

大容量ポンプ水車の運転結果

Operation Records of Large-capacity Pump-turbines

外岡英徳*
Hidenori Tonooka

山本景彦*
Kagehiko Yamamoto

高瀬光雄*
Mitsuo Takase

要 旨

わが国における揚水発電所用可逆ポンプ水車は、大森川発電所用設備を最初として、逐次単機容量が増大されてきた。特に昭和39年以来、池原、城山各発電所において大容量機が相ついで運転を開始し、日立製作所が総合技術を結集してその開発に全力を傾けたフランス形ポンプ水車も、すでに揺らん期を脱して、わが国電力需給の中樞を占めるに至ったといえることができる。

現在さらに大容量化した、長野、喜撰山などの各発電所向け機器を製作中であるが、本文は、現在までに運転にはいった諸機器の特長、試験結果、運転実績の概要について述べている。

1. 緒 言

昭和34年に、可逆ポンプ水車としてわが国最初の計画である、大森川発電所が建設されて以来、われわれは独自の技術を開発して畑薙第一発電所、三尾発電所などにおいて数多くのフランス形ポンプ水車を製作してきた。

これらの発電所においてはいずれのポンプ水車もその後、良好な運転を続けている。

表1に示すように、わが国で設置された、もしくは現在計画が進められつつある揚水発電所の機器は、その単機容量において、あるいは設備内容の改良および近代化において、ますます高度の成長を示している。

これらの機器の製作、据付、運転を通して、われわれは従来の普通形水車では遭遇しなかった多くの現象、たとえば、特殊な振動、異常な水圧上昇などを経験した。

昭和39年から40年の後半にかけて、池原発電所納80,000kW 2台、城山発電所納65,000kW 2台が運転を開始した。

池原発電所は、長い吸出管を有する地下発電所であり、城山発電所は、現在日本における最高落差を有するわが国最初の純揚水発電所である。

ついで昭和41年後半には、池原発電所納110,000kW（Ⅱ期工

事）2台が運転を開始した。

これらもそれぞれ機器容量、運転落差範囲などの面で記録的な特色を有する設備であり、今後さらに大容量化するであろう揚水発電所の建設に対する指針として注目されている。

ここにこれら諸発電所納ポンプ水車の概要および運転結果をまとめて報告する。

2. 城山発電所

2.1 発電所の概要

神奈川県企業庁電気局納 城山発電所は、日調整を主体とする純揚水発電所であり、上部調整池（本沢ダム）は全く自流を持たない。本発電所は、完全地下式で、放水路には水車中心から約75mの地点にサージタンクを有し、放水口までの全長は約1,000mに達する。

なお、本ポンプ水車の計画に当たり、1速度とするか2速度とするかについて、慎重な検討が繰り返された。すなわち、2速度案のほうが平均荷重効率の点で多少すぐれているが、発電電動機の重量が重くなり、極数変換用スイッチなどの設備を必要とし、建屋の据付面積も広くする必要があるなど、直接的な建設費の増大をもたらす結果となる。

1速度案については、回転数を300rpmと273rpmの2案について検討したが、効率特性については大差なく、273rpmでは、ポン

表1 日立製フランス形ポンプ水車一覧表

発電所名				大森川	畑薙第一	三尾	城山	池原(Ⅰ期)	池原(Ⅱ期)	矢木沢	サンルイス	新成羽川	長野	水殿	喜撰山
台数				1	2	1	2	2	2	1	8	3	2	2	1
ポンプ水車	運転	出力	kW	12,200	45,400	36,000	65,000	80,000	110,000	87,000	51,000	78,000	113,000	63,000	240,000
		最高落差	m	118	101.8	137	181.4	129.5	129.5	111	95.4	94.7	107.5	79.2	220
		最低落差	m	744	50.4	84	123.9	90	90	53	30.1	47.4	66.0	57.5	185
		最大水量	m ³ /s	12	50	31	48	71	100	100	63.1	106	147.4	90.0	124
		回転数	rpm	400	200	277	300	180	150	150	120/150	144	150	150	225
水車	ポンプ運転	最高揚程	m	127.8	103.2	143	186.2	132	132	112.5	100	96.4	111.0	81.0	230
		最低揚程	m	92	57	104	133	95	95	63	34.4	57.2	71.0	59.8	197
		最大揚水量	m ³ /s	13	50	31	44.1	75.3	100	110	65	106.3	136.5	—	110
		回転数	rpm	400	200	277	300	180	150	150	150/120	144	150	150	225
発電電動機	発電機	容量	kVA	14,000	50,000	37,000	70,000	78,000	110,000	85,000		79,000	120,000	65,000	240,000
		電圧	V	11,000	11,000	11,000	18,000	13,200	16,500	13,800		13,200	16,500	11,000	16,500
		極数	P	16	36	26	20	40	48	40		50	48	40	32
	電動機	容量	kW	15,000	46,500	37,000	73,000	80,500	110,000	87,000		73,000	120,000	63,000	240,000
		電圧	V	11,000	11,000	10,500	17,000	12,600	15,700	12,600		11,600	15,700	10,000	16,500
機		極数	P	16	36	26	20	40	48	40		50	48	40	32
		運転開始		昭和34年	昭和37年	昭和38年	昭和40年	昭和39年	昭和41年	昭和42年(予定)		昭和43年(予定)	昭和43年(予定)	昭和44年(予定)	昭和45年(予定)

* 日立製作所日立工場

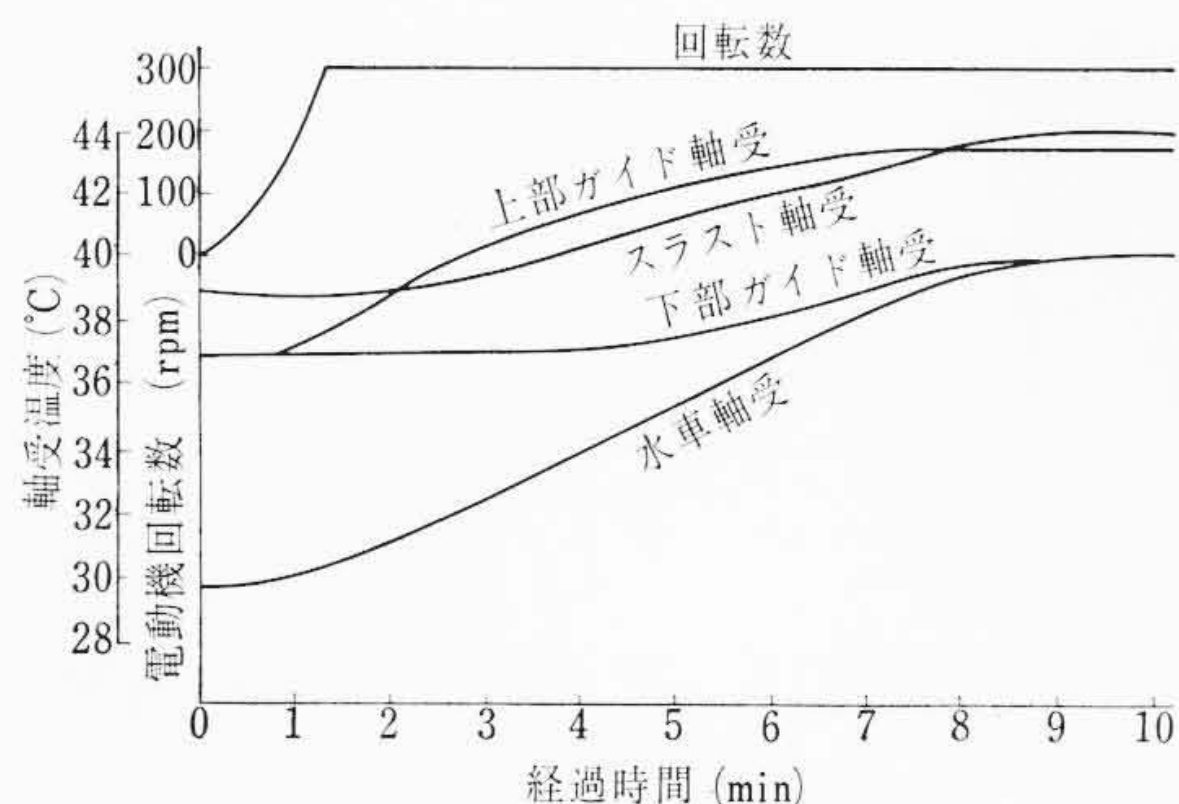


図1 2号機メタルならし運転結果

プ水車および発電電動機の重量が増加する。

このような検討の結果、従来の実績を上回る高速機となるが、十分安全確実な機器の設計製作が可能であるとの確信を得て、1速度300 rpmを採用した。

本発電所用ポンプ水車は、昭和40年8月通水試験を開始し、各種の試験を実施した後、11月より順調に営業運転にはいり、今日に至っている。以下各試験について概要を記す。

2.2 メタルならし運転

運転に先立ち、1号機は水車駆動によるメタルならし運転を行なったが、純揚水発電所であるため、鉄管には水がなく、したがって給水ポンプにより鉄管を充水して水車を駆動した。2号機は電動機を空転させてメタルならしを行なうという、新しい試みを採用したが、機器の各部とも異常なく、軸受温度も図1のように安定した値を示した。

2.3 水車負荷遮断試験

本発電所の水圧鉄管は、ポンプ水車2台に対して1条が共通に使用され、また放水路側は4台の吸出管が1本に合流しているため、各号機相互の間で水圧脈動が重畳する可能性が考えられたため、2、3および4台同時遮断試験を行なって、保証を満足することを確認した。図2は負荷遮断時の一例を示すオシログラムである。

2.4 水車負荷試験

定格負荷における運転状態は良好であり、部分負荷運転においても特に異常は認められない。水車軽負荷時に、吸出管内のパルセーションによる振動発生に備えて、あらかじめ吸出管への強制給気配管を設けるとともに、低落差時無負荷開度付近での、ランナ入口における衝撃損失に基づく振動騒音防止のための給気口をも設けておいたが、運転の結果、特に必要とは認められないので、現在いずれの場合の給気をも行っていない。

2.5 水車効率試験

水車効率試験は、差圧式2点ギブソン法により、基準落差153 m付近において行なわれた。水圧鉄管は、前述のように1条より分岐して2台のポンプ水車に接続されており、分岐部の影響が懸念されたが、試験結果に異常は認められなかった。

測定結果は、1号機および2号機ともに最高効率92%以上が得られ、十分保証効率を上回っている。

また効率曲線全体の傾向も模型試験結果とよく一致している。

2.6 ポンプ起動試験

一般にポンプ起動方式には、入口弁開放後起動し、ガイドベーンを開いて揚水するガイドベーン起動方式と、入口弁を閉じ、起動後ガイドベーンを小開し、その後ガイドベーンと入口弁を同時に開いて揚水する入口弁起動方式の2種がある。

本発電所では、いずれの方式も採用できるようにシーケンスを設けてあったが、2方式とも起動状況は良好であった。

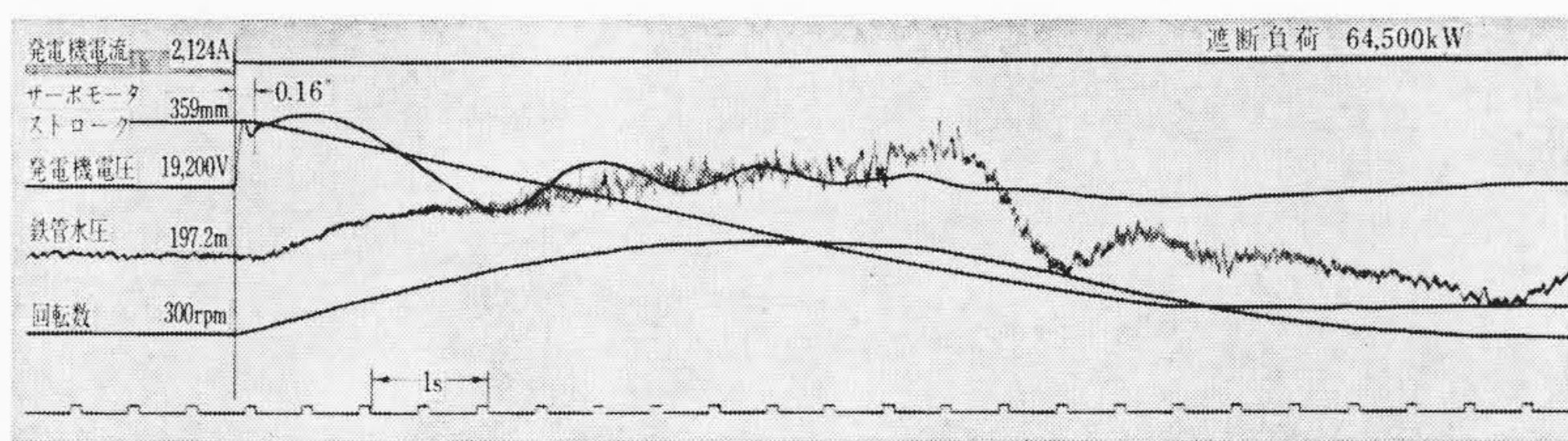


図2 水車負荷遮断試験例

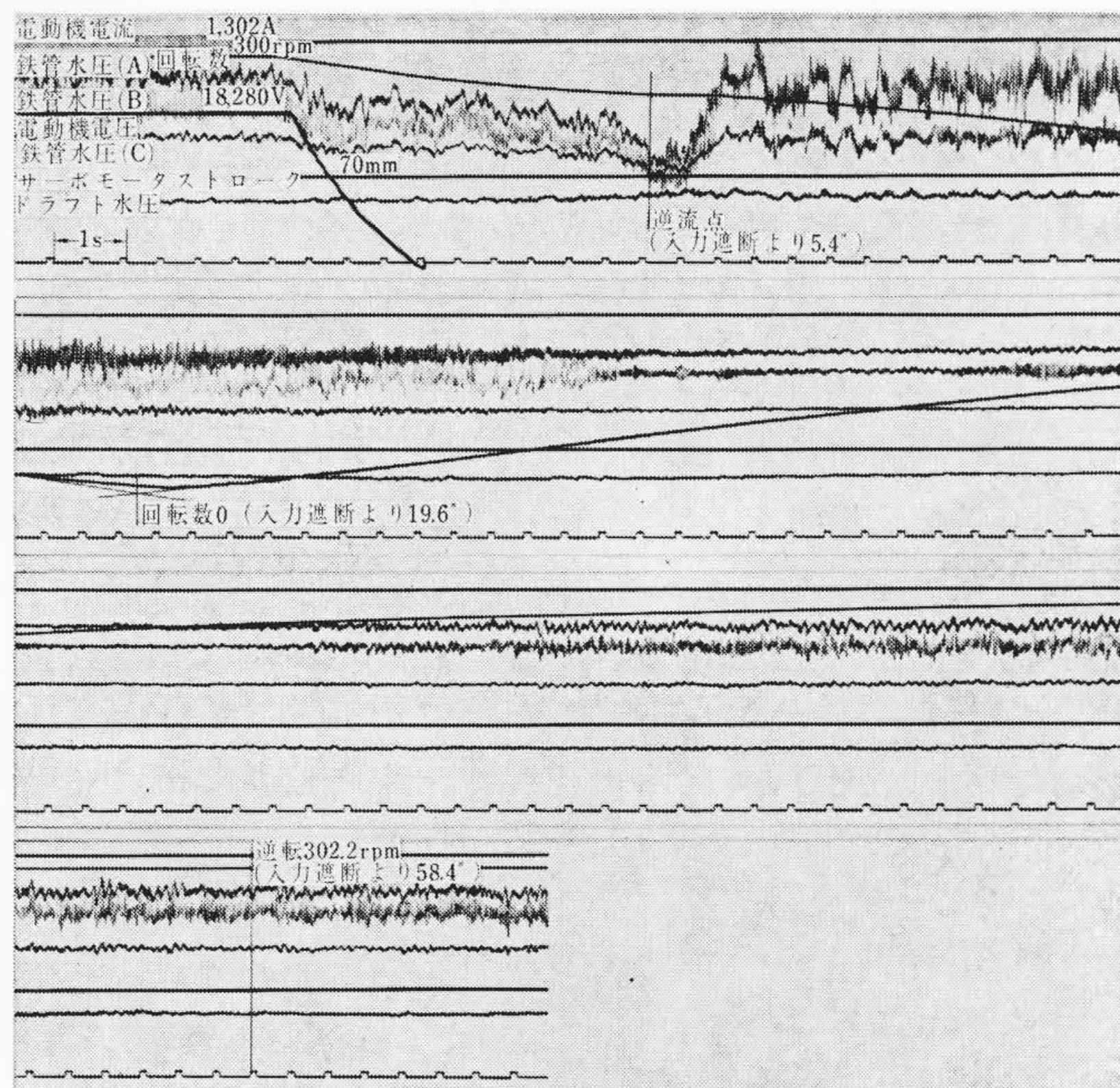


図3 揚水—発電切換試験結果

これら2方式の優劣は一概に論じ得ないが、ガイドベーン起動方式は起動時間を多少短縮しうる利点があり、一方入口弁起動方式では、いわゆる漏水補給弁を設けることによって、水面押下げ時のケーシング水圧を自由に低減し、ガイドベーンからの漏水をへらすことによって、起動トルクの軽減をはかることが可能である。したがってスコットランドの Cruachan 発電所、アメリカの Taum Sauk 発電所などの大容量揚水発電所では、起動に先立って入口弁を全閉する方式を採用して起動トルクの軽減をはかっている（これらの例では、水面押下げ起動、同期引入れ後、まず入口弁を全開し、その後ガイドベーンを開くので、本発電所に採用した2方式のいずれとも、厳密には一致しないが、起動トルク軽減という意味からは入口弁起動の考え方に近い）。

なお、起動シーケンス中の振動騒音を比較すれば、いくぶんガイドベーン起動方式のほうが静かであるので、最終的には本発電所ではこの方式を採用した。

2.7 揚水発電急速切換試験

揚水運転より発電運転への急速な切換は、将来ますますその要求度が高くなることが予想される。したがって本発電所において試験的に、この確認試験を行なった。

すなわち、ポンプ運転時にガイドベーン開度を、そのときの落差に見合う水車の無負荷開度まで閉じた後、ポンプを系統から切り離す。この際ガイドベーン開度はそのままの位置に保持されるため、まず水量が逆流し、ついで回転方向が水車側に逆転して、300 rpmに達する。この方式では入力遮断後約1分で水車規定回転に達することが確認できた。図3に通常の揚水—発電切換試験との比較を示す。

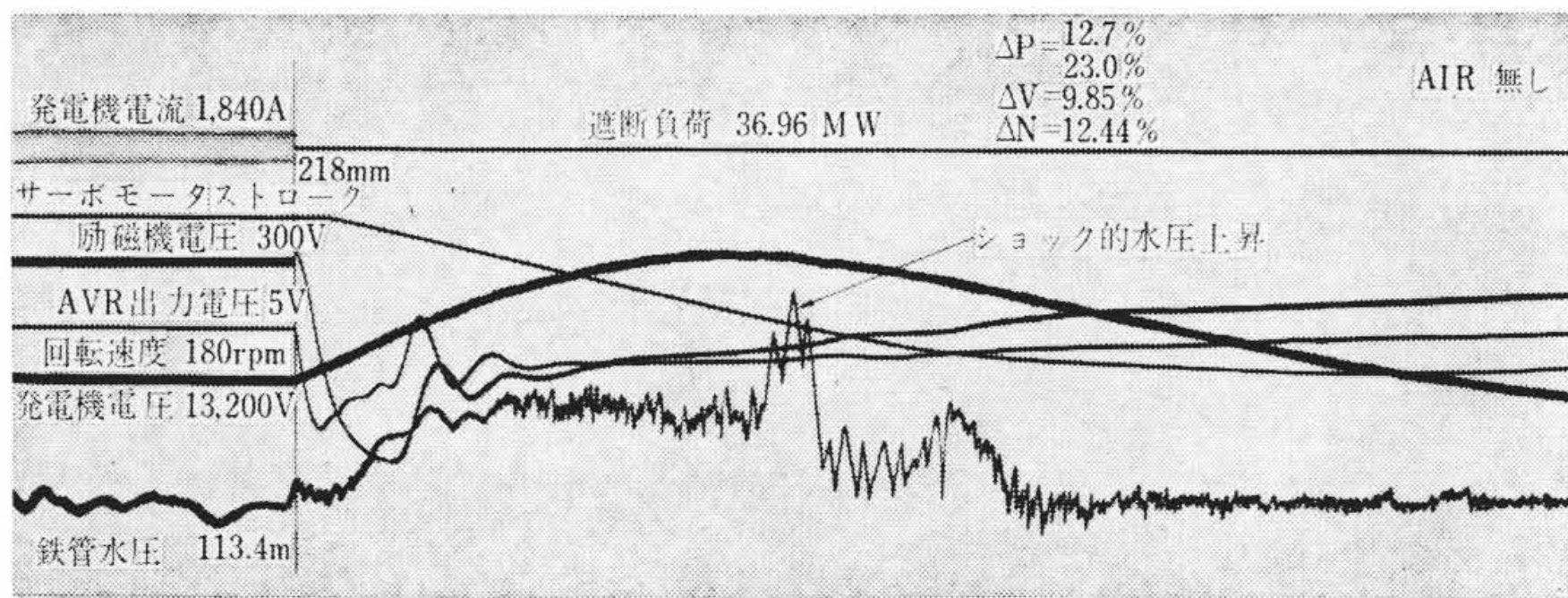


図 4 水車負荷遮断試験例

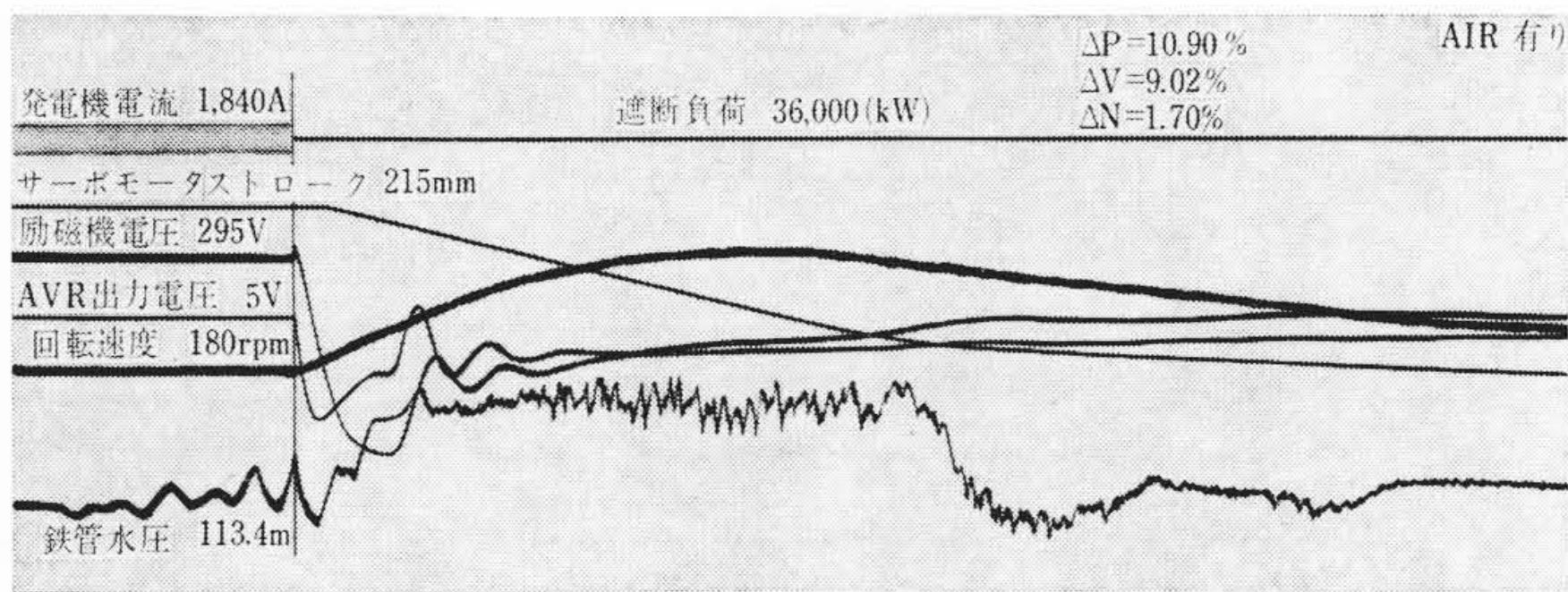


図 5 水車負荷遮断試験例

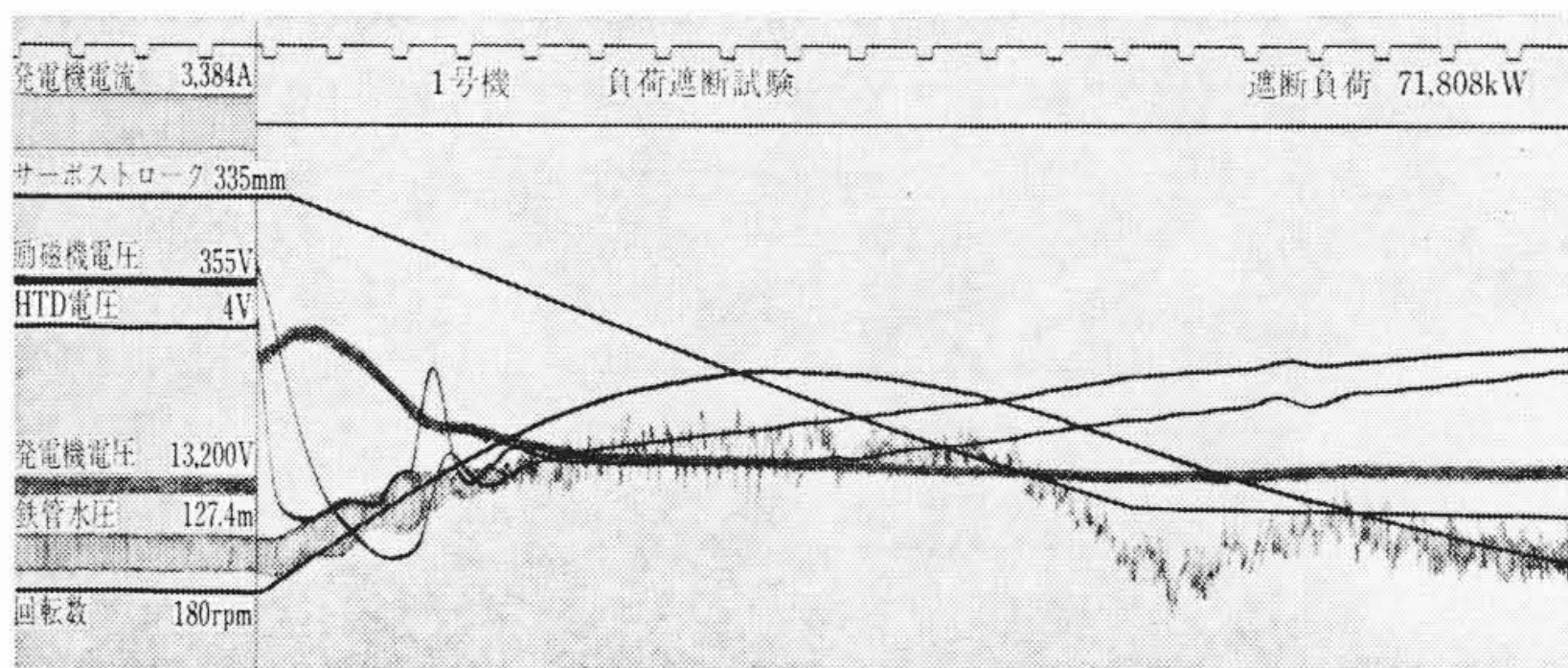


図 6 水車負荷遮断試験例

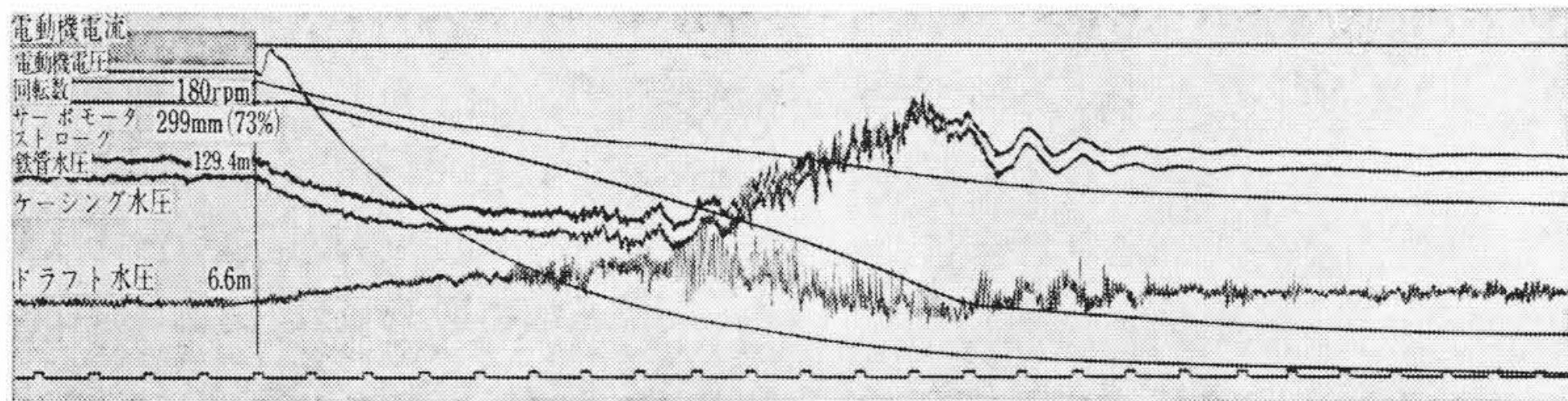


図 7 ポンプ入力遮断時オシログラムの一例

3. 池原発電所 80,000 kW ポンプ水車

3.1 発電所の概要

池原発電所は奈良県吉野郡下北山村大字下池原に建設され、熊野川水系北山川を利用する揚水発電所である。本発電所には 4 台のポンプ水車が設けられ、I 期として最大出力 80,000 kW、最大揚水量 75.3 m³/s のフランシス形ポンプ水車 2 台が設けられ 39 年 9 月運転を開始した。残りは II 期として後述する 110,000 kW ポンプ水車 2 台が設置されることで計画された。

本発電所の放水路は水平距離約 100 m におよびポンプ水車にたいしかかる長い放水路でも運転上支障ないかということが計画に当たり種々討議されたが、試験の結果は通常の運転領域では、なんら支障ないことが確認され、今後の地下発電所の建設計画に大きな指針となった。

3.2 水車負荷遮断試験

39 年 9 月試運転にはいった時期は下部七色ダムが未完成で、湛水が不能であったため、規定 $H_s = -9\text{m}$ に対し、 H_s が $-2.5 \sim -3.5\text{m}$

の状態で水車運転を始めることになった。

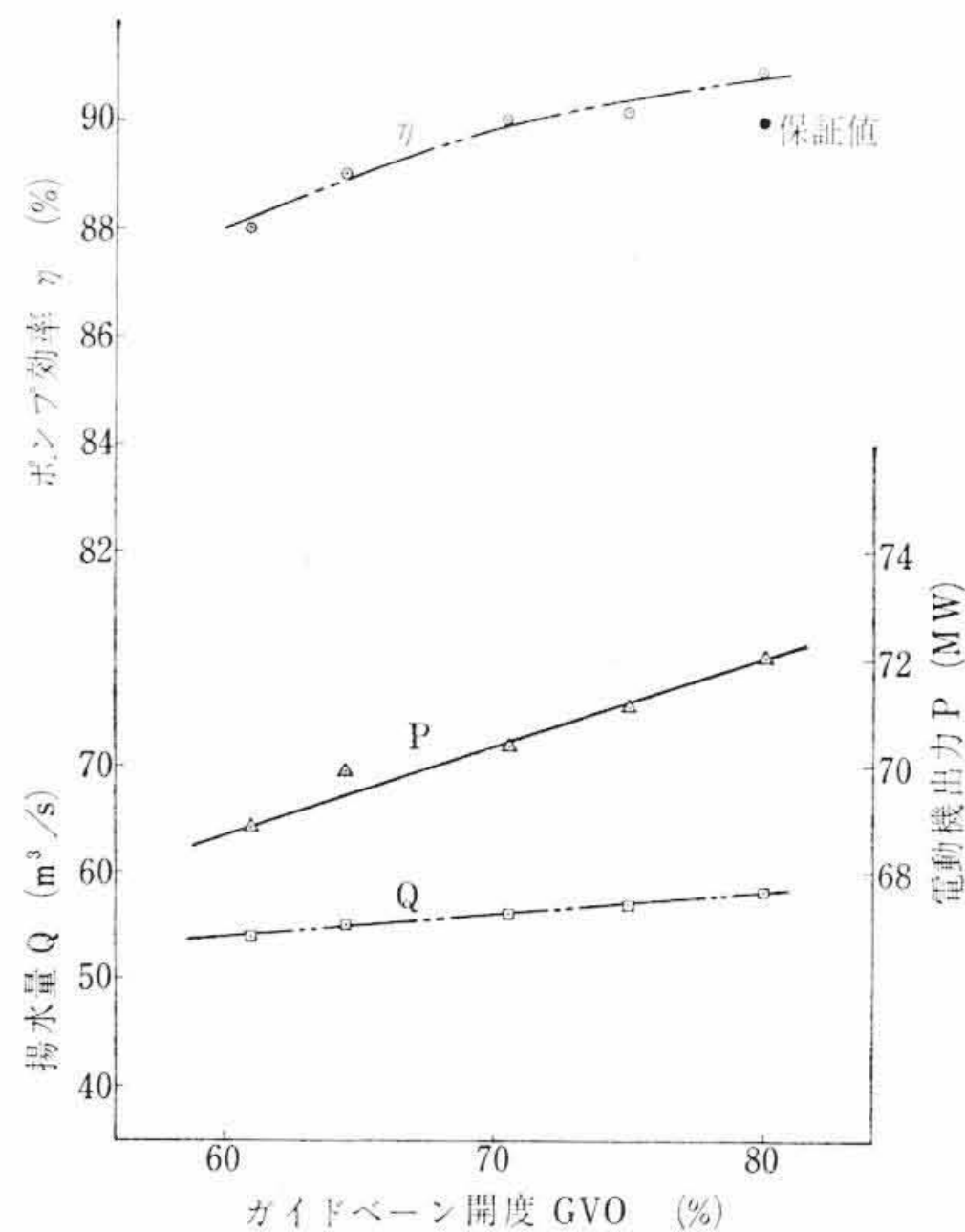
放水位の低い条件における 2 号機の負荷遮断試験において、1/4 負荷 (18 MW) 遮断のときは特に異常がなかったが 1/2 負荷 (36 MW) 遮断時、ガイドベーン全閉近くにおいてショック的水圧上昇が生じた。3/4、4/4 負荷遮断においても同様の現象が発生したが、その大きさは閉鎖時間を変化させることにより、ある程度変わることが認められた。

ショック的水圧上昇の現象の代表例を図 4 に示す。

これは放水路が長く、放水位が非常に低いこと、および現象が不連続であることから水車負荷遮断時にランナ下部より衝撃波が発生しこれが鉄管水圧上昇を生ぜしめたものと考えられたので、閉鎖時間、サーボモータ閉鎖のさいの腰折れ点、腰折れ後の閉鎖時間を検討し、さらに負荷遮断と同時に圧縮空気を送入するなどの方法によりショック的水圧上昇の発生を防止することができた。

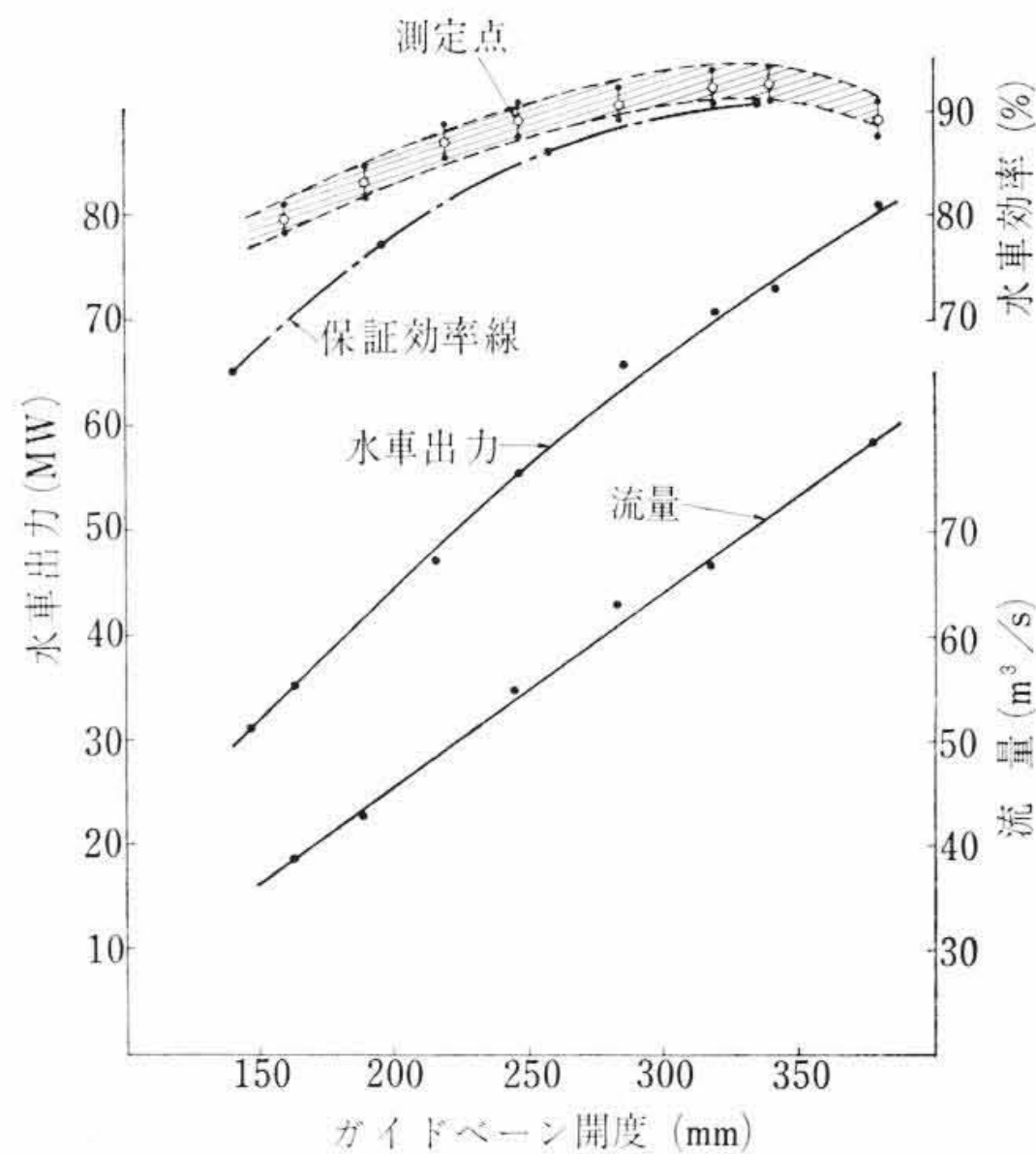
図 5 は圧縮空気送入の場合の一例を示した。

根本的にはその後の七色ダム湛水を待って放水路水位が規定値まであがった 40 年 7 月再試験を行なったのであるが、その結果は試運



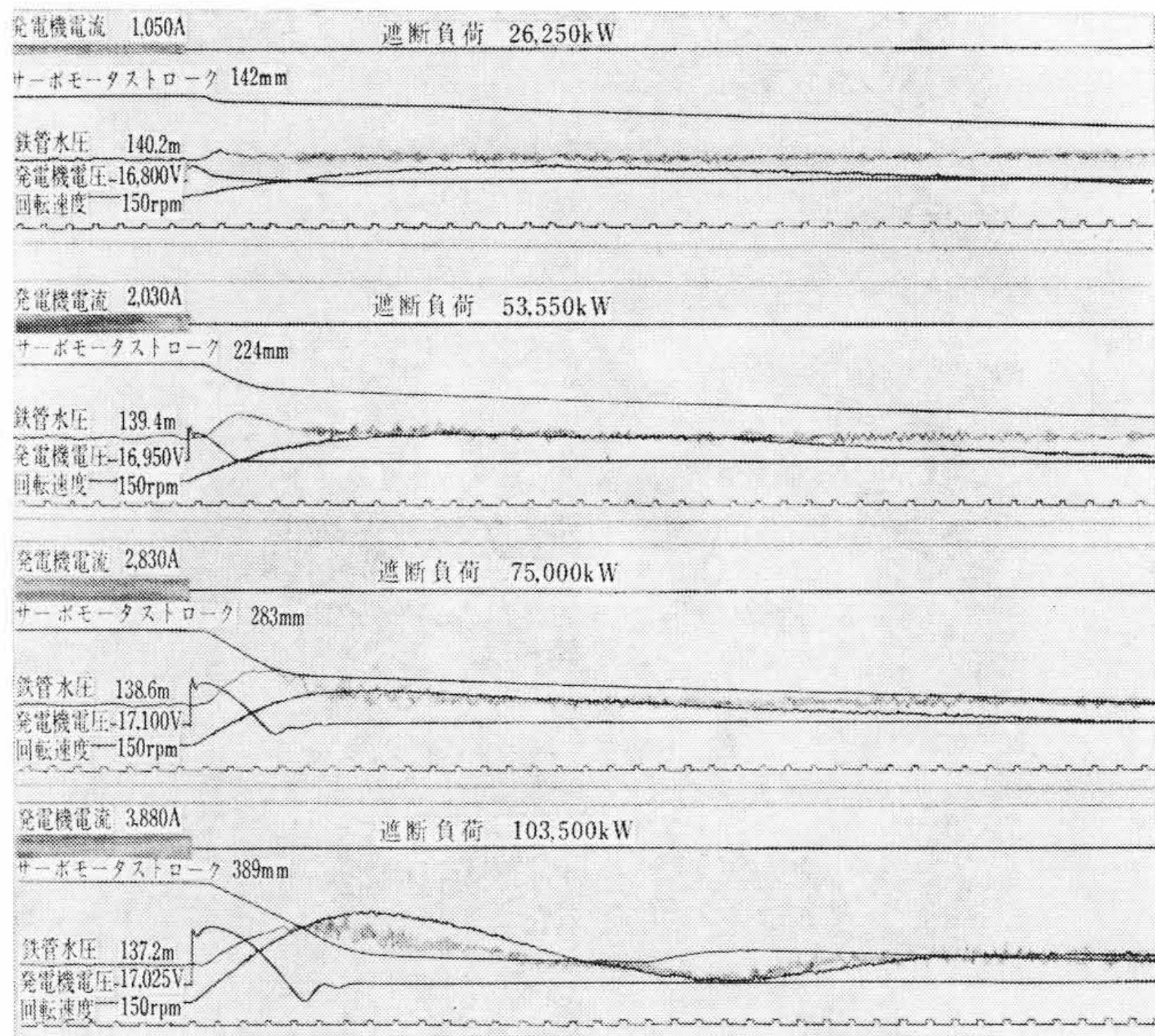
電動機出力、流量、効率曲線

図 8 ポンプ効率

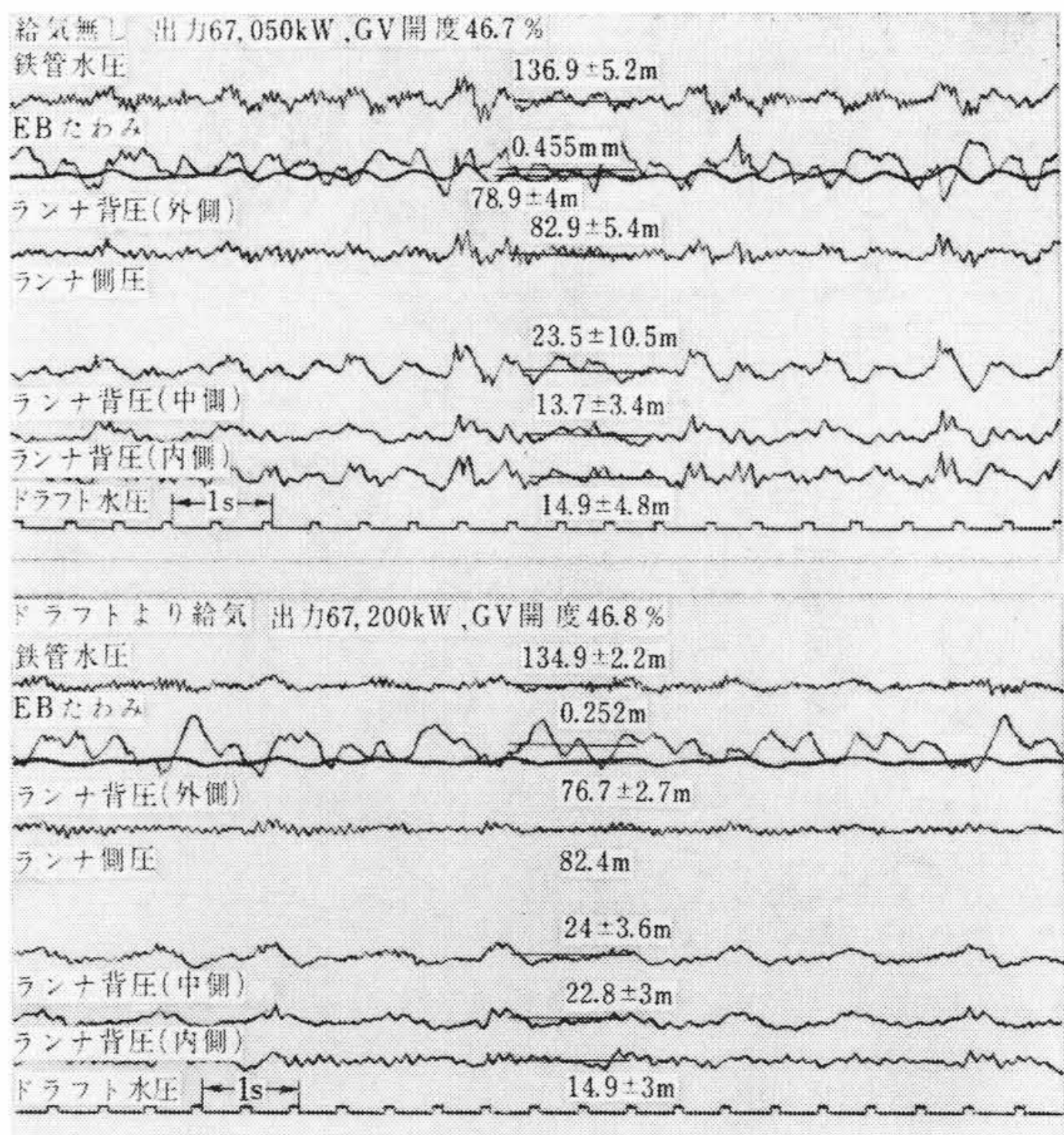


ガイドベーン開度、水車出力、効率、流量曲線
(カレントメータ法)
(基準落差 116.5 m に換算)

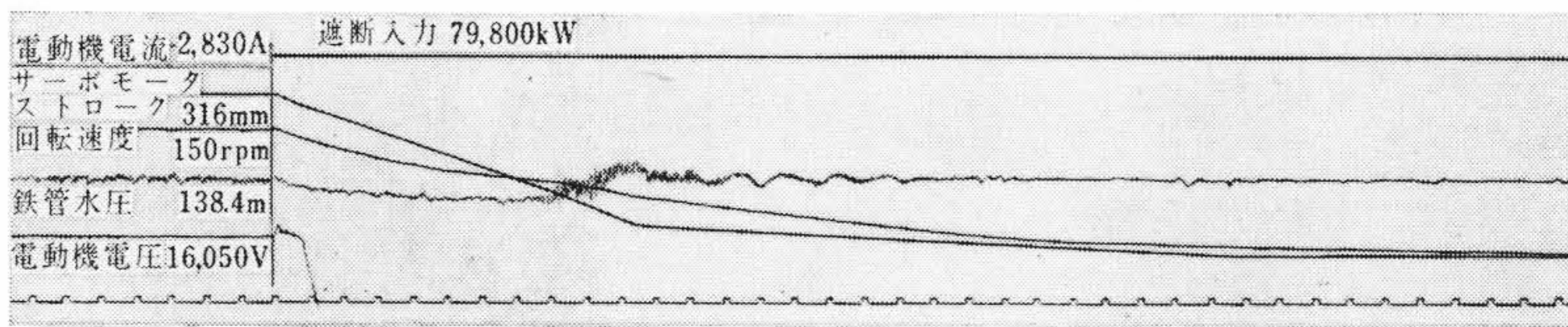
図 9 水車効率



(昭和 41 年 9 月)
図 12 水車負荷遮断オシログラム



(上は給気無し、下は給気有りの場合)
図 13 水車軽負荷時の水圧脈動のオシログラム



(昭和 41 年 9 月)
図 14 ポンプ入力遮断オシログラム

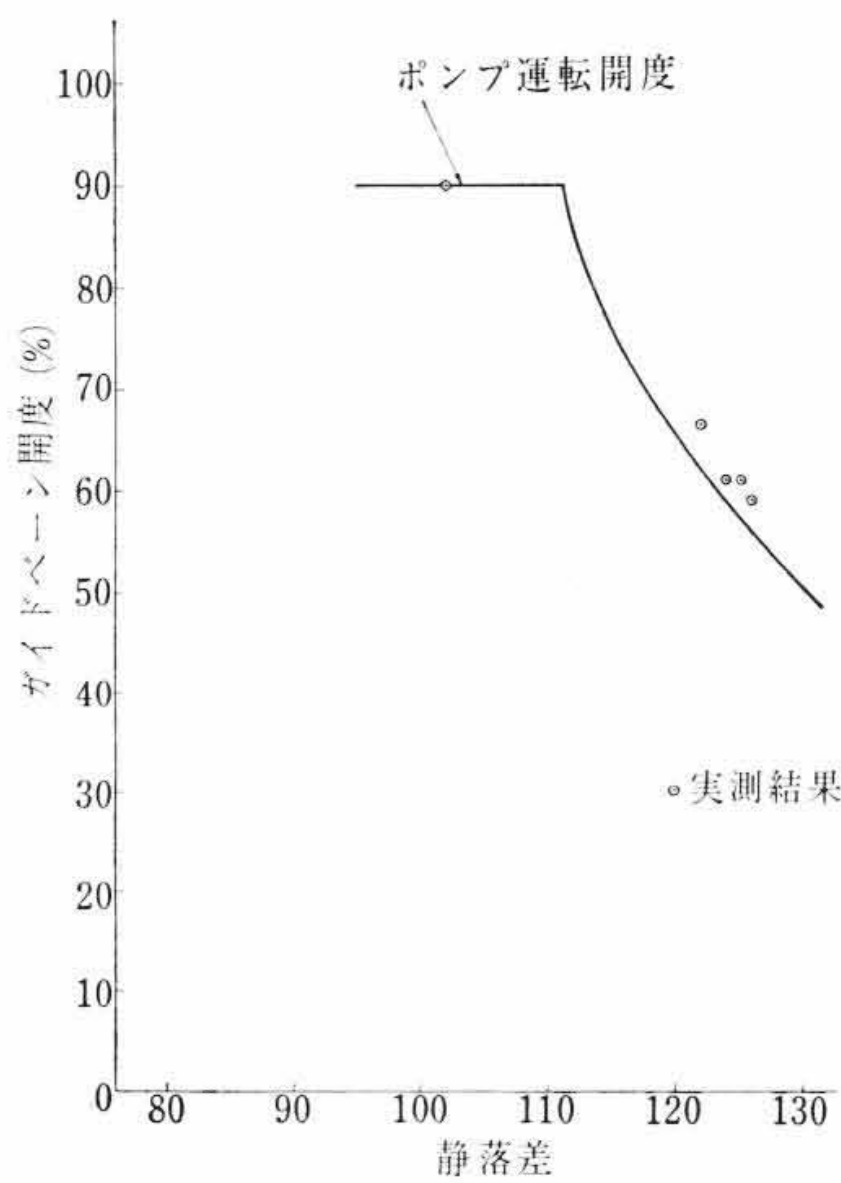


図 15 ポンプ運転開度適正值確認試験結果

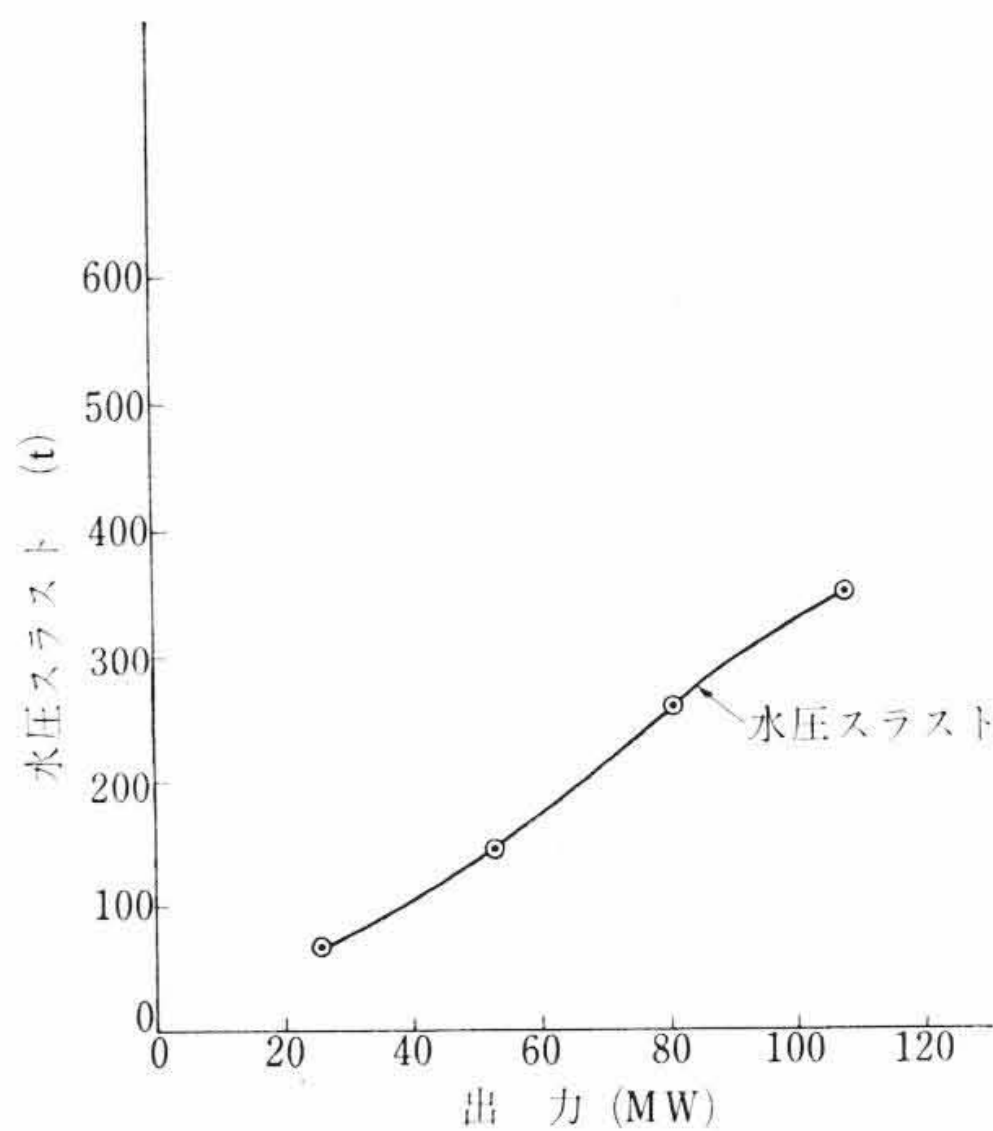


図 16 水車運転時水圧スラスト試験結果

と給気を行なった場合の水圧脈動のオシログラムの一例を示したものである。

4.4 ポンプ起動試験

41年 8 月揚水試験を完了したが、主弁起動ならびにガイドベーン起動のいずれの起動方式においても問題ないことが確かめられたが、現地運転状況からガイドベーン起動方式が採用された。

4.5 ポンプ入力遮断試験

100,000 kW 以上の入力を遮断するのはⅡ期がわが国で最初であるが、結果は特に問題なく計算結果とほぼ一致することが確認された。

図 14 はポンプ入力遮断のオシログラムの一例である。

4.6 ポンプガイドベーン適性開度試験

ポンプ運転はある揚程において最も適正なガイドベーン開度で運転するのが通常である。そこで予想された適正ガイドベーン開度について実際の運転状態からこれを確認する試験を実施した。図 15 はその比較した一例であるが、予想開度がほぼ実機運転における適正開度に一致している。また異常なパワースイングあるいは振動などの発生する開度はこれらの適正開度から十分離れていることも確認された。

4.7 ポンプ水車水圧スラスト試験

昭和 41 年 9 月 4 号機ポンプ水車の水圧スラスト測定試験を実施した。水圧スラスト保証値は水車 475 t、ポンプ 585 t でありこれに対しバランスバルブ開度調整後、ほぼ最高落差に近い状態での実測値は水車負荷時で 351 t、ポンプ入力遮断時で 445 t の結果を得た。

図16は水車運転時の実測結果を示したものである。

なお定常運転時におけるスラストを軽減するためバランスバルブを過大に開きすぎると、種々の過渡状態において、上向スラストが発生した場合、回転部が浮き上がることもありうるので現地調整においては十分留意する必要がある。

5. 結 言

以上昭和39年以来相ついで運転を開始した城山、池原Ⅰ期、Ⅱ期の各発電所における大容量ポンプ水車の現地運転結果の概要について報告した。電源開発が進むにつれて揚水発電所の必要性はますます

す顕著となり、現在建設中あるいは計画中の揚水発電所は急激に大容量化していることから可逆ポンプ水車の果たすべき役割は非常に大きなものである。このような状況下において、純国産技術によって相ついで、運転にはいった記録的な大容量ポンプ水車の運転実績は今後の揚水発電所建設のための重要な基礎を確立したものと確信する次第である。終わりに各発電所の設計・製作ならびに現地試験に当たり貴重な指針を与えてくださった各電力会社その他の関係者に厚く謝意を表明するとともに本文が今後の揚水発電所の建設、ポンプ水車の設計に役立てば幸いである。



特 許 の 紹 介



特許第470015号(特公昭40-23375号)

柴田満男・浅川貴志

誘 導 形 継 電 器

この発明は限時特性を任意に調整できるようにした誘導形継電器に関するもので、図1において主鉄心2に巻かれた2次巻線5は極鉄心3の一方の脚に巻かれた極線輪8に直接接続され、極線輪8と閉回路を形成するよう構成される。したがって従来2次巻線5と極線輪8との間に設けていた飽和変流器は不要となる特長がある。そして極線輪8は従来の巻数の等しい二つの線輪を直列和動に接続してなる極線輪と異なり、極鉄心3のいずれか一方の脚にのみ巻かれるものである。

したがって極鉄心3の両脚の磁束間是不平衡となり極線輪8に流れる電流だけで回転円板10は回転し、いわゆるクリープを発生する。このクリープによる回転力は極線輪8に流れる電流の2乗に比例して増加するので入力が過大電流のときは大きな回転力となる。

一方正規の回転力は主線輪4による主磁束と極線輪8による磁束との作用により生ずるものであるが、そのほかに前述したように極線輪8だけでもクリープと称する回転力を発生することになるの

で、正規の回転力を接点閉成のための動作力とし、クリープのみによる回転力を接点開路の方向としておけば、この場合の継電器の限時特性は小さい電流のときはクリープによる回転力は小さいので、その影響は小さいため逆限時特性となり、過大電流になるとクリープによる回転力は大きくなり、二つの回転力の差、すなわち一つは主線輪4の作る磁束と極線輪8の作る磁束との作用による接点閉路方向の動作力、ほかの一つは不平衡に巻かれた極線輪8の作るクリープによる動作力の差で定限時特性となる。図2はこの発明のほかの例で、13は可変抵抗である。

この発明によれば、極線輪8の巻数あるいは抵抗13の抵抗値を適宜選定することにより種々の回転力特性が得られ、かつ広範囲の限時特性を調整することができる。さらに飽和変流器が不要となるので小形軽量化し、かつ安価な製品を提供できるとともに主鉄心には飽和特性のよくない材料を使用しても良いなどの効果を発揮するものである。(西宮)

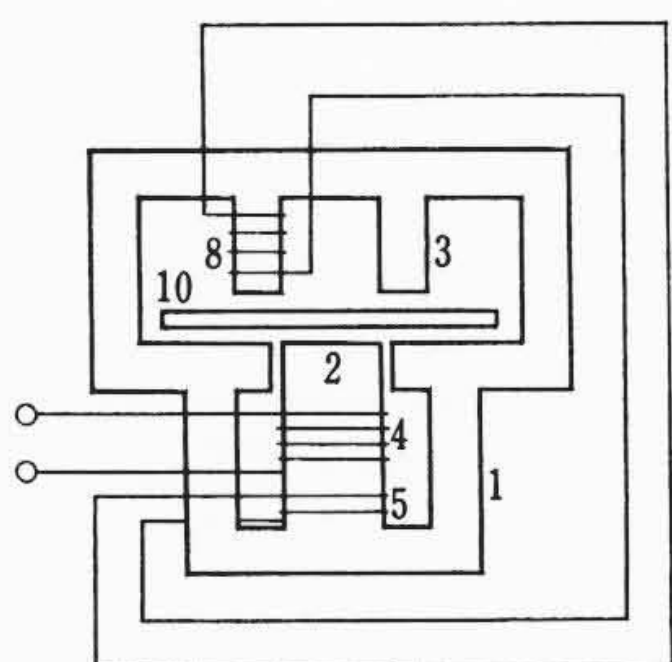


図 1

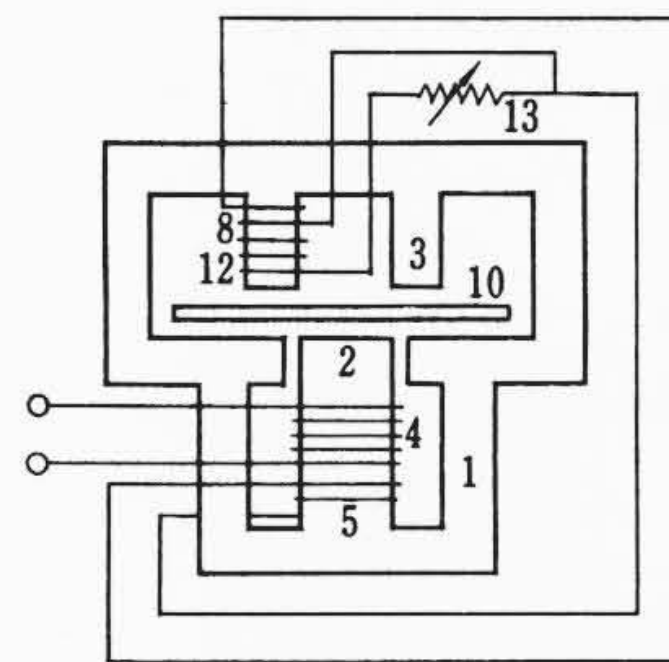


図 2