

# 最近の水力発電設備の動向

## The General Trend of the Recent Hydraulic Power Plant Equipment

深 栖 俊 一\*      田 附      修\*      川 井 晴 雄\*\*  
 Shun'ichi Fukasu      Osamu Tatsuke      Haruo Kawai

### 内 容 梗 概

水力発電機器の内容は最近著しく改善され、揚水発電所などほかに建設されて、単位容量の増大および調整能力の向上のほかに建設・保守の経済化および利用効率の増昇はますます緊要化されている。日立製作所において独自の技術により開拓された新しい構想の機器および高度の自動制御装置なども各方面において実用化されるに至った。

水力発電機器の海外進出も逐次活発化し、その輸出範囲も拡張を続けられている。これらの概要について述べる。

### 1. 緒 言

最近の電力需要の急増に対処し、大容量火力発電所の建設とともに貯水池または調整池を有する大容量水力発電所の建設がますます要望され、これらの設備の増強に建設および運営の経済化と利用効率の増昇がますます重要視されている。一方、負荷の変動も次第に激しくなる傾向を有しており、揚水式発電所などの設置によりこれに十分速応しうる調整能力の向上があわせて大きな問題として採りあげられている。

水力発電機器の内容は最近著しく改善され、単位容量の増大、各形式の適用範囲の拡大とともに新しい構想の機器および高度の自動制御装置なども逐次実用化されるに至った。日立製作所はこのような水力機器の製作分野において独自の技術により、常に業界の先頭に立って、新技術の開拓または機器の性能向上などにたゆまざる研究と努力をつみ重ねて今日に至っている。

一方、海外進出に関しても積極的にその推進に努めてきたが、東南アジア、中近東、中南米などのほかに最近北米にも進出するに至った。

今回水力発電機器特集号の発刊に際しこれらの内容についてその概要を述べることにする。

### 2. 水 車

#### 2.1 形式および容量の推移

水力発電機器の単位容量はこれに関連する土木もしくはそのほかの各関連技術の向上とともに、さらに増大化の傾向を示している。従前水車の容量は羽根車を極力鉄道の輸制限内にて一体鋳造にて製作する限度をもって検討されていたが、最近フランス形ポンプ水車の進展とともに分割構造の羽根車を採用する段階となるに至った。また大容量火力発電所の建設とともに水力発電にて次第に尖頭負荷を分担する傾向にあり、運営上よりも単位容量の増大化の必要性は今後ますます促進されることが予期されている。第1表に日立製作所における各水車の製作記録を掲げる。

機器の単位容量の増大は建設および運営の経済化を計るために設置台数を減少せしめることと相伴なって当然企図されることであるが、わが国のように年間を通じ河川流量または貯水池および調整池より流下する水量の変動の激しいところにあつては、単機容量の増大とともに各負荷における効率を極力高めることも必要である。このような目的に沿って水車の形式および構造に積極的に新しい構想の採用を推進してきたが、これらに関する最近の例を次に示す。

\* 日立製作所日立工場  
 \*\* 日立製作所国分工場

第1表(a) ペルトン水車 (\*建設中)

納先	発電所名	kW	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	N <sub>s</sub> (m-kW)	形式	台数	運転開始
関西電力	黒部川第四	98,400	580	19.4	(300)/360	(13.5)/16.6	P <sub>1</sub> N <sub>6</sub> -V	1	*1962
ビルマ	バルーチヤン 第2	29,840	423.96	8.1	428.5	19.3	2P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	3	1960
四国電力	松尾川第二	22,200	394	6.45	450	19.5	2P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	1	1953
四国電力	松尾川第一	21,400	379	6.45	450	19.85	2P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	1	1953
北陸電力	真川第二	17,500	550	3.7	514	21.7	P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	1	—
中華民国	霧社第一	16,500	275	6.95	300	17.2	2P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	1	1940
北海道電力	然別第一	14,000	263.3	6.04	375	20.55	2P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	1	1953

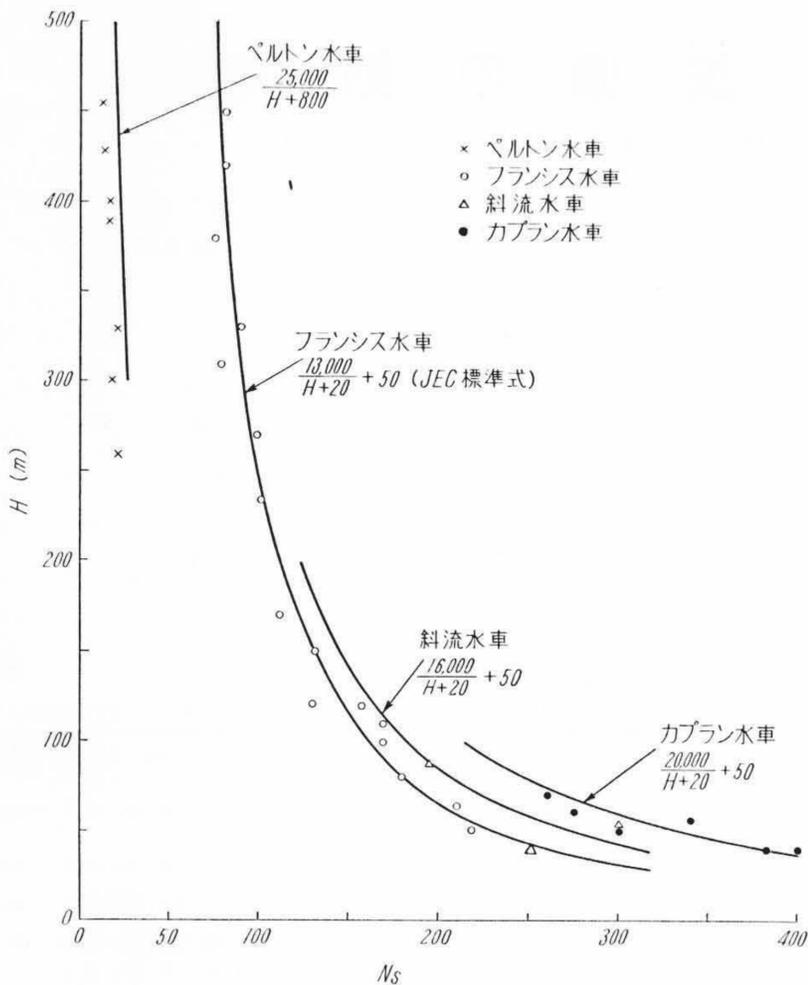
第1表(b) フランス水車 (\*建設中)

納先	発電所名	kW	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	N <sub>s</sub> (m-kV)	形式	台数	運転開始
電源開発	御 母 衣	137,500	200.0	76.6	225	116.9	FSS-V	2	1961
インド	バークラ	112,000	156	102.3	167	140.5	FSS-V	5	1960
イラン	ズ	103,600	180.0	64.5	250	134.2	FSS-V	2	*1962
電源開発	佐 久 間	100,000	135	82.2	167/200	126.9	FSS-V	2/4	1955
中華民国	松 花 江	85,000	69	141.2	125	193	FSS-V	2	1944
タイ	バミホール	84,700	123.2	75.8	150	127.2	FSS-V	2	*1962
関西電力	丸 山	70,000	80.7	96.0	164	181.8	FSS-V	1/2	1954
アメリカ	クリアクリーク	69,700	204.0	48.3	225	105.5	FSS-V	2	*1962
九州電力	諸 塚	54,000	226.0	27.06	300	80.6	FSS-V	1	1960
中国電力	滝 山 川	53,200	314.4	19.43	450	79.1	FSS-V	1	1959
北陸電力	神通川 第一	48,000	65	81.3	172	207	FSS-V	2	1954

第1表(c) カプラン水車 (\*建設中)

納先	発電所名	kW	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	N <sub>s</sub> (m-kW)	形式	台数	運転開始
電源開発	大 鳥	100,000	51.0	221.5	125	297	PMS-V	1	*1963
インド	ヒラクッド第一	38,800	36.3	166.7	150	491	PMS-V	2	*1961
東北電力	本 名	30,000	36.1	92.9	167	334	PMS-V	3	1953
インド	ガンダール	29,840	32.8	114.7	167	364	PFS-V	1	*1961
インド	コ ト ラ	29,840	32.8	114.7	167	364	PFS-V	1	*1961
東北電力	片 門	22,500	20.0	120.0	125	460	PFS-V	2/3	1953
韓 国	清 平	21,000	26.5	91.0	164	417	PMS-V	2	1943

(落差)	(形式)	(構造)	(実施例)
(普通形水車)			
高落差	ペルトン水車	立軸6ノズル	黒部川第四
中落差	フランス水車	横軸両掛2輪	桑 島
中落差	斜流水車	可動翼	新大倉
中落差	カプラン水車	可動翼(8枚羽根)	殿山, 市房
低落差	筒形水車	可動翼(直結式)	茂 庭
(可逆形揚水式設備)			
中落差	フランス形	可動案内羽根	大森川ほか
中落差	斜流形	可動案内羽根(可動翼)	穴内川
(直結形揚水式設備)			
高落差	フランス形	横軸(停止時切替)	沼 沢 沼
高落差	フランス形	立軸(停止時切替)	諸 塚



第1図 Ns 限界曲線

これらの各形式の水車の落差に対する比速度  $N_s$  の適用限界は技術の進歩とともに次第に増昇の傾向にあるが、第1図に最近の傾向を掲げる。図中の各水車の  $N_s$  の限界はそれぞれ下式にて例示される数値を示す。

- ペルトン水車  $N_s = 25,000 / (H + 800)$
- フランス水車  $N_s = 13,000 / (H + 20) + 50^{(1)}$
- 可動翼斜流水車  $N_s = 16,000 / (H + 20) + 50$
- カプラン水車  $N_s = 20,000 / (H + 20) + 50$

ペルトン水車の場合には一般に相隣るノズル間の狭角により最も制約を受けるため、ノズル数により  $N_s$  の適用範囲が相違する。したがって有効落差の高い領域ではノズル数の少ない横軸形が多く採用され、立軸形の4本または6本ノズルの場合はこの傾向より  $N_s$  は通常低い値が採用される。

フランス水車に関しては、東北電力株式会社八久和、中国電力株式会社滝山川発電所など各水車の高落差低  $N_s$  領域における良好なる運転実績によりさらに高落差領域への進出が期待されている。

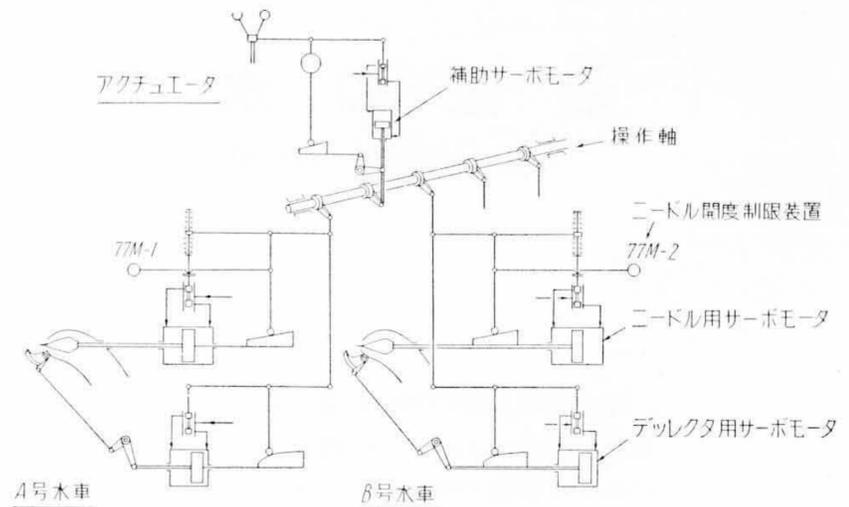
可動翼斜流水車は、今回東北電力株式会社新大倉発電所納水車の模型試験結果により、カプラン水車より高い落差の領域においてすぐれた性能が得られ、今後の進展が期待されているが、その  $N_s$  の限界は上式のとおりフランス水車とカプラン水車の中間に設定される。

カプラン水車に関しては北海道電力株式会社岩知志、関西電力株式会社殿山および熊本県電気局市房など各発電所用水車の優秀な運転実績より今後さらに高落差領域への進出が期待される。また一方筒形水車の開発により超低落差領域において十分経済的に高性能の水車を設置しうるようになってきた。したがってカプラン水車の  $N_s$  の限界もなおいっそう上昇せしめられるものと考えられる。

2.2 利用効率の向上

最近のごとく負荷が急速に増大しその変動状況も次第に激しくなりつつあるとき、水力発電の分担すべき範囲は基底負荷より尖頭負荷に逐次置換されつつあるが、水車の性能はこれらの状況に即応して種々の改善が施されている。

すなわち製作容量の増大、試作研究または設計製作技術の向上な



第2図 ペルトン水車高能率運転装置

第2表 高能率運転装置例

水車	対象	装置	適用例
ペルトン水車	負荷	針弁開閉切替え	然別, 松尾川, 白根, 黒四
フランス水車	負荷	横軸両輪切替え	桑島
斜流水車	水位	羽根角度調整	新大倉
カプラン水車	上水位-放水位 放水位	羽根角度調整	本名, 上野尻, 鷹泊
各水車	負荷	運転台数自動切替	上野尻
フランスポンプ水車	ポンプ時水位	案内羽根開度調整	大森川, 畑窪第一
斜流ポンプ水車	ポンプ時水位	羽根角度調整	穴内川

どにより水車の最高効率は各形式とも引続き増昇の傾向にある。

また各負荷における効率に関しては前述のとおり新しい形式構造の水車の採用のほか、運転中に変動する上水位、放水位または系統負荷に応じ各負荷にて高い効率を維持せしめるため独特の高能率運転装置をそれぞれの目的に応じ多数創案し、各所の水車にてその実現に努めてきた。

たとえば1台の発電機に2台の水車が直結されている様な機械を(例2 P<sub>1</sub>N<sub>2</sub>-H形横軸ペルトン水車)高効率で運転するには、約1/2負荷までは1台運転とし、それ以上の負荷では2台運転とするのが最も好ましいので、1台運転中に予定の負荷になれば自動的に2台運転となって、しかも負荷を平衡に分担するように切り替わり、また2台運転中に負荷が約1/2になれば1台が全負荷をとってほかの1台は全閉となるようにする。もし数個の針弁を有するペルトン水車においては各負荷に対してそれぞれの切換開度を規定しておけば、いかなる負荷に対しても常に高能率の運転を行うことができる。第2図はその一例である。

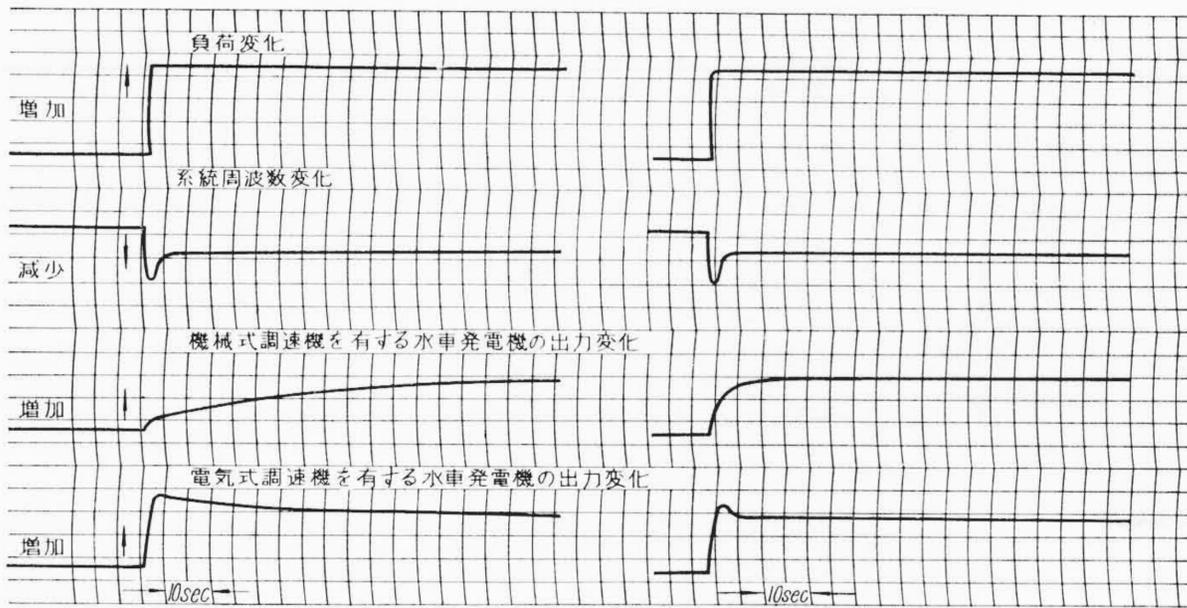
また落差変化の激しい発電所のカプラン水車においては、上水位の変化あるいは放水位の変化を検出して有効落差に応じてランナ羽根角度を高効率の関係となるように、自動的に変えている。また変落差発電所のフランス水車においては配電盤にて「高能率運転」を指令すればいかなる落差にも常に対応して最高効率の開度となるような運転方式も採用されている。

これらの使用目的と実施例を第2表に掲げる。

2.3 系統電力の良質化

最近の調速機は感度ならびに操作性能が向上し、また構造についても保守点検の容易を図り、従前のものと比較するとはるかにすぐれたものとなっているが、特に負荷の急変による周波数の変化が極力僅少となるように、調速機サーボモータの応動速度を敏速にするいわゆる速応性の高いものとして、安定した周波数が得られるように改善されている。さらに電気ガバナの出現によって速応性をさらに増加するようになり、一方レーシングやハンチングの防止対策を含めた考慮が払われている。

一例として調速機の復原用ダッシュポットの強弱によってサーボモータの速応性がいかに異なるかについて、アナログ計算機により



(a) 機械式调速機		(b) 電気式调速機	
過渡速度垂下率	30%	過渡速度垂下率	0
弾性復原の時定数	20 s	弾性復原の時定数	0
速度垂下率	3%	速度垂下率	3%
過渡速度垂下率	8%	過渡速度垂下率	8%
弾性復原の時定数	1 s	弾性復原の時定数	1 s
速度垂下率	3%	速度垂下率	3%

第3図 同一系統中の水力的条件および容量の等しい水車発電機に設置された機械式调速機および電気式调速機の過渡応答

解析した結果は第3図に示すとおりその差がはなはだしいことがわかるが、並列運転中はダッシュポットを除外することにより第3図(b)のような速応性をもって動作するため、当然系統周波数の安定が得られることになる。

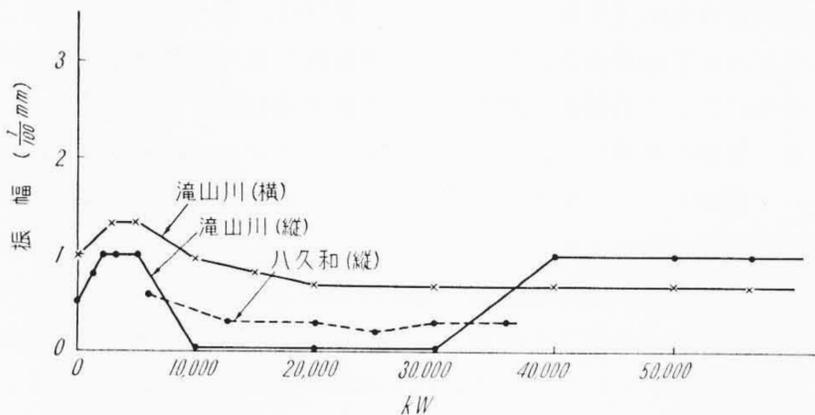
### 2.4 高落差設備

東京電力株式会社白根発電所にてわが国に初めて立軸4ノズルペルトン水車が採用されて以来、横軸構造にまさる数多くの特長が認められ、その後引き続き各所に立軸形が設けられたが、今回さらに立軸6ノズル水車が関西電力株式会社黒部川第四発電所に設けられるに至った。

6ノズル構造については、相隣る針弁の角度が60度であるため、噴射水の相互干渉を起さないようバケットの設計に十分な配慮を要し、また各針弁より出される噴射水が相等しく配分されることが特に必要で、これらに関しては日立水力実験室における高落差精密測

第3表 高落差フランシス水車 (\*建設中)

納先	発電所名	kW	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	N <sub>s</sub> (m-kW)	形式	台数	運転開始
韓国	江界第一	46,000	380	13.9	514	66	FSS-V	3	—
中国電力	滝山川	53,200	314.4	19.43	450	84	FSS-V	1	1959
四国電力	広野	35,800	292.3	14.0	514	83.2	FSS-V	1	1960
中国電力	潮	20,500	278.65	8.25	600	76.1	FSS-V	2	1956
北陸電力	新中地山	40,200	270.2	16.98	450	84	FSS-V	2	1959
東北電力	八久和	32,000	276.7	13.4	500	86.9	FSS-V	2	1956
鳥取県	小鹿第二	5,750	249.88	2.6	900	69	FSS-V	1	1958
インド	パニール	17,900	237.5	8.55	600	87.4	FSS-V	2	*1962



第4図 高落差フランシス水車のメタルケースカバー上部の振動例

定装置により非常にくわしく調査され、バケット形状の仕上げ精度の向上とあいまってその総合模型試験の結果高い効率をうる事ができた。

このほかわが国において高落差領域に第3表のとおりフランシス水車が数多く採用されるに至った。これをペルトン水車と比較すれば、軽負荷にては若干効率が低下するが、変落差または放水位の変動の大きな地点では有利となる。また建設費については水圧鉄管のかなり長い場合にはペルトン水車のほうが有利となる。

従前高落差フランシス水車の軽負荷時には一般に騒音または振動などを伴ないがちであったが、八久和、滝山川、新中地山などにはこの点は著しく改善された。第4図にその運転成績例を示す。

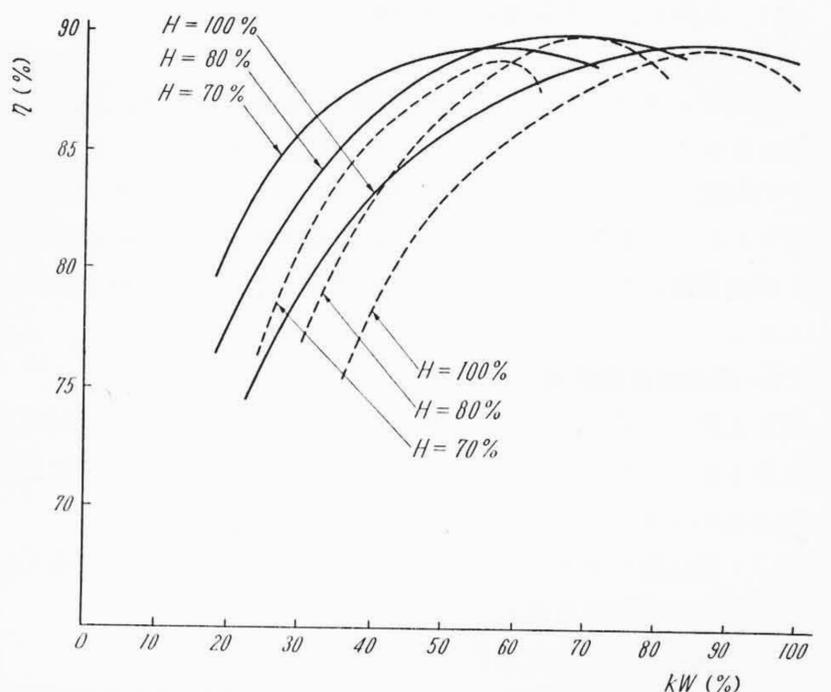
### 2.5 変落差用水車の発達

わが国の河川は一般に年間を通じて流量の変動が激しく、また設置台数が少ない

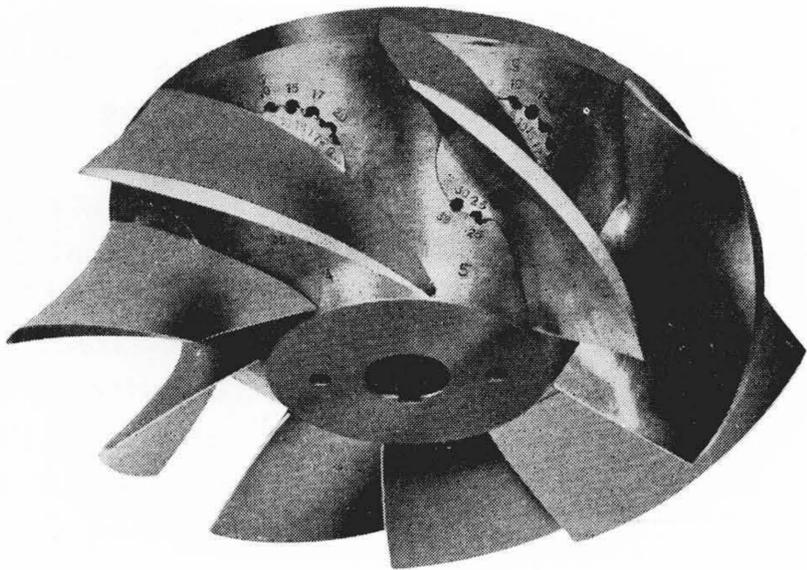
ため、軽負荷で運転される場合が一般に多いように見受けられる。また貯水池もしくは調整池も十分な容量がある場合が少なく、落差の変動も広範囲となる場合が多い。これらの立地条件によりわが国においては第4表のとおりカプラン水車の中落差領域への適用例が数多く実現され、優秀な実績を収めている。なおこれらのカプラン水車に関しては羽根車の多数の試作による設計改善、東北大学高速流体力学研究所沼知教授による二次元翼列基礎試験および材料の基礎試験による改善などに努力した結果、北海道電力株式会社蘭越、東北電力株式会社片門発電所など各水車を始めとし、昭和21年

第4表 高落差斜流およびカプラン水車 (\*建設中)

納先	発電所名	kW	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	N (rpm)	N <sub>s</sub> (m-kW)	形式	台数	運転開始
東北電力	新大倉	5,500	96.9	6.5	750	202	DMS-V	1	*1961
熊本県	市房第一	15,800	73.35	24.75	400	274	PMS-V	1	1960
関西電力	殿山	17,000	71.0	27.5	400	258	PMS-V	1	1957
北海道電力	岩知志	14,500	59.0	28.2	375	276	PMS-V	1	1958
中部電力	姫川第三	13,000	55.0	26.5	333/400	254/304	PMS-V	1	1955
インド	ヒラックド第一	38,800	36.3	166.7	150	491	PMS-V	2	1961
東北電力	本名	30,000	36.1	92.9	167	334	PMS-V	3	1953



(実線は斜流水車 N<sub>s</sub>=200 m-kW, 点線はフランシス水車 N<sub>s</sub>=159 m-kW を示す)  
第5図 可動翼斜流水車とフランシス水車の効率比較例



第6図 斜流水車模型羽根車例

以降にて製作された各カプラン水車はいずれも運転以来羽根裏面に空所発生による腐食をまだ起こしていないことは特記されるべき事項である。

またカプラン水車よりさらに高い落差の領域に可動翼斜流水車が東北電力株式会社新大倉発電所において、他国に先がけて実現されることとなった。本水車の計画当初におけるフランス水車との効率の比較例を第5図に掲げる。本水車の模型試験結果は効率ならびに空所発生限界などの特性に関し、予期以上のきわめて高い性能が確認された。これが模型試験に使用された羽根車の一例を第6図に示す。なお可動翼斜流水車の羽根を動かすサーボモータの構造としては

- (1) 回転式サーボモータによるもの
- (2) 上下動式サーボモータによるもの

の両者に大別される。案内羽根は斜形と立形の両者に大別されるが一般に立形のほうが製作保守に容易である。新大倉発電所水車に関してはこれらの利害得失を長期間にわたって詳細に検討された結果、立形案内羽根および上下動サーボモータの構造が採用されることとなった。

### 2.6 低落差領域の開発

低落差領域においてカプラン水車のほかに筒形水車が採用されて以来、有効落差4~5m程度までは十分経済的に開発可能とみなされるに至った。その効率も従来のカプラン水車に比し一般に良好である。これら構造としては落差または容量などにより種々の形式構造が採用されているが、

- (1) 水車および発電機を直結したもの
- (2) 水車および発電機間に増速歯車を設けたもの

に大別される。

増速歯車を設けることは一見発電機の回転数を高めて、全体の建設費を経済的ならしめるようであるが、構造を複雑ならしめることなどの問題との利害得失は個々の例について十分検討を要するものと考えられる。東北電力株式会社茂庭発電所用 1,550 kW 筒形水車および発電機は当初にこれらの諸点を比較の上直結形が採用されることとなった。

### 2.7 揚水式発電設備

揚水式発電設備を設けられる地点としては、その地理的状況に応じ大体下記の3形式に大別されるが、このような例が逐次具体化され新計画が各所で進められている。

- (1) 自流揚水併用式 (大森川, 諸塚, 畑薙第一, 穴内川, 王滝川)
- (2) 季節調整用揚水式 (沼沢沼)
- (3) 週間または昼夜調整用揚水式

揚水式設備には実用上別置形, 直結形および兼用形に大別され、わが国にては当初高落差領域に大容量の直結形として東北電力株式

第5表 揚水式水力設備

(⊕ 直結形, ※ 兼用形, \* 建設中)

納先	発電所名		kW	m	rpm	形式	台数	運転開始
東北電力	沼沢沼	T	23,000	215.5~183.5	500/600	⊕FDS-H DMS-CH	2	1951
		P	21,000	226.2~194.8	500			
九州電力	諸塚	T	54,000	234~222	300	⊕FSS-V CM-CV	1	1960
		P	55,000	245.9~235.5	300			
四国電力	大森川	T	12,100	118~74.4	400	※FRSS-V	1	1959
		P	14,250	127.8~92	400			
中部電力	畑薙第一	T	45,200	101.8~50.4	200	※FRSS-V	1	*1962
		P	34,800	103.2~57	200			
四国電力	穴内川	T	13,500	69.5~29	360	※DRMS-V	1	*1963
		P	12,200	75~40	360			
関西電力	王滝川	T	36,000	136~88	227/231	※FRSS-V	1	*1962
		P	36,000	143~114	277			

会社沼沢沼発電所が設けられて以来、最近兼用形の採用とともに中落差領域には大体この形式が広く採用されるに至った。日立製作所はわが国におけるこれらの各所の揚水式設備の製作に関し独特の総合技術を遺憾なく発揮している。

#### 2.7.1 ポンプ直結形揚水式設備

横軸構造および立軸構造に大別され、第5表のように東北電力株式会社沼沢沼および九州電力株式会社諸塚発電所はそれぞれその適例であるが、一般にポンプを直結するため回転数はポンプ側の比速度の許容限度に制限を受けることが多く、水車側よりみれば多少低いNsが採用されるが、両者はそれぞれ別個の設計により最高の性能を発揮せしめることが可能である。

ポンプの起動方式は使用状況により種々の形式が採用されているが、沼沢沼発電所および諸塚発電所はいずれも停止時切替式が採用されている。沼沢沼発電所は当初季節ごとに切替え運転を行うよう計画されたため、移動式カップリングボルトによる軸接手が採用されたが、実際には昼夜間負荷調整も行うこととなり、最近ではポンプを直結のまま水車運転をされている。諸塚発電所はこの切替えをさらに短時間に行うため移動式歯車が採用され、歯車の投入にはポンプ側に微速度回転装置が設けられている。

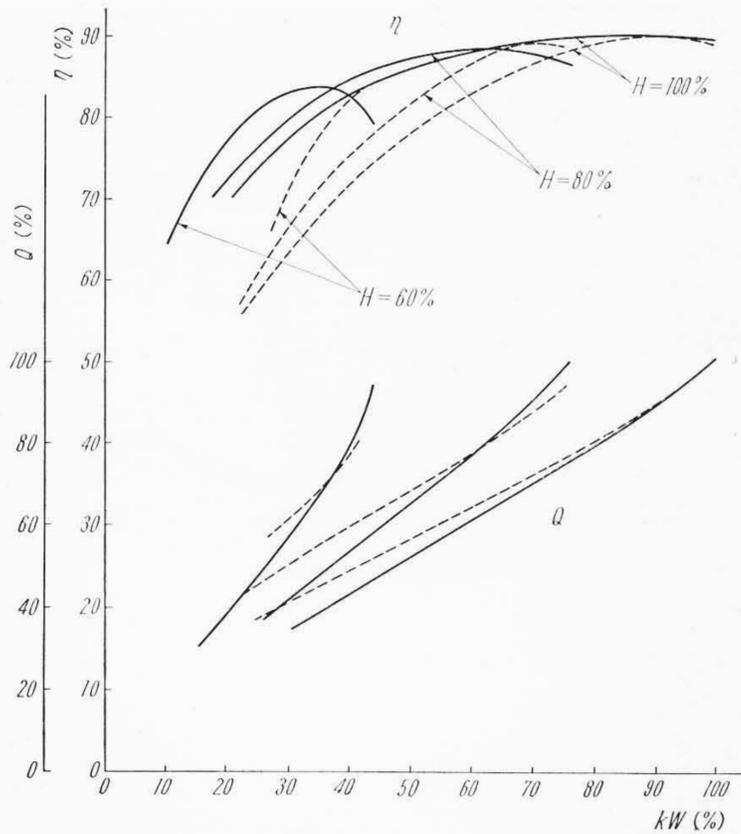
#### 2.7.2 ポンプ水車兼用形

揚水式設備としてポンプ水車は従前よりよく知られているところであるが、昨年度に四国電力株式会社大森川発電所にて運転を始めて以来、その優秀な運転実績と詳細の特性がわが国にて広く各方面に認識され、各所にてこれが建設計画の促進に大きな機運を与えるに至った。ポンプ水車の形式としてはそれぞれの適用落差または揚程に応じ、フランス形, 斜流形または軸流形が採用される。

大森川発電所用ポンプ水車はフランス形として第5表の仕様を有し、計画当初四国電力株式会社との協同研究により年間の自流分および揚水分による発生電力の合計を最大にするような水車とポンプの特性を有し、しかも大幅の変揚程を有する地点に対し安定なポンプ性能を有する羽根車を求めるため、多数の羽根車を試作し長い期間にわたって努力が重ねられた。

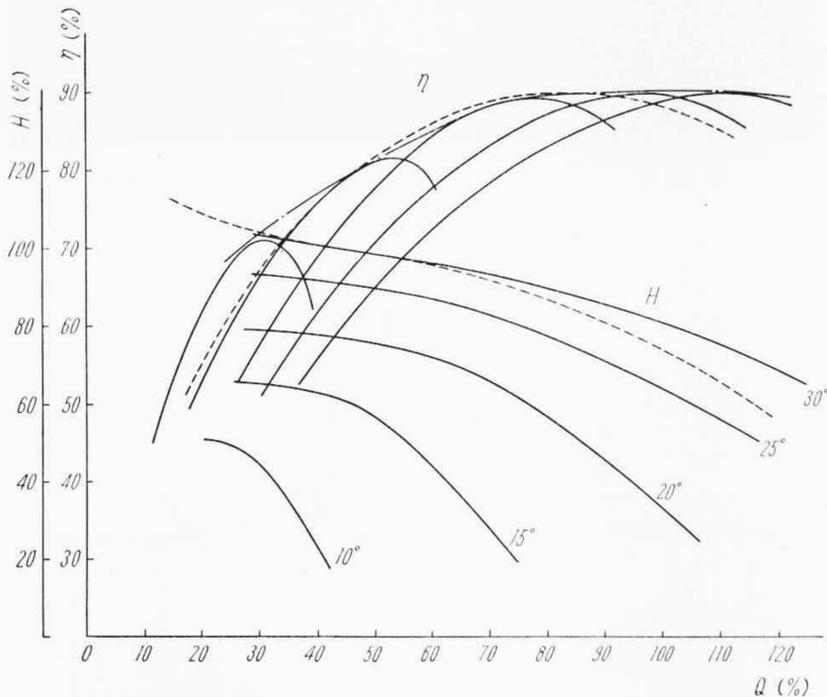
またポンプと水車のキャビテーション特性、サージタンクの容量決定のため完全特性、ポンプの起動特性、案内羽根開閉力などもあらかじめ調査された。ポンプ運転時の案内羽根開度は揚程の変化に応じて自動的に調整される高能率運転装置が設けられている。実物の水車およびポンプ運転もしくはポンプ起動時などにおいて振動もしくは騒音が非常に少なく、その諸特性も予期以上の実績を収めることができた。

中部電力株式会社畑薙第一発電所用ポンプ水車は、ホローグラビティダム直下の建家中に設置され、それぞれ異なる形状の吸出管が設けられる。上下両貯水池間の変動水位は52mに達し、水車は毎日尖頭負荷6~10時間にその落差にて主として最大出力運転を行い、ポンプは深夜約6時間の運転にて、下部貯水池の容



〔実線は斜流ポンプ水車  $N_s=190(m-kW)$ , 点線はフランシス形ポンプ水車  $N_s=170(m-kW)$  を示す〕

第7図(a) 可動翼斜流ポンプ水車とフランシス形ポンプ水車の水車特性比較例



〔実線は斜流ポンプ水車  $N_s=440(m-m^3/min)$ , 点線はフランシス形ポンプ水車  $N_s=400(m-m^3/min)$  を示す〕

第7図(b) 可動翼斜流両ポンプ水車のポンプ特性比較例

量の範囲で日間調整運転を行うよう計画されている。なお水車のケーシングとスピードリングは鋼板製で現地溶接とし、羽根車は輸送上分割構造とされている。

四国電力株式会社穴内川発電所には、前述の第5表のような斜流形ポンプ水車が設けられることとなり、これが設備一式を特命受注することとなった。本ポンプ水車は日立製作所独特の技術によるもので斜流形として世界最高の揚程を有する記録品である。

斜流ポンプ水車の特性の一つとして第7図のように変落差または揚程にわたって高い効率を維持することができるほか、水車水量を低下せしめないことがあげられるが、これは下流に発電所が設置されている場合は運転操作にはなほ都合となることが多い。

### 3. 発電機

最近の水力地点の開発は、世界的にますます大容量化の傾向をた

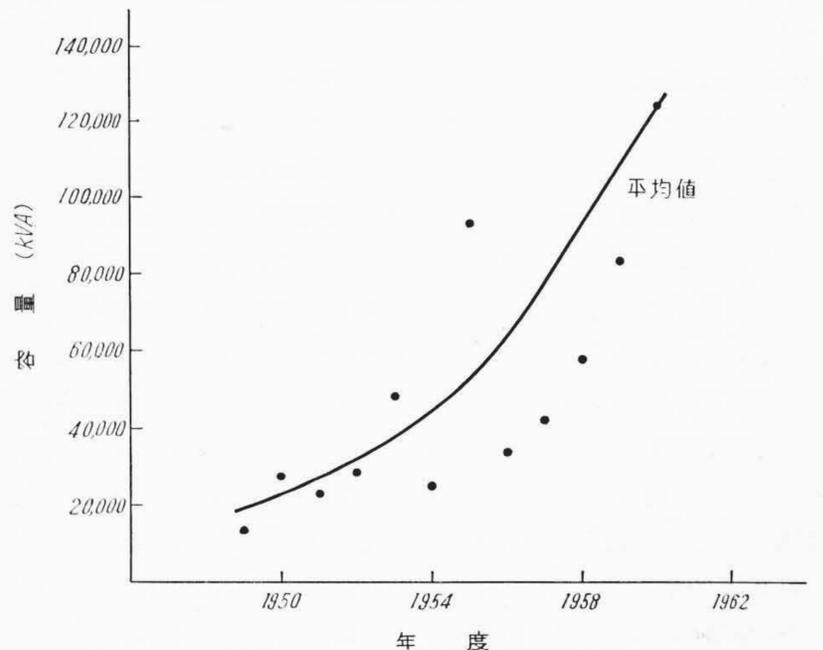
第6表 最近の大容量発電機の実例 (製作中を含む)

国名	発電所	出力(kVA)	回転数(rpm)	形	台数	運転開始
ソ連	Bratsk	230,000	125	立	16	1961
アメリカ	Lewiston	167,000	120	立 傘形	13	1961
カナダ	Chute-des-Passes	165,000	200	立 傘形	5	1959
スウェーデン	Stornorrfors	150,000	125	立 傘形	3	1958
日本	奥只見	133,000	200	立 傘形	3	1960
スペイン	Aldeadwila	126,000	187.5	立	6	製作中
日本	御母衣	125,000	225	立 普通形	2	1960
ソ連	Quibyshev	125,000	83	立		1954
アメリカ	Glen Canyon	125,000	150		8	1960
カナダ	Bersimis Lac Cassé	120,000	277	立 普通形	8	1957
カナダ	Bersimis No. 2	120,000	163.6	立 傘形	5	1959
ノルウェー	Tokke	120,000	375		4	
イタリー	Cimego	110,000	300	横 軸	2	1954
カナダ	Kemano	106,000	327	立 普通形	16	1954
スウェーデン	Harspranget	105,000	167	立 傘形	4	
日本	田子倉	105,000	167	立 傘形	4	1959
アメリカ	Noxan	101,660	100	立 傘形	4	1959
アメリカ	Brownlee	101,000	129	立 傘形	4	1958
日本	大島	100,000	125	立 傘形	1	1963
フランス	Bort Les Orgues	100,000	188	立 普通形	2	1950
アメリカ	Ross	100,000	150	立 普通形	4	1953
インド	Bhakra	100,000	167	立 普通形	5	1960
スイス	Tierfeld	100,000	600	立 普通形	3	
日本	黒部第四	95,000/86,000	360/300	立 普通形	3	1960
アメリカ	Ice Harbor	94,737	90	立 傘形	3	1961
日本	佐久間	93,000	167/200	立 傘形	4	1955
アメリカ	Waneta	90,000	120	立 傘形	2	
フランス	Chastang	90,000	150	立 普通形	2	

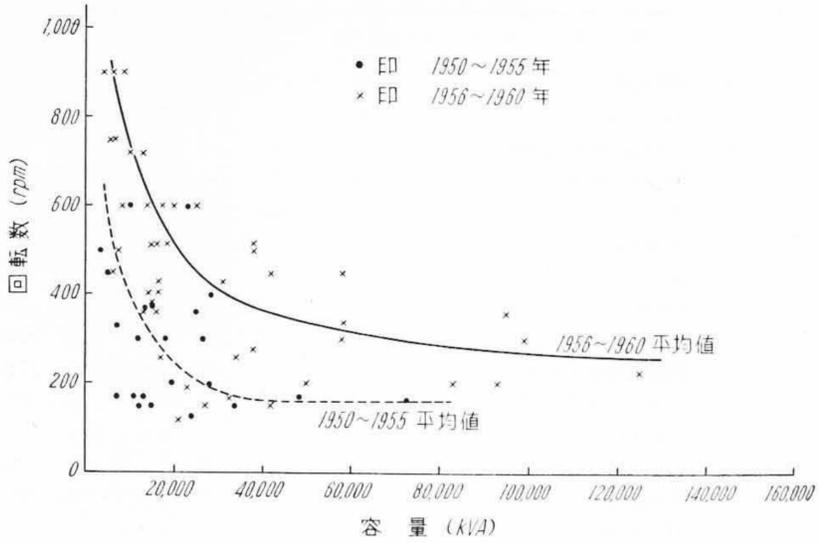
どりつつある。第6表は大容量発電機の実例を示す。またこれとともに、高落差フランシス水車の開発などにより高速化される傾向にあり、また火力発電で定常負荷を負担して水力は尖頭負荷に応ずるいわゆるピークロードステーションがとりあげられ、このため揚水発電所が盛んに計画されるようになった。一方低落差地点の開発に伴ない、斜流発電機、筒形発電機も開発されるようになり、これらの大容量、高速化および新機種の採用により発電機的设计製作は、使用鋼材、溶接技術、絶縁物などの進歩と相まって目ざましい進歩をとげつつある。また送電線が長く、線路網が強化されるにつれ、安定度の観点から自動電圧調整装置の性能も向上し、特に速度と発電所建屋高さの軽減から静止形励磁装置が開発され、整流器の進歩により急速に採用される傾向がでてきた。

#### 3.1 形式と容量、速度、電圧の推移

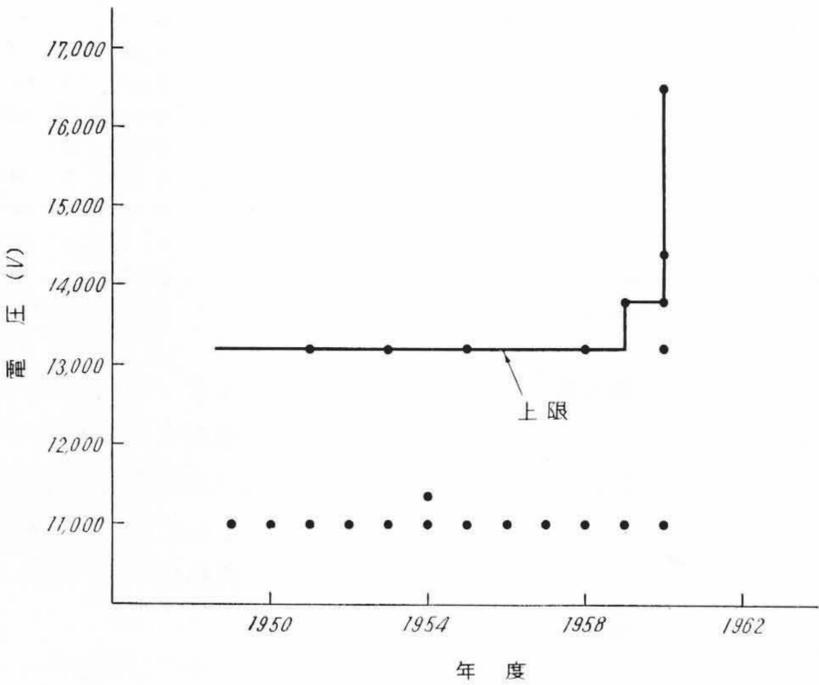
高落差地点が開発されるに伴い単機容量が大きくなるとともに、回転数も高くなってきている。第8図は年度別単機容量を、第9図は容量に対する回転数の経年傾向を示す。大容量化は、当然輸送制限の制約を、高速化は材料の制約をうけるが、これらは最近の鍛鋼、製鉄技術、絶縁物などの進歩と、設計技術の進歩により克服され、



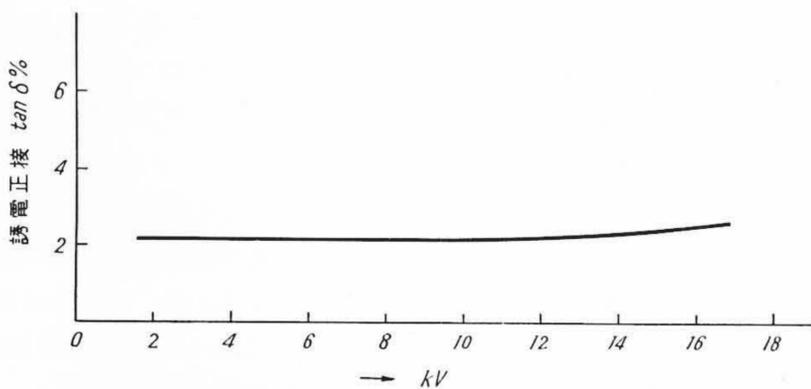
第8図 年度別単機容量曲線



第 9 図 容量と回転数の経年傾向

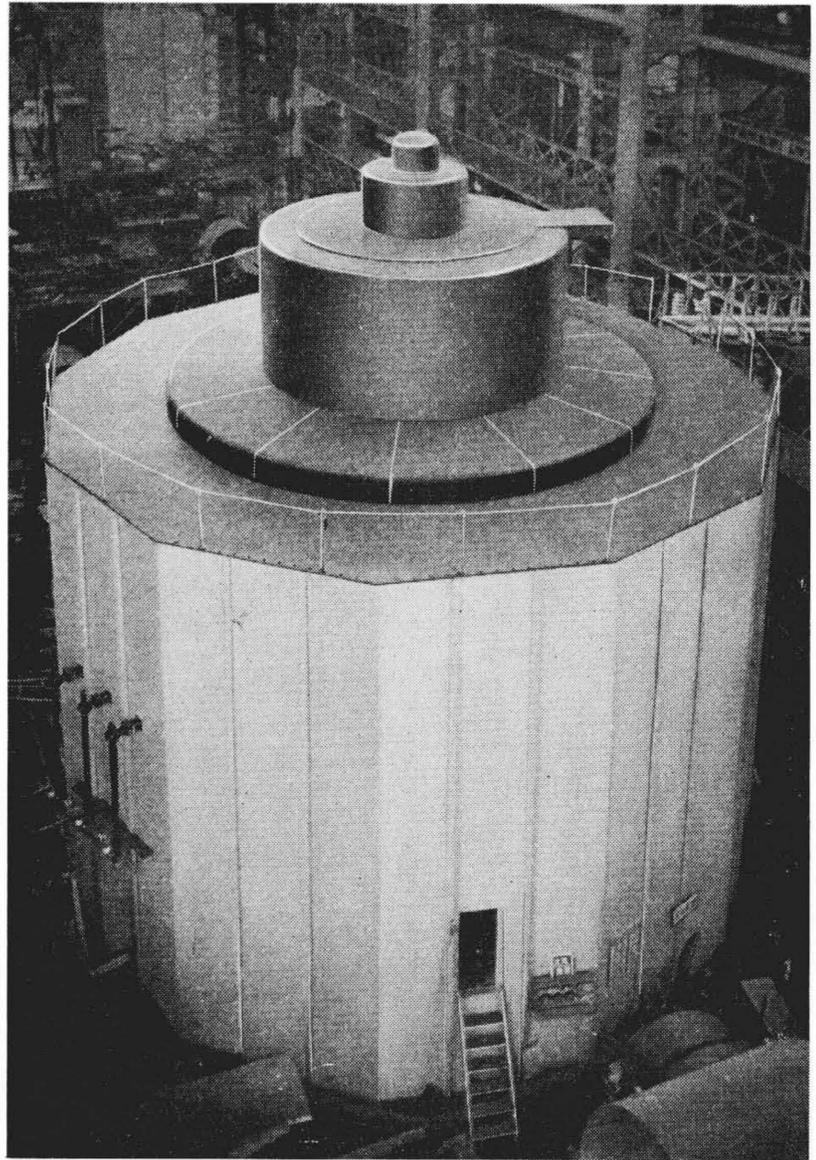


第 10 図 11,000V 以上についての年度別電圧の傾向

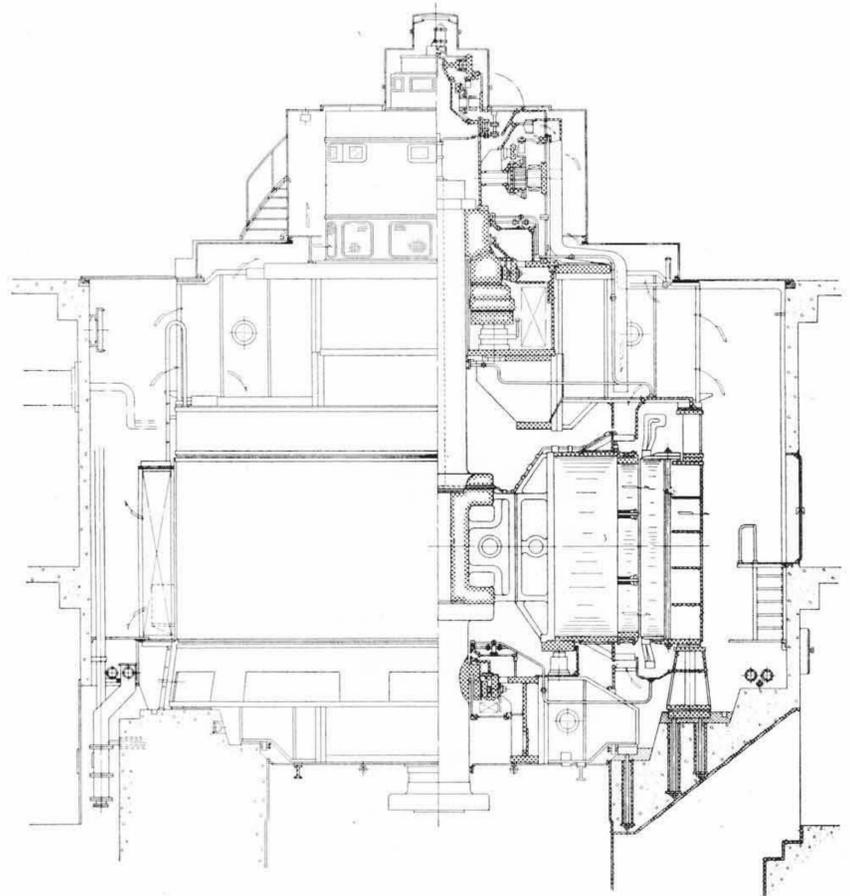


第 11 図 125,000 kVA 交流発電機コイルの誘電正接特性

将来さらに飛躍的に大容量, 高速度化に進むであろうと思われる。また最近では地下発電所の設置が盛んになって, この場合主変圧器が地上に設置されることが多く, したがって電圧も高くなり電源開発株式会社御母衣発電所納 125,000 kVA の発電機では 16,500 V を採用している。第 10 図は 11,000V 以上についての年度別電圧の傾向を示す。高電圧化に伴い高圧コイルの性能も改善され, 誘電正接特性や耐インパルス特性, さらに耐コロナ特性など著しく向上している。前記 125,000kVA 発電機ではコイル頭のワニス注入絶縁法によりよく 80,000V のインパルス試験に合格し, コロナ電圧も対地間に定格電圧をかけてもほとんどコロナの発生はみられなかった。第 11 図にはその誘電正接特性を示す。また発電機の体裁を良くし, 特に地下発電所では発電所全体の通風の関係から, 励磁機を発電機と一体の風洞でおおうことが多く, この場合励磁機の通風は発電機のクーラで共通に冷却される。第 12 図は 125,000 kVA 発電機の工場



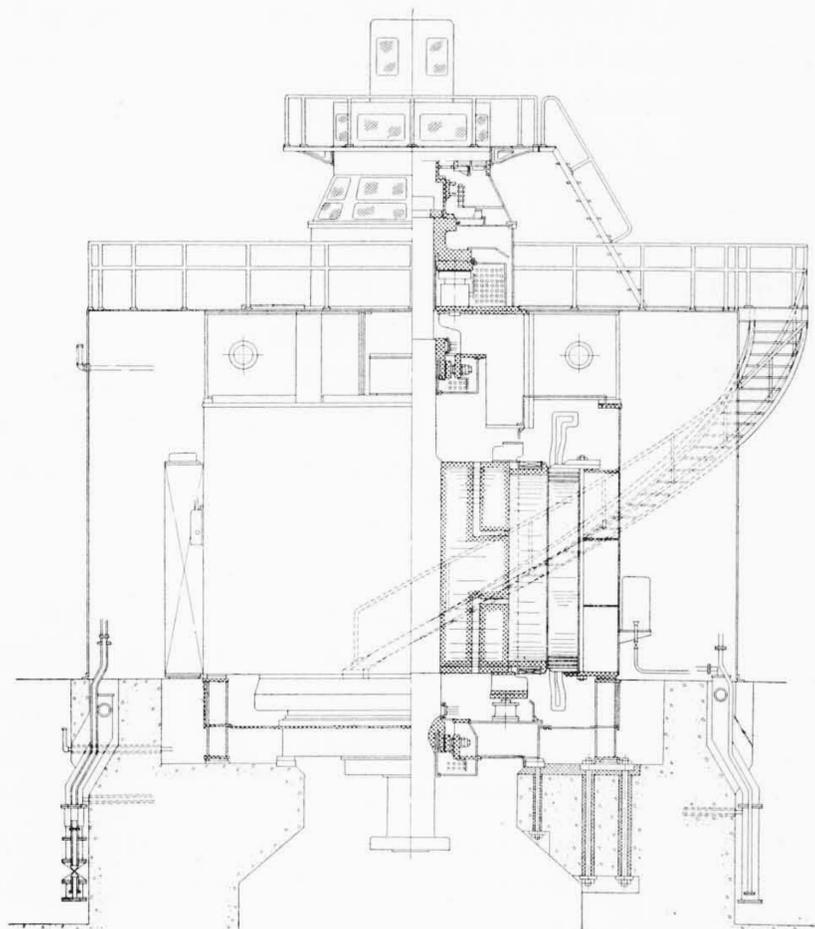
第 12 図 125,000 kVA 交流発電機工場試験外観図



第 13 図 125,000 kVA 交流発電機構造図

試験中の外観を示すもので, 実際据付けに当っては発電機部分は床面より下に収容され外部からは励磁機部分がみえるにすぎない。

大容量化に伴う輸送制限については, 回転子を上部軸, ロータ, 下部軸の三者に分割することが多く, 固定子は一般に適当個数に分割されコイルは現地で入れる場合がほとんどである。第 13 図は前記 125,000 kVA 発電機の構造を示すもので, 固定子は 6 分割されて



第14図 58,000 kVA 交流発電機構造図

いる。

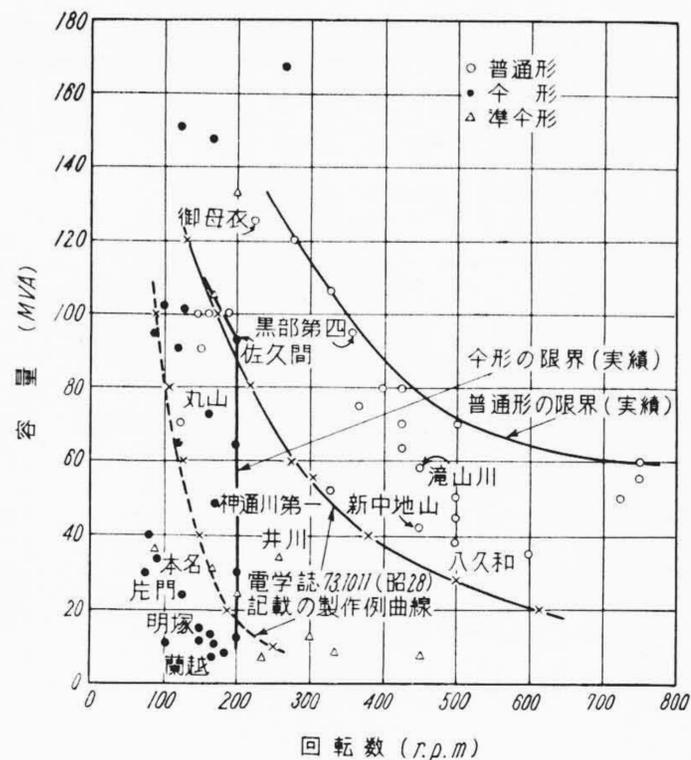
高落差地点の開発により大容量高速度機も多数製作され、中国電力株式会社滝山川発電所納 58,000 kVA, 450 rpm, 目下製作中の関西電力株式会社黒部川第四発電所納 95,000/86,000 kVA, 360/300 rpm, 60/50~ 発電機などはその代表例である。高速機の特長は回転子径に比べて軸長が長くなることであり、この場合特に磁極と継鉄のダブテール部にかかる応力は軸方向にわたり均一でなく中央部より両端部のほうが大きく、設計に当ってはこの点を注意すべきであるが、これらの値はダブテールコッタの当りや打ち込み技術が大きく関係するとともに、長大な磁極の直線度、すなわち軸方向の曲りについても十分注意する必要がある。軸方向長さが大きくなるにともないコイルのヒートサイクルによる絶縁物と導体の相対運動が問題になり、高圧コイルのワニス特性や製作技術、界磁コイルの絶縁物、接着剤ならびにその製作技術は特に高度なものが必要となる。第14図に 58,000 kVA, 450 rpm の構造を示す。

大容量高速度化するにつれ軸受の条件も過酷になり、軸受油膜の生成について慎重に設計製作されるとともに、軸受漏油につき構造上意を注ぐ必要がある。漏油については特にオイルダム部の構造が大切で、軸受ランナの油止めと軸の間隔、オイルダムの偏心、タンクの寸法や容積と内蔵物の関係などに密接な関係があるほか、カラー内側の形状およびそのポンプ作用に大きな影響があり、これらの点につき試作研究を進めその成果が着々応用されている。

以上述べた諸点の進歩により大容量、高速度機がますます採用され、最近の実績は第15図に示すようになった。しかしこれらはまだ製作限界にきたものとはいえず、今後さらに大容量機、高速度機の需要が生じ記録は更新されてゆくものと思われる。

### 3.2 揚水発電所用発電電動機

今後の発電形態はますます火主水従の傾向を現わし、水力発電としては尖頭負荷を負担する揚水発電所の建設が多くなる。日立製作所で納入あるいは製作中の揚水発電所の例を第7表に示す。揚水方式で水車、ポンプ併置される場合には発電電動機としては大して問題なく、回転方向も同一で、ポンプ起動もまず水車により行われ、発電電動機を同期投入後水車の水を止めポンプ運転に移る。したが



第15図 容量-回転数の関係

第7表 揚水発電所発電電動機一覧表

発電機/電動機 kVA/kW	電圧 V	回転数 rpm	形式	水車ポンプ 種類	発電所名	製作年	台数
23,000/21,000	11,000	500/500	横軸	フランス ポンプ別置	東北電力 沼沢沼	1951	2
14,000/15,000	11,000	400	立軸普通形	フランス 可逆	四国電力 大森川	1959	1
58,000/56,500	11,000	300	立軸普通形	フランス ポンプ別置	九州電力 諸塚	1960	1
52,000/48,500 47,000/48,500	11,000/11,000 10,000/11,000	200/200 167/200	立軸傘形	フランス 可逆	中部電力 畑産第一	製作中	1
14,500/14,000	6,600	360	立軸普通形	斜流 可逆	四国電力 穴内川	製作中	1
37,000/37,000 33,000/37,000	11,000/10,500 10,000/10,500	277/277 231/277	立軸普通形	フランス 可逆	関西電力 王滝川	製作中	1

って発電電動機としてはポンプ運転中の電源遮断時万一逆転することを考慮して軸受部を設計すれば十分である。しかしポンプ別置方式では発電所の建設費が大きくなり不利をまぬがれないので、最近計画されるものはほとんど水車とポンプを共用するものとなってきた。この方式では水車運転時とポンプ運転時で回転方向が逆になること、ポンプ運転時に電動機でポンプを起動する問題があること、また一般に変落差が多く、各揚程につき水車、ポンプともにその効率を上げる要請から、発電電動機に2速度運転が必要となる場合が生じてくるなどの諸点が特長である。以下可逆ポンプ水車用発電電動機につき述べる。

#### 3.2.1 可逆回転

ポンプ水車に直結される発電電動機は正逆回転を行う必要があるため

- (1) 固定子巻線を切りかえる開閉器を設けること
  - (2) 界磁巻線を切りかえる開閉器を設けること
  - (3) 推力軸受および案内軸受は両回転に対して十分油膜が形成される構造となっていること
  - (4) 冷却ファンは両回転に対し同一効果をもたせる構造のこと
  - (5) 励磁機には極性反転装置をつける場合がある
- など考慮せねばならない。

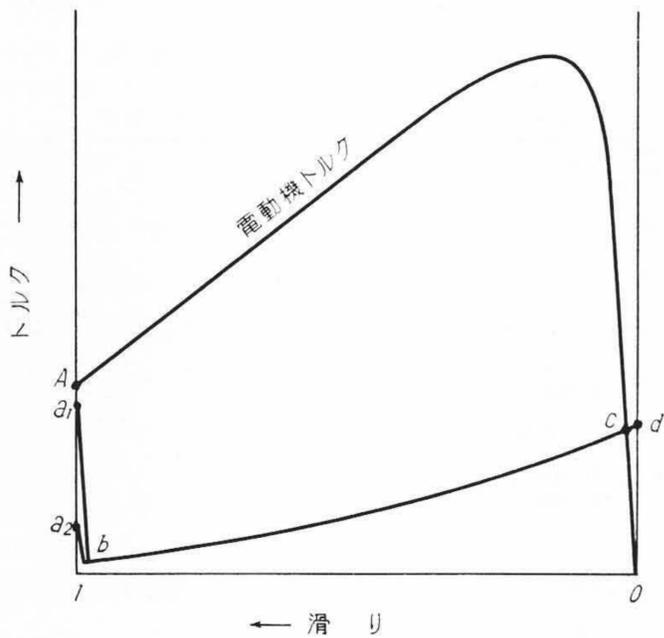
可逆回転を行う軸受構造は、一方向回転の場合の偏心支持に対して、中心支持方式が採られるが、この場合には偏心支持より油膜の生成がやや困難なため軸受圧力は一般にやや低くすることが好ましい。実験結果によれば約20%少なくとることにより偏心支持と同程度の油膜を生成することができる。

#### 3.2.2 起 動

起動には第8表に示す各種方式があるが、ほとんどの場合発電電動機の制動巻線を用いる方式が採用され、かつ起動時送電線の

第8表 起動の方法

方法	制動巻線による方法			同期起動法	直結起動用電動機による方法
	全電圧	低電圧	低電圧	—	—
電圧	全電圧	低電圧	低電圧	—	—
周波数	定格周波数	定格周波数	低周波数	—	—
操作	容易	容易	比較的面倒	比較的面倒	容易
付属機器	少	少	少	別置励磁機要	電動機要
起動トルク	大	小	小	使用電源発電機によりきまる	小
起動時間	1	2	3	3	3
同期化並列	容易	全電圧に 切換に要	位相検定要	位相検定要	容易
起動 kVA	大	小	小	—	小
系統に及ぼす影響	大	小	なし	なし	極小
機器に及ぼす影響	大	小	小	なし	なし
専用電源	不要	低電圧要	専用発電機要	専用発電機要	電動機用電源要
実例	○	◎	×	×	×



第16図 起動特性曲線

電圧降下を少なくするため減電圧起動方式が盛んに用いられる。減電圧方式は起動用変圧器を設ける方式と主変圧器の中間タップを利用する方式とあり、前者は設備費がかさむが起動 kVA、起動トルクの調整が可能であるに反し、後者は主変圧器の中間タップ値が50%電圧に限られるので起動 kVA、起動トルクの調整は不可能である。したがって最近では起動負荷トルクを十分軽減し、これに対し発生起動トルクに十分余裕をもたせる方式が用いられる。

起動負荷トルクの問題点には2種類があり、一つはすべり1、他は最小すべり附近の値である。第16図に示すように、すべり1の点では回転子には軸受静止摩擦トルク  $a_1$  があり、きわめてわずかに回転すれば軸受に油膜ができて b に下り、次第に速度が上昇するにつれ風損および水によるポンプ負荷トルクが増し、すべり0 で d 点に達する。電動機トルクの滑り1におけるトルクを A とすれば、 $A > a_1$  ならば電動機は起動を始め、次第に加速して両者のトルクが等しい点 c で速度上昇は止る。このときのすべりが同期引き入れ可能最小すべりより小さければ同期引入れができるわけである。軸受静止摩擦トルク  $a_1$  は不安定な値で、起動ごとに異なるのが普通であるから、安全な起動を行うためには  $A \gg a_1$  が必要である。このため軸受に圧油をそう入して静止時一たん油膜を生成してから起動したり、回転子を電磁石でつり上げることにより  $a_1$  を  $a_2$  に下げて起動を安全にする方法があるが、前者のほうがはるかに効果が大きく、軸受静止摩擦係数の1%以下にすることは容易である。これに反し後者では吊上力が電磁石の励磁電

流の自乗に比例することや空隙調整の困難さなどのため、前者ほど大幅に起動負荷トルクを減少することができない。また圧油押し上方式は起動時軸受裏面に与える悪影響を大幅に減らすことができるので、アメリカでは一般の水車発電機でも採用されている。

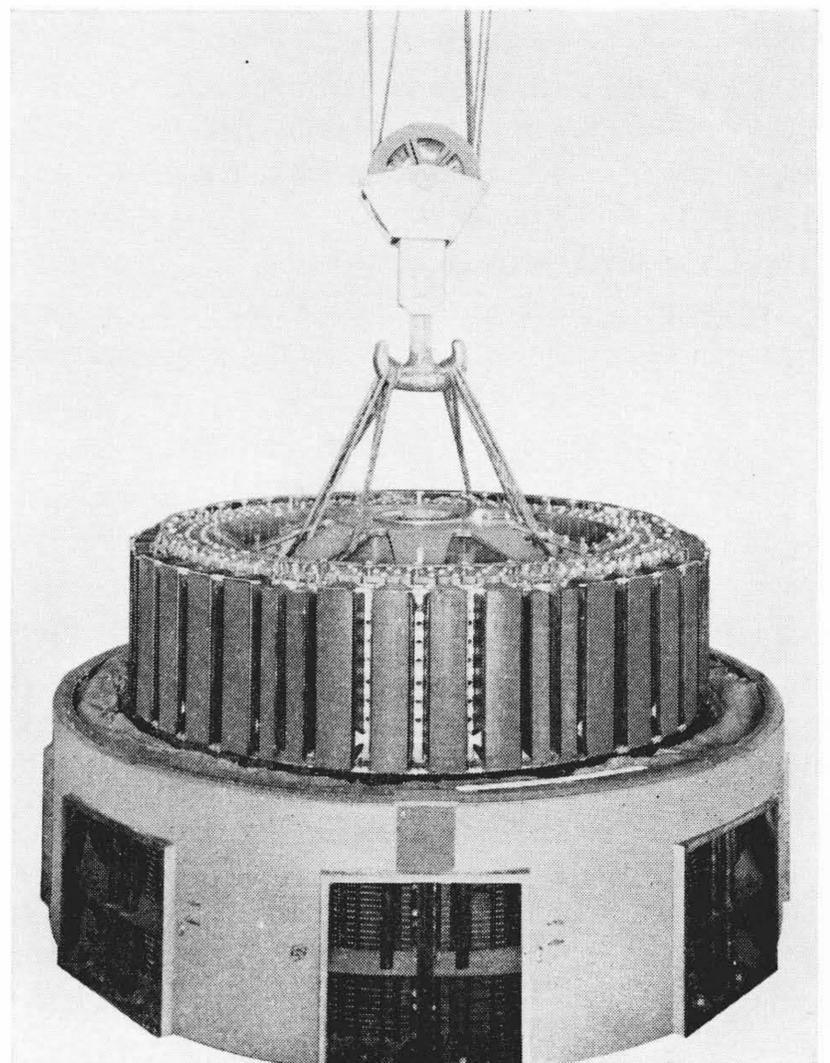
次第に速度が上昇するにつれ風損および水によるポンプ負荷トルクが増すが、後者のほうがはるかに大きい一般にフランス形では水面押し下げを行ってポンプランナを水から離し、斜流形では可動翼を全閉してポンプトルクを減少する。

同期引き入れは減電圧のまま同期に入れる方式と、全電圧に切り替えてから同期化する方法とあるが、前者は送電線に及ぼす影響に対しては良いがやや複雑な制御装置が附随するので、後者のほうが確実である。

### 3.2.3 二速度機

変落差発電所で各落差における水車あるいはポンプの効率、および水車運転時とポンプ運転時の効率を良くするため二速度運転を行うことがある。一般に発電電動機は二速度にすると効率が若干低下し、重量は重くなり、滑動環の数がふえ、かつ固定子巻線の切替えのため相当数の開閉器を必要とするので、二速度方式の採用にあたっては年間発生電力量を最大にすることはきわめて重要であるが、前記発電電動機に生じる諸点を考慮して慎重に決定される必要がある。

凸極機で二速度を得るには極数変換を行えばよいが、この方法として正規極を適宜減極、あるいは転減極する方法、正規極の代りに1グループにつき小極を2個ないし数個用いてこれらを適宜転減極する方法、さらに極間隔をかえる方式などあり、いずれも極数変換比により磁束の利用率に優劣があり、また滑動環の数や効率、重量などにそれぞれ影響をもっているため、方式の決定に当ってはその都度諸条件を十分考慮して決定する必要がある。日立製作所ではかねてから各方式の諸特性の解明を行い、最近42,000kVA、11,000V、40/32P、150/188 rpm の試作研究を行い大形機製作の態勢をととのえている。第17図に試作機の回転子を示す。



第17図 42,000 kVA 極数変換交流発電機

### 3.3 低落差水車発電機

地点の開発が進むにつれ大容量化される一方、低落差発電所も開発されてきており、筒形発電機、斜流発電機が登場してきた。筒形発電機は発電機が水中に設置され、外部を流れる水が発電機の冷却に貢献するから、機内の熱源に対する各部の温度分布および外筒からの水への熱放散が問題であって、各種試作研究によりこれらの効果が確かめられている。また設置方向は水平の場合、傾斜した場合があり、いずれもスラスト軸受の構造が問題になるほか、外被の内側に水滴が発生することによる諸考慮が必要である。

斜流発電機ではランナ間隙が少なく、軸と固定子の温度による伸び差やスラストなどによる両者の相対位置の変化のため水車効率に影響を及ぼし、あるいはランナとケーシングの接触などの問題があるので、エンドブラケットの剛性や軸受位置とその構造などに慎重な考慮が払われる。

### 3.4 材料の進歩

#### 3.4.1 固定子コイル用材料

最近合成化学の進歩が著しく、絶縁材料も従来使用されてきた天然材料と異なり、新しいタイプのワニスが製作されるようになった。不飽和ポリエステル系の無溶剤ワニスである。いくたの試作研究の結果現在は発電機用固定子コイルは全面的に、このワニスで製作されるようになった。

このワニスは重合反応で硬化するため絶縁層内に空隙の生ずることがきわめて少なくなり、コロナ放電の減少のため、誘電体正切電圧特性が良好となる。機械的にも強固となり過酷な条件のヒートサイクルにも十分耐え、B種の許容温度範囲内においてまったく絶縁のふくらむことはない。

しかしながら、このすぐれた特性をさらに改良するべく、別の種類の合成ワニスの研究が進められ将来の飛躍にそなえている。

#### 3.4.2 コロナ防止塗料

高電圧の採用が多くなるにつれ、スロット内コロナ防止材料も一段と進歩した。従来は天然樹脂系のワニスに半導体粉末を混合していたが、最近では合成樹脂系のワニスを使用し、抵抗の温度による変化も少なく、長期間使用に対し抵抗の変化の少ないものが作られるようになった。コロナ防止の施工も一段と進歩し、ガラステープ塗込式が出現した。この方法によるとコイル取扱い時の傷によってもコロナ発生電圧の低下はほとんどない。

#### 3.4.3 回転子コイル絶縁材料

前述のように高速大容量化に発電機が進んでいるため、回転子コイル絶縁に大きな遠心力、導体の膨張収縮の影響が表われてくる。従来天然樹脂系ワニスを主体として作られていたポピン絶縁は、その熱軟化のため、遠心力や導体の膨張収縮により移動し、破壊するので最近では熱硬化形の特殊フェノール樹脂をもってモールドされたすぐれたポピン絶縁が製造されるようになった。

#### 3.4.4 固定子コア材料

磁性材料の進歩はめざましく、従来の熱間圧延珪素鋼板はほとんど冷間圧延に移行しつつある。冷間圧延材は熱間圧延材に比し波打ち、板厚の不同など少なく、鉄板積み作業がそれだけ容易になり、また絶縁皮膜処理ワニスも進歩し、熱圧縮特性で従来のワニスより数等まさるものができるようになり、完成後の固定子は振動などの点から従来より高性能のものができるようになった。今後方向性珪素鋼帯、二方向性珪素鋼帯などの開発によりさらに向上が望まれるであろう。

## 4. 配電盤および制御装置

水力発電所の監視および運転制御をつかさどる配電盤ならびに制御装置は、ここ数年間に目ざましい発達を遂げた。

制御方式はほとんどが一人制御方式で、中央配電盤室に重要な計測および制御装置を備えた総括制御盤を設け、発電所全体を一括はあくして適切な運転制御ができるようにしている。このため総括制御盤は監視容易で取扱いの便利な縮小形とし、計測用指示計は必要最小限にとどめ、代りに記録計を積極的に採用して別設置としている。また最近の傾向として、従来比較的まとまりの悪かった所内動力の低圧回路開閉器は、引出形気中遮断器やヒューズフリー遮断器を組込んだメタルクラッドに取りまとめ、補機関係の制御器具類も系統別にキュービクルに収納して建家内を整頓し、保守点検を容易にしている。

一人制御方式はこれまであらゆる角度から改良を加えられた結果、現在ではまったく標準化されているので画期的な発展はみられないが、今後はシーケンスの簡易化と制御回路用部品の改良が積極的に行われるであろう。特に制御用継電器の小形化ないし無接点化は開閉器、遮断器類の進歩と相まって早晩実現の運びとなろう。

また屋外送電設備の制御および保護回路を屋外設置のメタルクラッドないしスイッチハウスに収納し、屋内引込みケーブルを節減することも一部実施されているが、今後1A変流器の採用とともに普及するものと思われる。

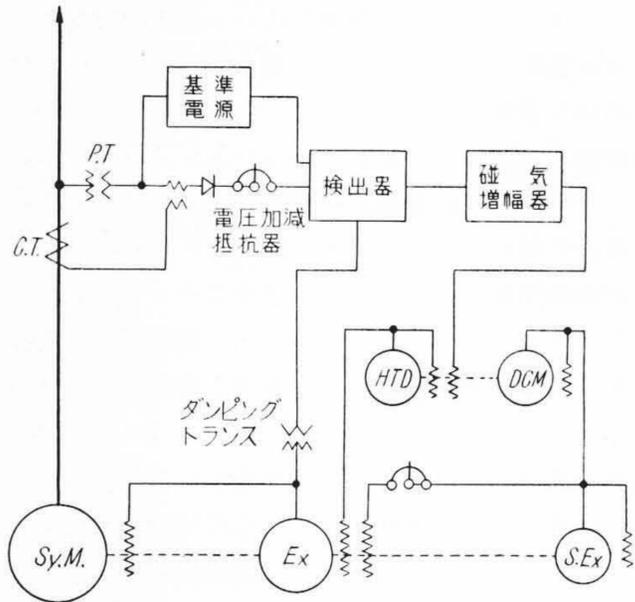
一方、良質の電力を安価に供給するためには、電圧を安定に保つこと、周波数の変動を極力小さくすること、送電損失を少なくすること、さらに過渡安定度を向上して送電不断の実をあげることなどが必要であるが、最近の自動制御技術の進歩はこれらの要求を十分満足せしめるようになった。すなわち、高感度、高速応性の磁気増幅器形自動電圧調整装置、系統周波数の変動を $\pm 0.1c/s$ の幅に保つ自動周波数調整装置、高感度の無効電力自動調整装置、電気ガバナによる水車発電機群の安定な平衡運転など、数多くの成果がこれである。さらに系統の発電所群に対し最も経済的に負荷を分担せしめる経済負荷配分制御装置も発達の途上であり、本格的な高性能装置の出現も間近い。以上のほか、保護継電方式としては変圧器の新形高速度差動電流保護方式、また母線の新しい保護方式などみるべきものがあるが、以下最も注目し価値する自動制御技術の応用分野につき述べる。

### 4.1 発電機の自動電圧調整

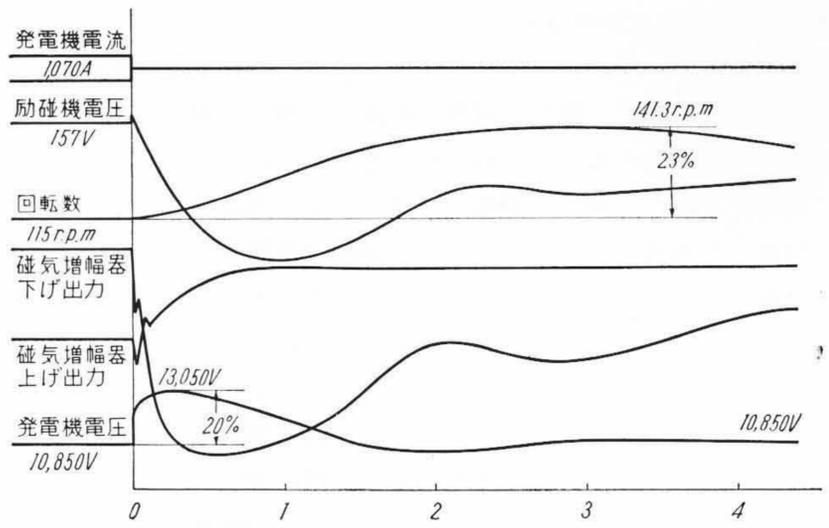
最近の発電機用自動電圧調整器は、精度、速応性ともにすぐれた増幅形がもっぱら用いられている。これは自動電圧調整の目的が単なる電圧の一定値保持にとどまらず、短絡故障時の過渡安定度の向上、全負荷遮断時の過電圧の抑制、送電線の無負荷充電容量の増大など、系統運用上必要な高度の要求をみたすことができるからである。この増幅形自動電圧調整器に増幅発電機形と磁気増幅器形の二つがあるが、まず前者が目ざましい発達を遂げ引続きここ数年間に後者も広く用いられるようになった。

#### 4.1.1 増幅発電機形自動電圧調整装置

増幅発電機形自動電圧調整装置は大きな出力を容易に得られるので、比較的大容量（たとえば50MVA以上）の水車発電機に好適である。第18図は本装置の構成を示すものである。検出部はPT2次電圧を三相全波整流し、基準電源の定電流出力と比較して偏差分を取出し、これを増幅してHTD形増幅発電機を制御する。一方、増幅発電機および主励磁機の出力端子にダンピングトランスを接続し、出力変化分を微分して負き還し乱調を防止している。また電圧整定、横流補償の機能を備えていることは従来の自動電圧調整器と同様である。第19図は本装置を適用した93MVA水車発電機の全負荷遮断試験のオシログラムで、遮断後の発電機電圧上昇最大値は21.4%で0.5秒後に現われており、これを1.3秒で回復させ3.5秒で安定せしめている。このようにHTDは応答きわめて速く、かつ短時間に大きな調整出力を出し

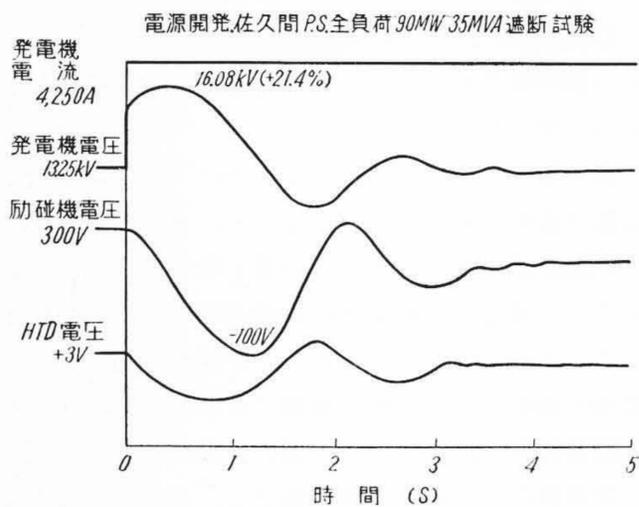


第18図 増幅発電機形自動電圧調整装置の概略接続図



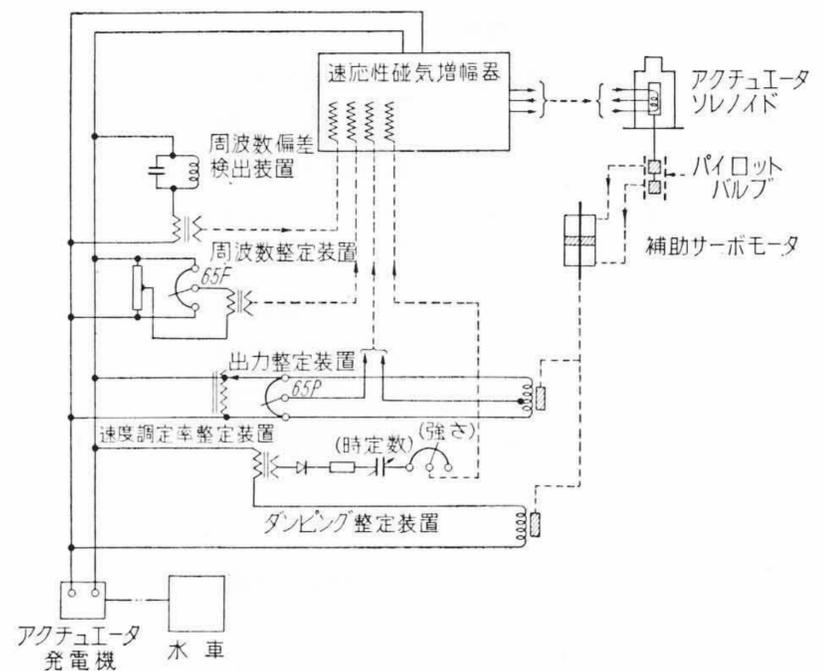
水車発電機：21 MVA, 11 kV, 50 c/s  
AVR：磁気増幅器形

第21図 全負荷遮断試験オシログラム

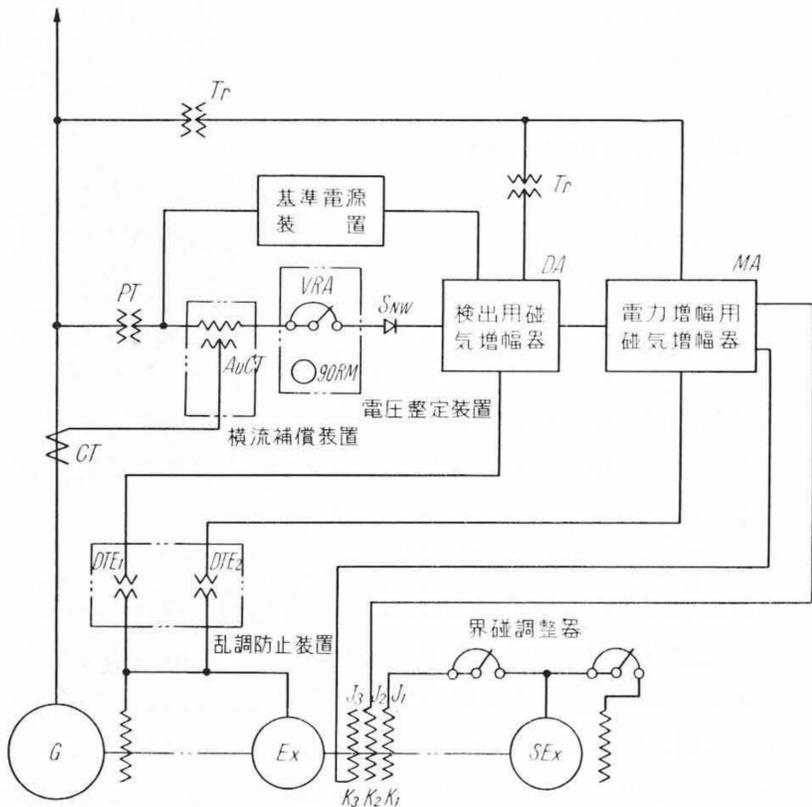


水車発電機：93 MVA, 13.2 kV, 60 c/s  
AVR：HTD形

第19図 全負荷遮断試験オシログラム



第22図 EFA形電気ガバナ説明図



第20図 磁気増幅器形自動電圧調整装置の概略接続図

ていることがわかる。

#### 4.1.2 磁気増幅器形自動電圧調整装置

増幅発電機形に対し磁気増幅器形自動電圧調整装置がここ数年間に広く用いられるようになった。増幅発電機は直流機なるため整流子の保守を必要とするが、磁気増幅器形はその必要なく、かつ出力 10 kW 程度の大容量のものが製作されるようになった

め適用範囲が拡大された。接続は第20図に示すとおりで、終段の電力増幅装置として増幅発電機に代り磁気増幅器を使用する。現在水車発電機では60 MVA程度までの適用例がある。第21図は21MVA水車発電機の全負荷遮断試験のオシログラムで、発電機の電圧上昇を20%におさえている。

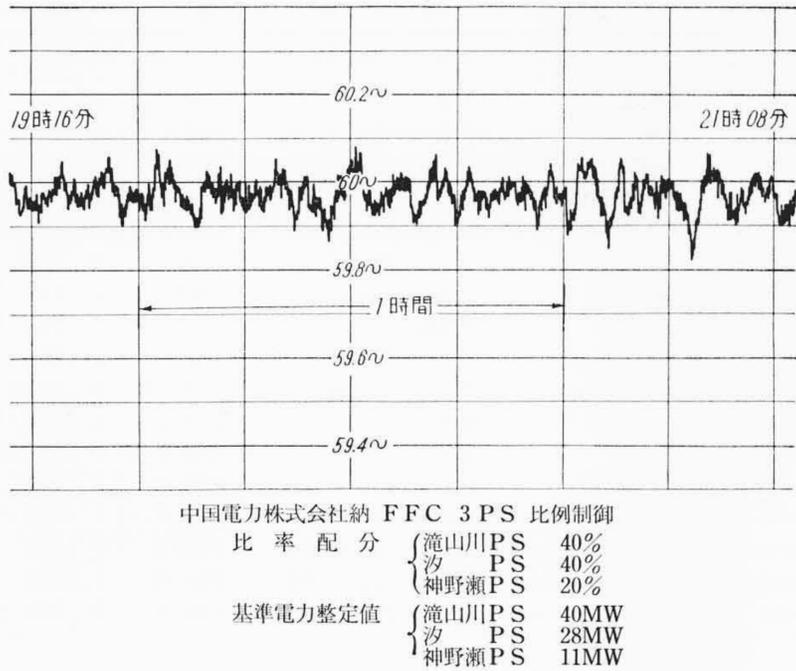
#### 4.2 周波数の自動調整

電力系統の周波数調整は、発電機を駆動する原動機の回転数が負荷の変動により変化することを防止することにつくる。ガバナは周波数調整能力をもつが、垂下特性のため一定値制御はできない。自動周波数調整装置は積分制御系を構成し、一定値制御を行うことができる。

高感度の電気ガバナと自動周波数調整装置の協調運転が系統周波数の改善に最も望ましい方法で、最近広く用いられる傾向にある。

##### 4.2.1 電気ガバナ

日立 EFA 形電気ガバナの構成を第22図に示す。周波数偏差の検出にはリアクトルとコンデンサの並列共振回路を使用し、アクチュエータ発電機の周波数が共振回路で定まる整定周波数と比較され、これが整定値より高いかまたは低いかにより回路電流は電圧に対し進み、またはおくれとなる。この電流を速応形磁気増幅器2台のプッシュプル接続より成る位相弁別増幅装置に導き、その直流出力電流によりアクチュエータソレノイドを励磁して一次配圧弁を駆動する。補助サーボモータ以降の機械的操作は、従来の機械ガバナと同様油圧式となっている。感度は補助サーボモータまでで±0.02%以内の高感度で、速応性も大きく、また整定



第 23 図 定周波比例制御における系統周波数

値の変更も容易である。

次に電気ガバナのほかにみられぬすぐれた機能として、多数のガバナを結合して総括制御するいわゆる結合運転がある、結合運転装置は各水車専用の電気ガバナを主体とし、その結合制御回路と総括制御装置から構成される。多数の水車発電機を結合運転することにより制御は簡易確実となり、また各機の負荷平衡による効率の向上に効果があるので、今後広く適用されるものと思う。

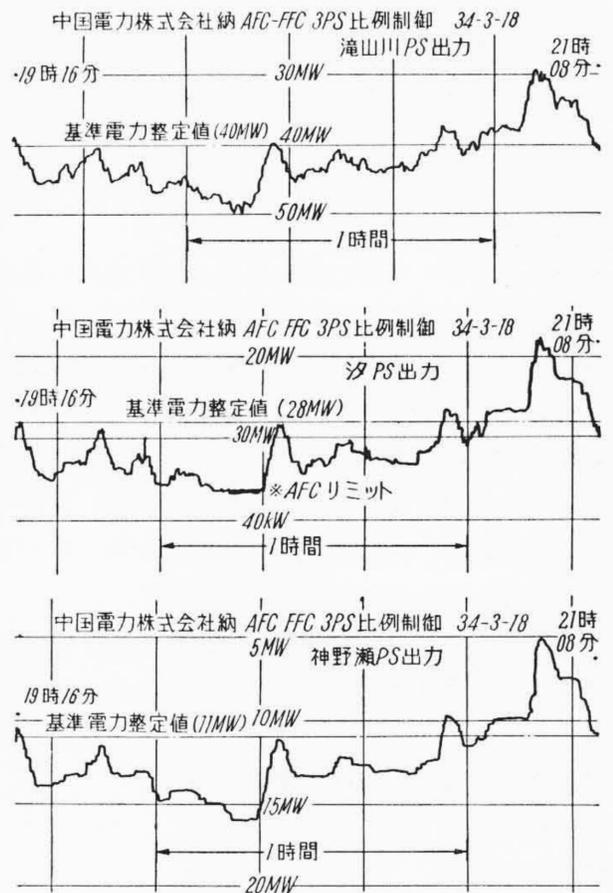
#### 4.2.2 自動周波数調整装置 (AFC)

系統の周波数を調整するためには周波数の変動分に見合う調整電力を必要とする。このため系統容量の大小に応じて数箇所の発電所を調整用発電所として選定し、これに自動周波数調整装置 (AFC) を設けて周波数を調整する。このとき、各調整発電所の負荷分担をあらかじめ整定したそれぞれの基準出力に比例させるのが一般に合理的な方法であるが、これを実現するため中央制御比例配分方式が採用される。すなわち、系統の周波数変動分に相当する負荷の増加もしくは減少の制御信号を、中央制御所から各調整発電所へ所望の比率に配分して伝送し、これによる各発電所の出力変化分は中央制御所にテレメータで送られ、制御信号と平衡させるのである。この方式は中国電力株式会社および北陸電力株式会社納の AFC に採用され、運転実績も良好で好評を博している。第 23 図および第 24 図は中国電力株式会社における比例制御の実績を示すもので、周波数変動は整定値  $\pm 0.1\text{c/s}$  以内に収まり、3 発電所の負荷分担も整定比率通りとなっている。なお本装置は、定周波調整 (FFC) はもとより、定連絡線負荷調整 (FTC) および周波数偏倚連絡線負荷調整 (TBC) も任意に行えるよう構成されており、さらに時差補正装置、融通電力プログラム制御装置なども備えている。このほか、北陸電力株式会社納 AFC には一つの水系に配置された 2 発電所のそれぞれの調整池の水位変動 (有効水深に対する百分率変動) を等しく保つ機能をもたせている。

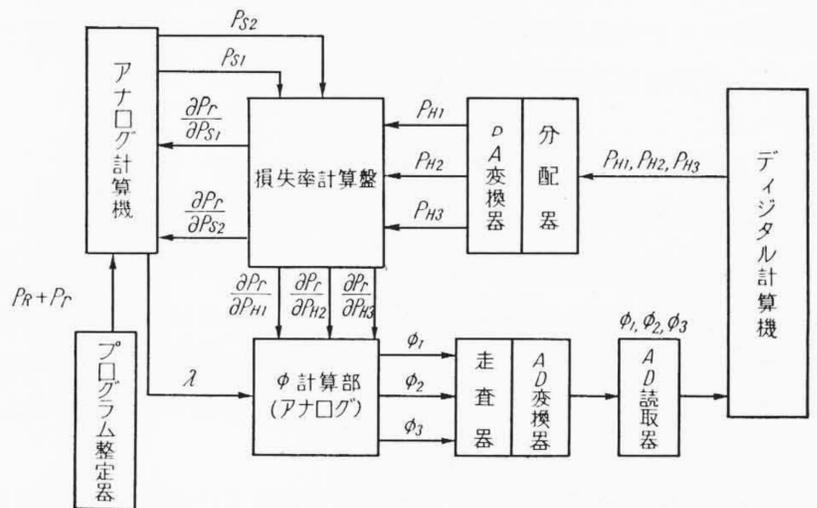
次に、高感度と制御の確実をむねとした全トランジスタデジタル式 AFC を関西電力株式会社向として現在製作中であるが、これは動作ひん度の少ない簡けつ制御方式とし、かつ機械的接点をもたないので信頼度も高く、今後の発展が期待される。

#### 4.3 経済負荷配分制御装置 (ELD)

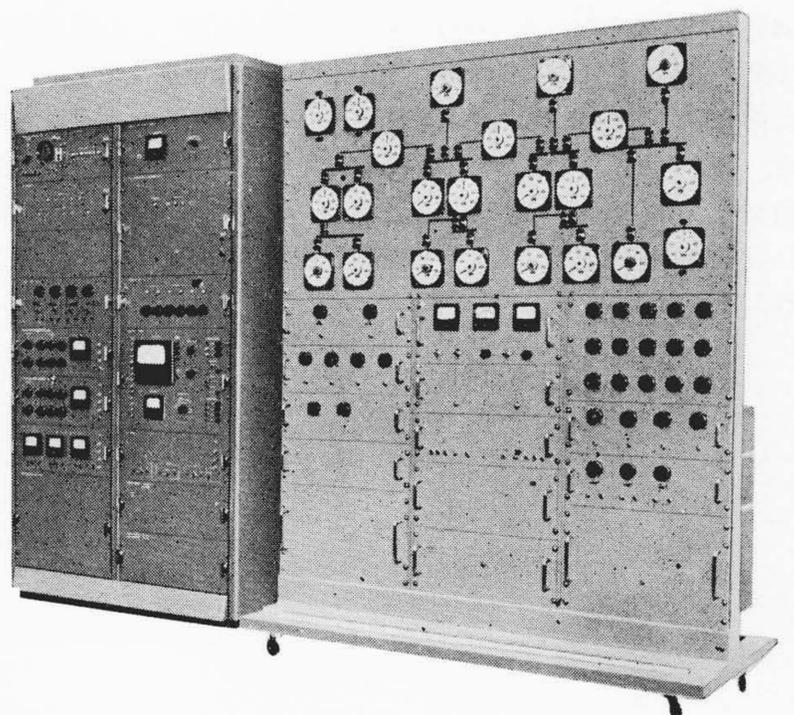
一つの電力系統で総負荷をいかに各発電所に分担させれば全火力発電所の燃料費を最小にすることができるかを自動計算し、かつ各発電所の制御信号量を決定する装置で、わが国においても電力事情の安定化に伴ない重視されるようになった。この場合、系統内の水



第 24 図 定周波比例制御における各発電所の出力



第 25 図 ハイブリッド形 ELD 説明図



左：アナログ計算部および変換部  
右：増分損失率計算部

第 26 図 ハイブリッド形 ELD 試作装置の一部

力発電所の水の価値は、1 日の許容使用水量、調整池の許容水位変動などの制限条件のもとに評価される。最近わが国で実用に供せられている ELD は火力系を対象としたものであるから、水力系の比

重の大きいわが国の実情に即しない不合理の点が多かった。このため水火力併用系に適用する完全な自動運用計算機の実現が要望されていたが、日立製作所では関西電力株式会社の理解あるご協力のもとにアナログ、デジタル両計算機の結合になるハイブリッド形 ELD の試作に成功し、これより得られたデータをもとに現在関西電力株式会社向の本装置の製作を進めている。

ハイブリッド形 ELD は解の取れん性と演算速度の点から火力計算をアナログで行い、計算内容の複雑な水力計算をデジタルで行う結合計算機で、これを試作装置の規模で示すと第25図のような構成となっている。主要部はアナログ計算部、増分損失率計算部、A-D 変換器、D-A 変換器およびデジタル計算機から成っており、その一部分の外観を第26図に示す。本装置において、取扱う電力系統の発電機および負荷は下記のとおり分類され、それぞれに制限条件が与えられる。

- (1) 火力発電機の増分燃料費特性と出力の上下限值
- (2) 調整式水力発電所の出力上下限值および1日の総発生電力量
- (3) プログラム水力発電所の出力
- (4) 融通点の電力
- (5) 特殊負荷電力
- (6) 比例負荷電力

上記を条件として、1日を通じての山元総需要変化を与えて、火力発電所の1日の総燃料費を最小にするよう、各発電所の発電スケジュールを等増加率配分法で自動計算することができる。

### 5. 輸出の増進

従来輸出は東南アジア諸国、南米諸国に向けられていたが、最近アメリカ内務省開発局納クワクリーク発電所 69,700kW 水車2台を受注し、アメリカへの輸出の端緒を作った。これはいままでの輸出の成果が実ったものというべきで、納入された製品に対する日立製作所の技術がアメリカにおいてようやく高く評価されたものと思われる。

戦前から中国、韓国は別として南米に水車および発電機の輸出は行われており、戦後いち早く南米に輸出できたのも、戦前の技術的努力の結果であるが、国内の生産体勢がととのい、いままで国内で築き上げた前述の技術水準と実績を背景として第9表に示すように東南アジア諸国から米州大陸にまで及ぶに至った。ペルトン水車、カプラン水車および高速度大容量発電機のように国内でも記録的な製品が輸出されていることは注目すべきであって、今後の輸出は貿易の自由化と相伴って、国際的な規模に生長することが与えられた使命であろう。

第9表(a) 輸出水車例 (\*建設中)

国名	所名	kW	m	rpm	形式	台数	運転開始	備考
India	Bhakra	112,000	156	167	FSS-V	5	1960	*
Iran	Dez	103,600	180	250	FSS-V	2	1962	*
China	Sungari	85,000	69	125	FSS-V	2	1944	*
Thailand	Bhumiphol	84,700	123	150	FSS-V	2	1962	*
U.S.A.	Clear Creek	69,700	204	225	FSS-V	2	1962	*
Mexico	El Novillo	56,600	101	225	FSS-V	2	1963	*
India	Hirakud No.1	38,800	36.3	150	PMS-V	2	1961	*
Colombia	Calima	38,800	225	450	FSS-V	2	1963	*
Korea	Hwachon	30,000	75.7	200	FSS-V	3	1941	*
Burma	Bul Chang	29,840	423.96	428.5	2P <sub>1</sub> N <sub>2</sub> -H	3	1960	*
India	Gangual	29,840	32.8	167	PFS-V	1	1961	*
India	Kotla	29,840	32.8	167	PFS-V	1	1961	*
Formosa	Tien-Leng	26,500	173	400	FSS-V	2	1951	*
India	Gandhi Sagar	25,400	45.5	188	FSS-V	1	1961	*
Korea	Chong Pyong	21,000	26.5	164	PMS-V	2	1943	*
Salvador	Cinco de Nov.	13,000	56.0	150	FSS-H	1	1961	*
India	Pannior	17,150	237.5	600	FSS-V	2	1962	*

第9表(b) 輸出发電機例 (\*建設中)

国名	所名	kVA	kV	rpm	形式	台数	運転開始	備考
India	Sharavathi	99,000	11	300	VEFW-RD	2	1962	*
Brazil	Paulo Afonso	83,000	13.8	200	VEFKW-RD	2	1961	*
China	Sungari	70,000	13.8	125	VEF-RD	2	1957	*
Mexico	El Novillo	57,500	13.8	225	VEFKW-RD	2	1963	*
Iran	Karadj	48,415	14.4	333	VEFW-RD	2	1961	*
India	Hirakud No.1	41,666	11	150	VEFKWL-RD	2	1962	*
India	Ganguwal	32,500	11	167	VEFKW-RD	1	1961	*
India	Kothla	32,500	11	167	VEFKW-RD	1	1961	*
Burma	Baluchang	31,000	11	429	EFBW-RD	3	1960	*
Korea	Hwachon	30,000	11	200	VEF-R	3	1941	*
Formosa	Tien-Leng	28,500	11	400	VEF-R	2	1955	*
India	Hirakud No.2	27,000	11	150	VEFKWL-RD	2	1962	*
India	Gandhi Sagar	23,000	11	188	VEFKW-RD	1	1961	*
Korea	Chong-Pyong	22,000	11	163.8	VEF-R	2	1943	*
Salvador	Cinco de Nov.	19,167	13.8	200	EFBW-RD	1	1961	*
India	Panniar	17,647	11	600	VEFW-RD	2	1962	*
India	Riverbed	14,200	11	250	VEFW-RD	2	1961	*

### 6. 結 言

最近における水力発電設備の新しい動向についてその概要を述べた。今後の傾向として水力発電設備の単位容量の増大および調整能力の向上のほかに、建設および保守の経済化および利用効率の増昇はますます緊要化されることが予期される折柄、各関係機器の設計製作技術は飛躍的に向上が計られている。

一方、水力発電機器の海外進出も次第に活発化し、逐次その進出範囲も拡張されるに至った。

本文がさらに内外における水力機器の進展の一助とならば幸甚とする次第である。