎖風道循環形空気冷却器付

凸極回転界磁式制動巻線付

出力 14,000 kVA/15,000 kW

電圧 11,000 V

電流 735 A/812 A

周波数 60~

回転数 400 rpm (電動機の場合逆転)

力率 0.9/1.0

主励磁機 100 kW 220 V

副励磁機 5 kW 110 V

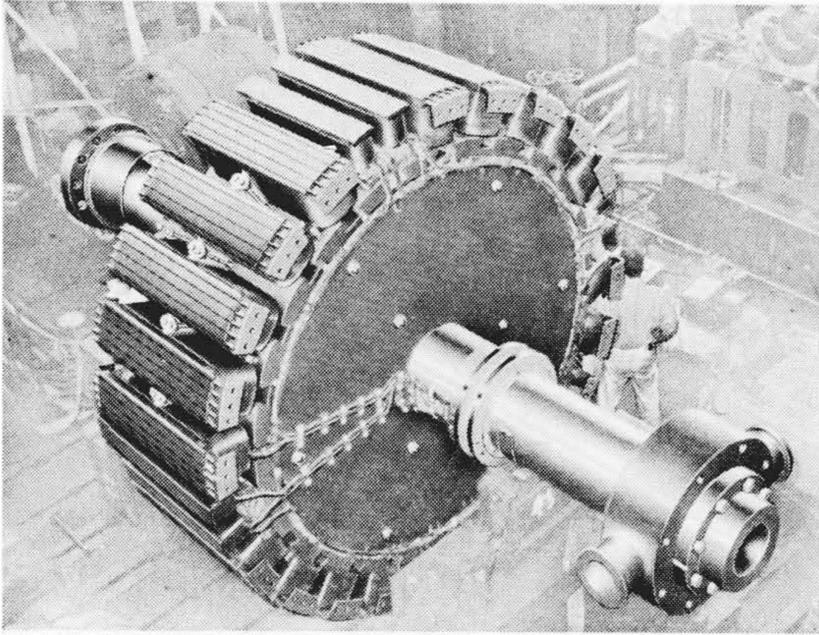
3.2 起動方法

大森川発電所の場合、連結される系統の点より、低電圧定格周波数による制動巻線起動法が採用された。低電圧源としては起動時の線路の電圧降下および主変圧器の電圧降下を考慮し、主変圧器の低圧側にタップ付起動変圧器を設置した。この仕様は下記のようなものである。

三相単巻変圧器

容量 8,550 kVA 5分定格

一次電圧 11,000 V

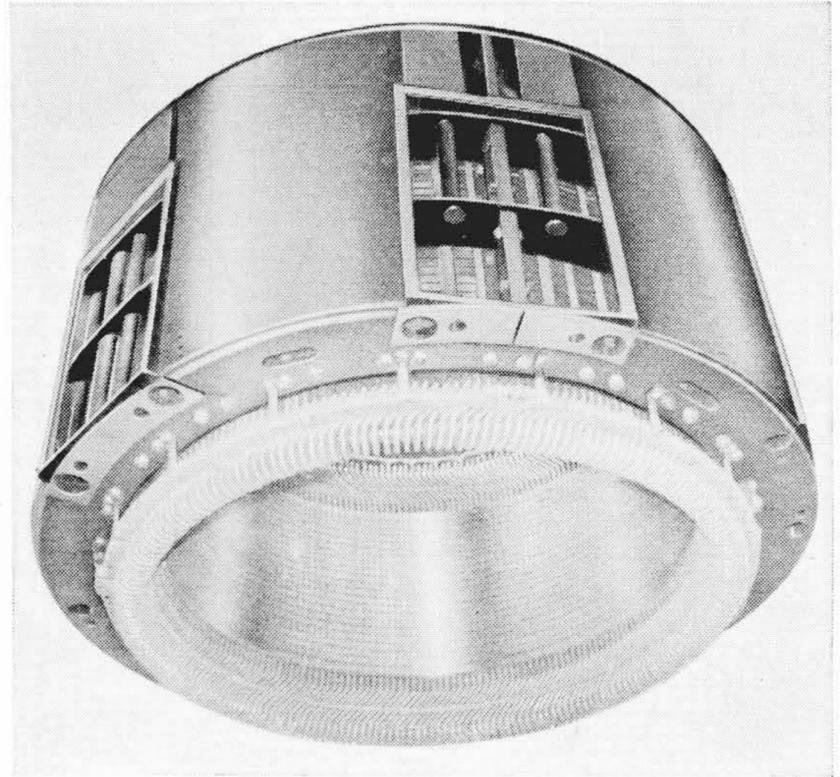


第6図 12,000 kVA 極数変換機回転子

二次電圧 7,470 V
6,880 V
6,280 V

起動トルク低減方法としては水車水面押下および推力軸受面に圧油送入の方法を採用している。

ポンプ起動はまず水面押下を行い、完了後高圧油ポンプ起動、圧油送入、起動開閉器投入(約50%電圧印加)、速度上昇、全電圧切換、同期引入、水面押下解除、負荷の順に行われる。同期引入の時機については低電圧のまま投入しついで全電圧に切換える方式もあるが、切換時間内における位相のずれの速度変化に問題がある。すなわち低電圧電源を切離した瞬間より電動機は入力を受けない減速を始める。この減速の途中で全電圧の電源に再投



第8図 固定子

入されるわけであるが、位相の合ったところで投入しないと大きなショックを電動機に与えるのみならず位相のずれの速度いかんによっては同期不能になるおそれもある。大森川発電所の場合これら詳細検討した結果、同期前に全電圧に切換えその後励磁を与えて同期引入を行う方式を採用した。

起動のシーケンスについては別稿制御関係に詳記されている。

3.3 発電電動機の構造

第7図は構造を示す発電電動機の断面である。以下構造のおもなる特長について述べる。

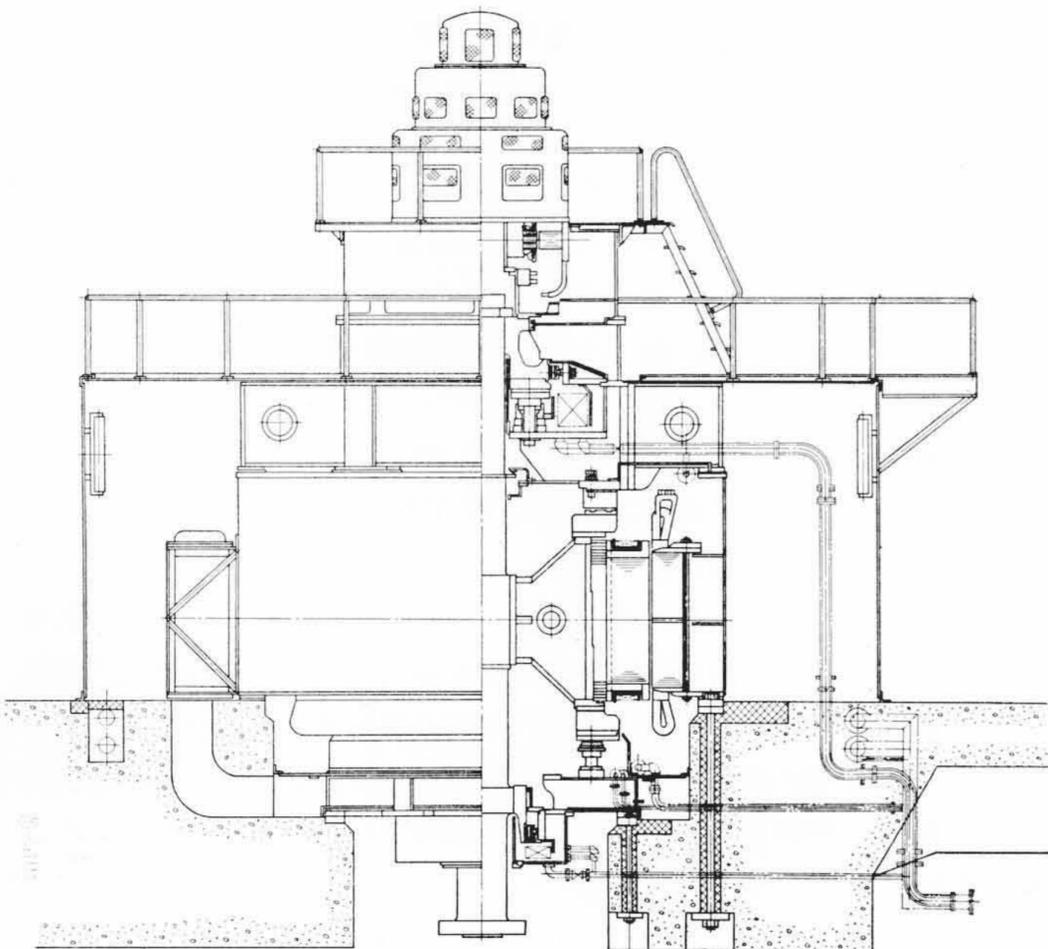
(a) 固定子

固定子わくは熔接鋼板製で輸送制限上四つ割となっている。固定子鉄心の線輪を入れる溝は開溝であるが起動特性も考慮して決定された。固定子線輪はきっこう形二層重巻で SLS ワニス使用のものである。絶縁強度は十分にとるとともに起動時の衝撃に十分耐えるよう保持法も特に入念に行われた。

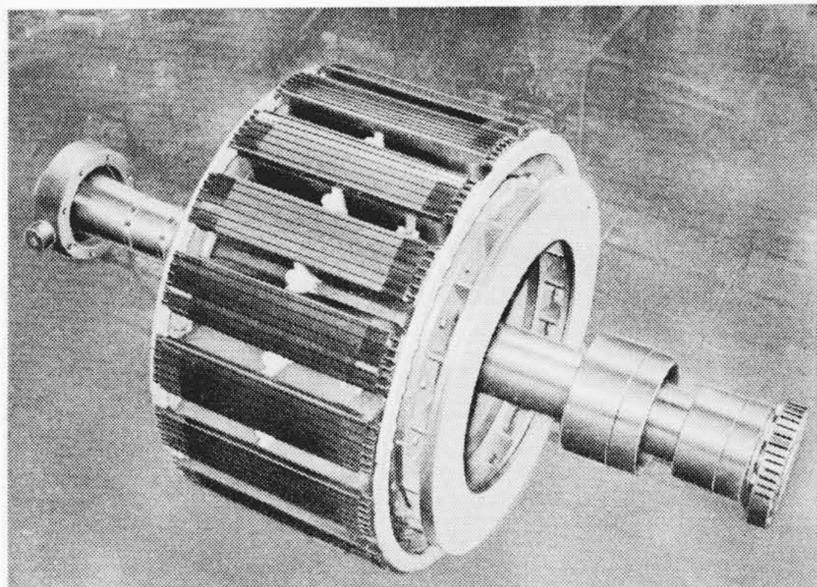
第8図に完成された固定子を示す。

(b) 回転子

回転子継鉄は厚鋼板製、輻鉄は熔接鋼板製とし、主軸に焼はめる構造となっている。磁極は積層式であるが、磁極頭にとりつけられる制動巻線は従来の発電機に使用されるものの約5倍の熱容量をもった強力なものとした。さらに十分なる起動トルクを発生させ、機械的にも強度の高いものという意味



第7図 14,000 kVA/15,000 kW 発電電動機組立図



第9図 回 転 子

からその材料は特に吟味し、特殊真中棒を採用した。構造は単一ダンパで両端を短絡片にろう付けし、さらにこれらを鍛鋼製リングで接続した完全ダンパとなっている。極間を可撓片で接続する方式もあるが、本機の場合輸送上寸法が問題ないこと、および十分なる熱容量をもたせてあるため起動時における温度上昇が低いことが確められたので、上記の構造を採用した。可撓片接続の場合の起動時の現象も別途確めてある。なお短絡片とリング間の接触についても接触面間に銀メッキを施して、接触抵抗による局部過熱を防止している。これらの結果工場試験において制動巻線部の温度上昇はきわめて低く満足すべき結果が得られた。

回転子上下部にとりつけられたファンは正逆転に対し、同一効果をもたせるようにラジアルファンとなっている。第9図は工場で作成した回転子である。

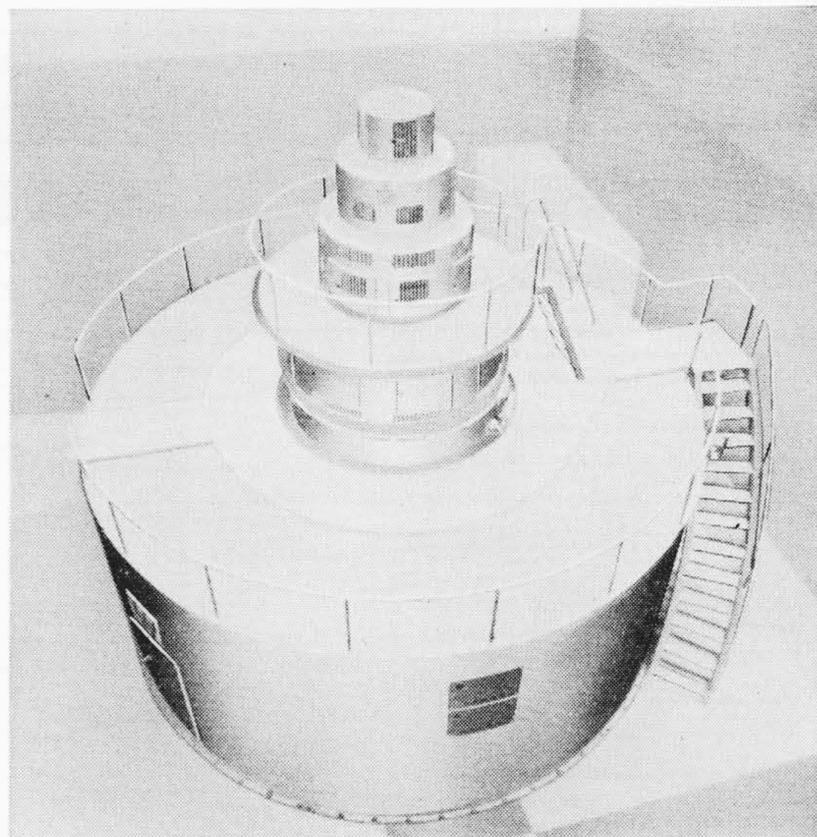
(c) 軸 受

推力軸受は可逆式であるため、キングスベリー形であるが中心支持方式となっている。中心支持方式については実物大モデルを製作し、長期にわたり回転数、軸受圧力、温度を変えて試験を行ないその正逆転に対する安全性を確かめた。また起動トルク低減のために各シュー共圧油送入口を設けかつ高圧油の逆止弁をとりつけてある。この送入口についても前記実験とともに寸法、形状、位置などを変え、正常運転時における孔の影響、起動時における摩擦トルク減少の効果を調べた結果採用したものである。圧油系統は高圧油ポンプ、フィルタ、逆止弁より成っている。

案内軸受も同様中心支持式のセグメント形で、上部案内軸受は推力軸受と同一油槽内に設置されている。正逆両回転に対しても十分油が入るよう、油溝の切りかたを考慮してある。

(d) そ の 他

上部ブラケット、下部ブラケットなどは従来の発電

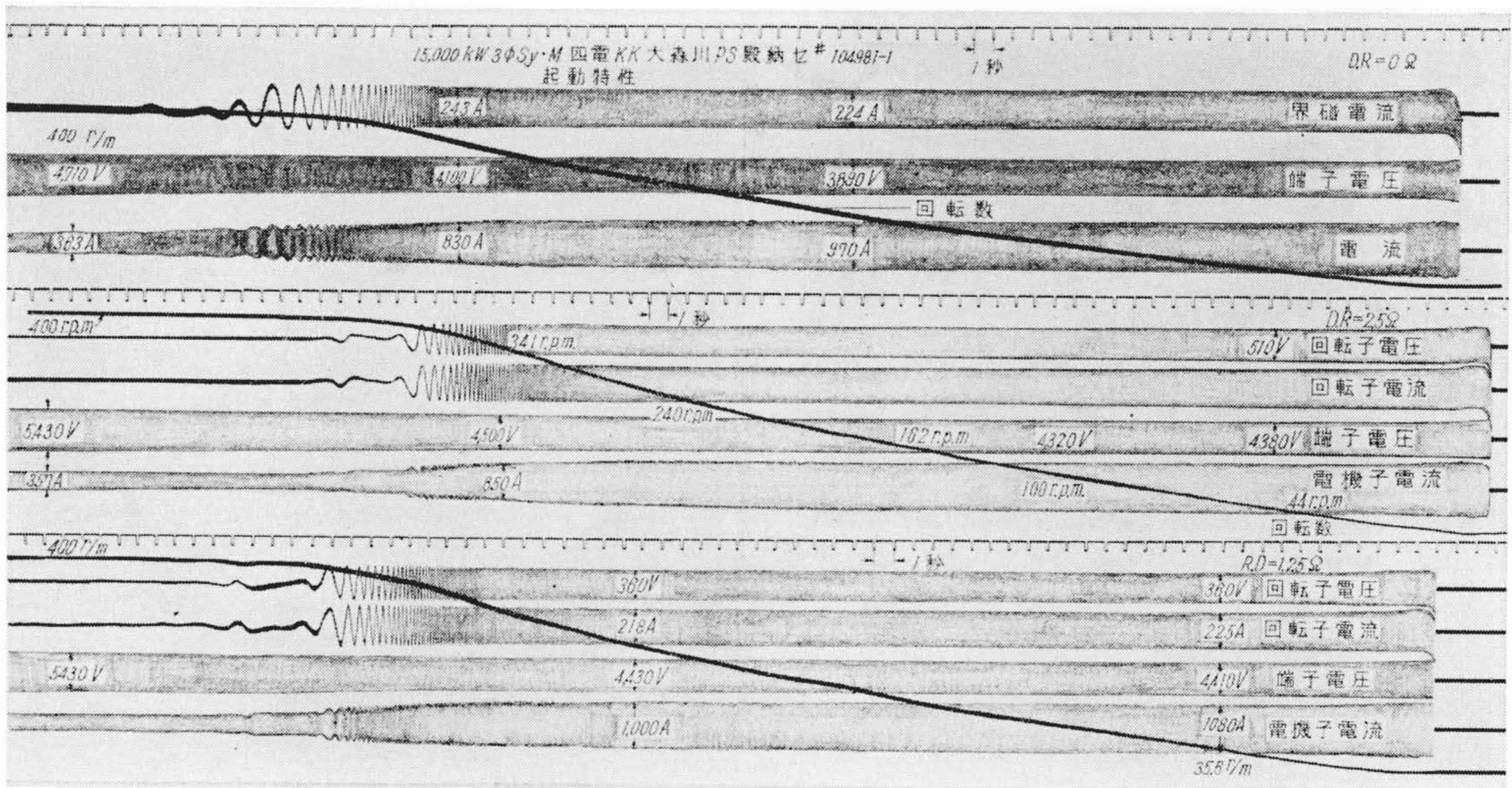


第10図 完成せる発電電動機

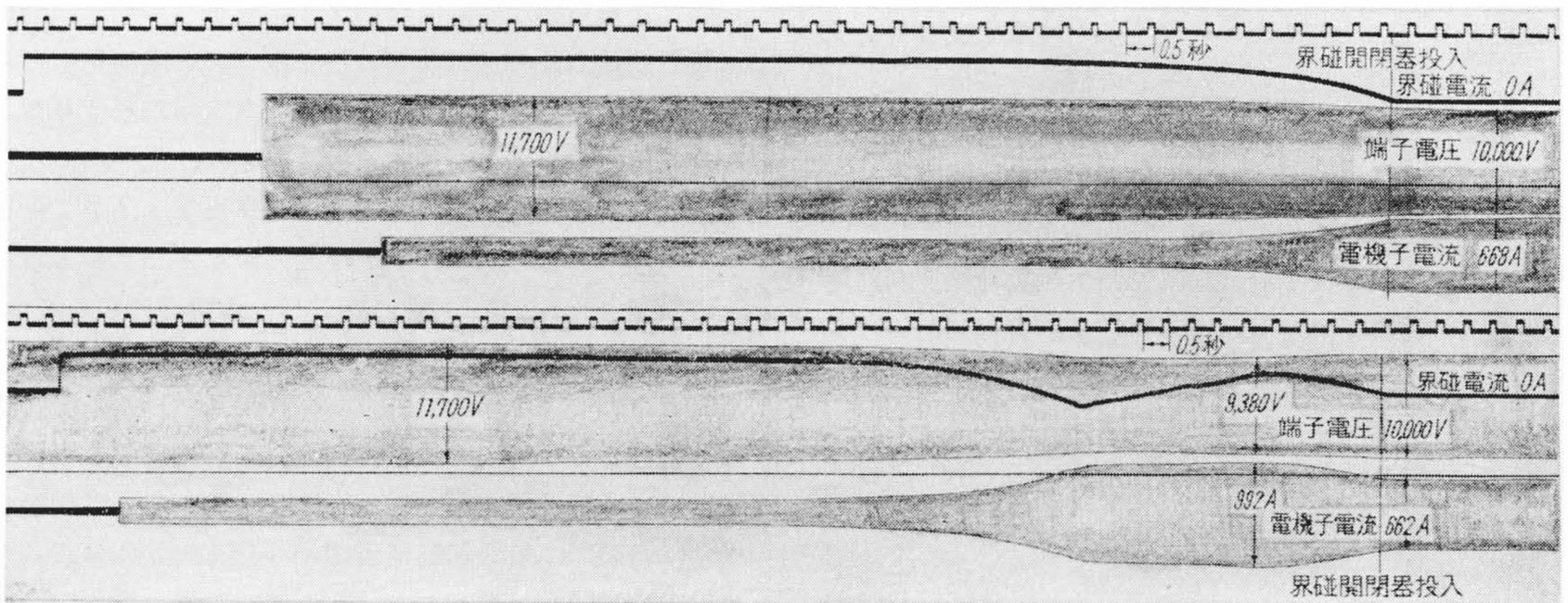
機となんら異なる点はないが、軸受よりの油もれ防止装置は新方式のラビリンスパッキングと圧力をもった空気によるものを採用している。空気冷却器は6個固定わくに対称にとりつける構造をとり、風道内には除湿器を設置している。高圧油ポンプセットはキュービクル内におさめ、FR、FSなどのキュービクルと並んで設置される。第10図に完成した本機の外観を示す。

3.4 発電電動機の特 性

発電電動機は工場内で組立てられたあと、電動機諸特性を含む詳細な工場試験が実施された。発電機の場合の諸特性は通常発電機と変るところはないが、電動機の場合については最低起動電圧測定、起動特性測定(起動電流、起動時間、起動トルク、トルク-速度曲線など)、起動失敗2回を考慮した制動巻線部温度上昇測定、同期引入特性、急速正逆転変化試験などが行われ種々興味ある結果が得られた。最低起動電圧測定は固定子線輪と界磁極との相対位置を少しずつ変えそれぞれに対する起動電圧を求めたもので50%以下の電圧でも十分起動することが確認された。同期引入特性では、本機はリアクショントルクが大きい励磁を与えなくても同期化してしまいが、磁極と正方向で同期に入っている場合、逆方向で入っている場合、それぞれ励磁を与えた場合の状態を調べたものである。急速正逆転試験はポンプ運転時の電源喪失を模擬して、軸受関係の安全性を確かめたもので、逆転している発電電動機を急速にとめ正転させたものである。これら試験の結果すべて満足すべき特性を有していることが実証された。第11、12図に工場試験におけるオンログラムの一部を示す。



第11図 起 動 試 験 結 果



第12図 同 期 化 試 験 結 果

4. 結 言

以上日立製作所において製作されたわが国最初の可逆式揚水発電所である四国電力株式会社大森川発電所用14,000 kVA/15,000 kW 発電電動機の概要をのべた。そのおもなるものは可逆式であるため推力軸受が中心支持であるとともに、起動トルク低減のために圧油送入機構を有していること、制動巻線起動方式であるため、制動巻線部は特に強力にしてあること、発電機特性はもちろん電動機特性もきわめて良好であることなどである。本機はすでに現地における発電、揚水とも各種試験を終了し、好調に運転中である。本発電所の完成は、最初の国

産可逆機という意味から各方面より大きな関心と期待がもたれていたものであり、これが完成はまことに喜ばしいことである。今後の揚水発電所開発に明るい前途を与えたものと信ずる。

終りに本機の製作に当り熱心にご鞭撻を賜った四国電力株式会社の関係者各位に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) L. R. Sellers & J. E. Kirkland: E. E 75, 263 (1956)
- (2) E. P. Smoot & J. E. Tillma: G. E. Rev. 55, 18 (1952)
- (3) H. H. Roth: A. C. Ele. Rev. 20 (1954)